

目 次

前言..... 龚晓南 (3)

序..... 胡美龙 (4)

化学灌浆技术的传承与发展.....胡美龙, 薛炜, 杨龙, 张文超(5)

灌浆材料在矿山工程应用中的现状.....吴龙梅, 曾娟娟, 杨元龙(11)

环氧树脂堵漏材料在工程中的应用.....于方, 张维欣, 聂金平(19)

新型地基处理复合灌浆材料的研究.....吴龙梅, 杨元龙, 曾娟娟, 张文超, 于方(24)

低温条件下可固化环氧树脂灌浆材料的研究.....曾娟娟, 杨元龙, 马哲(31)

重金属污染地基土处理的新型固化剂研究.....黄沅清, 杨元龙, 于方, 吴龙梅, 曾娟娟(37)

适应混凝土变形的环氧树脂堵漏材料研究.....曾娟娟, 杨元龙, 张维欣(45)

便携式化学灌浆泵的研制.....于方, 全志坚, 张维欣(50)

成孔、安装、注浆三合一的锚索施工设备的研制.....张文超, 薛炜(55)

临海软弱土注浆加固选材及工艺的试验研究.....曾娟娟, 杨元龙, 马哲(60)

锚杆(索)孔口漏水成因分析与处理工艺.....曹建胜(69)

前 言

在工程建设过程中,化学灌浆技术以其独特的方法已经成为诸多解决工程问题的一项重要手段,它融合了化学、材料学、工程地质学、岩土工程学、结构工程学等学科而形成的一门交叉学科,可解决地基基础加固、岩土固化、混凝土缺陷修复等工程疑难问题,起到提高力学强度、防渗堵漏、修复加固的作用。上世纪 80 年代初,地处改革开放前沿的中国科学院广州化学研究所,在国内创办了第一家专业从事化学灌浆技术研究、应用与开发的专业化企业——中国科学院广州化学研究所化学灌浆公司。依托中国科学院,化灌公司解决了在水利建设、铁路建设、公路建设及工民建等领域中的许多工程疑难问题,为我国的国民经济建设及化学灌浆事业的发展做出了重要的贡献。

我与化灌公司结缘始于我的老师曾国熙教授,化灌公司成立伊始,曾先生便与广州化学研究所及化灌公司开展了化学灌浆技术在软土地基处理方面的探讨研究,随着与化灌公司交流的不断深入,我们在科研项目、人才培养、技术成果转让、技术创新平台搭建等方面有了全面深入的合作。2013 年在长期合作的基础上,又获准成立了广东省中科浙大化灌工程与材料院士工作站。岁月无声,不经意间与化灌公司的交流合作已有三十多个年头,广州化学研究所及化灌公司在化学灌浆领域丰硕的科研成果及应用实践,也丰富了我们的学术研究领域、拓展了我们的学术思路。

今年是化灌公司成立三十五周年,历经三十五载的发展,化灌公司已从一个单一从事化学灌浆技术应用的企业发展成为一个综合性的国家高新技术企业。值此化灌公司成立三十五周年之际,衷心祝愿化灌公司继续保持良好的发展势头,继续发挥技术上的优势,为我国的灌浆事业发展和国民经济建设再立新功!

一个企业能长期立足于市保持不断发展,技术优势和创新是关键,化灌公司的发展历程离不开他们坚持不懈地追求技术上的持续创新和发展,本期《地基处理》汇集了他们最新的研发成果,特此推荐给大家。

龚晓南

中国工程院院士

浙江大学滨海和城市岩土工程研究中心教授

2016 年 11 月 22 日

序

时光荏苒，中科院广州化灌工程有限公司（化灌公司）成立至今已三十五周年。

三十五年的风雨兼程，化灌公司始终坚持改革创新，不断凝练主业、超越自我。在大股东中科院广州化学有限公司（原中国科学院广州化学研究所）的领导与支持下，在社会各界的关怀下，经过全体化灌人的共同努力，已由一家中科院“所办公司”发展成为集设计、施工、生产、销售、研发、技术服务于一体的国家高新技术企业。

三十五年的传承发展，化灌公司始终致力于将自主知识产权的化学灌浆技术向建筑、水利、公路、铁路、市政、城市轨道交通等领域进行推广和应用。先后拓展了高压喷射灌浆、原位化学灌浆、建筑物纠偏与加固、基坑止水帷幕等技术。开发出了堵水环氧树脂系列、高渗透防水防腐环氧系列、聚氨酯嵌缝胶系列、无机渗透结晶型防水防腐系列等材料。这些技术和材料广泛地应用在地基处理、基础工程、基坑工程、防渗帷幕、结构加固、地质灾害治理、抢险救灾及文物保护等诸多领域，取得了显著的社会和经济效益，受到了业界的认可与好评。

而今，国家建设提倡“可持续发展”和“以人为本”，环境保护是社会各界关注的共同话题，化灌行业也提出了新的发展要求：环保、绿色、可持续。这对于化灌公司来说，是新的发展契机，也将是新的历史起点，我们将坚持“以化学灌浆为龙头，以工程技术为主线，走创新可持续发展之路”的战略方针，坚持以市场为导向，加强技术创新，继续为我国经济建设的发展做出应有的贡献。

值此化灌公司成立三十五周年之际，特向为化灌事业发展做出过贡献的老同志表示慰问，向仍然奋斗在化灌一线上的全体化灌人表示祝贺，向长期关心化灌公司的各级领导、各界人士表示衷心的感谢！

中科院广州化灌工程有限公司
董事长：胡美龙

化学灌浆技术的传承与发展

——写在中科院广州化灌工程有限公司成立 35 周年之际

胡美龙¹, 薛炜^{1,2,4}, 杨元龙^{2,3,4}, 张文超^{2,4}

(1.中国科学院广州化学研究所; 2.中科院广州化灌工程有限公司; 3.广东省化学灌浆工程技术研究开发中心; 4 广东省中科化灌工程与材料院士工作站, 广州, 510650)

摘要: 摘要: 简述了我国化学灌浆技术的发展历程, 介绍了中国科学院广州化学研究所在化学灌浆技术领域所取得的成就, 重点介绍了中科院广州化灌工程有限公司成立以来对研究所化学灌浆技术的传承及 35 年来对化学灌浆技术发展所取得的创新成果, 展望了未来化学灌浆技术的发展前景。

关键词: 化学灌浆技术; 发展历程; 传承; 创新

1 我国化学灌浆技术的发展历程

化学灌浆是在外力作用下, 通过辅助装置(设备), 将化学浆液灌入岩体、土体、混凝土等受灌体中, 使受灌体得到充填、固结、密闭, 达到防渗堵漏、补强加固、改善性状的工程措施过程。

我国的化学灌浆技术应用与研究在新中国成立后才得到系统全面地开展, 如果以 1953 年在佳木斯等地采用碱性水玻璃进行化学灌浆算起, 也只有 60 多年的历史。60 多年来, 特别是改革开放以来, 我国在化学灌浆技术领域的研究与应用发展迅猛, 取得了一批具有原创性的成果, 主要体现在:

(1) 中国科学院广州化学研究所研发的“中化-798”为代表的糠叉丙酮环氧树脂灌浆材料系列, 解决了青海龙羊峡水电大坝 G4 伟晶岩劈裂带渗透固结问题, 开创了环氧树脂材料在建设工程领域的先河, 在我国化学灌浆发展历程中具有里程碑的意义。

(2) 长江科学研究院研发的 CW 系列化学灌浆材料, 解决了三峡大坝等长江流域重大水利水电工程建设的问题, 为我国水利水电建设做出突出贡献, 至今仍然在水利水电建设工程领域发挥着重要的作用。

(3) 华东勘测设计研究院研发出的聚氨酯灌浆材料, 引领了水利水电行业防渗堵漏的发展, 为国家大坝建设保驾护航。

(4) 中国科学院广州化学研究所研发的甲基丙烯酸酯类(甲凝)化学灌浆材料用于石窟围岩裂隙的灌浆固结, 为我国文物保护事业起了示范性作用。

(5) 中国科学院广州化学研究所、长江科学研究院分别研发出的丙烯酸盐化学灌浆

材料,开创了绿色、环保化学灌浆材料研发的先河。

(6) 敦煌研究院研发的 PS 灌浆材料,成功应用于敦煌等古遗址、古文物的保护工程中,拓展了化学灌浆应用领域。

(7) 化学灌浆技术的发展也促进了相关基础理论的研究,达到了一个崭新的高度,如浆液扩散半径的计算理论、浆液湿面粘接理论、降低浆液毒性的拮抗理论、浆液吸渗理论等。

(8) 化学灌浆技术的发展与相关设备的发展相辅相成,目前国内已开发出了适合各类化学灌浆要求的设备,如各种灌浆泵、浆液搅拌装置、灌浆自控仪及成孔机械。

化学灌浆技术已成为目前解决工程建设各领域中不可或缺的一种工程手段。

2 中国科学院广州化学研究所在化学灌浆技术发展过程中的贡献

中国科学院广州化学研究所成立于 1958 年,研究所成立伊始,即把高分子灌浆材料作为一个主要的研究方向,是国内最早开展相关研究的单位之一。受国家有关部门委托,早在 1962 年就开展了甲基丙烯酸酯类(甲凝)化学灌浆材料的研究,解决了石窟崩坏、风化和石窟围岩裂隙的灌浆固结等问题,开始了化学灌浆技术在实际中的应用。

1965 年,丙烯酰胺化学灌浆材料的(中化-656)研制成功,及时解决了如胜利油田油井固壁、堵漏,成昆铁路隧洞开挖的超前灌浆与堵截地下水射流等重大技术难题。

上世纪六十年代初,研究所开展了以糠醛-丙酮稀释环氧树脂为基础的化学灌浆材料的研究,在当年极其简陋的条件下,经过科研人员反复攻关,对环氧树脂进行改性,研制成功了具有高渗透特征的改性环氧树脂化灌材料(中化-798)。在随后的十几年时间里,经过反复试验与现场应用,使中化-798 化学灌浆材料日臻成熟,上世纪 70 年代成功地应用在龙羊峡水电站基岩泥化夹层固结处理工程中,开创了环氧树脂化灌材料在水电建设工程领域应用的先河,在我国化学灌浆发展历程中具有里程碑式的意义。中化-798 因此获得了国家科技进步一等奖、国家优秀专利金奖等奖项。

近年来,在中化-798 的基础上,研究所又进一步研发出了性能更加优异的 YDS 系列环氧化学灌浆材料。

1986 年 12 月,新型水玻璃化学灌浆材料的研究及应用通过了有关部门的鉴定,在首届专利奖评选中获得中国专利发明创造优秀奖、国家发明专利奖和广东省科技进步二等奖。

1989 年 9 月,中国科学院广州化学研究所的科研成果“南岭隧道石灰岩溶流塑粘土大突泥固结”技术获得了广东省科技进步二等奖。

1990 年 10 月,化学灌浆工程研究与发展中心在研究所成立,通过不断的创新发展,于 1995 年 12 月 29 日经原广东省科委批准成立“广东省化学灌浆工程技术研究开发中心”,为开展化学灌浆材料与施工技术的开发、生产及产业化研究,促使化学灌浆成果产业化提供了一个良好的研发平台。

3 中科院广州化灌工程有限公司对化学灌浆技术的传承与发展

3.1 公司的发展历程

上世纪 80 年代初, 国家改革开放刚刚起步, 各项建设方兴未艾, 为了满足日益发展的经济建设需要, 更好地将科技成果服务于社会, 1981 年 10 月中国科学院广州化学研究所创办了国内首家专业从事化学灌浆技术研究、开发与应用的公司——中国科学院广州化学研究所化学灌浆公司, 经过十几年的发展, 公司于 1993 年变更为中科院广州化学灌浆工程总公司, 2001 年为顺应时代潮流, 按照中国科学院关于科研体制改革的部署, 公司改制成为中科院广州化灌工程有限公司。

公司自成立以来, 依托于中国科学院广州化学研究所的科技成果, 致力于将化学灌浆材料和技术在工程建设的各个领域及相关行业进行推广和应用, 并从化学灌浆材料、工艺、设备及理论等方面不断进行探索与创新。

3.2 化学灌浆技术的传承与发展

(1) 化学灌浆材料方面

a) 环氧树脂的环保性研发

为了改善中化-798 高渗透环氧树脂化学灌浆材料的相关性能, 通过对传统的固化剂与稀释剂进行改性, 既保留中化-798 灌浆材料优异的物理力学性能, 又极大地改进了材料的环保性, 形成了公司自主品牌的“XT”系列化学灌浆材料体系。

在国家科技部中小企业技术创新资金的资助下, 公司还研发出了水性环氧灌浆材料, 该材料的研制成功填补了国内的空白。

b) 丙烯酸盐灌浆材料的研发

为了解决丙烯酰胺的环保问题, 公司开发出了丙烯酸盐灌浆材料, 它是以丙烯酸钙和丙烯酸镁为主体成分, 在促进剂和引发剂的作用下, 双键发生自由基反应生成线性高分子, 在交联剂的作用下, 线性分子发生交联生成网络状的高分子凝胶体。它对 SD 大鼠的急性经口半数致死剂量 LD₅₀ 大于 5 000 mg/kg, 属于环保型的化学灌浆材料, 可广泛应用于对环境要求较高的工程中。

c) 无溶剂型浆材的研发

环氧树脂和聚氨酯的粘度较大, 要靠稀释剂来降低粘度, 通常是通过丙酮稀释降低粘度, 而丙酮的沸点低, 易燃易爆。为降低其危险性, 公司创新性地采用活性稀释剂或高沸点的增塑剂进行稀释降低环氧树脂或聚氨酯灌浆材料的粘度, 开发了一系列无溶剂环氧树脂和聚氨酯化学灌浆材料。

d) 堵水快固环氧浆材的研发

环氧树脂虽然力学性能优良, 渗透性好, 但固化较慢, 难以满足堵水要求。公司研发出的环氧树脂堵漏材料, 填补了国内空白。这种材料通过采用在有水介质条件下可快速聚合反应的固化剂, 使得改性环氧树脂在水中的初凝时间仅需二十多分钟, 固化时间缩短至 6~10 h。堵漏环氧灌浆材料既可用于防渗堵漏, 又保留了改性环氧树脂原有的优点。特别

适合既要堵水又对稳定性和强度有一定要求的工程项目，目前已在多个城市的地铁工程中得到了应用，受到了广泛的好评。

e) 低温固化环氧树脂灌浆材料的研发

对于低温（低于 10℃）环氧树脂灌浆材料的研究还鲜有报道，公司通过选用硫脲先与胺反应，合成含有硫脲基团的改性胺，再由硫脲改性胺、醛与酚发生曼尼斯反应，制得含有硫脲基团的曼尼斯碱，再配以环氧树脂及活性稀释剂制得环氧树脂灌浆材料。该灌浆材料不仅可在低温下快速固化，并且力学性能优良，可用于低温环境下的补强加固及堵漏灌浆工程中，目前该材料已在内蒙古、青海等高寒低温地区的高速公路工程中得到了较好的应用。

f) 高分子-无机复合灌浆材料的研发

高分子-无机复合灌浆材料将高分子材料与无机灌浆材料的优点相结合，使两类灌浆材料的优势互补。公司先后开发出聚氨酯-水玻璃、丙烯酸盐-水泥等复合灌浆材料，可广泛应用于地基加固、防渗堵漏，也可用于断层破裂带、松散围岩区、裂隙发育带及塌陷区的填充加固。

(2) 化学灌浆技术方面

a) 高压喷射灌浆技术

公司自上世纪 80 年代开展高压喷射灌浆技术的应用与研发后，在工程实践中积累了丰富的经验，在喷射材料、喷射工艺以及加固体性能等方面做了大量的研究，形成了具有特色的高压喷射灌浆技术，尤其在灌浆材料方面，公司把传统的水泥浆和高分子化学材料进行了有机的结合，形成了复合高压喷射灌浆材料，极大地改善和提高了高压喷射灌浆的效果，拓展了高压喷射灌浆的用途。

b) 混凝土结构缺陷的修复技术

混凝土广泛应用于土木工程的各个领域，由于混凝土结构内外因素的共同作用，混凝土结构产生缺陷是工程中常见的问题之一。自上世纪 70 年代中国科学院广州化学研究所研发出环氧树脂化学灌浆材料之后，环氧树脂化灌材料便成为混凝土结构缺陷修复的首选材料。目前，公司在原有改性环氧树脂的基础上，已经研发出了的不同粘度、不同强度的环氧树脂化灌材料。针对不同结构缺陷类型，公司开发出了不同的混凝土缺陷修补技术，形成了自己的技术特色。

c) 化学灌浆联合传统加固技术在既有建筑纠偏加固中的应用

随着城市建设开发进程的加快，高层建筑日益增多，因各种原因导致房屋建筑的纠偏与加固工程越来越多。公司经过长期的实践，将传统纠偏加固技术与化学灌浆技术有机的进行结合，研发了具有自主知识产权的化学灌浆联合传统加固方法的纠偏加固技术体系，已经成为了省级工法。

d) 高寒干旱地区桥涵砼结构裂缝病害诊治技术

针对高寒干旱地区环境的特点，公司与有关单位合作完成了“高寒干旱地区桥涵砼结构裂缝病害诊治技术研究”，开发出了丙烯酸糠醇酯改性环氧灌浆材料、聚氨酯预聚体改性环氧丙烯酸酯灌浆材料和改性聚丙烯酰胺灌浆材料三种灌浆材料，编制了《高寒干旱地

区桥涵砗结构物裂缝病害诊治技术指南》，该指南填补了国内空白。本项目获得了内蒙古自治区人民政府 2007 年科技进步三等奖。

e) 地铁隧道防渗堵漏技术

渗漏一直是困扰地铁建设和运营的一个难点问题，针对这一工程领域的热点，公司在化学灌浆材料和工艺方面不断进行创新研究，研发了一整套对地铁隧道防渗堵漏的化学灌浆材料和施工工艺，已广泛地应用于国内多个城市的地铁工程中。同时针对地铁盾构管片的防水防腐要求，公司研发出了高渗透环氧树脂防水防腐涂料，满足了地铁建设的需要。

(3) 化学灌浆设备的研发

根据不同的浆材性能公司已研制出一系列的化学灌浆设备，包括手动双液灌浆泵、电动双液灌浆泵、环氧树脂灌浆泵等。

(4) 在推广和应用的同时，公司一直十分注重开展各种科研活动，除公司每年投入一定的科研经费自立课题开展化学灌浆技术领域的研究之外，公司还积极参与国家、省、市的科研项目研究，先后独立承担了 2 项国家科技部创新基金项目以及广东省自然科学基金、广州市创新基金和科学研究项目。经广东省科技厅批准，2013 年公司还与浙江大学共同启动“广东省中科化灌工程与材料院士工作站”研发平台建设项目。

4 我国化学灌浆技术发展的展望

虽然化学灌浆技术已在工程建设的各个领域得到了广泛应用，但是仍然有许多问题没有很好的解决，今后要从以下几个方面开展工作：

(1) 绿色化学灌浆材料方面研发。积极研发无毒催化剂以及无溶剂的化学灌浆材料、大力发展以水为稀释剂的化学灌浆材料。

(2) 化学灌浆理论研究。目前，化学灌浆的基础理论尚不清晰，尤其在受灌体被灌后的微观机理方面的研究还很不系统和全面，因此，必须加强和发展微观机理和理论研究，促进灌浆技术的进一步发展。

(3) 高分子-无机复合化学灌浆材料研发。水泥类颗粒材料由于粒度大、可灌性低，难以满足各种不同地层类型的不同要求，而高分子化学浆材在环保性和经济性上存在一定的问题，目前即便进行了环保性能的改进，但相比无机材料还是有一定的差距。因此发展高分子-无机复合化学灌浆材料是今后的目标和方向。

(4) 灌浆设备的研发方向。化学灌浆设备应向更加信息化、自动化、可视化、集约化以及更加环保安全的方向发展。

参考文献：

- [1] 马哲, 庞浩, 杨元龙, 等. 化学灌浆材料的研究进展综述[J]. 广州化学, 2014, 39(1):9-13.
- [2] 于方, 薛炜. 灌浆理论浅析[J]. 广州化学, 2014, 39(1):1-8.
- [3] 杨元龙, 徐宇亮, 张亚峰, 等. 高强度无溶剂环氧树脂堵漏材料[J]. 中国建筑防水, 2012, 8:4-7.

- [4] 徐宇亮, 杨元龙, 于方. 一种新型环氧灌浆材料的制备及性能研究[J]. 中国建筑防水, 2014, 4:12-15.
- [5] 马哲, 徐宇亮, 杨元龙, 等. 低温快速固化环氧树脂灌浆材料的制备及性能研究[J]. 新型建筑材料, 2014, 12:60-65.
- [6] 王坤, 庞浩, 杨元龙. 煤矿用聚氨酯水玻璃复合灌浆材料的研究[J]. 广州化学, 2014, 39(1):30-34.

Inheritance and development of chemical grouting technology

——Guangzhou Chemical grouting Engineering Co., Ltd., Chinese Academy of Sciences was founded in the 35 anniversary

Hu Mei-long¹, Xue Wei^{1,2,4}, Yang Yuan-long^{2,3,4}, Zhang Wen-cao^{2,4}

(1. Guangzhou institute of chemical research, CAS; 2. Guangzhou chemical grouting Engineering Co., Ltd., CAS; 3. Guangdong Province chemical grouting engineering technology research Development Center; 4. Guangdong Province chemical grouting engineering and materials academician workstation, CAS, Guangzhou, 510650.)

Abstract: This paper briefly described the development history of chemical grouting technology in China, and introduced the achievements of Guangzhou institute of chemical research, CAS in the field of chemical grouting technology, focusing on its inheritance of chemical grouting technology of Guangzhou institute of chemical research, CAS since Guangzhou Chemical grouting Engineering Co., Ltd., CAS was founded and its innovative achievements in the field of chemical grouting technology in the past 35 years. The future of chemical grouting technology in China was prospected.

Key words: chemical grouting technology; development history; inheritance; innovation

灌浆材料在矿山工程应用中的现状

吴龙梅, 曾娟娟, 杨元龙

(1. 中科院广州化灌工程有限公司, 广州 510650; 2. 广东省化学灌浆工程技术研究开发中心, 广州 510650)

摘要: 矿井漏风是煤矿通风工作的一大隐患, 易引发瓦斯事故及发生火灾, 严重威胁矿井安全生产。本文总结了目前我国矿井普遍采用的密闭堵漏化学灌浆材料, 分析了各材料的特点及其局限性, 并对密闭材料未来的发展趋势做了简单预测。

关键词: 堵漏材料; 高分子泡沫; 无机材料; 凝胶

1 引言

利用密闭堵漏材料进行封堵漏风点, 减少了漏风量, 增加了采掘工作面的风量, 防止漏风点瓦斯涌出和煤层自然发火。应用密闭堵漏材料的密闭墙强度增加, 防止了风流短路现象, 确保了工作面的通风安全, 保证了矿井的安全生产。密闭堵漏材料的应用为治理与采空区相连区域的瓦斯和防灭火提供了新方法、新途径。密闭堵漏材料按材料的性质可分为有机、无机封堵材料; 按封堵的部位可分为内部充填和表面涂抹材料。

从上世纪八十年代开始, 国外一些拥有先进采矿技术的国家如英国、德国、法国、南非、澳大利亚、美国等研究多种井下密闭、填充堵漏材料并在数十个国家推广应用^[1]。其中, 主要包括以下几类: 以发泡水泥为基料制成的充填材料; 高分子聚合物泡沫喷涂材料; 以铝矾土、石灰和石膏为基料, 添加高分子纤维制成的轻质充填材料或砌块。

我国对矿井密闭充填和堵漏材料研究起步较晚, 上世纪在井下实际应用的封堵材料以廉价的普通建材如砖石、黄土、水泥、粉煤灰为主, 品种单一, 设备落后, 技术含量不高, 容易产生裂缝, 影响密闭、堵漏效果^[2]。目前, 国内使用的主要有传统材料和引进技术及材料。以上封堵材料被广泛应用于煤矿井下或其它地下工程: 加固煤岩体, 高冒区充填, 密闭堵漏及充填, 煤、岩体表面喷涂堵漏。

目前使用的传统材料主要有黄泥灌浆材料、凝胶堵漏材料、水泥砂浆喷涂材料、氨盐类凝胶材料、黄土充填、灰浆抹面、硬石膏充填。以铝矾土、石灰和石膏为基料, 添加高分子纤维制成的轻质充填材料或砌块; 高分子聚合物泡沫喷涂材料; 以发泡水泥为基料制成的充填材料也有广泛使用^[3]。这些材料对裂隙不能够充分充填, 堵漏效果差, 而且随着开采深度的增加, 地压越来越大, 传统材料对岩层裂隙及密闭墙内部难以封闭严实, 极易造成漏风, 对安全生产造成了极大隐患。

高分子聚合物泡沫喷涂材料虽然没有上述缺点, 但固化时间不可调, 粘接性较弹性体

收稿日期: 2016 年 10 月

差，价格高，不适宜大面积施工，且含有溶剂，不符合环保的要求。同时大部分高分子聚合物泡沫材料都为国外引进，成本较高，不利于大幅推广应用。

现阶段的密闭堵漏材料都存在一定的缺点，因此，开发一种性能优良、施工简便快速、符合国情的新型堵漏密闭材料是当前我国煤矿安全生产的迫切需求，聚氨酯弹性体密闭堵漏材料满足上述要求，在矿井堵漏风、防灭火领域具有广阔的应用前景和潜力。矿用充填堵漏材料主要分为无机材料和有机材料两大类（见表 1）。

表 1 矿用充填堵漏材料的优缺点

类型	材料名称	主要优点	存在问题
无机材料	粉煤灰	粉煤灰变废为宝，成本低廉	施工较复杂
	石灰-石膏-纤维复合材料	充填效果好，具有较好的抗压缩特性	费工，堵漏风不太理想
	硅酸凝胶	成本低，有降温、防火功能	放出有毒有害气体
	复合胶体	胶凝时间可控，具有固水、吸热降温功能；充填堵漏效果好	流动性差，输送困难
	胶体泥浆	降温堵漏效果好，防灭火效果显著	流动性差，不能长距离输送
	发泡水泥	重量轻、成本低；较好的流动性	井下施工设备复杂，用时较多；密封效果较差
	固化粉煤灰	成本低，可堆积，固化时间可调	承压强度低，封堵效果差
有机材料	高分子胶体	密封性好，有降温灭火功能	失水漏风，承压能力弱
	马丽散泡沫	密封性好，抗压性强，粘结性强	阻燃性能低，高温分解释放出有害气体，仅用于局部构筑快速密闭，成本高
	罗克休泡沫	阻燃性好，高温稳定，尺寸稳定性好，不收缩，抗静电	成本高，固化时间不可调，应用范围受限制
	艾格劳尼泡沫	膨胀率高，材质轻，不传热，封堵速度快，易于操作，成本低。	抗压强度低，不抗冲击；聚合材料有一定的气味

2 无机堵漏材料

2.1 传统充填材料

20 世纪 70 年代，日本、波兰、美国等将火力发电厂的粉煤灰作为密闭墙的充填材料和防止采空区周壁漏风的充填隔离带材料^[4]。德国将石灰、石膏与高分子纤维混合制成的轻质充填材料或砌块进行堵漏风，取得了很好的效果^[5-7]。在上世纪，我国普遍采用粉煤灰、矸石、黄土、砖石、砂子、水泥、石膏等廉价的材料进行矿井充填堵漏^[8,9]。这些传统的充填方法具有取材便利、材料成本较低、可以在地面混浆制浆等优点；其缺点是充填后不能堆积接顶，只能在钻孔处充填形成一个山状沙堆，充填难度大；并且对于石膏浆液其脱水后体积收缩造成充填封堵不严，在充填体周边都形成漏风通道。传统泥浆密闭充填技术由于其流动性、粘结性和保水性较差，容易沉淀和泌水、闭实体易产生开裂，密闭的要求性

能指标如透气性、抗压强度、抗冲击强度比较差。虽然成本低廉,但煤矿密闭应用较少。

2.2 无机凝胶材料

近十几年来,凝胶成为煤矿普遍采用的防火堵漏风材料^[10-17]。由于凝胶具有类似于固体流动困难的特点,因此具有封堵漏风和隔绝氧气的作用。水玻璃-铵盐凝胶具有成本低,封堵效果好的优点^[10]。但是,该凝胶在使用过程中会放出有毒气体,对井下环境造成污染。为了减少凝胶的环境污染和提高密封效果,邓军等人又先后提出了无氨凝胶、复合胶体、膨胀胶体、粉煤灰胶体和胶体泥浆等材料^[13-17]。无氨凝胶选用无氨促凝剂作为铵盐的替代品,无毒无害。膨胀凝胶以水玻璃为基料,加入膨润土等添加剂,增加了胶体的热稳定性、可塑性、吸湿性,且具有二次成型的特点。复合胶体是由基料、促凝剂、增强剂和溶剂按一定比例混合后,经一定时间形成的复合凝胶^[11]。粉煤灰凝胶材料由水玻璃粉煤灰浆和高分子促凝剂组成,粉煤灰同水混合成粉煤灰浆,再按比例加入一定量的水玻璃溶液后,配制成水玻璃粉煤灰浆液作为凝胶基料,其中的粉煤灰作为骨料,再通过高分子促凝剂起到促凝作用。粉煤灰凝胶充填工艺以矿井注浆系统为依托,以水玻璃溶液为载体,以粉煤灰为胶体骨料,以高分子促凝剂制成粉煤灰凝胶,对井下巷道冒落空洞、密闭墙体等进行充填,达到堵漏风、充填防火的目的^[15]。胶体泥浆是将高分子吸水材料与泥浆混合制备的胶体材料,该材料具有良好的吸热性、密封性和保水性^[10]。凝胶类材料在未脱水时附着在煤体表面对抑制煤炭氧化放热、防止煤炭自燃具有极好作用,现场使用较普遍,有的直接喷洒在煤体表面,有的压注在漏风缝隙中期望实现密闭。但凝胶的这种阻化、密闭作用是有时限的,当胶体中含有的水分挥发、胶体收缩后煤炭又会暴露在空气中,就会重新具有自燃危险,不能实现永久密闭切断漏风。

2.3 高水速凝材料

使用高水速凝材料进行密闭充填是一种新型密闭工艺,高水速凝材料是指能在高水灰比条件下快速凝结并全部固化成为有一定强度的固结体的特种水泥混合物,具有用水量,固结料用量少。一般由两部分混合组成,一种是主料,由硫铝酸盐水泥熟料、超缓凝剂和适量悬浮剂混合而成,另一种是配料,由石膏、石灰、悬浮剂、速凝早强剂等多种配料混合而成^[18]。利用高水速凝材料混合后形成的钙矾石具有较强固水能力的特点,实现胶结充填密闭。该工艺 20 世纪 60 年代在英国率先研制成功,起初用于煤矿的巷旁充填支护。高水速凝材料一般 1 h 内实现初凝(初凝时间一般在 5-30 min),2 h 内不用脱水便可凝结成固态充填体,8h 即可达到最终强度。在不掺骨料净浆充填时,井下充填 1 立方米空间体积材料用量范围为 297~390kg,高水速凝充填密闭同时也存在许多不足之处,如充填料输送、混合工艺复杂;材料不膨胀,用量大,工程搬运等劳动强度大;高水材料对配比要求严格,否则会造成不凝固的现象;在干燥条件下充填体易失水粉化;高水材料生产厂家较少,材料来源困难等,在国内的充填密闭使用还处于起步阶段。

2.4 泡沫水泥

泡沫水泥是近几年研发的新型充填堵漏材料。泡沫水泥以水泥、石灰、粉煤灰、陶粒、碎石屑、膨胀聚苯乙烯、膨胀珍珠岩等骨料,在此基础上掺加一些促凝剂、发泡剂等添加剂,制备的无机发泡材料^[18,19]。泡沫水泥具有较好的流动性,成本较低,固化后抗压强度

高。但在受压条件下充填固化后容易产生压裂，产生漏风现象。充填设备复杂、体积大，不便于井下移动和快速施工。泡沫水泥料在自然不受潮条件下保质期 3 个月，井下存放不得超过 5 天，不易存储。

3 有机堵漏材料

有机固化泡沫是由树脂，发泡剂，固化剂等按照一定的比例混合，经搅拌快速膨胀并固化，具有优异的堵漏效果^[20-22]。世界各国一般根据本国的化工原料市场的情况，选择并发展相应的有机固化泡沫的类型，所采用的施工设备也各有特点（见表 2）。前苏联采用碳酰胺泡沫密封采空区，获得了良好的经济效益。与其它密闭方式相比较，碳酰胺泡沫密封采空区表现出明显的优越性，采用该固化泡沫，采空区漏风量可减少 2/3-9/10，劳动量减少一半，每个回采工作面全年可节约 2000 卢布左右^[23]。德国采用聚氨酯泡沫作为巷边顶帮间隙中的充填材料，使得巷道密封性大大提高，漏风量明显下降，施工进度大幅度提高^[24]。英国采用脲醛泡沫封闭采空区，也收到了明显的效果^[25]。法国采用酚醛泡沫对采空区进行充填密闭，该泡沫表现出了优越的阻燃性和抗压缩性^[26]。

表 2 国外用于煤矿的有机固化泡沫材料

国家	年代	泡沫类型	备注
美国	70 年代	氨基甲酸酯泡沫	用于封堵
苏联	70 年代	碳酰胺泡沫	密闭采空区
法国	80 年代	脲醛泡沫	用于防灭火
法国	90 年代	酚醛泡沫	用于防灭火
英国	90 年代	脲醛泡沫	封闭采空区
德国	70 年代	聚氨酯泡沫	密封加固
德国	1993	聚氨酯泡沫	修补岩层断裂，堵漏
俄罗斯	1998	聚氨酯泡沫	露天煤矿的防火

近十年来，随着国外高分子泡沫生产技术的引进，以及本国泡沫材料的研发，有机固化泡沫堵漏技术在我国得到广泛应用。目前，有机固化泡沫堵漏风的主要产品有罗克休、马丽散、艾格劳尼等。主要应用范围包括：各种废巷、老硐室、溜煤眼、空穴的充填；漏风通道和采空区的封堵等。虽然，国内外有机固化泡沫的产品众多，但是，按化学成分主要分为三种型：聚氨酯泡沫、酚醛泡沫和脲醛泡沫。

3.1 聚氨酯泡沫

聚氨酯泡沫是异氰酸酯和聚醚多元醇在交联剂、发泡剂、表面活性剂等化合物的作用下，经过聚合反应形成的高分子泡沫材料。该材料具有极佳的弹性和压缩强度，优良的绝热性、粘合性等^[26]。目前，聚氨酯泡沫被广泛的应用于煤岩加固、瓦斯封孔，以及充填堵漏风等方面。国内浩珂伟博矿业公司生产的马丽散泡沫、北京瑞棋米诺桦合成材料有限公司生产的米诺桦泡沫就属于此类材料。

①聚氨酯泡沫的优点包括：其良好的柔韧性能承受地层运动，防震抗压，固化后不开裂，不脱落；泡沫尺寸稳定性好，填充后无缝隙；具有极好的粘合能力，与地层可形成很强的粘合力；泡沫的细胞都是闭孔结构，密封效果好。

②聚氨酯泡沫的主要缺点有：聚氨酯为易燃物，遇火会燃烧；燃烧产生大量有毒烟雾；发泡反应剧烈，放热较多，发泡温度较高；生产成本高。

3.2 酚醛泡沫

酚醛泡沫是由酚醛树脂在发泡剂、固化剂、表面活性剂及其它助剂的作用下，经过聚合反应制备的闭孔硬质泡沫^[27]。目前，煤矿井下广泛应用的罗克休泡沫就属于此类材料，主要用于构筑防火密闭墙，充填高冒区及瓦斯钻场废弃空间。

①酚醛泡沫的优点表现在：本身难燃、低烟、抗高温歧变；具有均匀的闭孔结构，导热系数低，绝热性能好；耐候性强，尺寸稳定性好，可在 140°C~160°C 下长期使用。

②酚醛泡沫的主要缺点：泡沫脆性大、易碎、掉粉；粘结力与聚氨酯泡沫相比较弱；成本较高；生产过程中产生大量难降解的致癌废水。

3.3 脲醛泡沫

脲醛泡沫是在脲醛树脂中加入表面活性剂、硬化剂和发泡剂等助剂，通过机械搅拌或化学发泡制备的高分子泡沫^[23,28]。目前浩珂伟博矿业公司生产的艾格劳尼泡沫就属此类，主要用于工作面架后充填，上、下隅角封堵瓦斯等。

①脲醛泡沫的优势表现在：质量轻，膨胀倍数高，不传热；生产成本低，为酚醛泡沫成本的一半；本身不燃，安全系数高；对防止瓦斯等气体积聚、封堵裂隙防治漏风效果明显；反应放热温度低。

②脲醛泡沫的缺点为：泡沫的强度低，承压能力弱；反应过程中放出刺激性气体，污染工作环境。

3.4 罗克休

罗克休是一种由两种成分组成的堵漏泡沫产品，即将树脂和催化剂以容积 4:1 均匀混合，快速应生成大量泡沫，这些泡沫会在短时间内迅速膨胀到原体积的 20~30 倍，与此同时，泡沫也在几分钟内快速硬化^[29]。其快速、高膨胀率、良好的抗压能力以及突出的抗静电性能，可以很好的起到快速、安全的充填效果，因此主要适用于充填空洞、密封空气和瓦斯以及加固断裂程度高的地层。

①罗克休的优势表现在：膨胀率高，充填用量小；泡沫反应迅速，堵漏效果好；抗动压能力较强；不蔓延火焰，也可用于灭火措施。

②罗克休的缺点为：应用范围有限；成本昂贵。

3.5 艾格劳尼

艾格劳尼是采用两种不同的胶体聚合材料，通过高压风带动的艾格劳尼单体泵自不同的两个容器通过软胶管将两种不同液体吸入泵中，经过加压压入喷射头，两种液体经过喷射头内的压缩空气可以自动激活，压注到要堵漏风的区域，瞬间发泡体积达到原来的 25 倍左右，可以在较短的时间内完成防火密闭、冒顶或一般的裂隙等上部空洞的填充^[30]。

①艾格劳尼的主要优点有：膨胀率高，材质较轻，不易导热，可以从低位运送到高位

充填堵漏,对防止瓦斯等气体集聚、封堵裂隙防治漏风效果明显;封堵速度快,便于操作,在1h内可施工完一道断面 7.2m^2 ,厚度 $2\sim 3\text{m}$ 的防火密闭墙,效率高;成本较低,使用方便。

②艾格劳尼缺点是:充填固状物抗压强度较低,抗冲击能力差;有机聚合物有一定的气味。

3.6 马丽散

马丽散封堵剂是用两种成份合成的高分子聚亚胶酯类产品,主要应用于地层的加固与水流的封闭^[30,31]。具有极好的粘合力,可以和地层产生高度粘合,有良好的柔韧性,抗动压性好,能承受一定的地层运动,可保持与地层同样的寿命。注入岩层后,其粘度混合物液体状态可以从几十秒或几分钟保持到十几分钟,逐渐渗透到周围细小的缝隙并膨胀凝固,从而有效地密封和加固待处理区域。在加入一定量的激发剂后,反应速率快速提高。遇水后发生胶结反应,进一步膨胀发泡生成多元网状封闭弹性体,能更好的封闭裂隙,从而达到堵漏的目的。

①马丽散主要优点:粘度较低,便于渗入细小的裂隙中,操作方便、快捷;②极好的粘合能力,与地层等易于形成很强的粘合;柔韧性能很好,能承受地层运动;可与水胶结并封闭水流及漏风;能提高煤仓仓体内煤的支撑机械阻力。

②马丽散缺点:主要是成本较高,施工不方便,而且具有一定的可燃性,应用范围受限。

有机聚合物有一定的气味尽管有机固化泡沫存在一定的缺陷,但是有机固化泡沫相比无机材料具有突出的施工速度快,硬化时间短,粘结强度高,气密性好,整体抗压能力强、不易开裂,能承受岩层变化引起的压力扰动等特点。尤其在井下特殊情况下(如巷道断面小、无法通车、无法运输喷浆和注胶材料以及所需的设备及需要快速充填密封处理时),使用有机固化泡沫更凸显优势。如果能够将聚氨酯泡沫、酚醛泡沫和脲醛泡沫的优势结合在一起,克服它们的不足,研发一种新型的矿用充填堵漏复合泡沫材料对防治煤炭自燃将具有重要的意义。

4 结论

经过长时间的实践证明,化学灌浆材料在矿业中的作用已经得到充分的肯定,但也暴露出了不足之处。随着矿业对化学灌浆材料需求的增长,需要完成的任务也会变得更多、更难,所以化学灌浆材料的改进是非常迫切的,需要不断地开发、创新。

参考文献:

- [1] Xue Sheng., Dickson B., Wu Jianming. Application of 222Rn technique to locate subsurface coal heatings in Australian coal mines[J]. International Journal of Coal Geology, 2008, 74: 139-144.
- [2] 田晓龙. 近距离煤层群自燃火灾防治技术的研究与应用[D]. 太原: 太原理工大学, 2006.
- [3] 刘文岭. 大面积采空区自燃火灾灭火新技术的研究与应用[D]. 太原: 太原理工大学, 2004.

- [4] 王德明. 矿井火灾学[M]. 徐州:中国矿业大学出版社, 2008.
- [5] Ogunsola, Olayinka, Mikula, et al. Study of spontaneous combustion characteristics of Nigerian coals [J]. *Fuel*, 1991,70(2):258-261.
- [6] Angle Chandrawatee, Berkowitz Norbert. Distribution of oxygen forms in Alberta low rank coals [J]. *Fuel*, 1991, 70(7):891-896.
- [7] Jones, J.C. Steady behaviour of long duration in the spontaneous heating of a bituminous coal [J]. *Journal of Fire Sciences*, 1996, 14(2):159-166.
- [8] 孙忠强, 郭立稳. 我国煤矿火灾防治技术的研究现状[J]. *河北理工学院学报*, 2007, 5:1-4.
- [9] 吕智海, 王占元. 矿井火灾防治[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2007.
- [10] 徐精彩, 张辛亥, 文虎, 等. 煤层自燃胶体防灭火理论及技术[M]. 北京:煤炭工业出版社, 2003.
- [11] 薛韩玲, 葛岭梅, 徐精彩, 等. 矿用灭火复合凝胶的强度性能研究[J]. *西安科技大学学报*, 2004, 24(2):145-147.
- [12] 邓军, 徐精彩, 张辛亥. 稠化胶体防灭火特性实验研究[J]. *西安科技学院学报*, 2001, 21(2):102-105.
- [13] 王秀林. 煤层火灾胶体防灭火理论及应用[D]. 西安: 西安科技学院, 2002.
- [14] He P.X., Xiao W.D., Luo X.F., et al. Preparation of high water-absorbing poly (sodium Acry late-acry lamide) [J]. *Polymer Material Science and Engineer*. 1993, 9 (4): 23-28.
- [15] 隋涛. 粉煤灰凝胶防灭火技术在煤矿中的应用[D]. 太原: 太原理工大学, 2007.
- [16] 罗振敏, 邓军, 杨永斌, 等. 煤矿井下灾区水凝胶密闭填充材料性能研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2007, 36(6):748-751.
- [17] Xu, Y. L., Wang, D.M., Zhong, X. X., et al. Study of inhibition characteristic of sand suspending thickener for spontaneous combustion prevention [J]. *Procedia Earth and Planetary Science*, 2009, 1:336-340.
- [18] Sudhish, C.B. Prevention and Combating Mine Fires [M]. A. A. Balkema, Rotterdam, Rotterdam, Netherlands. 2000: 213-214.
- [19] Gary, J. C. Prevention, control and/or extinguishment of coal seam fires using cellular grout [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2004, 59(1/2): 75-81.
- [20] 李法刚, 王文庭, 王永勤. 罗克休泡沫防灭火技术在义马矿区的应用[J]. *煤炭技术*, 2008, 27(6):23-24.
- [21] 张胜, 张永朋. 罗克休泡沫在煤矿堵漏过程中的应用[J]. *煤炭技术*, 2007, 26(11):75-76.
- [22] 何伯稳, 张永, 潘鑫, 等. 罗克休泡沫防火新材料在防治煤炭自然发火中的运用[J]. *煤炭工程*, 2006, 8: 29-30.
- [23] 陈家清. 苯酚改性脲醛泡沫塑料的研制及其在矿井防灭火中的应用[D]. 徐州: 中国矿业大学, 1990.
- [24] Ni, X. and Pereira, N.E. Parameters affecting fluid dispersion in a continuous oscillatory baffled tube [J]. *Aiche Journal*, 2000, 46(1):37-45.
- [25] 奚志林. 矿用防灭火有机固化泡沫配制及其生产装置研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2010.
- [26] Bichler W., Simon L. Phenolic resin foam for the sealing of loose hanging walls of mines [J]. *Fuel and Energy Abstracts*, 1996, 37(4):251.
- [27] Myung, S.Y., Woo, I.L. Analysis of bubble nucleation and growth in the pultrusion process of phenolic foam composites [J]. *Composites Science and Technology*, 2008, 68: 202-208.
- [28] 张铭, 王勇, 胡达, 等. 机械发泡法制备脲醛泡沫材料的研究[J]. *现代塑料加工应用*, 2008, 20(2):

14-16.

- [29] 何伯稳, 张永, 潘鑫, 等. 罗克休泡沫防火新材料在防治煤炭自然发火中的应用[J]. 煤炭工程, 2006, 8:29-30.
- [30] 王圣武, 吴华军. 新型高分子注浆材料马丽散在望峰岗副井堵水及加固井壁中的应用[J]. 材料科学化工之友, 2007, 1:40-42.
- [31] 胡传亭, 禹中友, 土和平, 等. 新型聚合材料在防治自然发火中的应用[J]. 煤矿安全, 2003, 34(1): 35-36.

The Current Research Status of Airtight Plugging Material Used in the Mine

Wu Longmei, Zeng Juanjuan, Yang Yuanlong

(Guangdong Province Chemical Grouting Engineering and Technology Research and Development Center,
Guangzhou Chemical Grouting Engineering Co. LTD., CAS, Guangzhou 510070, China)

Abstract: Air leak underground mine is a serious hazard for the ventilation, causing gas and fire accidents and threatening the production safety. This paper summarizes the generally used of airtight plugging chemical grouting material current in the mine, analyzed the characteristics of various materials and its limitations, predict the future trend of the development of sealing material.

Keywords: sealant; polymer foam; inorganic materials; Colloid

环氧树脂堵漏材料在工程中的应用

于方^{1,2}, 张维欣^{1,2}, 聂金平¹

(1. 中科院广州化灌工程有限公司, 广州 510650; 2. 广东省化学灌浆工程技术研究开发中心, 广州 510650)

摘要: 环氧树脂在混凝土裂缝渗漏水治理工程的应用不断增多, 但常用的环氧树脂开槽封缝灌浆工法对混凝土结构造成较大破坏。我们引入了水性聚氨酯材料, 采用聚氨酯-环氧树脂复合灌浆法, 该工法解决了开槽法施工对混凝土结构造成破坏、等待时间较长等缺点, 取得了较好的灌浆效果。

关键词: 混凝土裂缝; 渗漏水; 环氧树脂; 水性聚氨酯; 工法

1 引言

随着经济建设的不断发展, 人口的增多, 地下空间的利用规模越来越大: 包括地铁、地下商城、地下车库、市政管线、隧道等。因此地下工程的安全和耐久性越来越引起人们的重视, 目前的地下工程中普遍存在渗漏水的问题, 渗漏水主要是由于混凝土的质量缺陷及结构裂缝所造成的。这使得混凝土构件的整体性遭到破坏, 地下水从裂缝渗出, 造成构筑物内部的受力钢筋遭腐蚀, 严重削弱构件的承载能力, 对建筑物的安全和使用寿命造成严重影响。

环氧树脂材料具有固化速度快, 固化时间可调, 室温下固化速度可以在 10min~60min 之内调节, 有较高的粘接强度和机械性能等特点。以上性能确保其能有效地修补混凝土裂缝, 恢复结构的整体性, 因此其在混凝土结构渗漏水治理中的应用越来越多。

2 开槽埋嘴法

为了保证渗透的距离和充填的饱满, 环氧类灌浆材料 A、B 组分混合后不会马上固化, 其凝固时间一般要 10 分钟以上。在使用过程中, 会渗漏到裂缝以外, 污染环境同时造成浪费。因此灌注环氧树脂前须对裂缝进行封闭, 将灌注的环氧类材料保持在裂缝内部, 等达到固化时间后自行固化。裂缝封闭后, 有利于灌浆压力有效的传递到混凝土内部最薄弱的部位, 压迫浆液反向推水, 原则上在一定压力和足够时间内可以使环氧浆液完全充满裂缝内部, 固化后形成的高强度固结体有效的修复混凝土裂缝, 起到一个永久封闭和修复的作用, 不会再出现二次渗漏^[1]。工程中常采用的封缝方法为开槽埋嘴法。

开槽埋嘴法即沿混凝土裂缝走向骑缝凿 V 型沟槽, 采用水泥基类材料或环氧类材料填缝封堵, 同时按间距 20~35cm 埋设灌浆嘴, 示意图见图 1 和图 2 所示:

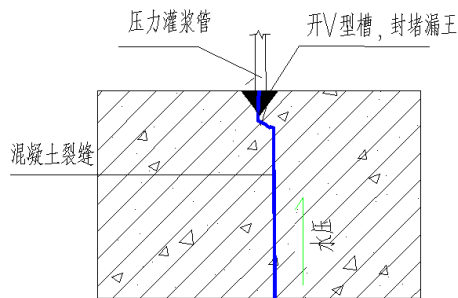


图1 开槽埋嘴法剖面图

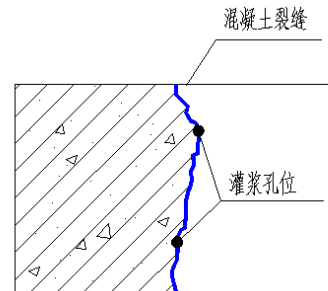


图2 开槽埋嘴法平面图

开槽埋嘴法的施工工序为：

(1) 裂缝清理

现场查找裂缝，根据裂缝走向进行标示。采用手持打磨机沿裂缝进行打磨，打磨的宽度为裂缝两侧各 5-10cm，打磨深度为 2mm，用高压水进行洗缝，使裂缝呈现清晰走向。

(2) 凿槽

采用冲击锤或风镐等工具对漏水点进行开凿，将漏水的点凿成“U”型槽或“V”型槽，槽深 3~5cm，槽宽 3~5cm；并将槽采用清水、风枪对裂缝进行清洗，槽内无粉尘后布置孔位。

(3) 布置孔位

骑缝布孔，孔距 20~35cm 进行布孔，灌浆嘴可采用铝管或钢管，视裂缝的宽度确定灌浆嘴的直径，一般可采用 1cm 直径的管即可。并根据现场裂缝的实际宽度，适当调整灌浆嘴间距，裂缝宽度大，则疏布置；裂缝宽度小，则密布置。

(4) 埋灌浆嘴

埋设注浆嘴通常有两种方式，一种是直接在凿槽的部位埋设灌浆嘴，也可在凿好槽的渗漏水部位钻骑缝垂直孔，在孔内设置注浆嘴。埋设的灌浆嘴应对准漏水部位，在灌浆嘴的底部即出浆口的位置采用透水性棉纱包裹，防止封缝过程堵塞注浆嘴出口。

(5) 封缝并检查

采用无机速凝水泥，沿槽方向进行密封，确保密封完整，不留漏点。封缝完成按照灌浆的顺序给每个孔口编号，编号从下往上或从一侧到另一侧依次类推。在封缝过程中，采用长橡皮管引出漏水位置的水，并集中引入蓄水桶或池中，防止渗漏水冲刷封缝材料，导致封缝破坏。

(6) 灌浆

待封缝材料固化达到一定强度后，用灌浆泵通过已安装好的管路系统，将配制好的化学灌浆材料从灌浆嘴进行灌浆。

(7) 拆嘴

灌浆完毕，灌浆材料固化并达到一定强度后，可以切掉灌浆嘴，切嘴时注意保护封缝材料，防止切割操作破坏封缝材料。

该方法可以达到较好的灌浆效果，但是存在的缺点是：

- ①开槽只能由人工手持电钻完成，耗费工时，造成粉尘污染环境。
- ②因在混凝土上开槽，对混凝土结构局部破坏较大，不利于混凝土的耐久性。
- ③开槽封堵后需等待封堵材料达到一定强度后才可以灌注环氧材料，一般需等待的时间最少为24小时，造成工期加长。
- ④开槽封堵后，混凝土的表现会有修补的痕迹，很难恢复原有颜色和状态。

3 聚氨酯-环氧复合灌浆法

针对开槽法的缺点，我们引入了水性聚氨酯材料。水性聚氨酯材料最突出的特点是其很容易在水中分散，遇水能迅速自乳化并发生聚合反应。形成的固结体具有良好的韧性、且耐低温性以及抗渗性能优异，对混凝土、岩石等具有良好的粘接性，注浆后对水质无影响，除此之外，固结体还具有弹性止水和膨胀止水的双重作用^[2]。由于其耐久性的问题，对于有补强要求的混凝土裂缝渗漏水处理应用越来越少。而环氧树脂材料具有强度高，耐久性好等特点，但是其固化速度相对较慢，对于渗水裂缝不易封堵，针对两种材料的特点，我们采用了聚氨酯-环氧复合灌浆法，扬长避短，发挥两种材料的优点，来达到堵漏补强的目的。

聚氨酯-环氧复合灌浆法布孔分两序进行，沿裂缝两侧每隔10~15cm钻斜孔，孔位距裂缝3~5cm，入射角为45°，钻孔深度7~10cm左右，要贯穿裂缝，埋设前止水型止水针头，作为I序孔，I序孔的作用是灌注聚氨酯材料封堵裂缝表层。沿裂缝两侧每隔20~30cm钻斜孔，孔位距裂缝10~15cm，入射角为60°，钻孔深度25~35cm左右，要贯穿裂缝，埋设前止水型止水针头，作为II序孔，II序孔灌注环氧树脂进行混凝土裂缝修补。

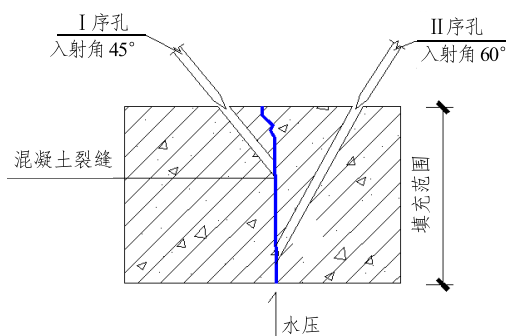


图3 钻孔埋管法剖面图

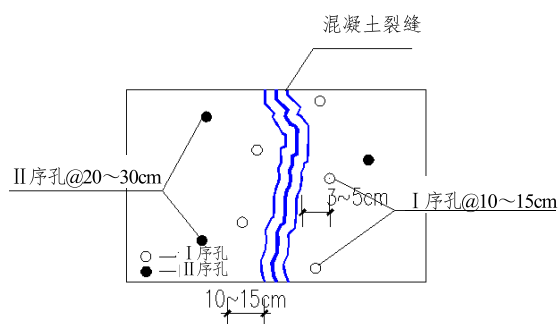


图4 钻孔埋管法平面图

4 工程应用

某地铁工程，因受地质条件的影响，局部变形缝渗漏量较大，主要从墙与道床交汇处成股流出；施工缝处一般成线形渗漏；砼缺陷处主要表现为成片湿渍，部分孔洞存在涌水

现象。

针对该工程裂缝堵漏需补强等特点，我们选取了地铁一号线某施工缝渗漏水进行试验，采用聚氨酯-环氧树脂复合灌浆法施工，取得了较好的灌浆效果。

聚氨酯-环氧树脂复合灌浆法施工工艺流程示意图如图 5：

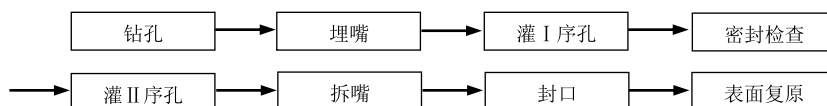


图 5 聚氨酯-环氧复合灌浆法施工工艺流程示意

(1) 钻孔

根据裂缝宽度、大小、长度布置灌浆嘴或管，宽缝疏布置，微细缝密布置。沿裂缝两侧每隔 10~15cm 钻斜孔，孔位距裂缝 3~5cm，入射角为 45° ，钻孔深度 7~10cm 左右，要贯穿裂缝，埋设前止水型止水针头，作为 I 序孔。沿裂缝两侧每隔 20~30cm 钻斜孔，孔位距裂缝 10~15cm，入射角为 60° ，钻孔深度 25~35cm 左右，要贯穿裂缝，埋设前止水型止水针头，作为 II 序孔。

(2) 埋嘴

在钻好的孔内安装灌浆嘴（又称之为止水针头），并用专用内 6 角扳手拧紧，使灌浆嘴周围与孔壁之间膨胀无空隙。应确保止水针头安装牢固结实，防止在灌浆压力下射出，造成安全事故。

(3) I 序孔灌浆

I 序孔灌注聚氨酯材料，主要目的是对裂缝浅层进行封闭，使裂缝形成一个密闭性空腔，保证灌浆压力和防止 II 序孔灌浆时环氧类浆液的流失。I 序孔沿裂缝纵向深度较浅，灌注的聚氨酯的结束标准以裂缝流出且两个针头之间的浆液相连接为止。

(4) 检查封缝

为保证密闭空腔的密闭性及承受灌浆压力作用，应对封缝密封效果进行检查^[3]。待聚氨酯固化且有一定强度后，一般需 60min 之后，沿裂缝涂一层肥皂水，从 II 序孔灌浆嘴向裂缝中通入压缩空气，检查密封效果。试气压力应由小到大，一般可控制在 0.1~1.0MPa。试气压力不应过大，防止将密封材料击穿。若无冒泡现象，表示密封效果良好，否则应予修补。如果裂缝较长，灌浆嘴较多，可分段检查通气情况。试气有利于发现未封闭的裂缝，可以提前处理，防止漏浆的发生。

(5) II 序孔灌浆

II 序孔灌注环氧类堵水灌浆材料，主要目的是永久性的封闭混凝土结构的裂缝，对裂缝进行封闭和加固修复，解决渗漏水问题。①灌浆时应采取由里到外、从下至上或裂缝一端至另一端，逐级封闭，直到下一个排气嘴出浆时立即关闭转芯阀，以保证浆液充满裂缝；②灌浆时以少量多次、低压慢灌、稳压渗透的原则，灌浆压力初始用 0.2MPa，应由小到大逐渐增加，不宜骤然加压，压力控制在 0.2~2MPa，达到规定压力后，保持压力稳定，

以满足灌浆要求；③灌浆停止的标志为吸浆率为零或压力在施灌过程中骤然升高，在达到2Mpa后，再继续恒压3min可停止灌浆，关掉进浆嘴上的转芯阀门；④灌浆结束后，立即拆除管道，清洗干净，用有机溶剂冲洗管道和设备。灌浆是施工的关键工序之一，应确保灌浆质量。

(6) 拆嘴

灌浆完毕，环氧达到一定强度，环氧固结体表干后，可切掉或敲掉外漏的灌浆嘴。清理干净已固化的溢漏出的灌浆液。

施工完成后，该渗漏水点已经从线漏状变为无渗漏，只剩下湿渍。第三天湿渍也已消失，做到了滴水不漏。最后采用无机防水涂料II型对裂缝表面及灌浆嘴进行抹平密封。施工至今已有6个月的时间，经过复查，该渗漏水点表面干燥，没有再发生渗漏的情况。

5 结论

采用聚氨酯-环氧复合灌浆法，很好的解决了开槽埋嘴法施工工期较长、破坏混凝土结构等的缺点。同时环氧树脂材料的耐久性也优于聚氨酯材料，保证了灌浆的质量。经过工程实践的检验该新工法可较好地完成封堵渗漏水目标，值得推广。

参考文献：

- [1] 张维欣, 虞巍巍. 环氧灌浆材料在莞惠城际轨道工程 GZH-5 标渗漏水治理中的应用[J]. 广州化学, 2014, 39 (1): 40-46.
- [2] 戴进峰, 李斌. 水溶性聚氨酯堵料制备及性能表征[J]. 化学与黏合, 2007, 29(1):23-26.
- [3] 宾斌. 广东某富水隧道渗漏水治理技术[J]. 中国建筑防水, 2012, 2: 13-15.

新型地基处理复合灌浆材料的研究

吴龙梅^{1,2}, 杨元龙^{1,2}, 曾娟娟^{1,2}, 张文超¹, 于方¹

(1. 中科院广州化灌工程有限公司, 广州 510650; 2. 广东省化学灌浆工程技术研究开发中心, 广州, 510650)

摘要: 以改性 MDI、聚醚多元醇、水玻璃及增塑剂 (DBP) 为原料, 引入特殊催化剂 C-1 与催化剂 DBTDL 协同作用, 制备了水玻璃-聚氨酯复合灌浆材料, 采用万能试验机及旋转粘度计测试灌浆材料的物理性能。结果表明, 灌浆材料固体的抗压强度及浆液的初凝时间与催化剂的种类及用量密切相关, 增塑剂 DBP 可以显著改善灌浆材料的粘度, 当水玻璃 40%、聚醚多元醇 A10%、增塑剂 10%、催化剂 DBTDL: C-1 为 0.15%:0.25% 时, 灌浆材料达到最佳综合性能。

关键词: 灌浆材料, 水玻璃, 聚氨酯, 抗压强度

1 引言

当今, 我国地下工程、道路隧道、地铁等发展迅猛, 修建的越岭铁路、高铁、公路隧道座数及长度居世界首位。大城市为了解决交通拥挤大力修建地铁、城际轨道, 为了满足人们日常生活生产, 地面建筑业日益增多, 这些建设的高速发展对施工中地基处理提出了更高的要求, 地基处理在建筑施工中起着基础作用, 是施工质量的重要影响因素。地基处理是按照上部结构对地基的要求, 对地基进行必要的加固或改良, 提高地基的承载力, 保证地基的稳定^[1]。目前很多地基采用灌浆的方法来提高建筑物和被灌注地层的抗渗性能和整体强度, 这样使得地基基础条件得以改善, 在堵水、补强、加固和防渗等方面均可以起到良好的效果^[2]。

聚氨酯灌浆材料具有粘度适中、凝结速度较快、时间可调、耐水性较好等优点^[3], 在众多化学灌浆材料中效果显著。聚氨酯灌浆材料可用于水库坝体的输水隧道裂缝的堵漏密封、桥梁的加固和桥体裂缝的堵漏密封, 各种建筑物与地下混凝土裂缝的堵漏密封、钻井护壁的堵漏加固、高层建筑物及公路路基的加固、采矿工程中巷道内堵水顶板等破碎层的加固, 以及作为室内保温填充材料等, 适用范围十分广泛^[3,4]。

一般的纯聚氨酯灌浆材料成本较高, 初凝时间、抗压强度、弹性模量等综合性能较差^[5]。为了获得成本较低、综合性能较好的聚氨酯灌浆材料, 有很多利用水玻璃改性聚氨酯的相关文献报道, 即先将水玻璃进行处理再与聚氨酯预聚体反应, 可以制得具有较高性能的灌浆材料, 但材料处理工艺繁琐、不确定因素多^[6-9]。本文采用水玻璃增强聚氨酯, 再采用特殊催化剂后, 水玻璃与聚氨酯有良好的反应, 并且在聚氨酯中分散性较好, 能有效提高复

合材料的抗压强度、并降低成本。通过选择不同的聚氨酯配合体,获得的灌浆材料粘度较低便于施工,并且各项性能均能满足使用要求。

2 实验

2.1 实验原料

水玻璃、增塑剂邻苯二甲酸二丁酯(DBP)、催化剂二月桂酸二丁基锡(DBTDL)、改性MDI、羟值为 $100\pm 8\text{mgKOH/g}$ 的聚醚多元醇A、羟值为 $280\pm 15\text{mgKOH/g}$ 的聚醚多元醇B、羟值为 $475\pm 25\text{mgKOH/g}$ 的聚醚多元醇C、羟值为 $760\pm 30\text{mgKOH/g}$ 的聚醚多元醇D均为工业品;催化剂C-1,自制。

2.2 材料的制备

取一定量经过滤除杂的水玻璃溶液与不同牌号的聚醚多元醇按相同比例混合,再加入一定量的催化剂二月桂酸二丁基锡于室温下搅拌分散30min作为A组分;将改性MDI与适量经真空脱水处理的增塑剂邻苯二甲酸二丁酯(DPB)及适量的催化剂C-1混合作为B组分。分别测定A、B组分的粘度,然后将A、B组分按照一定的比例混合,迅速搅拌均匀倒入模具中静置、固化,并记录固化时间,待完全固化后测定试样的抗压强度。

2.3 材料的性能测试

(1) 粘度测定

按照国家标准GB/T 2797-1995《胶粘剂粘度的测定》,在NDJ-1旋转粘度计上测定灌浆材料A、B组分混合料得的粘度。视试样粘度大小,选用适宜的转子(即粘度在转子对应的最大粘度的80%以内),将转子垂直浸入试样中心,使试样液面高于转子的测试线,恒温(25 ± 0.5) $^{\circ}\text{C}$,并保持试样温度均匀,记下指针在圆盘上不变时的读数,每个试样测试3次。

(2) 抗压强度

按照国家标准GB/T 2569-1995《树脂浇注体压缩性能测试方法》,采用WDW3020微机电子万能试验机测试固结体的抗压强度,试件尺寸采用 $2\text{cm}\times 2\text{cm}\times 2\text{cm}$ 立方体。

(3) 浆液初凝时间

以秒表记录时间,从灌浆材料A、B组分混合按下秒表开始计时,同时使用玻璃棒搅拌浆液使之均匀,当浆液失去流动性时再次按下秒表,秒表读书即为灌浆材料的初凝时间,每个试样测试3次,取平均值。

3 结果与讨论

3.1 催化剂对灌浆材料的影响

本文研究了两种催化剂对聚氨酯水玻璃复合灌浆材料浆液初凝时间及固结体抗压强度的影响,由表1可知,复合灌浆材料浆液初凝时间随催化剂用量的增加而减短,相反固结体24h抗压强度随催化剂用量的增加而增大,这说明催化剂的使用一方面促进了浆液中

各成分之间的化学反应速度,加快了浆液的固化速度,减少了反应进行的时间;另一方面提高了浆液化学反应程度,从而提高了固结体的抗压强度。与催化剂 DBTDL 相比,当使用相同分数的催化剂 C-1 时,所制备的灌浆材料浆液的初凝时间较长,固结体的抗压强度略高,这是因为催化剂 C-1 促进的是灌浆材料中水玻璃与改性 MDI 之间的反应,而催化剂 DBTDL 主要是促进聚醚与改性 MDI 之间的反应。基于以上原因,本实验考虑同时使用两种催化剂,由表 1 的数据可以看出,在催化剂 DBTDL 与 C-1 的协同作用下,两种催化剂使用量各为 0.15% 时,固结体的抗压强度提高至 11.96MPa,相比于单一催化剂作用时的抗压强度有大幅度的提升,这说明两种催化剂之间存在协同作用,有助于提高固结体的抗压强度。综合考虑催化剂对浆液初凝时间和固结体强度的影响,后续实验采用中 DBTDL 与 C-1 分别为 0.15% 和 0.25%。

表 1 催化剂种类及用量对灌浆材料浆液初凝时间及固结体抗压强度的影响

编号	催化剂		聚醚多元醇 A/%	水玻璃(密度 1.44g/ml) /%	增塑剂/%	初凝时间/s	24h 抗压强度 /MPa
	种类	含量/%					
1	DBTDL	0.15	10	40	10	936	7.65
2	DBTDL	0.25	10	40	10	865	8.36
3	DBTDL	0.35	10	40	10	637	9.58
4	DBTDL	0.45	10	40	10	486	10.26
5	C-1	0.15	10	40	10	968	8.65
6	C-1	0.25	10	40	10	826	10.28
7	C-1	0.35	10	40	10	716	11.32
8	C-1	0.45	10	40	10	598	12.56
9	DBTDL : C-1	0.15:0.15	10	40	10	712	11.96
10	DBTDL : C-1	0.15:0.25	10	40	10	621	13.85
11	DBTDL : C-1	0.25:0.15	10	40	10	490	12.63
12	DBTDL : C-1	0.25:0.25	10	40	10	356	14.35

3.2 水玻璃对灌浆材料的影响

由表 2 可以看出,当水玻璃的用量为 40%,催化剂 DBTDL 及 C-1 的用量分别为 0.15% 和 0.25%,聚醚多元醇 A 用量为 10%,增塑剂用量为 10% 时,随着水玻璃密度的增加,浆液中硅酸盐的含量增加,参与固结反应的硅酸盐增多,化学反应速度一定程度上加快,反应程度增加,所以当水玻璃密度增加时浆液初凝时间略微减短,固结体抗压强度增加。当水玻璃的密度增加到 1.52 g/ml 时,较高浓度的反应物促使初凝时间进一步减短,然而固结体的抗压强度降低,这是因为浆液中硅酸盐浓度过高时,硅酸盐不能完全参与固结反应,过量的硅酸盐以填料的形式存在在固结体中,降低了固结体的抗压强度。由以上分析可知,水玻璃的密度对硅酸盐水玻璃聚氨酯复合灌浆材料的初凝时间影响较少,与固结体的抗压强度关系密切,制备这种灌浆材料时选择密度为 1.44 g/ml 左右的水玻璃较好。

表2 水玻璃密度对灌浆材料浆液初凝时间及固结体抗压强度的影响

编号	催化剂种类及用量/%	聚醚多元醇 A/%	水玻璃密度 (用量 40%) / g/ml	增塑剂/%	初凝时间/s	24h 抗压强度 /MPa
1	DBTDL : C-1= 0.15 : 0.25	10	1.35	10	679	12.42
2		10	1.39	10	653	13.17
3		10	1.44	10	621	13.85
4		10	1.52	10	589	12.59

表3是聚醚多元醇A用量为10%，增塑剂用量为10%时，水玻璃密度为1.44 g/ml，催化剂DBTDL及C-1的用量分别为0.15%和0.25%时，水玻璃用量对灌浆材料浆液初凝时间及固结体抗压强度的影响。从表3中可以观察到，浆液固结体物理性能与水玻璃的用量密切相关。固结体的抗压强度随水玻璃用量的增加而快速下降，这是由于水玻璃用量增大时，大幅度降低了改性MDI的用量，而改性MDI是水玻璃聚氨酯灌浆材料中参与固化反应的主体材料，它的减少严重影响了固结体中交联网络结构的形成，因此固结体在受到外力作用时很容易发生形变进而破坏，从而抗压强度大幅度降低。

表3 水玻璃用量对灌浆材料浆液初凝时间及固结体抗压强度的影响

编号	催化剂种类及用量/%	聚醚多元醇 A/%	水玻璃 (密度 1.44 g/ml) / %	增塑剂/%	初凝时间/s	24h 抗压强度 /MPa
1	DBTDL : C-1= 0.15 : 0.25	10	35	10	645	14.72
2		10	40	10	621	13.85
3		10	45	10	589	12.11
4		10	50	10	546	10.26

3.3 聚醚对灌浆材料的影响

表4、表5、表6、表7是羟值不同的聚醚多元醇的用量对聚氨酯水玻璃复合灌浆材料浆液初凝时间及固结体强度的影响。由表可见，灌浆材料的初凝时间及固结体抗压强度随聚醚多元醇的羟值的变化而变化，在聚醚多元醇用量相同的情况下，采用的聚醚多元醇羟值越高，浆液初凝时间越短，固结体抗压强度越低，并且这一变化十分明显，如表所示，当使用聚醚多元醇A质量分数为12%时，浆液初凝时间为563s，固结体抗压强度为12.57 MPa，使用相同质量分数聚醚多元醇D时，浆液初凝时间为289s，固结体抗压强度为8.09 MPa。这一现象表明，在制备灌浆材料时需要选择适当羟值的聚醚多元醇作为原料，如果选择的聚醚多元醇羟值过大，浆液的初凝时间将大幅度降低，这会给灌浆材料工程施工带来不便，限制灌浆材料的使用。

表 4 聚醚多元醇 A 对灌浆材料浆液初凝时间及固结体强度的影响

编号	催化剂种类及用量/%	聚醚多元醇 A/%	水玻璃(密度 1.44g/ml) /%	增塑剂/%	初凝时间/s	24h 抗压强度/MPa
1	DBTDL : C-1= 0.15 : 0.25	9	40	10	685	12.53
2		10	40	10	621	13.85
3		11	40	10	592	13.21
4		12	40	10	563	12.57

表 5 聚醚多元醇 B 对灌浆材料浆液初凝时间及固结体强度的影响

编号	催化剂种类及用量/%	聚醚多元醇 B/%	水玻璃(密度 1.44g/ml) /%	增塑剂/%	初凝时间/s	24h 抗压强度 /MPa
1	DBTDL : C-1= 0.15 : 0.25	9	40	10	587	11.62
2		10	40	10	534	12.87
3		11	40	10	501	12.15
4		12	40	10	439	11.49

表 6 聚醚多元醇 C 对灌浆材料浆液初凝时间及固结体强度的影响

编号	催化剂种类及用量/%	聚醚多元醇 C/%	水玻璃(密度 1.44g/ml) /%	增塑剂/%	初凝时间/s	24h 抗压强度 /MPa
1	DBTDL : C-1= 0.15 : 0.25	9	40	10	502	10.42
2		10	40	10	456	11.67
3		11	40	10	423	10.85
4		12	40	10	376	9.59

表 7 聚醚多元醇 D 对灌浆材料浆液初凝时间及固结体强度的影响

编号	催化剂种类及用量/%	聚醚多元醇 D/%	水玻璃(密度 1.44g/ml) /%	增塑剂/%	初凝时间/s	24h 抗压强度 /MPa
1	DBTDL : C-1= 0.15 : 0.25	9	40	10	408	10.22
2		10	40	10	389	11.17
3		11	40	10	327	9.85
4		12	40	10	289	8.09

3.4 灌浆材料粘度的影响因素

由于本文中制备的水玻璃聚氨酯灌浆材料是以改性 MDI、聚醚多元醇和水玻璃为主料,采用邻苯二甲酸二丁酯(DBP)作为增塑剂改善灌浆材料的粘度,而且使用的水玻璃的粘度均低于 150mPa·s,因此这种灌浆材料粘度主要与改性 MDI、聚醚多元醇及增塑剂的添加量有关系,图 1 为 DBP 对水玻璃聚氨酯灌浆材料粘度的影响,从图中可以看出,随着聚醚多元醇羟值的增加,灌浆材料的粘度增大,加入增塑剂 DBP 可以有效降低灌浆

材料的粘度,随着加入的 DBP 质量分数的增加,材料粘度显著降低。

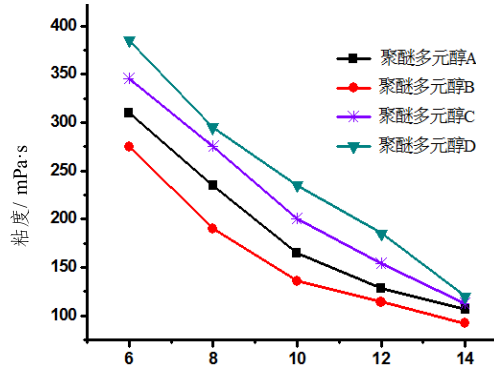
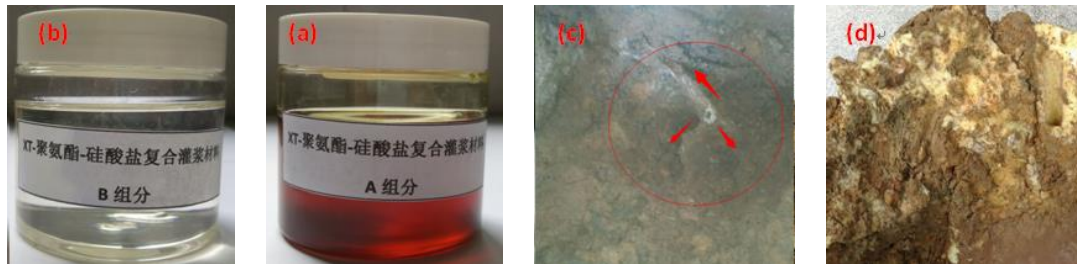


图1 DBP 含量及聚醚种类对灌浆材料粘度的影响

3.5 灌浆材料的应用

硅酸盐水玻璃-聚氨酯灌浆材料的 A 组分呈棕黄色, B 组分无色透明, 见图 2; 混合后形成的固结体为淡黄色, 灌浆材料在岩土中呈脉状扩散, 并且灌浆材料在使用过程中没有出现发泡现象, 固结体密实, 结合前面的数据可知, 这种灌浆材料不含有挥发性的溶剂, 粘度低、可灌性好、渗透性强, 并且具有良好的抗压强度, 可以对岩土/砂砾结构起到及时填充、加固、防水堵漏等作用, 能够适用于桥梁, 地铁, 水坝, 岩层, 港湾, 人防工程等裂痕的防水堵漏及地基稳固抗渗工程。



(a) 灌浆材料的 A 组分 (b) 灌浆材料的 B 组分 (c) 灌浆材料在土壤中的分布 (d) 灌浆后的固结体

图2 复合灌浆材料及其固结体

4 结论

(1) 通过向硅酸盐水玻璃-聚氨酯灌浆材料中同时加入催化剂 DBTDL 和 C-1 可以显著提高硅酸盐水玻璃的反应程度, 进而增加固结体的抗压强度。

(2) 实验表明水玻璃 40%、聚醚多元醇 A 10%、增塑剂 10%、催化剂 DBTDL:C-1 为 0.15%:0.25% 时, 灌浆材料达到最佳综合性能。本实验中制备的灌浆材料不含有挥发性有机溶剂, 并且浆液的粘度低、可灌性好、渗透性强, 灌浆材料固结体具有良好的抗压强度, 可用于地基稳固抗渗工程及隧道、桥梁、地铁、水坝、岩层、港湾、人防工程等裂痕的防

水堵漏。也可用于矿山开采断裂带、破碎松散围岩区、裂隙发育带,隧道施工裂缝、塌陷区等的填充加固,应用前景广阔。

参考文献:

- [1] 陈斌. 传统地基处理的两种方法[J]. 山西建筑, 2009, 35(4):128.
- [2] 李保龙. 基于高分子灌浆材料在地基基础处理中的应用探讨[J]. 建筑论坛, 2016, 43(5):162-163.
- [3] 宋永利, 陈昀, 顾宇璇. 混凝土灌浆堵漏材料及施工简述[J]. 江苏建材, 2010, (1):37-41.
- [4] Axelsson M, Gustafson G, Fransson. Stop mechanism for cementitious grouts at different water-to cement ratios[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2009, 24(4):390-397.
- [5] Jain P, Pradeep T. Potential of silver nanoparticle-coated polyurethane foam as an antibacterial water filter[J]. Biotechnology and Bioengineering, 2005, 90(1):59-63.
- [6] 单长兵, 刘元雪. 水玻璃改性聚氨酯注浆料的性能研究[J]. 建筑科学, 2011, 27(9):48-51.
- [7] 刘玄, 杨政鹏, 管学茂, 等. 聚醚基聚氨酯/水玻璃凝胶的制备及性能[J]. 化工新型材料, 2015, 43(7): 224-227.
- [8] 康永. 水玻璃的固化机理及其耐水性的提高途径[J]. 佛山陶瓷, 2011, 21(5):44-47.
- [9] 武世凯, 郭学锋, 曹新鑫, 等. 石英砂和水玻璃改性聚氨酯复合膨胀材料[J]. 新型材料, 2015, 1:15-18.

The study of preparation and performance of sodium silicates-polyurethane grouting materials

Longmei Wu^{1,2}, Yuanlong Yang^{1,2}, Juanjuan Zeng^{1,2}, Wenchao Zhang¹, Fang Yu¹

(1. Guangdong Province Chemical Grouting Engineering and Technology Research and Development Center, Guangzhou 510070, China ; 2. Guangzhou Chemical Grouting Engineering Co. LTD., CAS, Guangzhou 510070, China)

Abstract: The sodium silicates-polyurethane grouting materials was prepared using modified MDI, polyether glycol, silicate and DBP as raw materials under the synergistic effect of catalysts C-1 and DBTDL. The physical properties of grouting materials was investigated by universal testing machine and rotational viscometer. The results show that the compressive strength and initial setting time of the grouting material were closely related to category and content of catalyst, meanwhile DBP can significantly improve the viscosity of the grouting material. When the ratios of raw materials were 40% sodium silicate, 10% polyether A, 10% DBP, 0.15% DBTDL and 0.25% C-1 the grouting material reach optimal comprehensive performance.

Keywords: grouting material, sodium silicate, polyurethane, compressive strength

低温条件下可固化环氧树脂灌浆材料的研究

曾娟娟^{1,2}, 杨元龙^{1,2}, 马哲³

(1. 中科院广州化灌工程有限公司, 广州 510650; 2. 广东省化学灌浆工程技术研究开发中心, 广州 510650; 3. 中科院广州化学研究所, 广州 510650)

摘要: 采用硫脲与二乙烯三胺为原料合成硫脲改性胺, 然后与多聚甲醛、苯酚发生曼尼斯反应, 制得含有硫脲基团的曼尼斯碱作为环氧树脂固化剂, 再配以环氧树脂及活性稀释剂制得低温固化环氧树脂灌浆材料。研究了活性稀释剂和固化剂含量对环氧灌浆材料性能的影响。实验表明, 浆液的黏度可在 500~1000MPa.s 调节, 固结体抗压强度 ≥ 60 MPa, 室温(25°C)初凝时间 5~10min 可调, 低温(5°C)初凝时间 30~90min 可调, 可用于低温环境下的补强加固及堵漏灌浆材料。

关键词: 灌浆材料; 环氧树脂; 低温固化

1 引言

环氧树脂灌浆材料具有优良的力学性能, 能有效在水介质中快速固化, 而且固结体强度高、与混凝土、金属等粘结性能良好、收缩率低, 耐酸、碱、盐等性能优异, 同时兼顾了堵漏和加固的作用, 是国内灌浆材料中最广泛应用的材料之一, 广泛用于混凝土裂缝修补、复杂地基处理、防渗堵漏以及补强加固等工程^[1-4]。

单纯的环氧树脂没有多大的使用价值, 只有加入固化剂使环氧树脂转化为三维网络状结构, 形成不熔的高聚物才能呈现出一系列优良的性能, 所以环氧树脂灌浆材料一般分为两个组分, 一个组分以环氧树脂或改性环氧树脂为主体, 加上稀释剂和其他助剂, 另一个组分为固化剂。最常使用的固化剂主要为脂肪族和脂环族小分子多胺, 其反应速度快、可室温固化, 但是分子量较低、挥发性大、毒性大, 对人体伤害也大; 由于反应速度过快, 使固化收缩应力大、易开裂、性脆; 固化剂用量少, 配比要求严格, 给使用者带来不便; 在低于 10°C 条件下, 反应速度缓慢, 强度上升很慢。

目前对于低温(低于 10°C)环氧树脂灌浆材料的研究还很少, 对低温固化剂的研究主要集中在聚硫醇和硫脲改性多元胺^[5-8]。聚硫醇可实现低温快固, 但是价格昂贵, 而且主要依赖进口; 而硫脲改性多元胺价格便宜很多, 且相对低分子多元胺毒性减小, 挥发性降低, 并且可以低温快速固化环氧树脂。

本文选用硫脲先与二乙烯三胺反应, 合成含有硫脲基团的改性胺, 再由硫脲改性胺、多聚甲醛与苯酚发生曼尼斯反应, 制得含有硫脲基团的曼尼斯碱, 再配以环氧树脂及活性

稀释剂制得环氧树脂灌浆材料。该灌浆材料不仅可在低温下快速固化,并且力学性能优良,可用于低温环境下的补强加固及堵漏灌浆材料。

2 实验部分

2.1 原材料与实验仪器

实验原材料:环氧树脂、柔性环氧树脂、二乙烯三胺(DETA)、硫脲、多聚甲醛,工业品;苯酚,化学品。

实验仪器:傅立叶红外光谱仪,美国 Analect 公司;NDJ-1 型旋转黏度计,上海精科天平仪器厂;WDW3020 型微机控制电子万能试验机,长春科新试验仪器有限公司;恒温恒湿试验箱,华南仪器设备有限公司;英鹏防爆冰箱,广州安菲环保科技有限公司。

2.2 低温固化环氧树脂注浆材料制备

(1) 固化剂的合成

将计量的二乙烯三胺与硫脲按加入四口烧瓶中,在氮气保护下,持续机械搅拌,加热至 $50\pm 5^\circ\text{C}$,待硫脲完全融化后将温度升至 $130\pm 5^\circ\text{C}$,回流反应 3 小时后,自然冷却至室温即得到低黏度、深黄色的硫脲改性胺。

将计量的硫脲改性胺、苯酚加入四口烧瓶中,加热至 $50\pm 5^\circ\text{C}$ 后,分三次加入多聚甲醛,待物料温度稳定后,升温至 $100\pm 5^\circ\text{C}$ 继续反应 3 小时,自然冷却后即得到含硫脲基的酚醛胺固化剂,其合成反应机理见图 1。

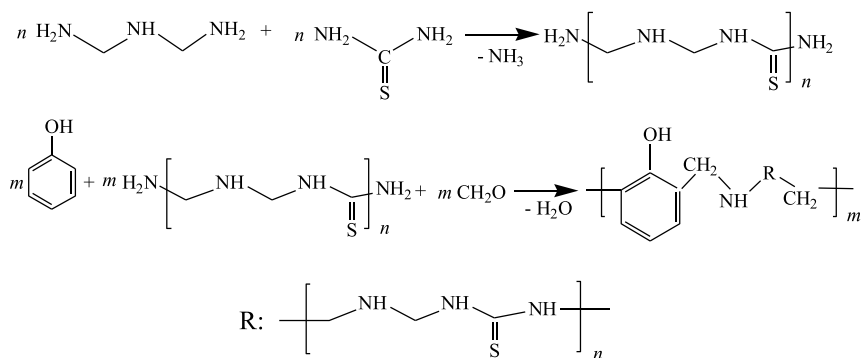


图 1 含硫脲基的酚醛胺固化剂合成原理

(2) 低温固化环氧树脂灌浆材料的制备

由环氧树脂和活性稀释剂配制成 A 组分,固化剂为 B 组分,将 A 组分与 B 组分按照实际需要进行配比,即制得低温固化环氧树脂灌浆材料。

2.3 测试方法

黏度:按 GB/T 2794-1995《胶粘剂粘度的测定》进行测试。

FTIR 分析:采用美国 Analect 公司 RFX-65A 傅里叶红外转换光谱仪测试。

初凝时间:按一定比例配制好浆液,放置在恒定温度下,至长20cm直径4mm的玻璃棒靠自身重力不能插入到浆液底部的时间为初凝时间^[8]。

抗压强度:按照GB/T2567-2008《树脂浇注体性能测试》,截取试样为直径10mm高度25mm的圆柱体。浇注体在恒定温度下放置28d后,使用WDW3020型微机控制电子万能试验机,对同一试样进行5次测试,记录样品破裂前所受最大压力下的压强值。

3 结果与讨论

3.1 含硫脲基酚醛胺固化剂的红外光谱结构表征

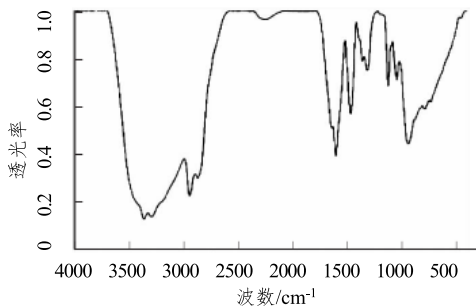


图2 未改性DETA的红外光谱

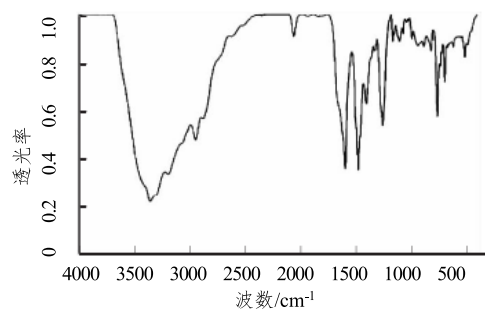


图3 改性DETA的红外光谱

未改性和改性的DETA的红外谱图如图2和图3所示,图2中未改性的DETA在 $3350\sim 3250\text{cm}^{-1}$ 处有较强的伯胺对称和非对称伸缩振动的双峰吸收峰,而图3中合成的改性胺在此区域双峰逐渐转变为单峰,说明伯胺逐渐反应转变为仲胺。图3中 1280cm^{-1} 左右的尖锐吸收峰为连在脂肪链上 $\text{C}=\text{S}$ 的特征吸收峰,说明硫脲参与反应,并生成含硫脲基团的改性胺;而在 1720cm^{-1} 左右无吸收峰,表明多聚甲醛完全参与曼尼斯反应。在 1600cm^{-1} 和 1500cm^{-1} 处左右出现苯环振动吸收峰,并在 770cm^{-1} 左右与 700cm^{-1} 出现的吸收峰为苯环上1,2,3三取代苯类型的特征吸收峰,说明反应生成了目标产物。

3.2 低温固化环氧树脂灌浆材料的性能

(1) 稀释剂含量对浆液黏度的影响

稀释剂为一种柔性环氧树脂,黏度只有 $180\sim 280\text{mPa}\cdot\text{s}$ (25°C),一方面可以降低主体环氧树脂的黏度,提高浆液的流动性,有利于施工操作;另一方面其本身分子链带有双环氧官能团,降低黏度的同时也可参与固化反应。实验将一定份数柔性环氧树脂与100份主体环氧树脂混合配制成环氧浆液A组分,测试其含量对A组分黏度的影响,实验结果见图4,从图中可以看出,主体环氧树脂的黏度本身就很低,只有 $1000\text{mPa}\cdot\text{s}$ (25°C)左右,随着柔性环氧树脂含量的增加,环氧浆液A组分的黏度逐渐降低,主要是因为柔性环氧树脂分子链短且柔性好,黏度较低,分散到主体环氧树脂中可以使得分子运动阻力减小,运动能力增强。

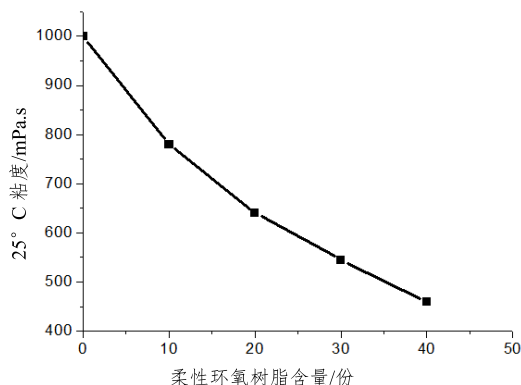


图4 柔性环氧树脂对环氧浆液A组分黏度的影响

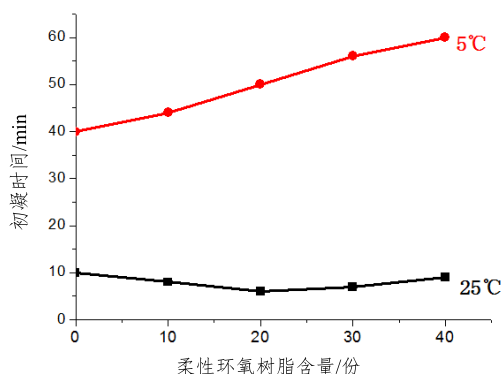


图5 柔性环氧树脂对环氧树脂灌浆材料初凝时间的影响

(2) 稀释剂含量对初凝时间的影响

柔性环氧树脂分子链带有双环氧官能团，会与主体环氧树脂的环氧基团竞争固化剂中的活泼氢，影响浆液的反应活性。实验将柔性环氧树脂含量不同的环氧浆液A组分与B组分按质量比5:1混合均匀，分别在室温25°C和低温5°C下测试柔性环氧树脂含量对凝时间的影响，实验结果见图5，从图中可以看出，在常温下，柔韧性环氧树脂的加入会促使反应加快，这是因为柔韧性环氧树脂环氧值更高，反应活性更强，与固化剂反应更快，释放较多热量使固化反应速度加快。而在低温情况下，柔韧性环氧树脂的加入使固化反应变慢，这是因为在低温下，一方面柔韧性环氧树脂与固化剂反应放出的热量快速释放到环境中，不能加速反应，另一方面柔韧性环氧树脂降低了体系黏度，随着固化反应的进行，黏度上升更缓慢，需要更长时间达到不能流动的状态，即初凝。

此外，从图5中还可以看出，环氧树脂灌浆材料在低温下的初凝时间比室温下长很多。这是因为在低温下浆液的黏度会比常温条件下高很多，黏度较大，不利于分子间自由地移动，会减少固化剂中活性分子与环氧分子发生活性碰撞的可能，从而降低固化的速度，另外温度较低也会使得体系中反应释放的热量快速释放到环境中，使得浆液的温度很难快速上升，进一步降低了固化速度。

(3) 固化剂使用量对初凝时间的影响

固化剂的使用量对环氧树脂灌浆材料的固化速度有较大影响，实验将100份主体环氧树脂与20份柔性环氧树脂混合配制成环氧浆液A组分，然后将不同质量比的A组分与固化剂混合，分别在室温25°C和低温5°C下测试固化剂使用量对初凝时间的影响，实验结果如表1，从表中可以看出，不管在室温还是低温条件下，随着固化剂使用量的增加，环氧树脂灌浆材料的初凝时间都变短；在低温情况下，固化速度受固化剂使用量的影响更大。当A组分与固化剂的质量比由6:1变到4:1时，室温初凝时间由10min缩短到5min，低温初凝时间由90min缩短到30min，在低温情况下，增加固化剂的使用量可以有效加快固化速度。

表1 固化剂对环氧树脂灌浆材料初凝时间的影响

$m_A:m_B$	25℃初凝时间/min	5℃初凝时间/min
4:1	5	30
5:1	6	50
6:1	10	90

(4) 固化剂使用量对抗压强度的影响

固化剂的使用量对环氧树脂灌浆材料的性能有较大影响,实验将100份主体环氧树脂与20份柔性环氧树脂混合配制成环氧浆液A组分,然后将不同质量比的A组分与固化剂混合,分别在室温25℃和低温5℃下测试固化剂使用量对抗压强度的影响,实验结果如表2,从表中可以看出,随着固化剂使用量的增加,环氧树脂灌浆材料的抗压强度提高。当A组分与固化剂的质量比由6:1变到4:1时,室温抗压强度由60 MPa提高到72 MPa,低温抗压强度由45 MPa提高到60 MPa。与在室温条件下相比,在低温情况下,材料的固化速度明显变慢,强度上升速度也变慢,经过近一个月的时间,强度为室温条件下的80%左右,要完全固化需要更长时间。

表2 固化剂对环氧树脂灌浆材料抗压强度的影响

$m_A:m_B$	(25℃, 28d) 抗压强度/MPa	(5℃, 28d) 抗压强度/MPa
4:1	72	60
5:1	67	52
6:1	60	45

4 结语

(1) 以硫脲与二乙烯三胺为原料,合成含有硫脲基团的改性胺,再由多聚甲醛、苯酚与硫脲改性胺发生曼尼斯反应,制备含硫脲基团的曼尼斯碱固化剂,该固化剂能够实现环氧树脂的低温快速固化。

(2) 活性稀释剂柔韧性环氧树脂能够有效降低主体环氧树脂体系的黏度,且在常温下,柔韧性环氧树脂的加入会促使固化反应加快,初凝时间变短,而在低温下正好相反。

(3) 固化剂的使用量对材料的固化速度有明显影响,当A组分(环氧树脂体系)与B组分(固化剂)的质量比由6:1变到4:1时,室温初凝时间由10min缩短到5min,低温初凝时间由90min缩短到30min,室温抗压强度由60 MPa提高到72 MPa,低温抗压强度由45 MPa提高到60 MPa,在低温情况下,增加固化剂的含量可以更有效的加快固化速度。

参考文献:

- [1] 魏涛,汪在芹,韩炜,等. 环氧树脂灌浆材料的种类及其在工程中的应用[J]. 长江科学院院报, 2010, 26(7):69-72.
- [2] 邹海良,张亚峰,邝健政,等. 弹性环氧灌浆材料的性能研究[J]. 新型建筑材料, 2009, 10:73-78.

- [3] 邱建华, 谢永江, 李化建, 等. 环氧树脂灌浆材料的制备及其性能研究[J]. 新型建筑材料, 2010, 10:62-65.
- [4] 曾志文, 张夏虹. 潮湿固化环氧化学灌浆材料的研制[J]. 水运工程, 2010, 10:19-22.
- [5] 胡张燕, 吴通宇, 李朝龙, 等. 多支化聚硫醇与环氧树脂的固化研究[J]. 塑料, 2009, 38(2):48-50.
- [6] 廖毅彬, 殷瑜, 寇亮亮, 等. 聚酯型聚硫醇固化剂的活性持久性的研究[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2014, 53(4):525-530.
- [7] 程秀莲, 霸书红, 周琦, 等. 硫脲改性三乙烯四胺环氧树脂固化剂的合成及性能研究[J]. 粘结, 2013, 2:41-44.
- [8] 马哲, 徐宇亮, 杨元龙, 等. 低温快速固化环氧树脂灌浆材料的制备及性能研究[J]. 新型建筑材料, 2014, 12:60-65.

Study on the low-temperature curing epoxy-resin grouting material

ZENG Juanjuan^{1, 2}, YANG Yuanlong^{1, 2}, Ma Zhe³

(1. Guangzhou Chemical Grouting Engineering Co.Ltd., CAS, Guangzhou, 510650; 2. Guangdong Prov. E.R.C. For Chemical Grouting, Guangzhou, 510650; 3. Guangzhou Chemistry Research Institute of Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, 510650)

Abstract: A Mannich base with thiourea group had been prepared by Mannich reaction of paraformaldehyde, phenol and thiourea modified amines which were synthesized by thiourea and diethylenetriamine, then, a new kind of low-temperature curing epoxy-resin grouting material was prepared by mixing with epoxy resin and reactive diluents. The effects of reactive diluent and curing agent on the properties of epoxy-resin grouting material were investigated. The results showed that the viscosity was adjusted in 500-1000 mPa.s, the compressive strength of consolidation was greater than or equal to 60 MPa, the initial setting time at room temperature (25°C) was adjusted in 5-10 min, and the initial setting time at low temperature (5°C) was adjusted in 30-90 min. This grouting material can be used for reinforcing and plugging at low temperature.

Keyword: grouting material; epoxy resin; low-temperature curing

重金属污染地基土处理的新型固化剂研究

黄沅清, 杨元龙, 于方, 吴龙梅, 曾娟娟

(中科院广州化灌工程有限公司, 广东 广州 510650)

摘要: 本试验以水泥、生石灰、膨润土、麦饭石和含磷物料为原料, 组配了六种固化剂, 将其应用于某重金属污染地基土的修复, 通过测定固化体无侧限抗压强度和重金属毒性浸出试验对固化/稳定化效果进行分析和评价。结果表明, 固化剂的加入使得固化体的 pH 值升高了 2.5~4.4。当固化剂添加量为 25%, 含水率为 30%, 养护时间为 28 d 时, A、B、C 和 E 组能达到 US EPA 针对填埋场无侧限抗压强度 q_u (350 kPa) 的要求。A~F 组固化剂均能很好地固定地基土中的重金属, 添加固化剂后各组的 Cd、Pb、Cu 和 Zn 的浸出浓度都没有超过《危险废物填埋污染控制标准》的标准限值。

关键词: 地基土; 重金属; 固化剂; 无侧限抗压强度; 毒性浸出;

1 引言

随着城市化进程的加快和产业结构的调整, 我国由工业企业搬迁而废弃遗留下来的“棕地”超过 50 多万块, 成为许多大中城市土地资源安全再利用的限制因素^[1]。由于长期以来工业废水的排放及金属冶炼, 重金属污染的场地日益增多。重金属污染带来的严重后果使得重金属污染场地的治理成为亟待解决的任务。近年来, 重金属污染地基土的修复和治理成为研究热点。

重金属具有毒性大和超累积等特性, 治理难度大。目前重金属污染地基土修复技术主要有: 换填法、生物修复法、化学固定法、淋洗法和电动修复法等^[2,3]。其中, 换填法只适用于小面积、重度污染地基土, 且成本高; 生物修复法费用低, 但周期长、受污染物类型限制大; 淋洗法成本高, 且存在二次污染的风险; 电动修复法在不同土质地基土中效果不一, 甚至有相反作用, 且成本高操作设备复杂, 不利于大面积使用。重金属污染地基土固化/稳定化技术是通过添加不同外源物质(即固化剂)使地基土形成具有一定强度和化学稳定性的固化体, 从而降低重金属迁移性和生物有效性的一种重要方法。由于操作方便和效果快速, 使其在污染地基土治理过程中有着不可替代的作用。

目前国内外研究较多的重金属污染固化剂有水泥及其他凝硬性材料^[4,5]、石灰等碱性物质^[5,6]、膨润土等黏土矿物^[7,8]和含磷物料^[9,10]等。对固化效果的评价多限于重金属的浸出浓度和形态分析等化学指标, 针对固化体的物理化学综合指标的研究较少。本研究以水泥、石灰、膨润土、麦饭石和含磷物质为主要配方组成复合固化剂, 从环境岩土工程学的角度研究复合固化剂对某钢铁厂污染地基土的固化修复效果, 以重金属浸出毒性和无侧限抗压强度为固化效果评价指标, 考察不同类型和比例的固化剂、水添加量和养护时间对钢铁厂

收稿日期: 2016 年 10 月

污染地基土的固化效果, 为实际修复工程提供参考。

2 材料和方法

2.1 试验材料

污染地基土采自广东省某钢铁冶炼厂搬迁区域, 该钢铁厂已运行 56 年。污染地基土经自然风干后剔除石砾和砖块, 过 20 目筛后保存为试验土样品。按照土壤分析测试的国家标准方法^[11-14]测试地基土基本理化性质和重金属污染物浓度, 结果如表 1 所示。按照国家环境保护行业标准固体废物毒性浸出方法 (HJ/T299-2007) 浸出时, 浸出液中 Cu 和 Zn 的浸出浓度未超过《生活垃圾填埋场污染控制标准》^[15]的标准限值; Cd 和 Pb 的浸出浓度分别超过标准限值 186.5 倍和 169.6 倍。遭受极端性酸雨时, 重金属 Cu 和 Zn 的浸出将进一步加剧, 其潜在危害较大。因此, 在对污染地基土进行固化/稳定化处理及安全填埋时, 主要考虑固化体中重金属 Cd、Pb、Cu 和 Zn 的浸出毒性和无侧限抗压强度。

表 1 污染地基土基本理化性质

pH	$\omega(\text{OH})/\%$	CEC/ cmol/kg	$\omega/\text{mg/kg}$				浸出浓度 C/mg/L			
			Cd	Pb	Cu	Zn	Cd	Pb	Cu	Zn
8.1	9.7	10.1	12.5	117	140	400	1.8	8.9	10.9	12.6

试验用水泥为 42.5R 普通硅酸盐水泥; 麦饭石购自上海椰青环保科技有限公司; 商业磷灰石购自泰州市长浦化学试剂有限公司; 氧化钙购自上海强顺化学试剂有限公司; 膨润土购自上海市四赫维化工有限公司; 骨粉含磷量达 20%~30%。各物质组成如表 2。

表 2 水泥、麦饭石、膨润土和磷灰石的物质组成

名称	$\omega/\%$										烧失量%
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	FeO	K ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	F	
水泥	26.10	9.50	46.80	2.10	0.80	/	0.70	1.30	/	/	5.40
麦饭石	68.20	15.40	/	3.10	/	4.20	4.20	/	/	/	2.6
膨润土	69	15.90	2	1.90	0.24	/	0.16	0.91	0.03	/	5.7
磷灰石	9.30	2.30	46.40	/	/	/	/	/	12.10	1.90	12.80

2.2 试验方法

六种固化剂按表 3 配成, 将一定量的固化剂 (15%、20%和 25%) 分别和地基土充分混合, 加入适量水 (30%、40%和 50%) 并参照土工试验标准 HGJT 233-2011, 装入 70.7 mm × 70.7 mm × 70.7 mm 的塑料试模中, 手动压实后放入养护箱, 养护条件为 RH = 95%, 温度为 20±1℃。以不添加固化剂的空白组作对比, 试样编号为 CK。分别在固化体养护 7 d、14 d 和 28 d 脱模, 测定固化体的 pH 和无侧限抗压强度, pH 的测定根据标准 NY/T 1377-2007 进行, 无侧限抗压强度用万能拉力试验机测定。选择无侧限抗压强度较优条件下的固化剂

添加比例和水的添加比例, 按照国家环境保护行业标准固体废物毒性浸出方法 (HJ/T299-2007) 进行浸出毒性试验。用原子吸收分光光度计 (日立 Z-2000) 测定样品中 Cd、Zn、Cu 和 Pb 的浓度。

表3 固化剂配方 (%)

编号	水泥	麦饭石	膨润土	石灰	磷灰石	KH ₂ PO ₄	骨粉
A	30	30	10	15	10	5	/
B	30	20	20	15	/	5	10
C	45	20	15	15	5	/	/
D	35	35	/	15	10	5	/
E	35	/	35	15	10	5	/
F	20	20	/	20	20	10	10

3 结果与讨论

3.1 pH 值

试验研究了复合固化剂添加量、含水量和养护时间对固化体 pH 的影响, 其中固化剂添加量对固化体 pH 的影响较大, 如表 4 所示。随着固化剂添加量的增加, 固化体的 pH 随之增大。当固化剂添加量为 25%, 含水率为 40%, 养护时间为 7 d 时, 固化体的 pH 值升高了 2.5~4.4。养护时间对固化体 pH 影响较小, 养护 7 d 时, pH 已达到最大值; 随着养护时间的增加, pH 值保持不变。众多研究表明, pH 的升高有利于 Cd、Zn、Cu 和 Pb 等形成氢氧化物沉淀, 从而降低重金属的迁移性^[16-18]。此外, 固化体 pH 也间接代表了水泥水化程度, 高 pH 说明水泥水化更充分, 这也是水泥发挥固化效果的前提^[4, 19]。

表4 固化剂添加量对固化体 pH 值的影响 (7d, $\omega(\text{OH}) = 40\%$)

固化剂添加量/%	CK	A	B	C	D	E	F
0	8.1						
15		10.0	10.2	9.6	10.3	9.5	10.6
20		10.7	11.1	10.3	11.2	10.1	11.0
25		11.5	11.8	11.0	12.0	10.6	12.5

3.2 无侧限抗压强度

试验研究了养护时间、含水量和复合固化剂添加量对固化体无侧限抗压强度的影响, 结果表明养护时间、含水量和复合固化剂添加量都对固化体无侧限抗压强度有较大的影响。为研究固化体自然强度增长特性, 取复合固化剂添加量为 25%, 水添加量为 40%, 养护龄期为别为 7 d、14 d 和 28 d。如图 1 所示, A~E 组的无侧限抗压强度都随养护时间的增加而增加, 空白组 CK 和 F 组的无侧限抗压强度很低且随养护时间增加无明显变化。CK 组是由于未添加任何固化剂而导致这种现象。F 组可能是由于水泥添加量少且未添加膨润

土, 导致固化体保持较湿润的状态, 强度低。在复合固化剂添加量为 25%、水添加量为 40% 的条件下, A 组养护 14 d 和 28 d、C 组养护 28 d 能达到 US EPA 针对填埋场无侧限抗压强度 q_u (350 kPa) 的要求。

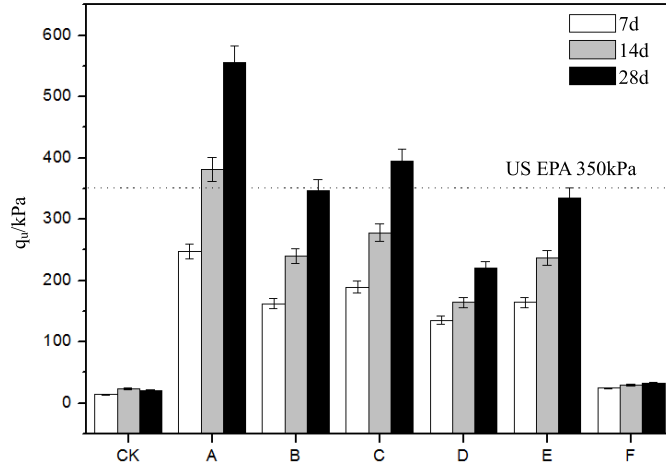


图 1 养护时间对固化体无侧限抗压强度 q_u 的影响 ($\omega=25\%$, $\omega(\text{OH})=40\%$)

图 2 所示为含水率对固化体无侧限抗压强度 q_u 的影响, 随着含水率的增加, 固化体无侧限抗压强度降低。尤其是当固化体的含水率由 40% 增加至 50% 时, 固化体的抗压强度出现明显下降。含水率的增加有利于原位化学灌浆修复技术的实施, 但不利于增强固化体强度。在固化剂添加量为 25% 和养护时间为 28 d 的条件下, A 组含水率 30% 和 40%、B 组含水率 30%、C 组含水率 30% 和 40%、E 组含水率 30% 能达到 US EPA 针对填埋场无侧限抗压强度 q_u (350 kPa) 的要求。

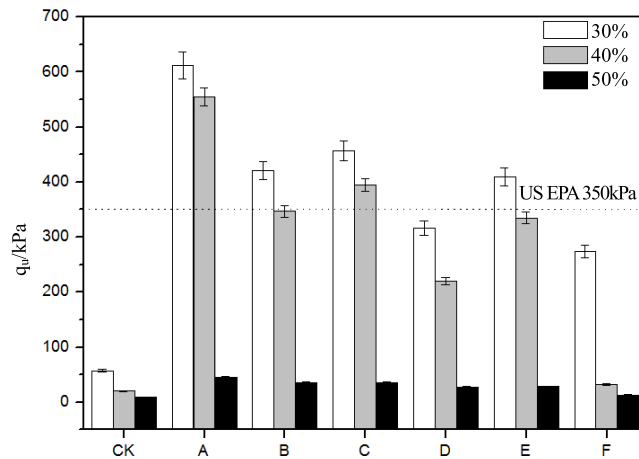


图 2 含水率对固化体无侧限抗压强度 q_u 的影响 (28 d, $\omega=25\%$)

图 3 所示为固化剂添加量对固化体无侧限抗压强度 q_u 的影响, 随着固化剂添加量的增

加, 固化体无侧限抗压强度随之增加。为了控制成本, 固化剂添加量不宜超过 30%。国外修复工程中, 固化剂添加量一般低于 20%。

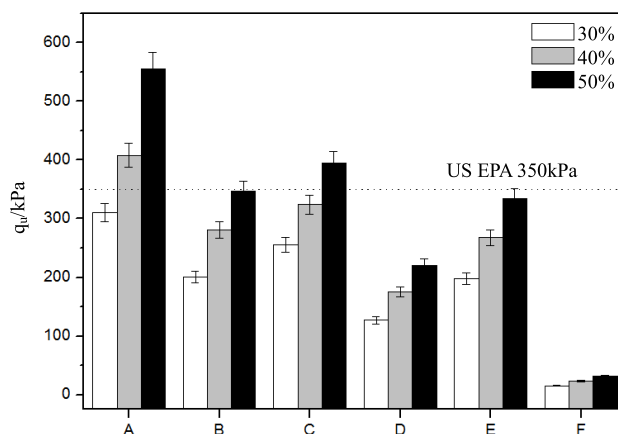


图3 固化剂添加量对固化体无侧限抗压强度 q_u 的影响 (28 d, $\omega(\text{OH}) = 40\%$)

综上, 从无侧限抗压强度的角度考虑, 固化剂较优配方为 A、C、B 和 E, 固化剂添加量为 25%, 含水率为 30%~40%, 养护时间为 28 d。固化体强度主要是由水泥水化作用产生的, 水泥中的熟料矿物和地基土中加入的水迅速发生化学反应, 生成具有空间网络结构的水合硅酸钙和水合铝酸钙等水合产物, 同时, 由于石灰的存在也会生成大量 $\text{Ca}(\text{OH})_2$, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 是一种碱性激发剂, 可快速激发固化体中的 SiO_2 、 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 等。活性 SiO_2 和 Al_2O_3 等具有不饱和键, 能与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 中的 Ca^{2+} 在有水的条件下形成 CaSiO_3 和 $\text{Ca}(\text{AlO}_2)_2$ 等水化物。水化物的胶凝作用将飞灰中的重金属化合物胶结并包裹于其中, 也促进了固化体的强度提高^[4, 20, 21]。

3.3 重金属浸出浓度

在复合固化剂添加量为 25%、含水率为 40%的条件下, 对养护 28 d 后的固化体进行重金属毒性浸出试验, 试验结果如图 4 所示。与空白组 CK 相比, 添加固化剂后的固化体重金属浸出浓度明显下降, 添加固化剂后各组的 Cd、Pb、Cu 和 Zn 的浸出浓度分别低于 0.1 mg/L、0.5 mg/L、0.5 mg/L 及 1.5 mg/L, 都没有超过《危险废物填埋污染控制标准》^[15] 的标准限值。

作为一种胶凝材料, 水泥在固化过程中产生的水化产物, 在提高固化体强度的同时, 可能对重金属发生包胶、物理吸附、同晶置换、化学反应沉淀等物化作用, 将有毒、有害物质转化为低溶解性、低迁移性和低毒性的物质^[4, 5, 22]。生石灰常与水泥搭配以达到更好的固化效果^[5, 22]。生石灰的主要成分是 CaO , 可以提高固化体的 pH 值, 一方面有利于重金属离子形成氢氧化物沉淀, 从而降低其迁移性; 另一方面有利于水泥发生水化反应, 提高固化体强度。麦饭石是常用的黏土矿物, 因其多孔和海绵状结构, 再加上大的比表面积, 常用来吸附水体中重金属离子^[23]。但将其应用于土壤重金属修复的研究较少。膨润土是以蒙脱石为主要矿物成分的非金属矿产, 蒙脱石的晶胞结构具有较好的离子交换性, 可应用于土壤中重金属的吸附固定。且水泥-膨润土泥浆固结体具有良好的防渗效果。麦饭石和膨

润土可以通过吸附作用固定土壤中的重金属。磷灰石、 KH_2PO_4 、骨粉都是含磷物料。磷灰石族矿物能和多种重金属离子发生离子交换吸附、表面络合吸附及沉淀等作用,对重金属离子有很好的固定作用。骨粉主要成分为磷酸三钙,常作为含磷物质被用于修复环境重金属污染。由于磷灰石和骨粉含磷量较低,故加入少量 KH_2PO_4 提高其修复性能^[9, 24]。

综上,结合无侧限抗压强度和重金属毒性浸出试验,试验得出固化剂较优配方为A、C、B和E,固化剂添加量为25%,含水率为30%~40%,养护时间为28 d。

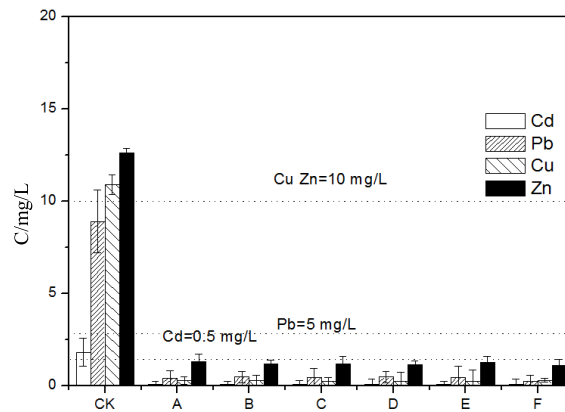


图4 固化体的重金属浸出浓度 (ω=25%, 28 d, ω(OH) = 40%)

4 结论

本试验以水泥、石灰、膨润土、麦饭石和含磷物料为原料,组配了六种固化剂,并将其应用于某钢铁厂污染地基土的修复,得出以下结论:

(1) 当固化剂添加量为25%,含水率为40%,养护时间为7 d时,固化体的pH值升高了2.5~4.4。

(2) 根据固化体的无侧限抗压强度,固化剂较优配方为A、C、B和E,固化剂添加量为25%,含水率为30%~40%,养护时间为28 d。

(3) A~F固化剂均能很好地固定地基土中的重金属,添加固化剂后各组的Cd、Pb、Cu和Zn的浸出浓度都没有超过《生活垃圾填埋场污染控制标准》的标准限值。

(4) 综合无侧限抗压强度和重金属毒性浸出试验,固化剂较优配方为A、C、B和E,固化剂添加量为25%,含水率为30%~40%,养护时间为28 d。

参考文献:

- [1] 陈梦舫. 我国工业污染场地土壤与地下水重金属修复技术综述[J]. 中国科学院院刊, 2014, 3:327-335.
- [2] 黄益宗, 郝晓伟, 雷鸣, 等. 重金属污染土壤修复技术及其修复实践[J]. 农业环境科学学报, 2013, 3:409-417.
- [3] 杨勇, 何艳明, 栾景丽, 等. 国际污染场地土壤修复技术综合分析[J]. 环境科学与技术, 2012, 10:92-98.
- [4] CHEN Q Y, TYRER M, HILLS C D, et al. Immobilisation of heavy metal in cement-based solidification/

- stabilisation: a review [J]. *Waste management*, 2009, 29(1):390-403.
- [5] 关亮, 郭观林, 汪群慧, 等. 不同胶结材料对重金属污染土壤的固化效果[J]. *环境科学研究*, 2010, 1:106-111.
- [6] 薛永杰, 朱书景, 侯浩波. 石灰粉煤灰固化重金属污染土壤的试验研究[J]. *粉煤灰*, 2007, 3:10-12.
- [7] SUN Y, LI Y, XU Y, et al. In situ stabilization remediation of cadmium (Cd) and lead (Pb) co-contaminated paddy soil using bentonite [J]. *Applied Clay Science*, 2015, 105:200-260.
- [8] 赵秋香, 黄晓纯, 李媛媛, 等. 蒙脱石-OR-SH 复合体修复剂对重金属污染土壤中 Cd 的钝化效果 [J]. *环境化学*, 2014, 11:1871-1877.
- [9] DU Y-J, WEI M-L, REDDY K R, et al. New phosphate-based binder for stabilization of soils contaminated with heavy metals: Leaching, strength and microstructure characterization [J]. *Journal of Environmental Management*, 2014, 146C: 179-188.
- [10] 王利, 李永华, 姬艳芳, 等. 羟基磷灰石和氯化钾联用修复铅锌矿区铅镉污染土壤的研究 [J]. *环境科学*, 2011, 7:2114-2118.
- [11] GB/T17138-1997. 铜、锌的测定 火焰原子吸收分光光度法[S]. 1997.
- [12] GB7863-1987. 森林土壤阳离子交换量的测定[S]. 1987.
- [13] GB7859-1987. 森林土壤 pH 值的测定[S]. 1987.
- [14] GB7172-1987. 土壤水分测定法[S]. 1987.
- [15] GB18598-2001. 危险废物填埋污染控制标准[J]. 2001.
- [16] 曹心德, 魏晓欣, 代革联, 等. 土壤重金属复合污染及其化学钝化修复技术研究进展[J]. *环境工程学报*, 2011, 7:1441-1453.
- [17] 李翔, 宋云, 刘永兵. 石灰干化污泥稳定后土壤中 Pb、Cd 和 Zn 浸出行为的研究[J]. *环境科学*, 2014, 5:1946-1954.
- [18] 周慜, 张萌, 陆友伟, 等. 土壤中 Pb、Cd 的稳定化修复技术研究进展[J]. *环境污染与防治*, 2015, 05: 83-9.
- [19] DU Y-J, WEI M-L, REDDY K R, et al. Effect of carbonation on leachability, strength and microstructural characteristics of KMP binder stabilized Zn and Pb contaminated soils[J]. *Chemosphere*, 2016, 144: 1033-1042.
- [20] 李先旺, 薛强, 胡竹云, 等. 垃圾焚烧飞灰水泥固化体强度稳定性研究[J]. *岩土力学*, 2013, 34(3):51-56.
- [21] GIERGICZNY Z, KROL A. Immobilization of heavy metals (Pb, Cu, Cr, Zn, Cd, Mn) in the mineral additions containing concrete composites [J]. *Journal of hazardous materials*, 2008, 160(2-3): 247-255.
- [22] 陈灿, 谢伟强, 李小明, 等. 水泥、粉煤灰及生石灰固化/稳定处理铅锌废渣[J]. *环境化学*, 2015, 34(8): 1553-1560.
- [23] 李娟, 张高英, 宋相国, 等. 麦饭石的理化性能及其在水质优化中的应用[J]. *环境科学与技术*, 2008, 31(10): 63-66.
- [24] 丁淑芳, 谢正苗, 吴卫红, 等. 含磷物质原位化学钝化重金属污染土壤的研究进展[J]. *安徽农业科学*, 2012, 35:17093-17097.

Solidification/stabilization treatment of heavy metals for foundation soil by using new compound solidifiers

Huang Yuanqing, Yang Yuanlong, Xue Wei, Yu Fang, Wu Longmei, Zeng Juanjuan

(Guangdong Prov, E.R.C.for chemical grouting, Guangzhou 510650, Guangdong, China)

Abstract:Six kind of solidifiers were prepared by cement, quick lime, bentonite, maifan stone and phosphorus materials to immobilize heavy metal contaminated soil sampled from a steel plant. The efficiency of the process was evaluated through unconfined compressive strength and leaching tests. The results showed that the pH values increased by 2.5~4.4 with the addition of solidifiers. When the ratio of solidifier to soil was 25%, moisture content of soil was 30%, the unconfined compressive strength of A, B, C and E group met the requirement of standard for US EPA. The leached concentrations of Cd、Pb、Cu and Zn in all group also met the requirement of standard for pollution control on the landfill site of municipal solid waste.

Key words:foundation soil; heavy metals; solidifiers; unconfined compressive strength; leaching performance;

适应混凝土变形的环氧树脂堵漏材料研究

曾娟娟, 杨元龙, 张维欣

(中科院广州化灌工程有限公司, 广东 广州 510650)

摘要: 采用低分子多胺、多聚甲醛与长链酚的曼尼斯反应合成酚醛胺, 再配以聚醚胺和促进剂制备出一种柔韧性环氧树脂固化剂, 同时通过共混改性的方法对环氧树脂进行改性, 制备一种柔韧性环氧树脂堵漏材料, 该材料在混凝土裂缝中固化后能够随着混凝土的形变而发生形变。研究了活性稀释剂、增韧剂和固化剂含量对环氧堵漏材料性能的影响。通过配方的优化, 得到了一种可灌性好、性能优异的堵漏材料。

关键词: 环氧树脂; 柔韧性; 堵漏材料

1 引言

随着国民经济的快速发展, 我国城市地铁建设十分迅速。地铁工程设计的使用寿命长达百年, 然而受地质条件的不同, 新旧结构的搭接, 地铁隧道不同施工工艺的结构之间结合, 混凝土自身的收缩, 施工质量, 地下水等因素的影响, 地铁混凝土结构的裂缝、变形缝、施工缝、缺陷等不可避免的存在一定程度的渗漏水, 渗漏水的存在一方面给地铁的安全运营带来潜在的安全隐患, 另一方面极大的影响混凝土结构的耐久性, 严重影响地铁系统的使用寿命^[1,2]。通过使用灌浆堵漏材料可以有效的对地铁的渗漏水进行治理, 消除隐患, 延长地铁系统的使用寿命。环氧树脂灌浆材料具有优良的力学性能, 能有效在水介质中快速固化, 而且固结体强度高、与混凝土粘结性能良好、收缩率低, 耐酸、碱、盐等性能优异, 同时兼顾了堵漏和加固的作用, 在地铁渗漏水治理方面具有广阔的应用前景^[3-5]。

环氧树脂灌浆材料一般分为两个组分, 一个组分以环氧树脂为主体, 另一个组分为固化剂, 最常使用的固化剂主要为小分子多元胺, 其反应速度快、可室温固化, 但是分子量较低、挥发性大、毒性大, 对人体伤害也大; 由于反应速度过快, 使固化收缩应力大、易开裂、性脆; 并且固化剂用量少, 配比要求严格, 给使用者带来不便^[6]。本文采用低分子多胺、多聚甲醛与长链酚的曼尼斯反应, 制备一种柔韧性的酚醛胺固化剂, 克服了传统小分子多元胺固化剂的上述缺点; 同时采用共混改性的方法对环氧树脂进行改性, 制备出一种柔韧性环氧树脂堵漏材料。

2 实验部分

2.1 原材料与实验仪器

环氧树脂、活性稀释剂、增韧剂、长链酚、多聚甲醛、低分子多胺、聚醚胺和促进剂

收稿日期: 2016 年 10 月

均为工业品。

傅立叶红外光谱仪, 美国 Analect 公司; NDJ-1 型旋转黏度计, 上海精科天平仪器厂; WDW3020 型微机控制电子万能试验机, 长春科新试验仪器有限公司; 恒温恒湿试验箱, 华南仪器设备有限公司。

2.2 环氧树脂灌浆材料的制备

在带有回流冷凝器的反应器中加入定量的长链酚和低分子多胺, 升温到 50°C , 边搅拌边分批加入多聚甲醛, 体系升温到 $(80\pm 5)^{\circ}\text{C}$ 回流反应 3 小时, 冷却至 50°C 即得到酚醛胺, 再加入聚醚胺和促进剂混合均匀, 得到固化剂。

将环氧树脂、活性稀释剂和增韧剂以不同比例混合均匀, 作为 A 组分; 固化剂作为 B 组分。A、B 组分按照质量 2:1 混合均匀, 即得到环氧树脂灌浆材料。

2.3 测试方法

(1) 黏度

按 GB/T 2794-1995 进行测试。

(2) FTIR 分析

采用美国 Analect 公司 RFX-65A 傅里叶红外转换光谱仪测试。

(3) 水中初始凝胶时间

在实验室标准条件下 (温度 $(23\pm 2)^{\circ}\text{C}$, 相对湿度 $(50\pm 10)\%$), 将浆液 A、B 组分按照一定质量比混合均匀并称量 45 克, 倒入一个 250ml 的玻璃烧杯中, 使其铺展均匀。将 250ml 玻璃烧杯放入一个 3000ml 的玻璃烧杯中, 将水倒入到 3000ml 的刻度处。每隔 10min 用玻璃棒接触一次浆液混合体的表面, 直到出现“拉丝”现象。记录此时经过的时间, 则该时间为环氧树脂堵漏材料在水中的初始凝胶时间。精确到 10min。

(4) 抗压强度

按照 GB/T2567-2008《树脂浇注体性能测试》, 截取试样为直径 10mm 高度 25mm 的圆柱体。浇注体在恒定温度下放置 28d 后, 使用 WDW3020 型微机控制电子万能试验机, 对同一试样进行 5 次测试, 记录样品破裂前所受最大压力下的压强值。

(5) 断裂伸长率

按 GB/T2568-1995 测试固结体的断裂伸长率。

(6) 水下粘结强度

试件制备: 按照 GB/T 16777-2008 第 7 章 7.2.1.4 要求制备“8”字型砂浆块。采用强度等级为 42.5 的普通硅酸盐水泥, 将水泥:中砂按照质量比 1:1 加入砂浆搅拌机中搅拌, 加水量以砂浆稠度 (70~90) mm 为准, 倒入模框中振实抹平, 然后移入养护室, 1d 后脱模, 水中养护 10d 后再在 $(50\pm 2)^{\circ}\text{C}$ 的烘箱中干燥 (24 ± 0.5) h, 取出在标准添加下放置备用, 同样制备 5 对砂浆试块。

试验器具: 拉力试验机, 拉伸速度 (5 ± 1) mm/min。

试验步骤: 将“8”字模拉断并泡于水中, 24h 后取出。将浆液 A、B 组分按照一定质量比混合均匀, 涂于“8”字模断面, 对接粘合后用橡皮筋固定好, 将粘合面水平放置, 立

即完全浸入(23±2)℃水中养护28天,取出后测其粘结强度。

3 结果与讨论

3.1 曼尼斯反应制备酚醛胺的红外光谱结构表征

长链酚、低分子多胺和合成酚醛胺的红外谱图如图1所示,在长链酚的红外谱图中,3342 cm^{-1} 附近的峰为酚-OH的吸收峰,1600~1400 cm^{-1} 区域的峰为苯环的吸收峰,3000~2800 cm^{-1} 区域的峰为烷烃链中C-H的吸收峰,3072 cm^{-1} 附近的峰为=C-H的吸收峰,此峰很弱说明长链酚中连接苯环的长烃链上有少量的C=C。在低分子多胺的红外谱图中,3400~3200 cm^{-1} 区域的双峰以及900~770 cm^{-1} 区域的峰为伯胺特有的吸收峰。合成的酚醛胺谱图中,3400~3200 cm^{-1} 区域的双峰逐渐变成单峰,以及900~770 cm^{-1} 区域的峰逐渐消失说明低分子多胺的端氨基发生了反应,此外,在1850~1650 cm^{-1} 区域未出现C=O的任何吸收峰,说明醛被反应完全,生成了目标产物酚醛胺。

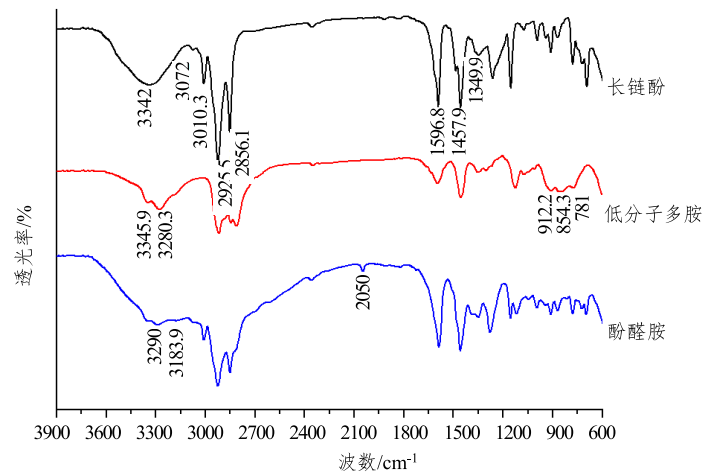


图1 曼尼斯反应合成酚醛胺的红外光谱

3.2 活性稀释剂对环氧树脂灌浆材料的性能

活性稀释剂为分子链上带有一个环氧官能团的低分子物质,其黏度很低,不到10 mPa.s (25℃),可以有效降低环氧树脂的黏度,同时可以参加固化反应,但是由于只含有一个环氧基团,参加反应后降低了环氧树脂的交联度,通常会使得材料的性能降低。实验将一定份数活性稀释剂与100份环氧树脂混合配制成环氧浆液A组分,测试其含量对A组分黏度和固结体抗压强度的影响,实验结果见图2和图3,从图中可以看出,随着稀释剂含量的增加,A组分的黏度先迅速下降,后下降速度变缓,而其抗压强度下降速度一直很快。这说明稀释剂添加量不能太多,否则严重影响材料的强度,本实验活性稀释剂含量在20份左右时,浆液的黏度比较适中,固结体强度也较高。

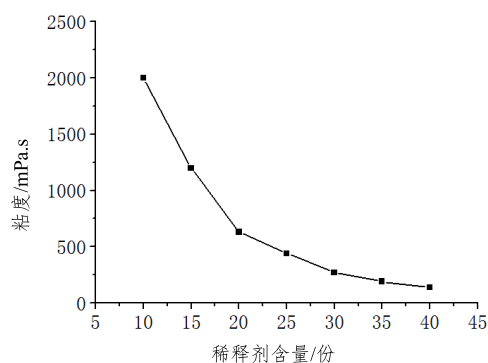


图 2 稀释剂含量对 A 组分黏度的影响

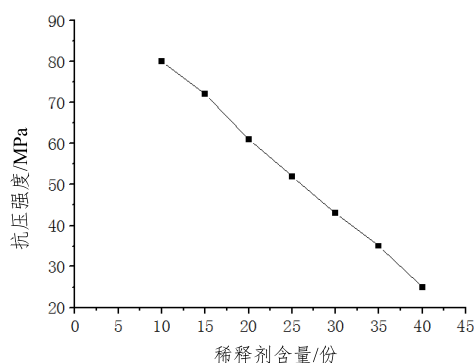


图 3 稀释剂含量对固结体抗压强度的影响

3.3 增韧剂含量对环氧树脂灌浆材料的性能

增韧剂一般为分子链柔性好的物质,通过共混对环氧树脂改性后,会大大改善环氧固结体的脆性,但同时也会对其强度产生一定影响。本实验采用 20 份活性稀释剂将 100 份环氧树脂稀释后,再以不同份数的增韧剂对其改性,测试增韧剂含量对固结体性能的影响,实验结果见图 4 和图 5,从图中可以看出,随着增韧剂含量的增加,材料的断裂伸长率前期增长较缓慢,中期迅速增长,后期增速趋于平缓,其抗压强度则缓慢下降。这说明增韧剂的添加量必须达到一定量时才能对材料的脆性有明显改善,但是也不可以添加太多,导致强度下降太多,本实验在增韧剂含量为 20 份的时候,材料的综合性能较好。

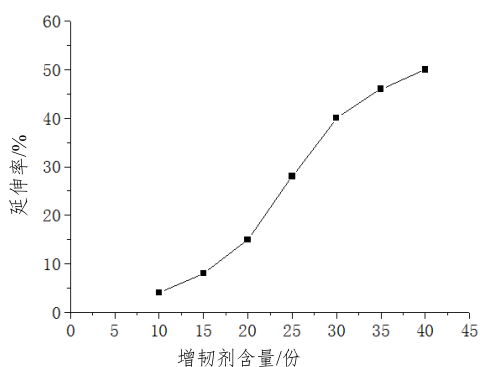


图 4 增韧剂含量对断裂伸长率的影响

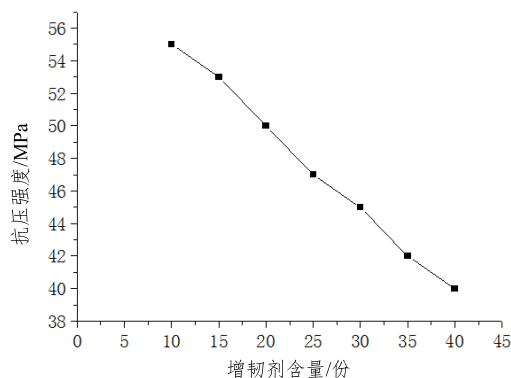


图 5 增韧剂含量对抗压强度的影响

3.4 固化剂含量对环氧树脂灌浆材料的性能

固化剂的使用量对环氧树脂灌浆材料的性能有较大影响,实验将 100 份环氧树脂、20 份活性稀释剂和 20 份增韧剂混合配制成环氧浆液 A 组分,然后将不同质量比的 A 组分与固化剂混合,测试固化剂使用量对初凝时间和抗压强度的影响,实验结果如表 1,从表中可以看出,随着固化剂使用量的增加,环氧树脂灌浆材料的水下初凝时间变短,抗压强度提高。当 A 组分与固化剂的质量由 3:1 变到 1:1 时,常温初凝时间由 240min 缩短到 50min,

抗压强度由 40 MPa 提高到 52 MPa。在 A 组分与固化剂的质量为 2:1 时,材料的综合性能较优。

表 1 固化剂对环氧树脂堵漏材料性能的影响

$m_A:m_B$	水下初凝时间/min	抗压强度/MPa	断裂伸长率/%	水下粘接强度/MPa
3:1	240	40	12	1.6
2:1	120	49	15	1.7
1:1	50	52	10	1.7

4 结语

采用长链酚、多聚甲醛和低分子多胺的曼尼斯反应合成了一种酚醛胺,再配以聚醚胺和促进剂得到一种柔韧性环氧树脂固化剂。经过配比试验,得到一个较佳的配方,将 100 份环氧树脂、20 活性稀释剂和 20 份增韧剂混合配制成环氧浆液 A 组分,然后将 A 组分与固化剂以质量比 2:1 混合,浆液的初始粘度在 500 MPa.s 左右,水下初凝时间 120min,固结体抗压强度 49MPa,断裂伸长率 15%,水下粘接强度 1.7 MPa。此环氧灌浆材料可灌性好,施工方便,水下凝固速度快,柔韧性好,在混凝土裂缝中固化后能够随着混凝土的形变而发生形变,是一种柔韧性环氧树脂堵漏材料。

参考文献:

- [1] 雷永生,邓国华. 城市地下铁道工程防水技术探讨[J]. 地下空间与工程学报, 2012, 8(3):637-644.
- [2] 张运勋,彭纪超,王玖玲,等. 地铁漏水事故及原因分析[J]. 交通企业管理, 2013,11:62-64.
- [3] 魏涛,汪在芹,韩炜,等. 环氧树脂灌浆材料的种类及其在工程中的应用[J]. 长江科学院院报, 2010, 26(7):69-72.
- [4] 邹海良,张亚峰,邝健政,等. 弹性环氧灌浆材料的性能研究[J]. 新型建筑材料, 2009, 10:73-78.
- [5] 邱建华,谢永江,李化建,等. 环氧树脂灌浆材料的制备及其性能研究[J]. 新型建筑材料, 2010,10: 62-65.
- [6] 刘守贵,甘国华,王家贵. 环氧树脂胺系固化剂改性综述[J]. 水运工程, 1996, 4:46-52.

便携式化学灌浆泵的研制

于方^{1,2}, 全志坚¹, 张维欣^{1,2}

(1. 中科院广州化灌工程有限公司, 广州 510650; 2. 广东省化学灌浆工程技术研究开发中心, 广州 510650)

摘要: 运营中地铁渗漏治理因其可施工时间短, 质量要求高等特点, 对灌浆泵的性能提出了较高的要求。针对其要求研制了一种搅拌均匀、施工速度快、压力可调的高效新型环氧树脂灌浆泵。该灌浆泵经过测试, 设备性能可靠、操作简单、维修方便, 满足运营中地铁施工的要求。

关键词: 地铁; 渗漏治理; 环氧树脂; 灌浆泵

1 前言

随着中国经济建设的不断发展, 地铁建设规模不断增大, 截止 2014 年, 中国内地已开通地铁的城市有 22 个, 已运营地铁中渗漏水的问题也日益突出。以西安地铁为例, 截止 2014 年底, 西安地铁一号、二号出现反复渗漏点还有 228 处, 区间渗漏占的比重较大, 其中, 暗挖隧道共 75 处渗漏, 盾构渗漏共 107 处。一、二号线矿山隧道共约 16114 米, 盾构隧道共约 62256 米, 矿山法隧道渗漏比率为 4%, 盾构法隧道渗漏比率为 1.7%。矿山法隧道渗漏的部位主要是变形缝、施工缝、混凝土缺陷位置; 车站渗漏主要是车站主体与出入口相连的变形缝处、诱导缝、站厅的边墙的施工缝处及出入口电梯井内; 盾构隧道渗漏点主要在管片接缝、洞门环梁处。

地铁渗漏治理中, 很多不仅有堵漏的要求, 还有补强的要求。环氧树脂材料因其渗透性好, 强度高, 耐久性好的特性, 在地铁渗漏水治理中的应用不断增多, 而环氧树脂灌浆泵的研发相对滞后, 现有的设备存在很多不足的地方:

(1) 运营地铁中进行堵漏施工由于可施工时间短, 大概在夜间 12 点至凌晨 4 点左右。为了地铁运行的安全, 施工完成后设备每次都需拿出, 不能放在地铁隧道中。因此需要高度集成化, 重量轻、流量大、施工速度快的灌浆泵。现有的灌浆泵不满足要求。

(2) 环氧树脂灌浆材料分为 A, B 组份按一定比例混合搅拌均匀后才可进行灌浆, 在实际工程应用中, 因使用量一般较小, A, B 组份的混合搅拌通常采用人工搅拌的办法, 缺少一个统一的标准。因施工人员素质及工程环境的差异, 经常出现 A, B 组份混合后未经充分搅拌就使用的情况, 从而导致灌浆达不到预期的效果, 出现质量问题。

(3) 现在采用的环氧灌浆施工为纯压式, 灌浆泵输出功率恒定, 导致灌浆压力不可调。

2 设备的改进研制

为了解决上述搅拌不均、流量较小、压力不可控三个方面的问题, 我们对现有的灌浆设备进行了分析, 在电动灌浆泵的基础上改进最为合理, 图1为电动灌浆泵分解图。该改进工作共分为四个阶段。

2.1 第一阶段: 改1型灌浆泵的研制与测试

(1) 首先测试了原有电动灌浆泵的流量, 约为0.5L/min, 改进的目标为1.0 L/min左右, 流量增大100%左右。

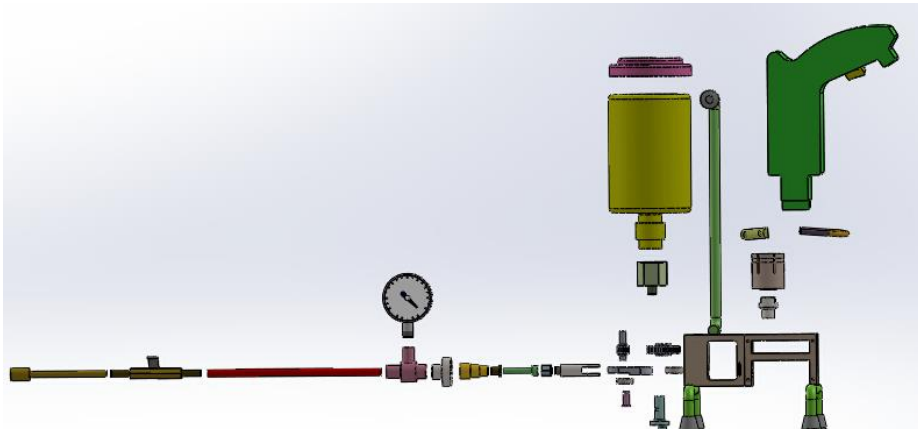


图1 电动灌浆泵分解图

(2) 为了增大流量, 首先想到的是增大动力, 将电动马达由560w增大到800w, 增加了42.86%。改动完成后称为改1型灌浆泵, 经测试, 改1型灌浆泵流量约为0.7 L/min, 增大了40%, 未达到目标。而一味的增大动力将会导致灌浆泵承受压力增大, 原有的材料和结构可能会不能满足强度的要求。

2.2 第二阶段: 改2型灌浆泵的研制与测试

(1) 通过对灌浆泵进行拆解分析, 增大灌浆泵活塞筒直径, 可以增加每次活塞筒压出的浆量从而增大流量。经过计算分析, 灌浆泵活塞筒直径由8mm增大到10mm, 活塞筒的端面积由50.24mm²增大到78.5 mm², 增加了56.25%, 即每次压出的浆量增加了56.25%。



图2 灌浆泵活塞筒及活塞杆结构图

(2) 采用 10mm 直径活塞筒做室内测试时, 发生了爆缸的现象, 经对比分析, 原因是活塞杆加工精度不足, 长了 1mm 而导致的, 改动后即能正常使用。

(3) 采用 800w 的电动马达, 10mm 直径活塞筒的改 2 型灌浆泵, 经室内测试流量达到 1.05L/min, 增大了 110%, 满足要求。

(4) 将改 2 型灌浆泵拿到工地现场进行工况下测试, 与原型号对比, 流量较大, 施工速度明显加快。但是用了 7 天之后, 发生故障, 拆解后, 是活塞杆磨损, 不能使用。

(5) 原活塞杆采用的是普通的模具钢, 耐磨性较差, 又采用钨钢进行替换, 替换后的灌浆泵拿到施工工地现场测试使用了 20 天左右, 没有出现问题。

2.3 第三阶段: 改 3 型灌浆泵的研制与测试

流量的问题解决之后, 针对压力不可调的问题, 对灌浆泵进行了分析, 可以从两个方面着手: 一个是改进电动马达, 一个是增加一个回流装置。通过价格对比, 最终选择增加回流装置。回流装置包括回流阀和回流管道, 活塞筒的出口连接回流管道和灌浆管道, 回流管道连接储浆罐的上端, 回流阀安装在回流管道上。通过手动控制回流阀的大小, 使输出的环氧树脂压力满足实时施工需求。

2.4 第四阶段: 改 4 型灌浆泵的研制与测试

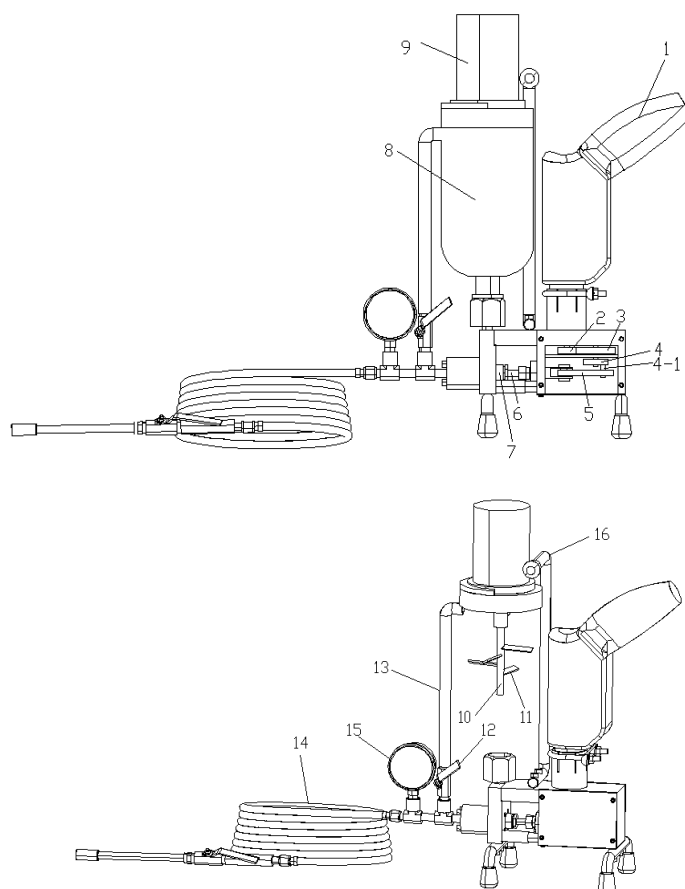
为了解决浆液搅拌不均匀的问题, 我们考虑增加一套搅拌装置。搅拌装置包括储浆罐、搅拌马达和搅拌杆, 搅拌马达的输出轴连接搅拌杆, 搅拌杆上设置有 4 个搅拌叶片, 4 个搅拌叶片相邻 90° , 4 个搅拌叶片从上往下等距排列, 4 个搅拌叶片均呈 45° 倾斜, 搅拌杆位于储浆罐内, 储浆罐的出口连通活塞筒; 如图 3 所示的环氧树脂灌浆泵, 包括灌浆装置、搅拌装置、回流装置和灌浆管道。

灌浆装置包括电动马达、减速齿轮、输出齿轮、偏心轮、摆杆、活塞杆和活塞筒, 减速齿轮安装在电动马达的输出轴上, 减速齿轮与输出齿轮啮合, 输出齿轮与偏心轮同轴, 偏心轮的拨杆连接摆杆, 摆杆末端与活塞杆铰接; 活塞筒的内径为 10mm, 面积为 78.5 mm^2 , 活塞筒的内芯采用钨钢材料, 提高耐磨性。电动马达 1 的功率为 800w, 最大输出流量为 0.95L/min。

搅拌装置包括储浆罐、搅拌马达和搅拌杆, 搅拌马达的输出轴连接搅拌杆, 搅拌杆上设置有 4 个搅拌叶片, 4 个搅拌叶片相邻 90° , 4 个搅拌叶片从上往下等距排列, 4 个搅拌叶片均呈 45° 倾斜, 搅拌杆位于储浆罐内, 储浆罐的出口连通活塞筒; 搅拌马达采用无级变速, 转速设置为 40~50 转/分钟; 根据 A、B 组份的比例不同, 搅拌时间设定为 2~3 分钟。灌浆管道上设有一个压力表。储浆罐和电动马达之间设有一个提手。

灌浆的过程中搅拌马达同时进行搅拌直至储浆罐中浆液灌完停止。从而采用量化搅拌时间的办法来确定搅拌的标准, 使环氧树脂材料 A、B 组份得到充分的搅拌混合。

回流装置包括回流阀和回流管道, 活塞筒的出口连接回流管道和灌浆管道, 回流管道连接储浆罐的上端, 回流阀安装在回流管道上。



1.电动机; 2.减速齿轮; 3.输出齿轮; 4.偏心轮; 4-1.拨杆; 5.摆杆; 6.活塞杆; 7.活塞筒; 8.储浆罐; 9.搅拌马达; 10.搅拌杆; 11.搅拌叶片; 12.回流阀; 13.回流管道; 14.灌浆管道; 15.压力表; 16.提手

图3 环氧树脂灌浆泵

3 工程应用

为了检验环氧树脂灌浆泵的性能及施工工艺,于2015年4~8月在某地铁1号线道床渗漏水点进行了现场测试。在近5个月的现场测试中,灌浆流量在 $0.95\text{L}/\text{min}\sim 1.1\text{L}/\text{min}$,达到设计要求;搅拌器运转正常,转速为 $40\sim 50$ 转/ min ,搅拌时间为 $2\sim 3$ min,可以很好的完成环氧树脂A、B组份的混合;压力可以通过手动控制回流阀的大小,使输出的压力满足实时施工需求。经过测试,环氧树脂灌浆泵满足运营中地铁施工要求,灌浆设备各部件运转正常可靠,未发生机械故障。施工工艺如下:

道床翻浆冒泥情况如图4所示,施工工艺如下:

(1) 调查可能发生渗漏点的范围,测算道床厚度。



图4 道床翻浆冒泥情况

(2) 对隧道断面道床两侧冒水、翻浆、冒泥部位进行封闭导流，即于边墙与道床交汇处沿线路方向在渗漏范围内凿“V”形槽，上口宽 60mm，深 60mm。清除槽内的杂质，于槽内每隔 500~600mm 埋设 $\Phi 8$ 铝管，保证预埋管口不受阻。然后分段在预埋管间的剩余“V”形槽底填塞棉纱，起到临时止水作用，接着及时用堵漏王对槽口进行充分封闭。以此法将水引导致预埋铝管内排出。

(3) 对道床进行系统布孔，孔距控制在 65~70 cm，钻孔深度至道床与隧道仰拱之间，具体根据竣工图测算。灌浆孔布置在发生渗漏段加上下游外各 2m 范围内。

(4) 配合环氧树脂 A 组份：环氧树脂 B 组份=A：B：C=5~7：1，为体积比。

(5) 灌浆采用新型环氧树脂灌浆泵进行灌浆，从道床的上游的孔位开始，每个孔位灌浆至相邻孔内溢出浆或者压力超过 2MPa 为止。对已溢出浆液的铝管用钳子夹弯，夹扁进行封闭。

(6) 灌浆结束后，待 48 小时，对道床凿槽位置进行磨平，填孔处理。

4 结论

研制的环氧树脂灌浆设备性能可靠、操作简单、维修方便。通过增加搅拌装置，可以很好的完成 A，B 组份的混合，克服了因施工人员素质及工程环境的差异，经常出现 A，B 组份混合后未经充分搅拌就使用的情况。该设备集成化高便以携带，流量大可加快施工进度，可较好地完成运营中地铁隧道堵漏施工的要求。压力可控：对于各种施工场合，需要不同的压力，甚至在同一施工场合，不同位置 and 不同阶段，也需要不同的压力，本灌浆泵能够通过压力表的读数，手动控制回流阀的大小，使输出的压力满足实时施工需求。该设备的研制成功，可以促进环氧树脂材料在运营地铁中渗漏水治理的应用。

参考文献：

- [1] 董建军, 尹作仿. HGB-1(2)型化学灌浆设备的研制[J]. 长江科学院院报, 2000, 17(6):15-17.
- [2] 李浩宇, 黄科. 化学灌浆设备浅析[J]. 中国建筑防水, 2011, 4:39-43.

成孔、安装、注浆三合一的锚索施工设备的研制

张文超, 薛炜

(1. 中科院广州化灌工程有限公司, 广州 510650; 2. 广东省化学灌浆工程技术研究开发中心, 广州 510650)

摘要: 锚索是基坑、边坡支护工程中常用的支护形式, 其施工工艺包括成孔、锚索安装、注浆三道工序, 现有的施工设备受技术条件限制, 将这三道工序分离, 造成施工效率低下。在现有锚索施工设备的基础上, 对钻进装置进行改进, 研制了新型锚索施工设备, 能够实现将成孔、锚索安装和注浆三道工序合而为一, 在一次钻进、退出钻杆过程中, 实现锚索施工的全部过程。新型设备不仅能够直接减少人工、降低成本, 亦可缩短工期, 并进而减小资金成本。

关键词: 锚索; 施工; 设备

1 前言

锚索是通过固结体将钢绞线的一端锚固于稳定的岩土层内, 在钢绞线的另一端(自由段)利用岩土层的锚固力承受施加于建筑物的荷载, 从而能够实现稳定结构的目的。我国的锚索技术最早起步于 20 世纪 70 年代, 彼时主要应用于煤矿巷道的支护, 经过几十年的发展, 锚索技术已经广泛应用于矿山、水电、建筑工程等领域。随着基坑工程的迅速发展, 锚索技术也广泛应用于基坑支护中^[1]。

相应的锚索施工设备及施工工艺也种类繁多^[2,3]。现有的锚索施工设备在施工锚索时均需要三道工序, 即成孔、安装、注浆。以 ZSDL-190 型全液压钻机为例, 一根锚索的施工过程首先要按设计要求钻孔, 之后退出钻杆, 人工安装锚索, 将预先制备好的锚索放入孔内, 最后再通过预埋的注浆管注浆。现有的施工设备将三道工序分离, 安装及拆卸钻杆、套管的时间占施工总时间的 60%以上, 造成施工效率低下, 且一根锚索施工包括钻机操作工人、锚索制作、安装工人及注浆操作工人, 通常为 6~7 人, 人工成本占比较高。

本文研制的新型锚索施工设备, 能够将成孔、安装、注浆三道工序合而为一, 不仅节省施工时间, 而且可减少 2~3 名人工, 具有广阔的应用前景^[4]。

2 组成结构及工作原理

研制的新型施工设备的目的将在成孔的同时将锚索安装在孔内, 并在拔出钻杆的同时

收稿日期: 2016 年 10 月

注浆，可在钻杆一次钻进和退出的过程中完成锚索的全部施工过程。整机的模型示意图如图 1 所示。

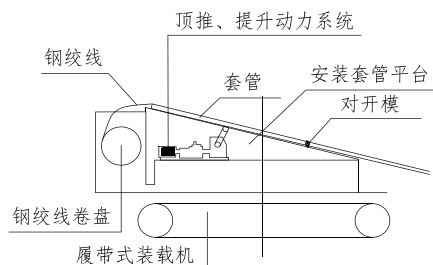


图 1 设备模型示意图

2.1 动力装置

实现成孔、安装、注浆合而为一的关键在于钻杆系统的设计。

钻杆系统内包括有钻杆（中空的套管）、钻头、液压动力马达，如图 2 所示，钻杆为中空杆体，其内分别装有液压动力马达、注浆管及为液压动力马达供油的供油管路，该装置最大的创新点在于将液压马达置于钻杆端部，实现锚索在钻进过程中的安装。液压动力马达固定在钻杆的钻孔端里，且在该端处设有与钻杆内部注浆管连接的注浆孔，成孔用的钻头安装在液压动力马达上，并外露出钻杆，由液压动力马达驱动旋转进行钻孔（图 2）。为保证液压马达在地下空间里正常工作，液压动力马达配套有马达保护罩，且该保护罩可拆卸地安装在钻杆的钻孔端处，并与液压动力马达之间设有密封装置，避免马达遭到泥水侵入损坏。

为了适应较长的锚索，钻杆杆体分节制作，并设计为对开型，如图 5 所示，采用配对的凹凸结构通过嵌插实现整体拼装。

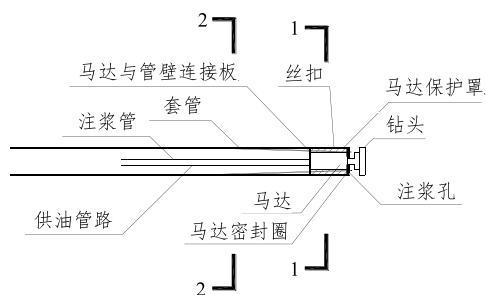


图 2 钻杆系统剖面图

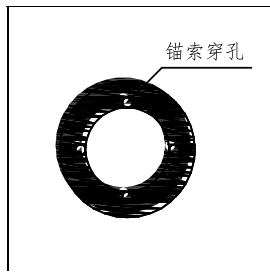


图 3 1-1 剖面图

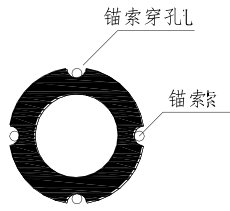


图 4 2-2 剖面图

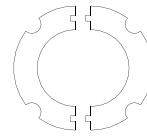


图 5 2-2 钻杆断面图

2.2 锚索安装

如图 4 所示, 在钻杆的杆身上沿其周向间隔分布有多条在其长度方向上延伸的凹槽, 用于容置锚索, 并配置有防止锚索脱离凹槽的挡环, 挡环环抱在钻杆上, 其形状大小与钻杆相匹配; 当锚索到达钻杆的钻孔端时, 在钻杆的内侧壁上沿圆周向间隔分布有多个供锚索穿过的锚索穿孔, 如图 3 所示。图 3 中的锚索穿孔与图 4 中的凹槽一一对应, 锚索穿孔与凹槽之间连通实为穿过钻杆杆壁的斜向通道, 共形成有多条斜向通道, 每条斜向通道自锚索穿孔往钻杆的另一端延伸, 将锚索放入凹槽后, 经斜向通道从锚索穿孔穿出, 可伸出钻杆直达已经钻好的孔内。

成孔时即将锚索通过凹槽附着与钻杆上, 随钻杆一同进入孔内, 当成孔至设计深度后, 钻杆配置有退孔拔出时用于卡住放入凹槽内的锚索的锚索脱离器, 如图 6 所示, 锚索脱离器固定不动而钻杆退孔向外拔出时, 可使锚索脱离钻杆留在钻孔内。

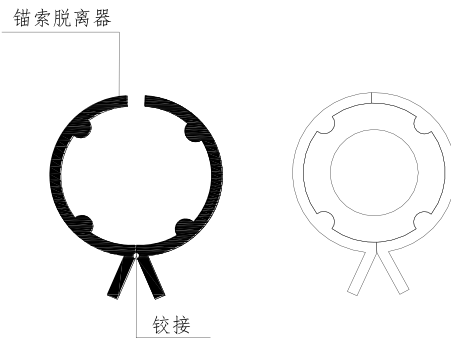


图 6 锚索脱离器

2.3 钻头

图 7 为钻头的剖面图, 图 8 为钻头的断面图, 钻头包括有装于液压动力马达上的旋转盘及用于钻孔切土的多张切土翼。如图 8 所示, 切土翼通过各自转轴安装在旋转盘上, 并平行于该旋转盘, 转轴沿旋转盘的周向间隔均布, 且每条转轴的轴身上均设有一个挡块, 旋转盘上同时设有与轴身挡块一一对应的限位块, 这样的设计可以使切土翼随液压动力马达的正转和反转实现张开和收回。在成孔期间, 使钻头张开便可实现切土功能, 当成孔完

成需退出钻杆时，反转液压马达可使钻头收回，旋转盘外径小于钻杆直径，便可实现钻杆退出时，锚索可无障碍的留在孔内（图7）。

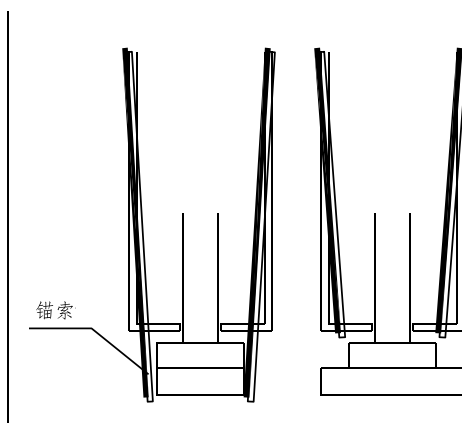


图7 钻头剖面图

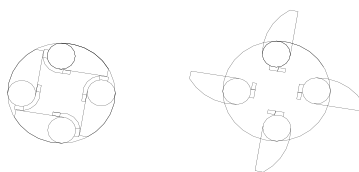


图8 钻头断面图

当钻头张开时，设计的钻头外径略大于钻杆外径，在钻进成孔时可采用泥浆循环，避免钻杆推进及退出过程中侧阻力过大的问题。

2.4 注浆

如图2所示，注浆管预先放于钻杆内并于端部预留的注浆孔连接，在钻进成孔过程中，该注浆管可注入泥浆，以实现泥浆循环护壁的作用，当成孔完成退出钻杆之前，先用水泥浆置换泥浆，待孔口出现水泥浆时，即可退出钻杆，实现注浆工序。

2.5 顶推系统及锚索卷盘

如图1所示，整套钻进、安装设备均放置于履带式装载机和装于该履带式装载机上的可调节倾斜角度的钻杆装拆平台，钻杆的推拉系统动力系统装于履带式装载机上，并位于钻杆装拆平台的下方，其通过传动机构与置于钻杆装拆平台上的钻杆相连接。在履带式装载机后部设多个锚索卷盘，用于装载一定数量的锚索，可实现锚索的自动下料和安装。

3 经济价值

现有的锚索施工技术分为成孔、安装和注浆三道工序完成，所需人工一般在成孔时的机械操作需要2~3人，锚索下料、制作并运至现场至少需要2人，注浆工序的水泥浆制作、灌注至少需要2人，完成一根锚索所需要的人工约为6~7人。而采用本文研制的设备，则

只需要3~4人操作机械及制作水泥浆,可节省人工约50%。按照广东省定额计算,当材料、机械费用不变时,总的成本可节省约7%。

此外,现有设备在三道工序分离时,安装及拆卸钻杆、套管的时间占施工总时间至少60%以上,而采用本文研制的设备时,可大幅度节省施工时间,提高施工效率,由于工期缩短所带来的资金成本的降低亦不可忽视。

4 结论

(1) 研制了新型锚索施工设备,可实现成孔、锚索安装和注浆三个过程合而为一,省去单独安装锚索和注浆的时间,通过一次装、拆钻杆即可实现成孔、锚索安装和注浆三个过程。

(2) 研制的新型设备不仅可直接节省人工成本,也可大幅度缩短施工工期,从而降低资金成本。

(3) 本文研制的设备可在拔杆的同时注浆,钻杆杆身可同时起到套管的作用,在易坍塌的地层中适应性强,也可注入砂浆,避免坍塌引起锚索锚固力的降低,施工可靠性高。

(4) 注浆可在设计要求的锚固段实施,在拔杆至自由段深度后,可停止注浆,与传统的锚索外套有PVC软管的方式不同,可避免大量注浆材料外溢,节约材料。

参考文献:

- [1] 中科院广州化灌工程有限公司,一种成孔、安装、注浆三合一的锚索施工装置[P]. ZL 2014 20838897.0, 2015-07-29.
- [2] 岳宝珍,樊国强,吕晋松,等. 预应力锚索在深基坑中的应用[J]. 工程勘察, 2006(S1):168-170.
- [3] 李作仁. MJ-2 锚杆钻孔机的研制[J]. 工程勘察, 1990, 6:22-23.
- [4] 张怀文,董可,董辉. 锚杆工法控制对桩锚支护结构稳定性的影响[J]. 工程勘察, 2011, 11:24-28.

临海软弱土注浆加固选材及工艺的试验研究

于方^{1,2}, 杨元龙^{1,2}

(1.中科院广州化灌工程有限公司, 广州 510650; 2.广东省化学灌浆工程技术研究开发中心, 广州 510650)

摘要: 拱北隧道工程位于珠海拱北口岸, 具有水文地质条件复杂, 沿线建筑物众多等特点。为了确保工程的绝对安全, 需对相关的注浆加固开展必要的试验性研究。针对此工程的特点, 我们主要从注浆材料和注浆工艺两方面进行了研究, 确定出适合此隧道地层的最优材料配比及最优注浆工艺参数。

关键词: 注浆材料; 注浆工艺; 试验

1 工程概况

拱北隧道隧址位于珠海拱北口岸, 隧道大部分位于水位线以下, 水力场复杂, 围岩以海相沉积的淤泥类土为主, 土质极软弱。软土层具有多层、厚度大、分布广泛、含水量高、压缩性高, 易触变等特性, 使隧道在围岩稳定性方面、支护设计方面、施工方面都存在诸多不利因素。隧道沿线途经边防五支队、拱北口岸、澳门关闸口岸、广珠城际轨道拱北站、茂盛围(军事管理区), 涉及口岸、边防部队等特殊部门, 并且与城市道路及地下管线多次交叉或重叠。隧道设计方案采用明挖+局部暗挖的组合方式。双层明挖+口岸段局部暗挖施工时必须做好辅助施工措施, 以确保工程能够安全顺利实施。此方案采用的辅助施工措施主要有地表预注浆加固、全断面或周边帷幕超前预注浆、超前长管棚注浆、隧道下穿构筑物基底注浆等加固措施。为了确保工程的绝对安全, 需对相关的注浆加固方法开展必要的试验性研究, 以取得注浆设计所需的工艺参数。

2 试验方案设计

针对本次工程的特点, 本次试验主要从注浆材料和注浆工艺两方面进行研究。注浆材料主要进行室内试验的研究, 通过不同的水泥, 不同的水灰比及添加不同的化学添加剂, 确定出适合此隧道地层的最优的材料配比。然后以室内试验确定出的材料配比, 选取适当的工艺, 在现场选取合适的场地进行模拟实验, 检验注浆效果。对选取的材料配比及施工工艺进行评价, 确定出适合此隧道地层的最佳注浆材料及施工工艺。

通过查阅相关文献, 在类似隧道地层中已成功应用的注浆材料主要为普通水泥和超细水泥以及化学浆液^[1-5]。因此, 在室内试验中主要采用普通水泥加化学添加剂以及超细水泥

加化学添加剂来进行配比试验,从而确定出最优的配比。化学添加剂主要为早强剂,减水剂和膨润土等,其作用主要是提高水泥早期强度、调节水泥活性、加速水化反应、提高固结率等。

现场模拟试验以室内试验的最优配方作为注浆材料,采用适当的工法进行。注浆工法有很多种,根据勘察资料,隧道主要涉及的地层包括填土、淤泥及淤泥质土、粘性土、砂层、残积土、全风化花岗岩等。再考虑到隧道周边环境极其敏感、工程水文地质条件极差、周边建筑物众多、地下管线极为复杂且施工过程中对沉降变形要求严格等多种因素,我们选定了采用钻机双重管双液注浆、袖阀管注浆、高压双管旋喷注浆(一种加泥浆切割土体,一种直接喷浆切割土体)三种工艺进行现场试验,来确定适合隧道附近土层的最优注浆工艺及参数。

3 室内试验

通过对不同的水泥,不同的水灰比添加不同的化学添加剂进行试验,确定出适合此隧道地层的最优的材料配比。针对此种地质情况,在查阅文献的基础上按以下实验方案进行实验:

①筛选出两种水泥(42.5R的普通硅酸盐水泥和MFC-GM8000超细水泥)进行实验,考查水灰比的变化对水泥浆的泌水率、固结体的结石率、不同龄期抗压强度的影响。

②考虑到隧道开挖工期紧,考查氯化钠+三乙醇胺复合早强剂对水泥固结体3d、7d早期抗压强度的影响。

③考查在满足注浆工艺的前提下,降低水灰比并添加减水剂对水泥固结体强度的影响。

④双液注浆为水泥水玻璃注浆,重点考查水玻璃的浓度变化、水泥浆与水玻璃浆的体积比例变化对水泥固结体的强度影响。

⑤高压旋喷注浆置换土的比例一般为30%~50%,考查由现场取土的不同添加比例对水泥固结体强度的影响。

以上述方案,我们做了大量的试验得出以下结论。

3.1 袖阀管注浆材料

超细水泥材料的各项性能均优于42.5R普通硅酸盐水泥,但其7d,14d抗压强度优越性不是很明显。早强剂的加入能够提高水泥固结体的早期强度3d、7d抗压强度。与空白实验相比,添加复合型早强剂的水泥固结体3d抗压强度超过了没加早强剂的7d抗压强度,接近于其14d抗压强度,达到了93.6%,效果非常明显。

根据以上结论,考虑到工程造价的因素,推荐现场试验选用材料为:42.5R普通硅酸盐水泥,水灰比选0.8:1,早强剂选用氯化钠1%+三乙醇胺0.15%。

3.2 双重管双液注浆材料

42.5R普通硅酸盐水泥在水灰比为0.8:1的情况下,水玻璃浆浓度对水泥固结体强度的影响与水泥浆/水玻璃浆体积比有关。在水泥浆/水玻璃浆体积比为0.75:1、0.5:1下,50%

浓度的固结体强度比 33%浓度的高；而体积比为 1.0:1 下，33%浓度的水泥固结体强度反而比 50%浓度的高，这与水玻璃的水解程度有关。适宜的水玻璃原浆:水（体积比）=1:1.5（利于水玻璃的水解），水泥浆:水玻璃浆=1:0.5（体积比）。

根据以上结论，推荐现场试验选用材料为：42.5R 的普通硅酸盐水泥，水灰比为 0.8:1，减水剂 0.5%；水玻璃原浆:水（体积比）=1:1.5，水泥浆:水玻璃浆=1:0.5（体积比）。

3.3 高压旋喷注浆材料

根据室内实验结果，选择 42.5R 的普通硅酸盐水泥，并添加氯化钠 1%和三乙醇胺 0.15%复合早强剂，水灰比为 1:1。水泥添加量为土的 50%，7d 的抗压强度达到 3.22MPa，14d 达到 5.82MPa。考虑到实际施工与实验室结果的差距，满足设计要求（ ≥ 1.2 MPa）。

4 现场试验

4.1 现场试验布置

现场试验选址在地质条件具有代表性的地区，图 1 为试验孔及检查孔布置简图。根据场地大小，高压旋喷注浆组与袖阀管注浆组间距为 6.5m，袖阀管注浆组与双重管双液注浆组的间距为 5m，以避免不同注浆组之间的相互干扰。

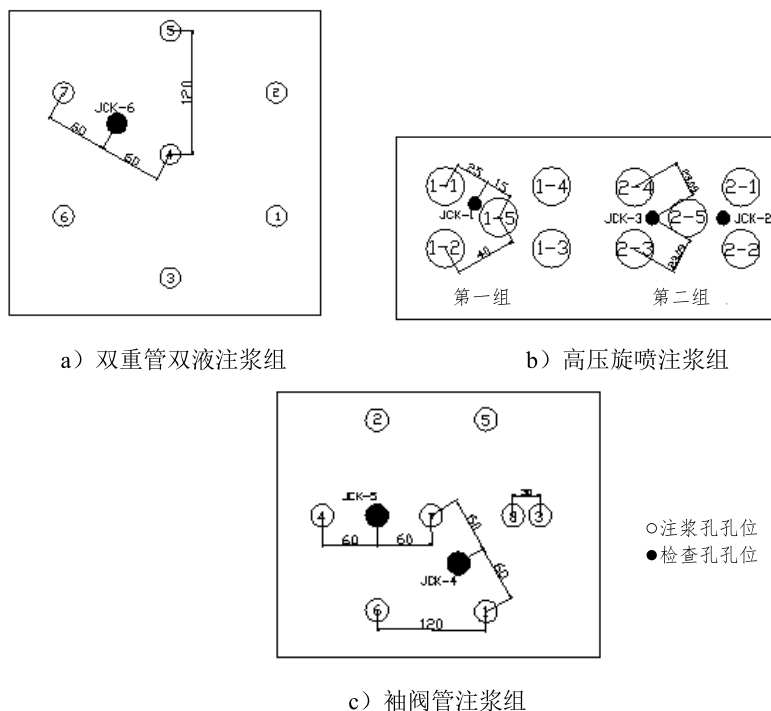


图 1 试验孔及检查孔布置

4.2 现场施工工艺

(1) 施工设备

SGZ-100 型地质钻机一台、XY-1A-4 型双管注浆钻机一台、高压旋喷机一套，PO1-40

型双液注浆泵两台、2台 JJS-10 型低速搅拌机、250 千瓦发电机一台、50 千瓦发电机一台、CJ-G3 型注浆自动记录仪 1 套。

(2) 袖阀管注浆

a) 注浆材料

采用 42.5R 普通硅酸盐水泥,水灰比: 0.8: 1, 添加 1%的氯化钠和 0.15%的三乙醇胺。

b) 注浆施工参数

袖阀管注浆孔共布置 7 个孔,孔间距 1.2 米,梅花形布孔,如图 1 所示。施工参数如下:

注浆管:采用特制的 $\Phi 48\text{mm}$ 袖阀塑料管,出浆孔间距为 33cm。开孔直径为 91mm。

孔深为 33m 左右;注浆压力: 0.5~1.0MPa;注浆次数:采用自下而上分段注浆,注浆次数一般为 3~5 次,每米注 250kg 水泥;注浆段长度:以 0.4m 为一注浆段进行分段注浆。

c) 施工流程

标记注浆孔位置→钻机和注浆设备就位→钻孔→插入袖阀管→注入套壳料→注浆→清洗管路。

d) 工程中遇到的问题及处理办法

①注浆管卡管、断裂

3 号孔经过 2 次注浆后,在第三次注浆的过程中由于卡管,造成注浆管断裂,注浆管留在孔中,导致 3 号孔不能再进行注浆。处理办法:在 3 号孔边上补打了一个孔进行注浆。

②地面跑、漏浆

在浅层注浆过程中,地面会发生跑、漏浆的情况。处理办法:降低压力,如还发生跑浆情况,可暂停注浆一段时间,等待跑浆通道水泥凝固后再进行注浆。

③注浆管下不到孔底

由于孔深达到 33 米,在经过 2~3 次注浆之后,塑料袖阀管有可能发生了变形,导致注浆管下不到 33 米,致使底层的注浆次数减少,达不到要求的注浆量。

(3) 钻机双重管双液注浆

a) 注浆材料

注浆材料选用水泥-水玻璃双液体系。水泥用 42.5R 普通硅酸盐水泥,水灰比: 0.7: 1, 减水剂添加量 0.5%,水玻璃的添加量为 20~25%,水玻璃稀释后灌入,水玻璃:水=1:1.5,上述浆液采用双系统注浆工艺灌入到土层中。

b) 注浆施工参数

双重管双液注浆孔共布置 7 个孔,孔间距 1.5 米,梅花形布孔,如图 1 所示。施工参数如下:

注浆管:采用特制的双重注浆管;钻孔:开孔直径为 69mm。孔深为 32m;注浆压力:初始压力 0.1~0.4MPa,稳压及终压 0.4~0.9MPa;注浆方式:采用先外后内、自下而上注浆,每米注 250kg 水泥。

c) 施工流程

放线定位→钻孔→双液注浆→拔管冲洗

d) 工程中所遇到的问题

①固管

在注浆过程中，有可能发生固管事故，导致钻杆无法拔出。特别是在 16.5~21m 处的粗砂层。处理办法：注浆过程中，要保证注浆管一直处于转动状态，发现固管征兆，及时处理。如已经发生固管无法拔出，则用比注浆杆粗的套管打捞注浆杆。图 2 为固管事故现场图，打捞出的注浆杆被粗砂紧紧包裹。



(a)



(b)



(c)



(d)

图 2 固管事故现场

②地面跑、漏浆

注浆过程中会发生地面跑、漏浆情况，如图 3 所示。处理办法一是降低压力，二是增加水玻璃添加量，加速水泥固结，达到封堵跑浆通道的目的。



图 3 注浆过程中地面跑、漏浆情况

(4) 高压双管旋喷注浆

a) 注浆材料

采用 42.5R 普通硅酸盐水泥, 水灰比: 0.8:1, 添加 1%氯化钠和 0.15%的三乙醇胺。

a) 注浆施工参数

布置 5 个注浆孔, 孔间距为 0.4m, 如图 1 所示。施工参数如下:

喷浆压力: 25~28MPa; 喷嘴直径: 2.4mm; 气压: 0.7~0.8 MPa; 提升速度: 18~22cm/min; 水泥掺入量 250kg/m。

b) 施工流程

孔位放样→钻机就位钻孔→下管钻进→水泥浆制备→高压喷射注浆成桩→冲洗器具→回注浆液→移机至下一个孔位。

c) 工程中所遇到的问题

在注浆过程中, 经常会发生堵管情况, 主要是喷嘴直径只有 2.4mm, 加减钻杆时粗砂层的砂粒进入喷嘴造成。处理办法: 拔出注浆管, 清理通道后, 再下注浆管进行注浆。

5 效果分析

以上三种工艺现场试验结束后, 我们对注浆试验的质量采用钻孔取芯、标贯等方法进行了检测。高压旋喷第一组(加泥浆切割土体)设置一个检查孔, 高压旋喷第二组(直接喷浆切割土体)设置两个检查孔, 袖阀管注浆设置两个检查孔, 双重管双液注浆设置一个检查孔。检查孔完工后, 我们对检查孔岩芯进行了拍照和分析。

5.1 高压旋喷注浆

(1) 高压旋喷第一组检查孔为 JCK-1, 设置位置见图 1, 位于 1 号和 5 号孔中心连接线上, 距离 5 号孔 15cm, 距离 1 号孔 25cm。

通过观察岩芯, 我们可以发现岩芯完整, 基本都呈柱状半柱状, 注浆效果较好, 图 4 为检查孔局部照片。



图 4 高压旋喷注浆检查孔局部特写

对取样进行了强度测试, 结果见表 1, 强度可以达到工程施工的需要。

表1 高压旋喷第一组检查孔 JCK-1 取样强度

取样位置/m	5.0~5.4	11.3~11.55	17~17.35	20.75~21	27.0~27.25
抗压强度/MPa	4.18	5.12	5.67	22.8	7.32

(2)高压旋喷第二组检查孔设置位置见图1,共设置两个检查孔JCK-2和JCK-3。JCK-2位于1、2、5号注浆孔的中心处,距1、2、5号孔的中心距离均为23.09cm。JCK-3位于3、4、5号注浆孔的中心处,距3、4、5号孔的中心距离均为23.09cm。

通过观察岩芯,注浆效果较差,检查孔JCK-2在24米以下未发现水泥结石,JCK-3检查孔6.5米以下未发现水泥。考虑原因一是由于孔太深,在24m以下造成缩径。二是设计的桩径是60cm,但是施工时地质情况或是高压泵功率的问题,导致切割半径较小致使形成的桩径较小。

通过检测检查孔JCK-2的取样强度,见表2所示,我们也发现强度要比一号检查孔的低很多,这也说明了在桩径外围水泥含量相对较少,致使强度降低。

表2 高压旋喷第二组检查孔 JCK-2 取样强度

取样位置/m	8.0~8.3	12.7~13.0	19.2~19.5
抗压强度/MPa	0.82	2.04	3.47

5.2 袖阀管注浆

袖阀管注浆组共设置两个检查孔JCK-4和JCK-5,设置位置见图1,JCK-4设置于1号和7号孔的中点处,距离1号和7号孔均为60cm。JCK-5设置于4号和7号孔的中心连接线上,距离4号为80cm,距离7号孔为40cm。

袖阀管注浆对于粘土层及淤泥层的处理效果较好,在岩芯中发现有大量的水泥结石,呈块状,层状,颗粒状分布。但是对于砂层及全风化层处理效果相对较差,只发现少量的水泥结石。图5为袖阀管注浆检查孔的局部照片。



图5 袖阀管注浆检查孔局部特写

对袖阀管检查孔也进行了标贯检测, 检测结果统计见表 3:

表 3 袖阀管检查孔 JCK-4 标贯统计表

标贯位 置/m	3.00~ 3.45	5.85~ 6.30	8.00~ 8.45	9.52~ 9.97	12.15~ 12.60	15.15~ 15.60	16.95~ 17.40	21.40~ 21.85	24.55~ 25.00	28.75~ 29.20
击数/次	15	34	26	9	16	25	43	23	31	42

通过与勘察部门提供的距离试验最近的勘察孔 ZK241 的标贯对比, 此地层强度有所提高, 注浆也起到了很好的效果(因标贯位置不同, 无法进行定量的比较, 只做了定性的对比)。

5.3 双重管双液注浆

双重管双液注浆设置一个检查孔 JCK-6, 设置位置见图 1, 设置于 4 号和 7 号孔的中心连接线中点位置, 距离 4 号和 7 号孔均为 60cm。

双液注浆效果类同于袖阀管注浆, 对于粘土层及淤泥层的处理效果较好, 在岩芯中发现大量的水泥结石, 呈块状, 层状, 颗粒状分布。但是对于砂层及全风化层处理效果相对较差, 下图为双液注浆检查孔局部岩芯照片:



图 6 双重管双液注浆检查孔局部特写照片

对双重管双液注浆检查孔也进行了标贯检测, 检测结果统计见表 4:

表 4 双重管双液注浆检查孔标贯统计表

标贯位置/m	6.75~7.2	9.05~9.5	12.15~12.6	14.35~14.8	18.75~19.2	25.8~26.25	30~30.45
击数/次	15	22	12	14	29	34	33

通过与勘察部门提供的距离试验最近的勘察孔 ZK241 的标贯对比, 此地层强度有所提高, 注浆也起到了很好的效果(因标贯位置不同, 无法进行定量的比较, 只做了定性的对比)。

6 结论与建议

通过室内试验及现场的模拟工况的试验, 结合注浆成果分析情况, 以及检查孔的分析, 我们可以得出以下结论及建议:

(1) 高压旋喷注浆所选用的材料强度经检验可以满足施工的要求。施工工艺也相对适合于此地层。原设计桩径为 60cm, 经检验实际桩径只有 40cm 左右, 致使相邻的桩之间没有搭接。建议缩小孔间距, 或使用大功率的高压注浆泵, 增大注浆压力, 还可使用高压

三重管注浆。同时施工过程中也要考虑动水及潮汐因素的影响。

(2) 袖阀管注浆对于粘土层及淤泥层的处理效果较好,在检查孔岩芯中发现有大量的水泥结石。但是对于砂层及全风化层处理效果相对较差,只发现少量的水泥结石。建议对于如何处理砂层进行进一步的研究,如更换注浆材料,选用超细水泥等。同时,由于孔深达到33米,在经过2~3次注浆之后,塑料袖阀管有可能发生了变形,导致注浆管下不到33米,致使底层的注浆次数减少,达不到要求的注浆量,此种工艺有很大的局限性。

(3) 双液注浆效果类同于袖阀管注浆,对于粘土层及淤泥层的处理效果较好,在岩芯中发现有大量的水泥结石,呈块状,层状,颗粒状分布。但是对于砂层及全风化层处理效果相对较差。此种工艺在通过16~20m左右的粗砂层时遇到很大问题,容易发生固管事故,严重影响施工质量及工期,建议此种工艺只在抢险堵水时采用。

参考文献:

- [1] 《地基处理手册》编辑委员会,《地基处理手册》[M].北京:中国建筑工业出版社,1988.
- [2] 吴爱风,施宏峰.超细水泥的特性及其在软土地基处理中的应用[J].工程力学,1997(增),604-608.
- [3] 葛家良.软岩巷道注浆加固机理及注浆技术若干问题的研究[D].徐州:中国矿业大学,1995.
- [4] 杨晓东,刘嘉材.水泥浆材灌入能力研究[M].中国水利水电科学研究院科学研究论文集.北京:水利电力出版社,1987.
- [5] 程鉴基.珠江三角洲软土地基水泥-水玻璃防渗固结注浆处理初步研究[J],岩石力学与工程学报,1995,14(3):179-186.

锚杆（索）孔口漏水成因分析与处理工艺

曹建胜

（中科院广州化灌工程有限公司，广州 510650）

摘要：混凝土灌注桩+锚杆支护施工工艺从 90 年代发展至今已非常成熟，较地下连续墙在成本和工期上均有节约，而较水泥土重力式挡墙和放坡支护在对场地的要求的支护深度更为灵活，但桩锚支护侧壁漏水一直是困扰桩锚支护的发展的一个弊病，侧壁漏水主要成因有两个：桩缝漏水和锚索孔漏水。本文主要针对锚索孔漏水进行探讨研究。

关键词：桩锚支护；侧壁漏水；锚索孔漏水

1 引言

桩锚支护适应的支护深度已由最初的小于 8 m，发展至今的最深支护深度已在 20 m 以上，适应的土层由塑性土发展至风化岩及淤泥等土层，桩锚支护适应条件越广，所面临的问题也越多。基坑漏水是支护体系最大的危险源，在支护体系设计上就非常注重防范基坑漏水，但止水桩与支护桩的设计过于理想化，没有充分考虑施工偏差，使得止水桩未能有效封闭支护桩的间隙形成了支护桩间漏水的通道。止水桩与支护桩的施工未能严格按照施工工艺交替进行，止水桩与支护桩之间的施工时间间隔过长造成止水桩与支护桩未能相切弥合而形成缝隙，成为漏水的通道^[1]。在设计和施工中的缺陷有很多，但最易被忽略的是锚杆在穿过止水桩体系时对止水体系的破坏。锚固技术在我国工程应用已有 50 余年历史^[2]。桩锚支护施工顺序为：围闭搭接的止水桩先施工，然后施工钢筋混凝土灌注止水桩，最后施工锚杆，施工锚杆时必须穿过止水桩，所以导致锚杆施工会破坏围闭的止水结构，使得锚杆孔口漏水，本文将对此种情况的发生原因处理方法进行探讨。

2 锚杆孔口漏水成因与危害分析

锚杆孔口漏水分为地下承压水涌水和地表水渗漏，地表水渗漏造成的危害较少及处理简单，本文不予以介绍，主要介绍地下承压水涌水，如图 1 所示，地下承压水的水头标高一般比地面低 1~3 m，而当锚杆的成孔孔口标高低于地下承压水水头标高时就会出现孔口涌水，当承压水处于渗透系数大于 5 k (m/d) 时，涌水量将比较大同时容易涌砂，当不考虑涌出的水（或砂）与孔壁的摩擦力是，涌水涌砂量可按照下列公式计算：

$$V = \frac{1}{4} \pi D^2 \sqrt{\frac{(H-h)g}{2}} \quad (1)$$

式中, V 为每秒涌水(砂)体积; D 为锚杆孔口直径; H 为承压水水头标高; h 为锚杆孔口标高; g 为重力加速度。

取 $D=0.018\text{m}$; $H=-1\text{m}$; $h=-6\text{m}$ 时, 可计算出 $V=0.00126\text{m}^3$, 一天的涌水(砂)量为 $V=108.9\text{m}^3$ 。

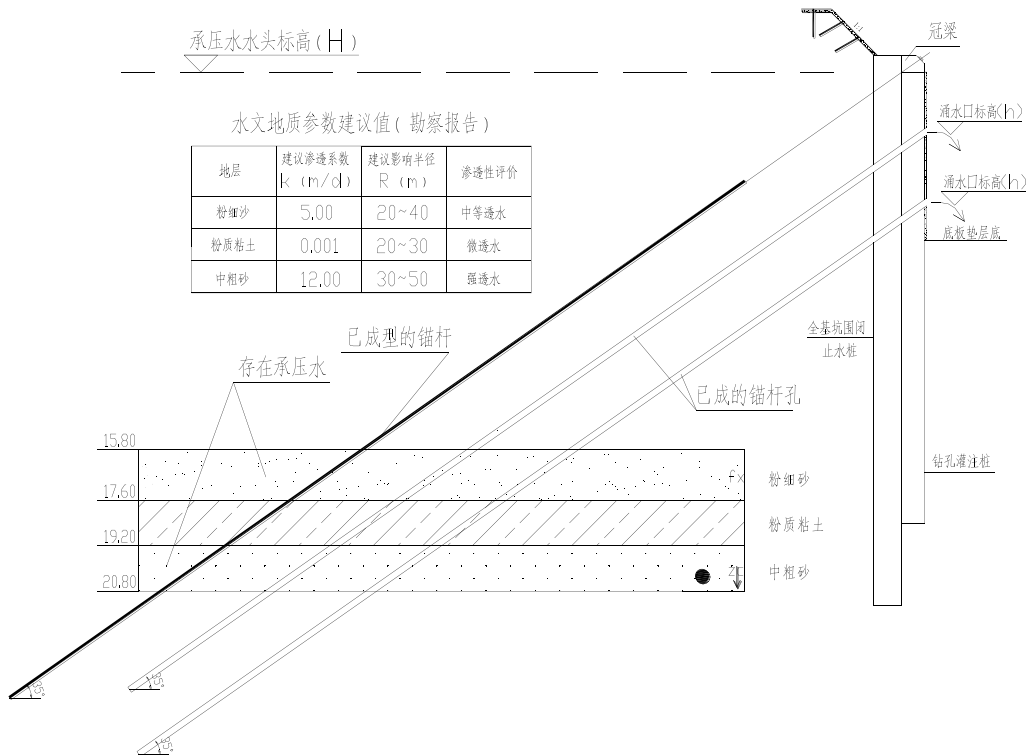


图1 地下承压水锚杆孔漏水示意

通过上述介绍, 锚杆孔口涌水涌砂量将主要会带来以下几点危害:

- (1) 影响锚杆施工, 将导致锚杆在正常工艺下无法完成注浆这一工序;
- (2) 涌水量过大会导致成孔泥浆稀释影响成孔质量并会导致钻杆无法拔出;
- (3) 长时间涌水量过大会使得地下承压水大量流失导致基坑周围地面或者建筑物下沉;
- (4) 涌水涌砂将会对土方开挖以及后续的基础施工带来诸多影响。

3 锚杆孔口漏水处理工艺方法介绍

处理这种地下承压水漏水有两种方法, 第一种是采取提高锚杆孔口标高, 使得锚杆孔口标高高于承压水水头标高再进行后续施工, 避免锚杆孔口漏水; 第二种方法是成孔后采

用双液化学注浆使得水泥浆在流动的水中能迅速硬化。第一种方法在工序上比较简单, 并且质量有保障; 第二种方法工序上较为复杂并且难以实现, 主要在于在注浆前涌水(砂)并未制止, 会影响成孔的成功率, 并且在注浆时注浆质量难以把控。

第一种防止漏水的工艺方法, 即提高锚杆孔口标高使得锚杆孔口标高高出承压水水头标高。具体措施如下: 如图 2 所示, 锚杆孔成孔后使用定制的钢套管及弯曲钢板连成的整体构件将锚杆孔口标高提升, 将弯曲钢板下端的钢管插入锚索孔内(入孔内深度不少于 2 米), 将弯曲钢板用膨胀螺栓固定在钢筋混凝土灌注桩上, 在露出端部链接 55°弯头钢管, 然后再连接直钢管以提高锚杆孔口标高, 保证在注浆时锚杆孔口不出现涌水(砂), 孔内的泥浆水处于静止状态, 保证注浆质量, 在水泥浆达到终凝后(大于 6.5 h)再松掉膨胀螺栓取出钢管, 这样将不会出现涌水涌砂的情况。

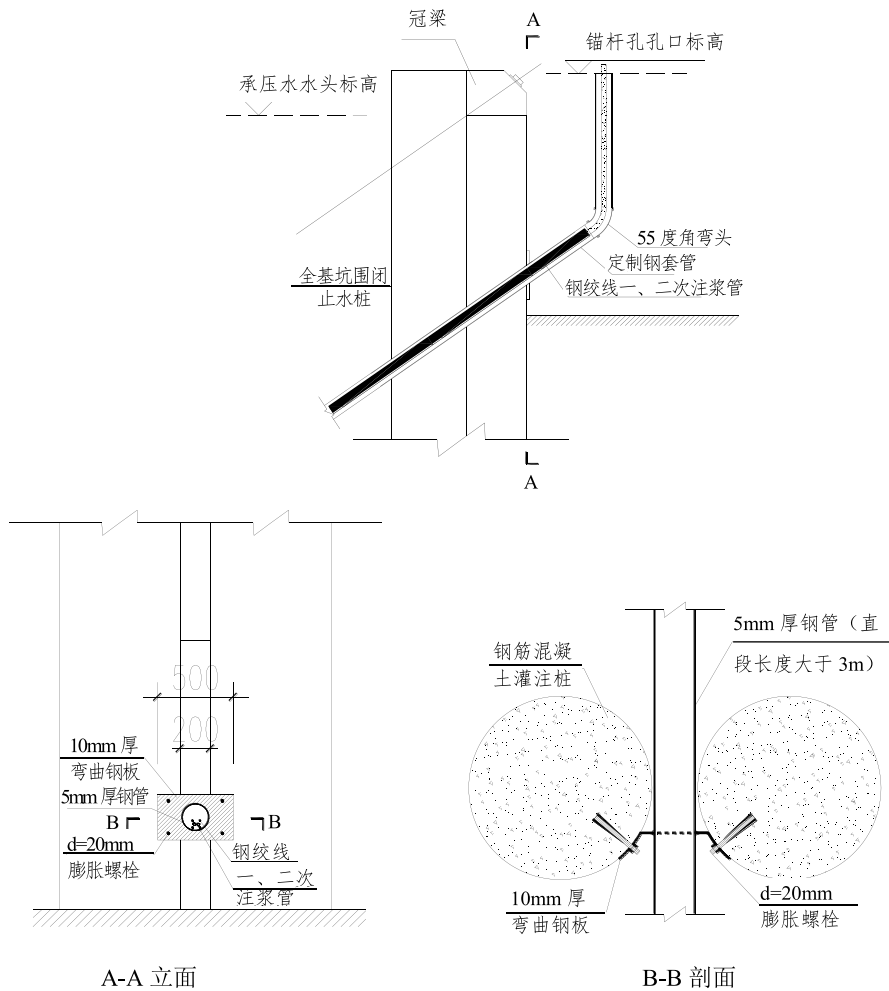


图 2 提高锚索孔口标高示意

4 结语

此种工艺方法可能还有较多的隐患,例如在锚索张拉时可能导致疏通强透水层与孔口的水路,从而导致涌水的情况再次出现,出现这种情况可以采用聚氨酯进行堵漏。

参考文献

- [1] 李会涛. 深基坑围护桩间漏水原因分析及处理措施[J]. 科技信息, 2013, 23:346.
- [2] 黄建生. 锚杆支护技术与工程应用[J]. 西部探矿工程, 2013, 12:4-7.