

DOI: 10.3785/j.issn.2096-7195.2021.03.014

【全国病险水库安全评估及除险加固技术前沿研讨会 论文精选】

水性环氧砂浆修复混凝土的黏接界面性能

刘志伟^{1,2}, 张雷², 王中林^{1,2}, 窦国竞^{1,2}, 黄飞亚^{1,2}

(1. 河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 黄河水利委员会黄河水利科学研究院, 河南 郑州 450003)

摘要: 采用水性环氧树脂制备水性环氧砂浆, 针对混凝土结构补强加固过程中改性砂浆-混凝土黏结面薄弱环节, 开展改性砂浆和混凝土黏结抗拉试验, 研究了界面干湿状况、混凝土表面粗糙度和界面剂类型对改性砂浆-混凝土界面黏结强度的影响。结果表明: 界面干湿状况是影响黏结强度的主要因素, 干燥界面的抗拉强度高于湿润界面, 在研究其对黏结强度的影响时, 需综合考虑改性砂浆中乳液掺量。对改性砂浆与混凝土的结合面进行一定程度的粗糙处理, 可以提高界面黏结强度; 使用界面剂可以改善改性砂浆与混凝土接触的界面区结构, 增强黏结性能, 需考虑界面干湿状况和界面接缝方式对黏结的影响。

关键词: 水性环氧砂浆; 黏结抗拉试验; 界面干湿状况; 粗糙度; 界面剂

中图分类号: TV32

献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2021)03-0256-06

Bonding interface performance of water-borne epoxy mortar for repairing concrete

LIU Zhi-wei^{1,2}, ZHANG Lei², WANG Zhong-lin^{1,2}, DOU Guo-jing^{1,2}, HUANG Fei-ya^{1,2}

(1. College of Water Conservancy & Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Yellow River Institute of Hydraulic Research, YRCC, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: The epoxy modified mortar is prepared with water-based epoxy resin. Aiming at the weak link of the modified mortar-concrete bonding surface during the reinforcement of the concrete structure, a tensile test of the modified mortar and concrete bonding is carried out. The tests were conducted to study the dry and wet conditions of the interface together with the influence of concrete surface roughness and interface agent type on the bond strength of modified mortar-concrete interface. The results showed that the dry and wet conditions of the interface are the main factors affecting the bond strength. The tensile strength of the dry interface is higher than that of the wet interface. Amount of emulsion in the modified mortar is comprehensively considered during bond strength analysis. The paper further determined that a certain degree of rough treatment on the bonding surface of the modified mortar and concrete improves the interface bonding strength. The use of interface agents improves the structure of the interface area at the joint of the modified mortar and concrete; hence, enhancing the bonding performance while considering the bonding, influence of interface dryness, wetness and seam method at the same time.

Key words: epoxy modified mortar; bond tensile test; dry and wet condition of interface; roughness; interface agent

0 研究背景

近年来, 大量混凝土结构基础设施随着时间的推移产生严重的冲刷磨蚀破坏, 很多已经满足不了正常使用要求, 甚至已经低于安全要求, 必须对原有混凝土进行必要的修复加固。环氧类材料以其优

异的黏结性能、良好的力学性能等特点被广泛应用于该领域, 成为结构加固修补工程中最为重要的建筑材料之一^[1]。水性环氧砂浆与基底混凝土之间的黏结强度对结构加固修复的质量至关重要, 直接影响到加固结构的整体质量, 必须根据具体工程实际采用合适、简单可靠的表面处理方法。有关改性砂

收稿日期: 2021-04-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51779101, U1965110); 江苏省研究生科研与实践创新计划项目(SJCX20_0161, SJCX20_0160); 中央高校基本科研业务费(学生项目)(B200203191, B200203190)。

作者简介: 刘志伟(1997—), 男, 安徽舒城人, 硕士研究生, 主要研究方向: 水工结构材料。E-mail: 1099840358@qq.com。

浆和混凝土界面黏结抗拉强度和黏结抗剪强度已有不少研究^[2], 包括黏结面的处理方法、粗糙度、试验方法^[3-7]及界面剂的品种和使用^[8-10]。基底混凝土的表面干湿状况、粗糙程度、水性环氧基液和水性环氧砂浆的热膨胀系数对黏结质量的影响很大, 亟需根据修复技术工艺, 设计实验方案开展专项研究。本文以改性砂浆与混凝土界面为研究对象, 通过开展不同界面剂、粗糙度及干湿条件下的黏结特性研究, 探索各因素对黏接性能的影响规律, 为水性环氧砂浆在水利工程中的应用提供参考。

1 试验原料和方法

1.1 试验原材料

制作水性环氧砂浆所需原材料一般包括环氧树脂乳液、水泥和砂。选用上海汉中化工有限公司生产的水性环氧树脂体系, 环氧树脂乳液由环氧树脂 H123A (A组分)、环氧固化剂 H123B (B组分) 和水按一定比例配制, 环氧树脂为固化剂乳化型液态树脂, 其相关参数见表1。

常见的用于改性砂浆中的水泥是普通硅酸盐水泥, 当工程有特殊要求时会用到其它类型水泥。试验旨在对水性环氧砂浆的黏结性能做全面的分析, 而不需要其具备某种特性, 因此采用42.5级普通硅酸盐水泥制作水性环氧砂浆, 水泥砂浆力学性能见表2。改性砂浆中的拌合用砂, 常见的有河砂、人工砂和标准砂。试验采用厦门艾思欧标准砂有限公司生产的标准砂作为改性砂浆拌合用砂。

试验中基底混凝土试件统一采用灌浆料制作。灌浆料一般由水泥结合剂、石英砂骨料和改性物质配制而成, 相较于普通混凝土, 灌浆料具有早强、高强和使用方便等特点。考虑到部分基底混凝土试块会在冬季制作和养护, 为保证混凝土自身的强度, 选择青岛卓能达建筑科技有限公司生产的标准型灌浆料和超高强型灌浆料作为原材料, 28 d龄期抗压强度分别为60 MPa和80 MPa, 符合《环氧树脂砂浆技术规程》(DL/T 5193—2004)中对于基底混凝土强度的要求。

1.2 试件成型

(1) 将1份环氧和1.3份固化剂组分按配比倒入拌料容器, 搅拌均匀至白色牙膏状的黏稠物, 再分3次加入2.5份的水, 搅拌均匀至白色牛奶状的乳液。根据配合比称取一定量的水泥和砂搅拌均匀, 将水性环氧乳液倒入填料中并采用手动搅拌的方式进行搅拌, 用拌料铲进行翻转、碾压和搅拌, 至拌和料颜色均匀且无结块存在。整个拌和过程在5 min内完成。改性砂浆的力学性能见表3。

(2) 参照《水工混凝土试验规程》(SL 352—2020), 选用标准型灌浆料, 水灰比0.12, 采用振动台振实方式成型基底混凝土试块, 1 d拆模后放入(20±3)℃、相对湿度90%以上的标准养护室中养护28 d。

(3) 制作黏结抗拉试件时, 基底块黏结面预先做干湿处理, 湿润界面的处理方式为提前将基底块放水里浸泡48 h以上, 取出后擦干表面明水, 使用钢丝刷刷洗干净。干燥界面的处理方式为在烘箱中用

表1 水性环氧树脂体系技术指标

Table 1 Technical index of waterborne epoxy resin system

组分	外观	固含量/%	配比
水性环氧树 (H123A)	浅色黏稠液体	96~98	H123A : H123B=1 : 1.3
水性环氧固化 (H123B)	微黄色黏稠液体	49~51	

表2 P.O 42.5 水泥砂浆力学性能

Table 2 Mechanical properties of P.O 42.5 cement mortar

水泥等级	水泥/g	砂/g	水灰比	抗压强度/MPa		抗折强度/MPa		压折比	
				3 d	28 d	3 d	28 d	3 d	28 d
P.O 42.5	500	1 000	0.5	27.2	48.5	5.5	8.56	4.95	5.67

表3 水性环氧砂浆抗压强度和抗折强度表

Table 3 Compressive strength and flexural strength of epoxy modified mortar

乳液掺量/%	水灰比 W/C	7 d 龄期			28 d 龄期		
		抗折强/MPa	抗压强度/MPa	压折比	抗折强/MPa	抗压强度/MPa	压折比
21	0.22	13.24	42	3.17	14.13	65.68	4.65

80℃烘2h,取出后冷却至室温。浇筑环氧砂浆的边界需要预先切槽,槽宽和槽深约2mm,需要粗糙处理的试件用石材切割机划出深1mm左右的条纹,如图1和图2所示。在基底混凝土块黏结界面处涂上薄而均匀的界面剂并静置2~3min。

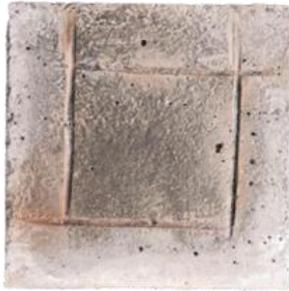


图1 混凝土表面切槽处理
Fig. 1 Grooving on concrete surface

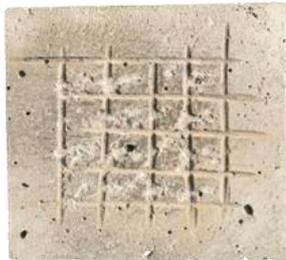


图2 混凝土表面粗糙处理
Fig. 2 Rough treatment of concrete surface

试验采用两种形式的黏结试件,方形黏结试件和长“8”字形黏结试件。方形黏结试件的制作方式为:在基底块上部安装40mm×40mm×10mm的试模,一次性装入改性砂浆,24±2h后拆模,自然养护至规定龄期测试黏结强度;长“8”字形黏结试件的制作方式为:将半个长“8”字形混凝土块放入涂有脱模剂的长“8”字形试模中,涂过乳液后将环氧砂浆分两层浇入余下的半个长“8”字模内,插捣并抹平表面,24±2h后拆模,自然养护至规定龄期测试黏结强度。

1.3 黏结试件

现场测试时,先使用空心钻机在水性环氧砂浆涂层上垂直切出一个Φ50mm的圆形待测面,将待测面部分的修复砂浆与周围砂浆分离,透过水性环氧砂浆涂层切割深入混凝土层5~10mm,之后用快速强力胶黏剂把Φ50mm的拉头黏结到砂浆待测面上。现场试验时把黏结拉头连接到拉拔仪上。为更好地模拟现场测试环境,试验采用方形黏结试件进行直接拉伸试验,试验装置如图3所示,抗拉强度试验按照《聚合物改性水泥砂浆试验规程》(DL/T 5126—

2001)进行。

国内检验黏结抗拉强度的试件形式多为“8”字形试件,而在试验中发现,“8”字形试件在拉伸过程中可能会出现扭、偏动,产生一定的弯矩,从而导致腰部位置出现应力集中现象,测出的黏结强度值离散性大。为避免应力集中现象,在“8”字形试件基础上进行改进。在试件腰部位置增加一直线段,长度为100mm,宽度为25mm,厚度为25mm,如图4所示。

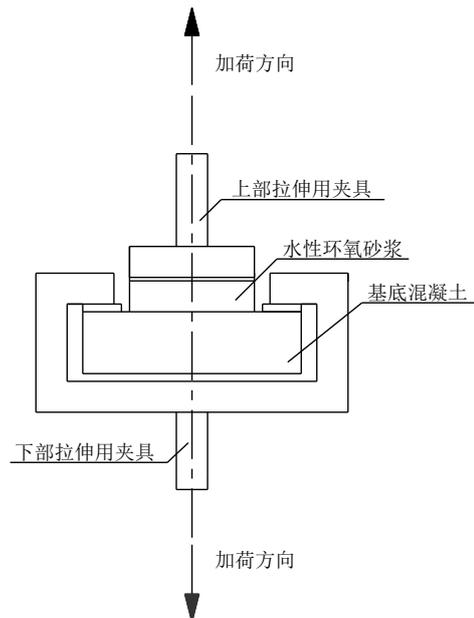


图3 方形黏结试件直接拉伸试验装置图
Fig. 3 Diagram of direct tensile test device for square bonded specimen

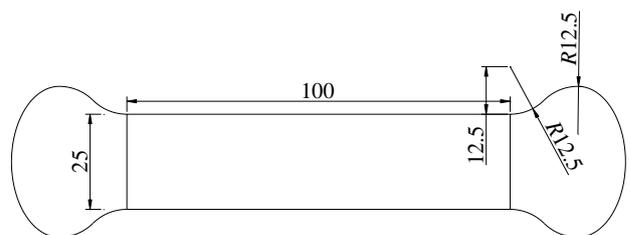


图4 长“8”字形黏结试件
Fig. 4 Long “8” shaped bonded test piece

1.4 黏结抗拉强度测定

黏结抗拉强度按下式计算:

$$\sigma_t = \frac{P}{A} \quad (1)$$

式中: σ_t 为试件抗拉强度, MPa; P 为破坏荷载, N; A 为黏接面积, mm^2 。

每个编号的试件制作6个,在6块试件测值中,剔除最大最小2个,以其余4个测值的平均值,作为该组试件混凝土黏结强度的试验结果。

2 结果与讨论

2.1 方形黏结试件抗拉强度

方形黏结试件抗拉强度测试结果见表4。

从表4可以看出, 无论试件采用何种黏结面处理方式, 整体而言, 使用水泥净浆作为界面剂对改性砂浆-混凝土黏结性能提升最大, 使用环氧乳液作为界面剂与无界面剂时的界面黏结强度相差不大, 甚至在II型面、湿润表面出现了黏结强度降低的现象。以无界面剂、干燥状态下的I型黏结面试件抗拉强度为基准, 涂抹水泥净浆界面剂后强度提升了49%, 而涂抹环氧乳液界面剂后黏结强度仅仅提升了27%。在湿润的II型黏结面涂抹环氧乳液作为界面剂时, 黏结强度不升反降, 为不涂界面剂的78%。原因可能是: 试验中的乳液掺量较大, 湿润状态下, 基底混凝土黏结界面表层存在水膜, 导致环氧乳液难以渗透到基底混凝土表面孔隙中去, 有自动脱离表面的现象。此外, 环氧乳液界面剂不易与混凝土进行黏结, 黏结面处出现孔洞现象, 导致改性砂浆-混凝土结合面抗拉强度较低。

基底混凝土表面干燥时, 经过粗糙处理过的II型面黏结强度均高于I型面, 原因是粗糙处理后混凝土表面与新浇筑的水性环氧砂浆的接触面积增加, 通过增强改性砂浆与混凝土间的主要黏结力, 即机械咬合力来提高整体结构的黏结性能。此外, 基底混凝土表面粗糙处理后黏结性能虽有提高, 但提升幅度不大, 使用不同种类界面剂时, 较I型面增长的最大值仅为39%。基底混凝土表面湿润时, 涂抹环氧乳液界面剂的II型黏结处理面试件抗拉强度与I型面试件相差不大, 原因可能是: 环氧乳液与基底混凝土的接触改善了黏结界面的粗糙度, 使得改性砂浆与基底混凝土间的机械咬合力降低。图5为I型面与II型面抗拉试件拉断面。

无论对于I型黏结面还是II型黏结面, 界面处于干燥状态时黏结效果明显优于湿润界面, 且不难看出, 在使用环氧乳液作为界面剂时, 基底混凝土干

湿情况对抗拉强度影响较大。此时, 干燥处理后的I型面试件相较于湿润界面, 改性砂浆抗拉强度提升93%; 干燥处理后的II型面试件相较于湿润界面, 改性砂浆抗拉强度提升160%。干燥状态下, 在基底混凝土表面涂一层环氧乳液, 原本的干燥表面会吸收部分乳液进入多孔隙基底混凝土中, 有助于环氧乳液渗透, 而环氧乳液界面剂又有利于改性砂浆的保水, 使黏结面附近的水泥充分水化; 湿润状态下, 混凝土表层的水膜阻碍了乳液渗透, 从而影响了改性砂浆的黏结效果。



图5 I型面与II型面黏结抗拉试件拉断面

Fig. 5 Tensile section of bonded tensile test piece between type I surface and type II surface

2.2 长“8”字形黏结试件抗拉强度

长“8”字形黏结试件抗拉强度测试结果见表5。

表4 方形黏结试件抗拉试验结果

Table 4 Tensile test results of square bonded specimens

MPa

界面类型	无界面剂		水泥净浆		环氧乳液	
	干燥	湿润	干燥	湿润	干燥	湿润
I型面	2.245 0	1.336 3	3.345 0	1.741 9	2.858 8	1.478 8
II型面	3.131 3	1.887 5	4.015 6	3.001 3	3.821 3	1.470 6

注: 表中I表示光滑面、II表示粗糙面

表5 长“8”字形黏结试件抗拉试验结果
Table 5 Tensile test results of long “8” shaped bonded specimens

界面类型	无界面剂		水泥净浆		环氧乳液	
	干燥	湿润	干燥	湿润	干燥	湿润
I型面	2.131 2	1.290 7	2.611 2	1.771 2	4.560 0	1.947 2
II型面	3.491 2	1.806 4	3.971 2	2.286 4	5.920 0	4.446 4

注：表中I表示光滑面、II表示粗糙面

从表5可以看出，在长“8”字形黏结试件抗拉试验中，界面剂黏结效果最好的是环氧乳液，其次是水泥净浆和无界面剂，以无界面剂下表面干燥的I型面试件抗拉强度为基准，涂抹水泥净浆界面剂和环氧乳液界面剂后强度分别提高23%和114%。

无论对于I型面还是II型面黏结试件，干燥界面的抗拉强度均高于湿润界面。同样地，在使用环氧乳液作为界面剂时，基底混凝土干湿情况对抗拉强度影响较大。而根据俞亮^[11]的改性砂浆黏结拉拔试验，在湿润界面条件下，改性砂浆黏结拉拔强度值高于干燥界面条件下的黏结拉拔强度值。出现这种差异可能是因为：当改性砂浆中的乳液掺量较小时，改性砂浆中的水份被干燥的基底混凝土表面吸收，导致界面处的改性砂浆水灰比有所降低。由于水份过早丧失，靠近黏结面的水泥水化反应进行得不充分，对结合面黏结强度产生一定的影响。而基底混凝土湿润界面表层水膜的存在阻碍了基材吸收砂浆中的水份，避免了靠近黏结面处改性砂浆水份流失，有利于此处水泥的水化反应，保证了黏结面附近水泥硬化后的强度，因此黏结力较干燥表面有所提高。本文中使用的改性环氧砂浆乳液掺量为21%，属于高聚灰比改性砂浆。基面湿润状态下，混凝土表层的水膜阻碍了环氧乳液向基底混凝土表面的孔隙渗透，从而影响了界面黏结强度。

不论黏结界面是干燥还是湿润，II型黏结处理面试件黏结抗拉强度均高于I型面。基底混凝土表面粗糙处理后虽然黏结强度有所提升，但幅度不大。例如，以I型干燥界面改性砂浆-混凝土黏结试件为基准，无界面剂、水泥净浆和环氧乳液界面剂下II型面黏结试件分别提高64%、52%、30%。图6为I型面与II型面黏结抗拉试件拉断面。

在进行改性砂浆与混凝土的黏结试验时，几乎所有的试件都在砂浆与混凝土的结合面附近的区域破坏，这一破坏区域，叫做界面过渡区，它是改性砂浆与混凝土黏结后的薄弱区。界面过渡区的缺陷是导致过渡区改性砂浆力学性能大幅降低的直接原因，此外，基底混凝土的水泥几乎完全水化，失去

活性，导致界面过渡区黏结力薄弱。



(a) I型面



(b) II型面

图6 I型面与II型面黏结抗拉试件拉断面

Fig. 6 Tensile section of bonded tensile test piece between type I surface and type II surface

3 结 论

针对混凝土结构补强加固过程中改性砂浆-混凝土黏结面这个薄弱环节，进行改性砂浆和混凝土黏结抗拉试验，研究了界面干湿状况、粗糙度和界面剂类型对改性砂浆-混凝土界面黏结强度的影响，得到结论如下：

(1) 界面干湿状况是影响黏结强度的主要因素，干燥界面的抗拉强度高于湿润界面，使用环氧乳液作为界面剂时，界面干湿状况对抗拉强度影响较大。在研究其对黏结强度的影响时，需综合考虑改性砂浆中乳液掺量。

(2) 使用界面剂可以改善改性砂浆与混凝土接触的界面区结构，增强黏结性能。直接拉伸试验结果表明界面剂黏结效果由大到小依次为水泥净浆、环氧乳液和无界面剂；黏结抗拉试验结果表明界面剂黏结效果由大到小依次为环氧乳液、水泥净浆和无界面剂。这是因为两种黏结试件的接缝方式不同，直接拉伸试验采用的是顶部接缝，而黏结抗拉试验采用的是侧面接缝。因此研究界面剂类型因素时需同

时考虑界面干湿状况和界面接缝方式对黏结的影响。

(3)对改性砂浆与混凝土的结合面进行一定程度的粗糙处理,可以使基底混凝土与界面剂的接触面积增大,增强黏结面的机械咬合力,从而使改性砂浆黏结强度得到提高。基底混凝土表面粗糙处理后虽然黏结强度有所提升,但提升幅度不大。

(4)方形黏结试件测得的抗拉强度偏低,但数据离散性小,适合模拟检验面层修补中改性砂浆-混凝土局部剥离黏结强度。长“8”字形黏结试件由于在进行拉伸试验时最大程度地降低了剪切力作用,测得的试验结果更稳定。

本文选自“全国病险水库安全评估及除险加固技术前沿研讨会”征集论文,会议旨在探讨病险水库评估方法以及除险加固新技术、新措施,推进病险水库除险加固工作、提高防灾和供水保障能力,会议于2021年5月26—27日在杭州召开。

本期刊登其中两篇精选论文。

参考文献

- [1] 梅世鹏. 潮湿及水下修补用环氧类砂浆的开发研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2013.
MEI Shi-peng. Study on epoxy mortar and epoxy modified cement mortar for use in wet and underwater conditions structure repair[D]. Changsha: Hunan University, 2013.
- [2] 方萍, 黄政宇, 尚守平, 等. 水泥基砂浆加固混凝土构件界面黏结强度的研究[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(3): 45-50.
FANG Ping, HUANG Zheng-yu, SHANG Shou-ping, et al. Study on interfacial adhesive strength between cement-based mortar and concrete substrate[J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(3): 45-50.
- [3] ROBINS P J, AUSTIN S A. A unified failure envelope from the evaluation of concrete repair bond tests[J]. Magazine of Concrete Research, 1995, 47(170): 57-68.
- [4] GEISSERT D G, LI S G, FRANTZ G C, et al. Splitting prism test method to evaluate concrete-to-concrete bond strength[J]. Aci Materials Journal, 1999, 96(3): 359-366.
- [5] N P S, Y O, K D. Evaluation method for adhesion test results of bonded mortars to concrete substrates by square optimization method[J]. Aci Materials Journal, 1995, 92(4): 355-360.
- [6] CUSSON D, MAILVAGANAM N. Durability of repair materials[J]. Concrete International, 1996, 18(3): 34-38.
- [7] ABU-TAIR A I. Testing the bond between repair materials and concrete substrate[J]. Aci Materials Journal, 1996, 93(6), 553-558.
- [8] 卜良桃, 全玥. 高性能水泥复合砂浆与混凝土黏结的剪切性能试验研究[J]. 四川建筑科学研究, 2008, 34(3): 64-67.
BU Liang-tao, QUAN Yue. Experimental research on shear properties of adhesion between high performance cement-mortar and concrete[J]. Sichuan Building Science, 2008, 34(3): 64-67.
- [9] 高剑平, 潘景龙, 王雨光. 不同界面剂对新旧混凝土黏结强度影响的试验研究[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 2001, 34(5): 25-29.
GAO Jian-pin, PAN Jing-long, WANG Yu-guang. Experimental study on the influence of different interfacial agents on the bonding strength of old and new concrete[J]. Journal of Harbin Architecture University, 2001, 34(5): 25-29.
- [10] 蒋隆敏, 尚守平, 黄政宇. 一种适用于钢丝(筋)网水泥加固RC结构的纤维增强复合砂浆和界面剂[J]. 土木工程学报, 2005, 38(5): 41-47.
JIANG Long-min, SHANG Shou-ping, HUANG Zheng-yu. Fiber reinforced composite mortar and interfacial adhesive for strengthening of rcstructures with ferrocement[J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(5): 41-47.
- [11] 俞亮. 水性环氧乳液改性砂浆抗冲磨特性试验研究[D]. 南京: 河海大学, 2019.
YU Liang. Experimental study on anti-abrasion properties of waterborne epoxy emulsion modified mortar[D]. Nanjing: Hohai University, 2019.