

高温养护条件下环氧树脂基砂浆早期性能研究

夏伟¹, 白二雷¹, 吕炎², 许金余^{1,3}, 秦立军¹

(1. 空军工程大学航空工程学院, 西安, 710038; 2. 94968部队, 南京, 210012;
3. 西北工业大学力学与土木建筑学院, 西安, 710072)

摘要 环氧树脂材料具有一定的温度敏感性, 因此探究养护温度对环氧树脂基砂浆性能的影响特点十分必要。为进一步明晰高温(30~60 °C)养护条件下环氧树脂基砂浆早期物理力学特性的演变规律, 对其凝结时间、抗折强度及抗压强度进行了测试, 并结合扫描电镜(SEM)及压汞(MIP)技术, 分析了环氧树脂基砂浆的微观结构特征。试验结果表明: 随着养护温度的升高, 环氧树脂基砂浆的凝结时间逐渐缩短, 并且凝结时间与养护温度之间大致呈现出线性递减的演变关系。在高温养护条件下, 随着温度的升高, 环氧树脂基砂浆的早龄期(4 h~3 d)抗折强度及抗压强度均先缓慢增大, 再急剧下降。当养护温度为40 °C时, 环氧树脂基砂浆的强度特性相对最佳, 4 h龄期试件的抗折、抗压强度分别达到21.4 MPa和56.8 MPa。在40 °C的养护条件下, 环氧树脂基砂浆的固化反应较为完全, 基体内部结构均匀密实, 无明显的孔洞、裂隙等缺陷, 而在60 °C的养护条件下, 环氧树脂基砂浆的固化反应不够充分, 基体内部结构松散杂乱, 原始缺陷增多。

关键词 环氧树脂基砂浆; 高温养护; 凝结时间; 早期强度; 微观结构

DOI 10.3969/j.issn.2097-1915.2024.06.014

中图分类号 TU57+8.11 **文献标志码** A **文章编号** 2097-1915(2024)06-0113-06

Research on Performance at Early Stage for Epoxy Resin Based Mortar under Curing Conditions at High Temperature

XIA Wei¹, BAI Erlei¹, LYU Yan², XU Jinyu^{1,3}, QIN Lijun¹

(1. Aviation Engineering School, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;
2. Unit 94968, Nanjing 210012, China; 3. School of Mechanics, Civil Engineering and Architecture,
Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract Epoxy resin is sensitive to temperature, so it is necessary to explore the influence of curing temperature on the performance of epoxy resin based mortar. In order to further clarify the evolution law of early physical and mechanical properties of epoxy resin based mortar under curing conditions of different high temperature (30~60 °C), its setting time, flexural strength, and compressive strength are tested. And the microstructure characteristics of epoxy resin based mortar are analyzed in combination with scanning electron microscopy (SEM) and mercury intrusion porosimetry (MIP). The experimental results show that with the increment of curing temperature, the setting time of epoxy resin based mortar shortens

收稿日期: 2024-01-24

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52278287)

作者简介: 夏伟(1996-), 男, 山东日照人, 博士生, 研究方向为防护材料与结构。E-mail: xiaweiafe@163.com

通信作者: 白二雷(1979-), 男, 河南焦作人, 副教授, 博士生导师, 研究方向为机场防护工程。E-mail: bwykgy@163.com

引用格式: 夏伟, 白二雷, 吕炎, 等. 高温养护条件下环氧树脂基砂浆早期性能研究[J]. 空军工程大学学报, 2024, 25(6): 113-118. XIA Wei, BAI Erlei, LYU Yan, et al. Research on Performance at Early Stage for Epoxy Resin Based Mortar under Curing Conditions at High Temperature[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2024, 25(6): 113-118.

gradually, and there is a roughly linear decreasing relationship between the setting time and the curing temperature. Under curing conditions of high temperature, with the increment of temperature, the flexural strength and compressive strength of epoxy resin mortar at an early age (4 h~3 d) first slowly increase, and then sharply decrease. When the curing temperature is at 40 °C, the strength characteristics of epoxy resin based mortar are relatively optimal, and the flexural strength and compressive strength of the specimens cured for 4 h reach 21.4 MPa and 56.8 MPa respectively. Under the curing conditions of 40 °C, the curing reaction of epoxy resin based mortar is complete relatively, and the internal structure of the matrix is uniform and dense, without obvious micro defects such as pores and cracks. However, under the curing conditions of 60 °C, the curing reaction of epoxy resin based mortar is not sufficient, and the internal structure of the matrix is loose relatively and disordered with a significant increment of micro defects.

Key words epoxy resin based mortar; high temperature curing; setting time; early strength; microstructure

在日常飞行训练及遂行任务过程中,机场水泥混凝土道面长期承受自然环境、静动态荷载等多种因素的耦合作用影响,难免出现裂缝、沉陷、剥落等不同程度的病害^[1-3]。若破损道面得不到及时修复,将会降低使用性能,造成极大隐患,严重威胁飞机运行以及人员的安全性^[4-5]。修补材料是影响工程设施抢修效能的重要因素,为提升机场道面的快速修复能力,研发兼具固化速度快、早期强度高、优良特点的应急修补材料,一直以来备受学者们关注。

环氧树脂基砂浆是一种新型的有机-无机高性能复合材料,其由环氧树脂按照一定比例替代水泥作为胶凝材料,以无机矿物作为骨料,加入固化剂、稀释剂、填料等组分混合配制而成,兼具有机高分子材料以及无机材料的理化性质^[6-8]。相较于常规的水泥砂浆而言,含有环氧树脂体系的砂浆材料具有较好的快硬、早强特性,在工程设施抢修抢建、建筑结构补强加固等领域的应用前景十分广阔^[9-12]。Debska等^[13]发现,与普通水泥砂浆相比,环氧树脂基砂浆表现出更加优异的耐化学腐蚀性。高杰等^[14]采用环氧树脂基砂浆开展了破损道路缺陷的维修验证,经过现场实际应用与性能检测,结果表明,使用环氧树脂基砂浆修补后的路面状态完好,达到了预期的目标。近年来,随着修补材料的应用场景日趋复杂,应用范围不断扩展,环氧树脂基砂浆基本性能特征的温度敏感性逐渐引起了国内外科研工作者的关注^[15-16]。Hassan等^[17]测试了5种不同类型修补材料在温度为35 °C养护条件下的28 d工程性能指标,结果显示,环氧树脂基砂浆的孔隙结构最为细密,并且具有更加出色的强度特性。吕炎等^[18]设计了全过程低温试验系统,针对环氧树脂基砂浆在0~15 °C养护条件下的早期性能进行了测试与表征,发现低温环境显著劣化了环氧树脂基砂浆的工作性能及早期力学性能。由此可以看出,现有试验探索和工程实践大多侧重于考虑环氧树脂基砂浆在

常规温度以及较低温度环境下的物理力学性能。值得关注的是,就我国实际情况而言,南方夏季高温时,部分地区的温度甚至超过40 °C,地表温度更是可达60 °C。同时,相关研究表明^[19],较高的温度环境会影响环氧树脂类有机材料的机械强度等特征参数。由于环氧树脂基砂浆的配合比不尽相同,其工作性能及力学性能也会存在一定程度的差异,但是目前,关于高温养护对环氧树脂基砂浆早期性能影响特点的报道还较为欠缺。环氧树脂基砂浆在高温养护条件下早期性能的演化规律及机制尚未完全明晰,鉴于此,迫切需要进一步开展相关试验研究。

综合考虑上述背景,本文在前期研究成果的基础上,通过设置不同温度的养护条件(常温:20 °C,作为对照;高温:30~60 °C),模拟施工现场环氧树脂基砂浆所处的实际工况,系统研究环氧树脂基砂浆凝结时间、抗折强度、抗压强度等早期物理力学性能指标的演变规律,并且依托扫描电镜(scanning electron microscopy, SEM)观测以及压汞(mercury intrusion porosimetry, MIP)测试技术,分析其微观结构特征,以期丰富环氧树脂基砂浆类快速修复材料的高温试验数据,从而更加全面地认识其早期性能随养护温度的变化关系,进而为其后续的性能优化以及工程应用提供有益参考和借鉴。

1 试验材料与方法

1.1 原材料

双酚A型环氧树脂,其环氧当量为186 g/mol,南通星辰合成材料有限公司生产。固化剂TE80-593、稀释剂TC-AGE、增韧剂V2246,江阴万千化学品有限公司生产。有机硅消泡剂,工业级,郑州腾安驰生物科技有限公司生产。细骨料为中砂,其堆积密度为1 470 kg/m³、表观密度为2 635 kg/m³,细度模数为2.9,西安市亚安砂石料厂生产。填料

为P·O 42.5级普通硅酸盐水泥,其比表面积为 $358\text{ m}^2/\text{kg}$,密度为 $3.05\text{ g}/\text{cm}^3$ 。同时,外掺玄武岩纤维(BF)和硫酸钙晶须(SW)作为砂浆材料的增强组分:玄武岩纤维,其长度为 6 mm ,密度为 $2.64\text{ g}/\text{cm}^3$,泰安浩达新材料有限公司生产;硫酸钙晶须,其长度为 $50\sim 200\text{ }\mu\text{m}$,密度为 $2.61\text{ g}/\text{cm}^3$,济南晴天化工科技有限公司生产。

1.2 配合比

在课题组先前的研究中,通过响应曲面法获得了环氧树脂基砂浆的较优配合比参数^[18]:骨胶比(砂与环氧树脂的质量比)为4.62、环固比(环氧树脂与固化剂的质量比)为2.91、填胶比(水泥与环氧树脂的质量比)为1,增韧剂掺量为9.32%,稀释剂掺量为10%,消泡剂掺量为0.4%。玄武岩纤维和硫酸钙晶须的掺量均以占环氧树脂质量的百分比进行计算,分别为0.3%和9%。环氧树脂基砂浆的具体配合比如表1所示。

表1 环氧树脂基砂浆的质量配比

Tab.1 Mix proportion of epoxy resin based mortar

组分	A	B	C	D	E	F	G	BF	SW
含量/ (g/m^3)	260	89.4	26	24	1	1	200	260	0.78 23.4

注:表中各物料的用量均以三联试模($3\times 40\text{ mm}\times 40\text{ mm}\times 160\text{ mm}$)为基准;A~G分别表示环氧树脂、固化剂、稀释剂、增韧剂、消泡剂、砂、水泥。

1.3 试件制作与处理

试验所用环氧树脂基砂浆试件的制作流程参照《DL/T 5193—2021 环氧树脂砂浆技术规程》中的有关规定执行。首先,一方面,将环氧树脂、稀释剂、增韧剂、固化剂和消泡剂在烧杯中搅拌 2 min ,制得环氧树脂胶液;另一方面,将水泥、砂、玄武岩纤维和硫酸钙晶须置于搅拌机中干拌 2 min ,确保纤维材料分布均匀。接着,将环氧树脂胶液倒入搅拌机中,先慢速搅拌 0.5 min ,再快速搅拌 1 min ,促使干料与液体充分混合,从而获得拌合物。最后,卸料装模(将拌和物分多次均匀地浇筑到棱柱体铸铁三联模具中),振捣密实,抹平试件表面,并及时将其移入相应的温度环境中,待试件固化后脱模,而后继续放置于目标温度条件下养护至测试龄期。

环氧树脂基砂浆试件的高温养护环境由恒温恒湿试验箱提供,本文依次选取 $20\text{ }^\circ\text{C}$ (常温,作为对照)、 $30\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $40\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $50\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $60\text{ }^\circ\text{C}$ 作为试验温度,相对湿度为 $(50\pm 5)\%$ 。为更加全面地研究环氧树脂基砂浆在不同温度养护条件下的早期物理力学性能,分别设置养护龄期为 4 h 、 12 h 、 1 d 、 2 d 、 3 d 。

1.4 试验方法

本试验围绕探究环氧树脂基砂浆早期($4\text{ h}\sim$

3 d)性能随养护温度($20\sim 60\text{ }^\circ\text{C}$)的变化关系展开,依次进行了5组试件在相应模拟工况下的物理力学性能表征试验,主要以凝结时间、早期抗折强度和抗压强度作为分析指标。同时,为增加试验数据的可靠性,在试验过程中每组均测试了3个有效的平行试件。试验内容包括凝结时间测试、早期强度测试以及微观结构测试,以下为试验方法。

凝结时间测试:环氧树脂基砂浆拌合物凝结时间(以初凝时间表征)的测定参照《DL/T 5193—2021 环氧树脂砂浆技术规程》实施。最终获得的试验结果均为3个有效试件的平均值。

早期强度测试:根据《GB/T 17671—2021 水泥胶砂强度检验方法(ISO法)》,采用全自动砂浆抗折抗压试验一体机对环氧树脂基砂浆试件进行抗折、抗压强度测试,如图1所示。每组测试3个有效试件,最终取其平均值进行分析。

微观结构测试:在受压破坏后环氧树脂基砂浆试件的中间部位选取粒径大约为 5 mm 的碎块,将所选样品用无水乙醇清洗、浸泡, 48 h 后取出并置于恒温干燥箱内烘干备用。依托蔡司场发射扫描电子显微镜(Gemini SEM 360)观测不同温度养护条件下环氧树脂基砂浆的微观形貌,在测试开始之前,需要对样品进行喷金处理,以增加其导电性能,从而获得高质量的观察效果。此外,借助美国康塔仪器公司生产的全自动压汞仪对环氧树脂基砂浆样品的孔隙参数进行测定。

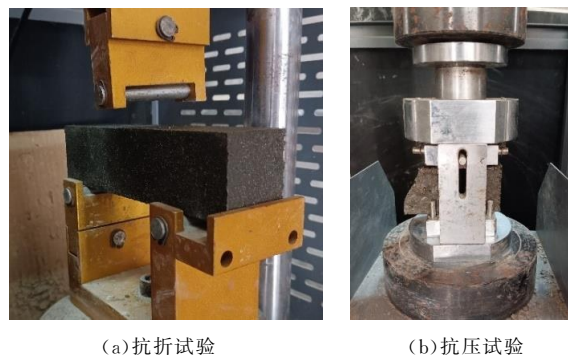


图1 抗折及抗压强度测试

Fig.1 Flexural and compressive strength testing

2 结果与讨论

2.1 养护温度对凝结时间的影响

图2展示了环氧树脂基砂浆在不同温度养护条件下凝结时间的变化情况。由图2可以看出,随着养护温度的升高,环氧树脂基砂浆的凝结时间大致呈现出线性下降的演变趋势。常温($20\text{ }^\circ\text{C}$)养护条件下环氧树脂基砂浆的凝结时间为 36 min ,而

60 °C 高温养护条件下其凝结时间已经缩短至 15 min,降低幅度达到了 58.33%。由此可知,本文制备的环氧树脂基修补材料对养护温度具有较强的敏感性,在高温养护条件下,环氧树脂与固化剂混合之后,发生固化反应的速度明显提高,进而有效促进了砂浆内部各组分之间的交互粘结,使得试件的凝结硬化进程加快^[20]。在此基础上,对获得的试验数据进行线性拟合,得到环氧树脂基砂浆的凝结时间-养护温度回归模型。可以发现,模型拟合曲线与实测数据值之间的吻合程度较高,误差也在较小的范围之内,相关系数 $R^2=0.99$,这说明该模型能够较好地反映养护温度对环氧树脂基砂浆凝结时间的影响规律。模型拟合曲线的数学表达式为:

$$Y = -0.52T + 45.8 \quad (1)$$

式中:Y 为凝结时间,单位为 min;T 为养护温度,单位为 °C。

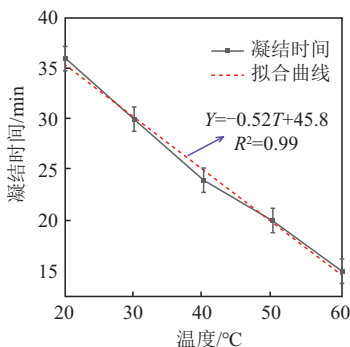


图2 不同温度养护条件下环氧树脂基砂浆的凝结时间
Fig. 2 Setting time of epoxy resin based mortar under different curing temperature

2.2 养护温度对抗折强度的影响

图3展示了常温及高温养护条件下,环氧树脂基砂浆不同龄期抗折强度的变化情况。从图中可以看出,随着养护温度的升高,环氧树脂基砂浆各个龄期的抗折强度均表现出先缓慢增大,后迅速减小的趋势。在40 °C的高温养护条件下,环氧树脂基砂浆的早期抗折强度出现峰值,此时,4 h龄期试件的抗折强度达到了21.4 MPa。当养护温度超过40 °C后,环氧树脂基砂浆的早期抗折强度骤然降低,以50 °C的高温养护条件为例,4 h龄期试件的抗折强度为11.3 MPa,较之养护温度为40 °C时的降低幅度为47.19%,而且明显低于常温养护条件下试件的抗折强度。究其原因,在温度较高的养护条件下,由于环氧树脂与固化剂的反应速度过快,释放出大量的热,导致砂浆内部形成的结构体系更加松散,孔隙增多,砂浆的抗折强度有所降低。同时,由于50 °C接近环氧树脂自身的玻璃化转变温度(环氧树脂从玻璃态向弹性态转变时所对应的温度),使得其分子链的状态发生改变,相互之间的凝聚力减小,环

氧树脂固化产物的软化现象较为严重^[21]。这对基体的结构形态是非常不利的,进而造成了环氧树脂基砂浆抗折强度的显著退化。通过图3还可以发现,在相同的养护温度条件下,随着龄期的延长,环氧树脂基砂浆的早期抗折强度呈现出初期增长迅速、后期增长缓慢的趋势。例如,当养护温度为40 °C时,12 h龄期试件的抗折强度较之4 h龄期试件的抗折强度提高了33.18%,而3 d龄期试件的抗折强度与1 d龄期试件的抗折强度相比较,增长幅度仅为2.33%。环氧树脂的快速固化造成了砂浆的前期强度发展较快,12 h龄期后,固化反应进行得较为完全,砂浆强度的增长程度相对较小。

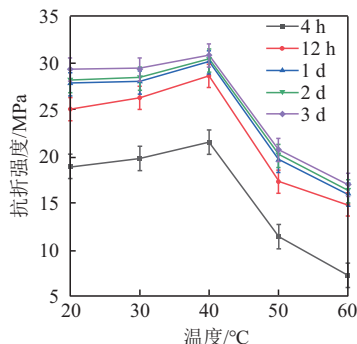


图3 不同温度养护条件下环氧树脂基砂浆的抗折强度
Fig. 3 Flexural strength of epoxy resin based mortar under different curing temperature

2.3 养护温度对抗压强度的影响

图4展示了常温及高温养护条件下,环氧树脂基砂浆不同龄期抗压强度的变化情况。从图中可以看出,养护温度对环氧树脂基砂浆抗压强度的影响规律与抗折强度基本类似,在20~60 °C的养护条件下,随着养护温度的升高,环氧树脂基砂浆各个龄期的抗压强度先逐渐增大,再急剧减小,当养护温度为40 °C时,环氧树脂基砂浆的早期抗压强度达到最大值,4 h龄期试件的抗压强度为56.8 MPa。当养护温度为50 °C时,4 h龄期试件的抗压强度减小为42.5 MPa,与养护温度为40 °C时相比较,降低率为25.17%。这一方面是因为养护温度过高,环氧树脂迅速发生固化反应,使得基体的密实程度不够,而且高温环境使得材料内应力过高,不利于砂浆早期强度的充分发展^[22]。另一方面,此时的养护温度已经基本达到了环氧树脂的玻璃化转变温度,环氧树脂固化产物的力学性质将会发生改变,即从坚硬的固体逐渐向柔性的弹性体转变^[15]。因此,当环氧树脂自身的这种形态转变产生的劣化效应大于养护温度对固化反应的正向提升作用时,环氧树脂基砂浆的抗压强度便会开始降低。此外,对比同一养护温度条件下环氧树脂砂浆早期抗压强度随龄期的发展情况可知,环氧树脂与固化剂的快速反应促进了环氧

树脂基砂浆 12 h 龄期内抗压强度的大幅发展,而 1~3 d 龄期内其抗压强度的增幅递减。

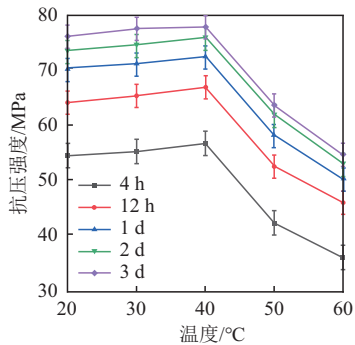
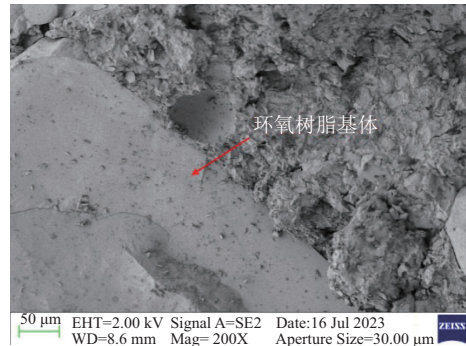


图4 不同温度养护条件下环氧树脂基砂浆的抗压强度
Fig. 4 Compressive strength of epoxy resin based mortar under different curing temperature

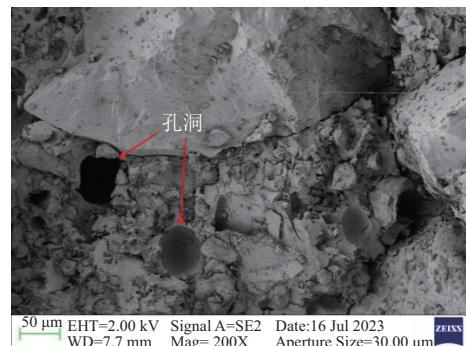
3 微观机理分析

图5为不同高温养护条件下环氧树脂基砂浆的早期微观形貌观测结果(受篇幅所限,本文以4 h龄期为例进行说明)。在此,主要选择早期强度特性相对较优的40 °C养护试验组以及早期强度特性相对较差的60 °C养护试验组进行分析。通过对比图5(a)和图5(b)可以发现,在40 °C的高温养护条件下,环氧树脂基砂浆内部形成了较为致密的微观结构体系,环氧树脂基体与其他组分之间粘结紧密,而且没有明显的孔洞、裂隙等缺陷,整体而言,微观形貌平滑密实。这说明环氧树脂的固化反应进展完全,其固化后形成的高分子网状结构对骨料等物相的包裹性增强,使得环氧树脂基砂浆表现出更加优异的早期强度特性。材料的微观形貌特征能够与其宏观力学试验结果相互照应,即在40 °C高温时,环氧树脂基砂浆的抗折、抗压强度达到峰值。但是当养护温度升高到60 °C后,由于过高的外界温度环境与材料组分之间相互反应产生的热量叠加,使得热效应加剧,引起环氧树脂发生剧烈的固化反应,从而导致环氧树脂基砂浆内部微观结构的均匀性、连续性和稳定性相对较差,缺陷增多,各种反应物的分布较为松散杂乱,宏观表现为环氧树脂基砂浆的力学强度降低。此外,通过压汞试验测得的孔隙结构参数显示,在常温养护条件下,环氧树脂基砂浆的总孔隙量为0.039 5 mL/g,当养护温度分别为30 °C、40 °C、50 °C时,环氧树脂基砂浆的总孔隙量分别为0.035 2 mL/g、0.029 8 mL/g、0.054 6 mL/g,而在60 °C的高温养护条件下,环氧树脂基砂浆的总孔隙量则达到了0.062 7 mL/g,即随着养护温度的升高,环氧树脂基砂浆的孔隙含量先减少,然后有所增加。这也进一步说明,过高的温度养护条件不利于

环氧树脂基砂浆凝结硬化,由于环氧树脂固化反应进行过快,导致基体结构发展不够充分,内部的孔隙含量明显增多,形成的胶结体密实度发生衰退,这些不利缺陷的存在加剧了材料在荷载作用下的破坏失效,削弱了环氧树脂基砂浆的早期力学性能。



(a) 养护温度为 40 °C



(b) 养护温度为 60 °C

图5 不同养护温度条件下环氧树脂基砂浆的微观形貌
Fig. 5 Microcosmic appearance of epoxy resin based mortar under different curing temperature

4 结论

通过进行环氧树脂基砂浆的凝结时间、抗折强度及抗压强度试验,探讨了高温养护对其早期物理力学性能指标的影响规律,研究成果对于丰富环氧树脂基砂浆的高温试验数据,进而指导工程施工具有一定的现实意义。经分析主要获得以下结论:

1) 高温养护条件对环氧树脂基砂浆的凝结过程具有显著影响,随着养护温度的升高,环氧树脂基砂浆的凝结时间逐渐缩短,并且凝结时间与养护温度之间具有近似线性递减的变化关系。

2) 在高温养护条件下,受环氧树脂玻璃化转变温度的影响,修补材料的早龄期抗折及抗压强度均随养护温度的提高而呈先缓慢增大、再急剧下降的变化趋势。当养护温度为40 °C时,环氧树脂基砂浆的早期强度特性相对最佳,其中,4 h龄期试件的抗折、抗压强度分别为21.4 MPa、56.8 MPa。

3) 在试验范围内,当养护温度为40 °C时,环氧

树脂基砂浆的固化反应较为完全,凝结程度较高,形成了致密的结构体系,基体内部无明显的孔洞、裂隙等缺陷,而当养护温度为 60 ℃ 时,其内部结构不够均匀,较为松散杂乱,孔隙含量增大。

参考文献

- [1] 张宇辉, 赵媛媛, 顾欣. 温度-荷载耦合场下机场跑道剩余寿命评价模型[J]. 南京航空航天大学学报, 2023, 55(4):725-733.
ZHANG Y H, ZHAO Y Y, GU X. Residual Life Evaluation Model for Airport Runway under Coupled Temperature-Load Fields[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2023, 55(4): 725-733. (in Chinese)
- [2] ABRAHAM S M, RANSINCHUNG G D R N. Temperature Variation and Stresses in Unreinforced Concrete Pavement Containing RAP[J]. Construction and Building Materials, 2020, 263:120506.
- [3] 王祯辉, 郭荣鑫, 郭路鑫, 等. 基于正交试验的聚甲醛纤维机场道面混凝土力学性能研究[J]. 公路交通科技, 2023, 40(12):57-65.
WANG Z H, GUO R X, GUO L X, et al. Study on Mechanical Property of Airport Pavement Concrete with POM Fiber Based on Orthogonal Test[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2023, 40(12):57-65. (in Chinese)
- [4] 陈东方, 蔡良才, 邵斌, 等. 基于历史数据矩阵的机场道面维护决策方法[J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(8):1947-1954.
CHEN D F, CAI L C, SHAO B, et al. Maintenance Decision of Airport Pavement Based on Historical Data Matrix[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, 16(8):1947-1954. (in Chinese)
- [5] BAYRAKTAROVA K, EBERHARDSTEINER L, ZHOU D, et al. Characterisation of the Climatic Temperature Variations in the Design of Rigid Pavements [J]. International Journal of Pavement Engineering, 2022, 23(9):3222-3235.
- [6] PANG B, ZHANG Y S, LIU G J, et al. Interface Properties of Nanosilica-Modified Waterborne Epoxy Cement Repairing System[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2018, 10(25):21696-21711.
- [7] RAHMAN M M, AKHTARULISLAM M. Application of Epoxy Resins in Building Materials: Progress and Prospects[J]. Polymer Bulletin, 2022, 79(3): 1949-1975.
- [8] JIN N J, YEON J, SEUNG I, et al. Effects of Curing Temperature and Hardener Type on the Mechanical Properties of Bisphenol F-Type Epoxy Resin Concrete [J]. Construction and Building Materials, 2017, 156: 933-943.
- [9] ZHANG X J, DU M R, FANG H Y, et al. Polymer-Modified Cement Mortars: Their Enhanced Properties, Applications, Prospects, and Challenges [J]. Construction and Building Materials, 2021, 299:124290.
- [10] GU H W, CAO Q, LI J H, et al. Enhancing the Comprehensive Performance of Bisphenol A Epoxy Resin via Blending with a Bio-Based Counterpart [J]. Polymer, 2023, 280:126038.
- [11] 田耀刚, 鲁涛, 赵成, 等. 水性环氧树脂-聚丙烯纤维改性水泥基快速修补砂浆性能研究[J]. 功能材料, 2024, 55(1):1031-1037.
TIAN Y G, LU T, ZHAO C, et al. Performance of Waterborne Epoxy Resin-Polypropylene Fiber Modified Cement-Based Quick Repair Mortar[J]. Journal of Functional Materials, 2024, 55(1): 1031-1037. (in Chinese)
- [12] 钱佳佳. 环氧树脂-水泥复合修补材料的制备与性能研究[D]. 南京:东南大学, 2021.
QIAN J J. Preparation and Properties of Epoxy Resin-Cement Composite Repair Material [D]. Nanjing: Southeast University, 2021. (in Chinese)
- [13] DEBSKA B, LICHOLAI L. A Study of the Effect of Corrosive Solutions on Selected Physical Properties of Modified Epoxy Mortars[J]. Construction and Building Materials, 2014, 65:604-611.
- [14] 高杰, 胡高平, 肖卫东. 环氧砂浆在道路修复中的应用[J]. 粘接, 2009, 36(6):74-75.
GAO J, HU G P, XIAO W D. Application of Epoxy Mortar in Road Maintenance[J]. Adhesion in China, 2009, 36(6):74-75. (in Chinese)
- [15] 陈静波, 邓安仲, 陈科, 等. 环氧树脂砂浆力学性能的温度敏感性研究[J]. 化工新型材料, 2016, 44(4): 249-251, 253.
CHEN J B, DENG A Z, CHEN K, et al. Temperature Sensitivity of Mechanical Property of Epoxy Resin Mortar[J]. New Chemical Materials, 2016, 44(4): 249-251, 253. (in Chinese)
- [16] REIS J M L, CARVALHO A R, DA COSTA MATOS H S. Effects of Displacement Rate and Temperature on the Fracture Properties of Polymer Mortars [J]. Construction and Building Materials, 2014, 55:1-4.
- [17] HASSAN K E, ROBERY P C, AL-ALAWI L. Effect of Hot-Dry Curing Environment on the Intrinsic Properties of Repair Materials[J]. Cement and Concrete Composites, 2000, 22(6):453-458.