

聚丙烯纤维增强磷酸钾镁水泥基钢结构防火涂料的性能研究

李诗程¹, 王南^{1,*}, 余江枫¹, 段子龙¹, 文德昕¹, 张硕¹, 邓志强¹

1. 辽宁科技大学, 土木工程学院, 辽宁 鞍山, 114051

摘要: 为了改善磷酸钾镁水泥(MKPC)基钢结构防火涂料在高温易开裂、结构完整性不足的问题, 将聚丙烯纤维掺入MKPC基钢结构防火涂料中, 通过抗压强度、干密度、粘结强度及耐火性能等测试, 系统研究了聚丙烯纤维对MKPC基钢结构防火涂料力学性能、界面粘结性及高温耐久性的影响。结果表明: 在聚丙烯纤维掺量0.1%~0.4%范围内, 随着掺量的增加, MKPC基钢结构防火涂料的抗压强度先增大后减小, 粘结强度则逐渐降低, 且聚丙烯纤维的掺入提高了MKPC基钢结构防火涂料的初期干燥抗裂性能和高温抗裂性能, 当聚丙烯纤维的掺量为0.3%时, MKPC基钢结构防火涂料的综合性能最好。

关键词: 聚丙烯纤维; 磷酸镁水泥; 钢结构防火涂料; 力学性能; 耐火性能

Study on the Performance of Polypropylene Fiber Reinforced Potassium Magnesium Phosphate Cementitious Steel Structure Fireproof Coating

Shicheng Li¹, Nan Wang^{1,*}, Jiangfeng Yu¹, Zilong Duan¹, Dexin Wen¹, Shuo Zhang¹, Zhiqinag Deng¹

1. School of Civil Engineering, University of Science and Technology Liaoning, Anshan, 114051, China

Abstract: To improve the problem of cracking and insufficient structural integrity of potassium magnesium phosphate cement (MKPC) based steel structure fireproof coating at high temperatures, polypropylene fibers were added to MKPC based steel structure fireproof coating. The influence of polypropylene fibers on the mechanical properties, interfacial adhesion, and high-temperature durability of MKPC based steel structure fireproof coating was systematically studied through tests such as compressive strength, dry density, bond strength, and fire resistance. The results showed that within the range of 0.1% to 0.4% polypropylene fiber content, as the content increased, the compressive strength of MKPC based steel structure fireproof coating first increased and then decreased, while the bonding strength gradually decreased. Moreover, the addition of polypropylene fiber improved the initial dry crack resistance and high-temperature crack resistance of MKPC based steel structure fireproof coating. When the content of polypropylene fiber was 0.3%, the comprehensive performance of MKPC based steel structure fireproof coating was the best.

Keywords: Polypropylene fiber; Fire-resistant coating; Magnesium phosphate cement; Mechanical properties; Fire resistance

钢结构因其高强、轻质、抗震性能好、可回收等特点, 被广泛应用于建筑领域。但钢结构并非耐火构件, 在高温环境下(500°C以上)强度会急剧下降, 失去承载能力^[1]。传统的钢结构防火涂料具有许多局限性: 有机防火涂料含有挥发性有机化合物, 污染环境, 危害人类健康; 以硅酸盐水泥为

基料的无机防火涂料粘结强度低,易开裂,耐候性差;气凝胶防火涂料成本高,高温防护能力有限。

磷酸钾镁水泥(MKPC)是由重烧氧化镁(MgO)、磷酸二氢钾(KH₂PO₄)及缓凝剂按一定比例配制而成的新型镁质胶凝材料^[2, 3]。MKPC兼具水泥、陶瓷和耐火材料的特性,具有早期强度高、粘结性能好、耐酸碱腐蚀和耐高温等优点^[4-7],生产与使用过程绿色环保、无有害物质释放,展现出作为钢结构防火涂料的潜力。但MKPC基钢结构防火涂料在高温下存在易开裂、结构完整性不足的问题,难以满足长时间、高强度火灾下的防护要求。

聚丙烯纤维,亦称“丙纶纤维”,其主要成分是聚丙烯树脂,具有质轻、分散性好、抗裂增韧、耐高温及与胶凝材料相容性优良等优异的性能^[8-11]。若将聚丙烯纤维引入MKPC基钢结构防火涂料中,其三维网状结构可能会起到改善高温抗裂性能的作用,从而提高MKPC基钢结构防火涂料的耐火性能。因此,本文研究了聚丙烯纤维对MKPC基钢结构防火涂料性能的影响,通过抗压强度、粘结强度及耐火性能等测试,分析其对MKPC基钢结构防火涂料力学性能、耐火性能及微观结构的影响规律,以此来确定最佳掺量,优化MKPC基钢结构防火涂料综合性能。

1 试验原料与方法

1.1 原材料

重烧氧化镁:密度为3600kg/m³,其粒径分布如图1所示、化学组成见表1。磷酸二氢钾(KH₂PO₄):工业级,纯度≥98%,密度为2.338g/cm³。硼砂(Na₂B₄O₇):工业级,纯度≥99.5%,密度为2.28~2.75g/cm³。

表1 重烧氧化镁化学组成

Table 1 Chemical composition of dead-burned magnesia

成分	MgO	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	烧失量
含量 (%)	92.39	3.69	1.42	1.99	0.78	0.73

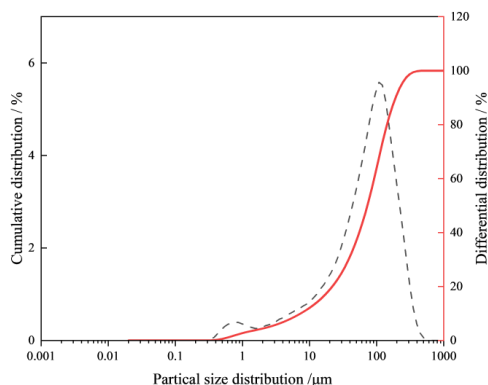


图1 重烧氧化镁粒径曲线

Fig. 1 Particle size distribution curve of dead-burned magnesia

白漂珠:主要化学成分为硅铝氧化物,空腔内呈半真空状态,密度为265kg/m³,导热系数0.090W/(m·K),耐火极限1600°C,体积吸水率31%。玻化微珠:表面玻化闭孔率为87%,呈现不规则颗粒状,密度为118kg/m³,导热系数0.047W/(m·K),耐火极限1200°C,体积吸水率为42%。上述两种轻质填料的基本物理性能如表2所示,粒径分布见图2。

表 2 轻质填料物理性能
Table 2 Physical properties of lightweight fillers

轻质填料	密度 (kg/m ³)	导热系数 (W/(m·K))	耐火极限 (°C)	体积吸水率 (%)
白漂珠	265	0.090	1600	31
玻化微珠	118	0.047	1200	42

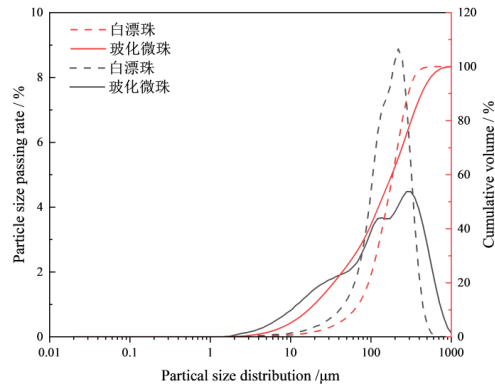


图 2 轻质填料粒径分布曲线

Fig. 2 Particle size distribution curve of lightweight filler

聚丙烯纤维：长度为 6mm，密度为 0.91g/cm³，抗拉强度≥560MPa，弹性模量≥3500MPa。

1.2 试样配合比

聚丙烯纤维掺量分别为 0.1%、0.2%、0.3%、0.4%（占 MKPC 基钢结构防火涂料总质量），试验分组编号分别为 G-0.0、G-0.1、G-0.2、G-0.3、G-0.4，配合比如表 3 所示。

表 3 不同聚丙烯纤维掺量试验分组
Table 3 Experimental groups with different polypropylene fiber contents

编号	镁磷比	硼镁比	骨胶比 (0.75)		聚丙烯纤维掺量 (%)
			白漂珠	玻化微珠	
G-0.0	2	0.05	0.45	0.3	0.0
G-0.1	2	0.05	0.45	0.3	0.1
G-0.2	2	0.05	0.45	0.3	0.2
G-0.3	2	0.05	0.45	0.3	0.3
G-0.4	2	0.05	0.45	0.3	0.4

1.3 测试方法

抗压强度：将 MKPC 基钢结构防火涂料搅拌均匀后注入 70.7mm×70.7mm×70.7mm 的标准立方体试模中，脱模后的试块置于环境温度为 5°C~35°C、相对湿度 50%~80%的条件下养护。将养护至规定龄期的试样置于 (60±5)°C 的烘箱中连续烘干 48h，待冷却至室温后，参照《水泥胶砂强度检验方法 (ISO 法)》(GB/T17671-2021) 进行抗压强度测试，每组 3 个试件，取平均值作为该组的抗压强度。

干密度：在环境温度为 $5^{\circ}\text{C}\sim 35^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度 $50\%\sim 80\%$ 的条件下养护 7d 后，将 $70.7\text{mm}\times 70.7\text{mm}\times 70.7\text{mm}$ 的试件按照《钢结构防火涂料》（GB14907-2018）^[12]要求进行测试。

粘结强度：将 MKPC 基钢结构防火涂料均匀涂抹在 $40\text{mm}\times 40\text{mm}\times 5\text{mm}$ 的钢板上，置于环境温度为 $5^{\circ}\text{C}\sim 35^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度 $50\%\sim 80\%$ 的条件下养护。养护 7d 后，使用 LR-6000C 型粘结强度检测仪对粘附在钢板上的 MKPC 基钢结构防火涂料施加垂直方向的拉拔力，直至发生界面剥离，以此来评价涂层与钢结构之间的附着可靠性。

耐火性能测试：将 MKPC 基钢结构防火涂料均匀涂抹在 $150\text{mm}\times 70\text{mm}\times 6\text{mm}$ 的钢板上，厚度为 15mm ，置于环境温度为 $5^{\circ}\text{C}\sim 35^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度 $50\%\sim 80\%$ 的条件下养护。养护 7d 后，将钢板背面的两根热电偶安放在钢板背火面中间位置，用耐高温胶布固定，将热电偶连接温度采集器进行数据检测，采用火焰温度可达 1000°C 的酒精喷灯作为热源，如图 3 所示。

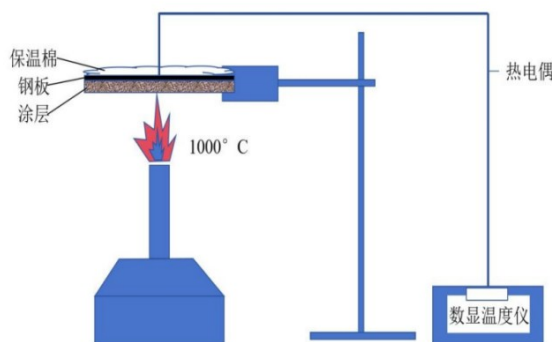


图 3 耐火性试验装置

Fig. 3 Fire resistance test apparatus

导热率：将 MKPC 基钢结构防火涂料成型为直径 180mm 、厚度 $(20\pm 5)\text{mm}$ 的圆盘状试件，置于环境温度为 $5^{\circ}\text{C}\sim 35^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度 $50\%\sim 80\%$ 的条件下养护。养护 7d 后，将圆盘状试件置于 50°C 烘箱中烘干至恒重，采用 PBD-13-4P 型平板导热仪测定平均温度达到 500°C 时的导热性能。

2 结果与讨论

2.1 聚丙烯纤维掺量对抗压强度与干密度的影响

图 4 为聚丙烯纤维掺量对 MKPC 基钢结构防火涂料抗压强度和干密度的影响。从图 4 中可以看出，随着聚丙烯纤维掺量的增加，MKPC 基钢结构防火涂料的抗压强度呈现先增大后减小的趋势。其中，G-0.1、G-0.2、G-0.3 和 G-0.4 的抗压强度分别为 0.64MPa 、 0.65MPa 、 0.72MPa 和 0.63MPa ，相较于基准组 G-0.0 分别提高了 1.59% 、 4.84% 、 16.13% 和 1.61% 。结果表明，聚丙烯纤维的掺入可以提高 MKPC 基钢结构防火涂料的抗压强度，其最佳掺量为 0.3% ，归因于聚丙烯纤维在基体中呈三维网状结构，改善 MKPC 基钢结构防火涂料的抗压强度^[8, 9]。

从图 4 中可以看出，随着聚丙烯纤维掺量的增加，MKPC 基钢结构防火涂料的干密度呈现减小的趋势。其中，G-0.1、G-0.2、G-0.3 和 G-0.4 的干密度为 $638\text{kg}/\text{m}^3$ 、 $635\text{kg}/\text{m}^3$ 、 $634\text{kg}/\text{m}^3$ 和 $628\text{kg}/\text{m}^3$ ，相较于 G-0.0 分别降低了 0.0% 、 0.47% 、 0.63% 和 1.57% 。结果表明，聚丙烯纤维的掺入对 MKPC 基钢结构防火涂料的干密度影响较小。依据国家标准《钢结构防火涂料》（GB14907-2018），防火涂

料的抗压强度 $\geq 0.5\text{MPa}$ ，干密度 $\leq 650\text{kg/m}^3$ ，在 0.1-0.4%的聚丙烯纤维掺量范围内，所有 MKPC 基钢结构防火涂料试件的抗压强度均和干密度均满足标准要求。

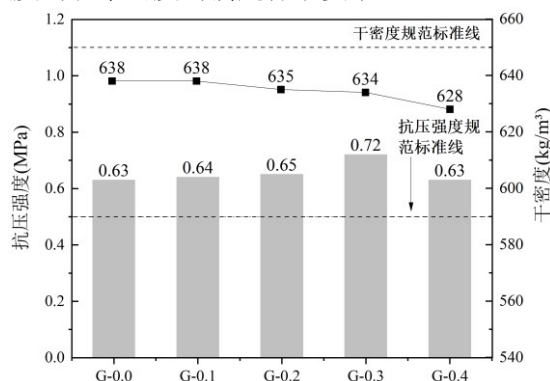


图 4 聚丙烯纤维对抗压强度和干密度的影响

Fig. 4 Effect of polypropylene fibers on and compressive Strength and dry density

2.2 聚丙烯纤维掺量对稠度、干燥时间及初期干燥抗裂性能的影响分析

稠度在 90-100mm 时有助于涂料的喷涂施工。根据表 4 可知，随着聚丙烯纤维掺量的增加，MKPC 基钢结构防火涂料的稠度和干燥时间逐渐增加，其中，G-0.0、G-0.1、G-0.2、G-0.3 和 G-0.4 的干燥时间分别为 34min、35min、35min、48min 和 50min，稠度则从 90cm 升至 93cm。主要原因是聚丙烯纤维在 MKPC 基钢结构防火涂料内部的网络结构阻碍了水分挥发通道，进而延缓整体干燥进程，使干燥时间变长。

初期干燥抗裂性能主要看裂缝数量和平均宽度，无裂缝为最优，裂缝数量越少、宽度越小，抗裂性越好。根据表 4 可知，G-0.1 和 G-0.2 的初期干燥抗裂性能合格，G-0.0、G-0.3 和 G-0.4 均出现裂缝，初期干燥抗裂性能不符合《钢结构防火涂料》（GB14907-2018）标准要求。

表 4 聚丙烯纤维掺量对稠度、干燥时间及初期干燥抗裂性能的影响

Table 4 Effect of polypropylene fiber content on consistency, drying Time and initial drying crack resistance

编号	稠度 (cm)	干燥时间 (min)	裂缝数量 (条)	平均宽度 (mm)
G-0.0	90	34	4	2
G-0.1	90	35	无	无
G-0.2	91	35	无	无
G-0.3	93	48	2	1
G-0.4	93	50	3	2

2.3 聚丙烯纤维掺量对粘结强度的影响

图 5 为聚丙烯纤维掺量对 MKPC 基钢结构防火涂料与钢板间粘结强度的影响。从图 5 可以看出，所有 MKPC 基钢结构防火涂料与钢板间粘结强度均符合《钢结构防火涂料》（GB14907-2018），但随着聚丙烯纤维掺量的增加，粘结强度呈逐渐下降的趋势。其中，G-0.1、G-0.2、G-0.3 和 G-0.4 的粘结强度分别为 0.087MPa、0.075MPa、0.068MPa 和 0.042MPa，相较于 G-0.0 分别降低了 7.45%、20.21%、27.66%和 55.32%。造成这一现象的主要原因是聚丙烯纤维的团聚效应，导致其在 MKPC 基钢结构防火涂料分散不均，削弱了 MKPC 基钢结构防火涂料与钢板的界面，造成粘结强度显著下降。

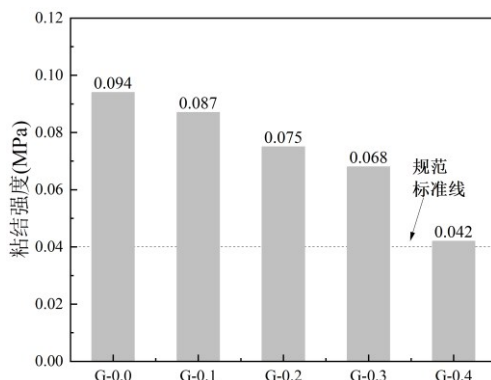


图 5 聚丙烯纤维对粘结强度的影响

Fig. 5 Effect of polypropylene fibers on bond strength

2.4 聚丙烯纤维掺量对耐火性能的影响

图 6 为聚丙烯纤维掺量对 MKPC 基钢结构防火涂料和钢板背面升温曲线的影响。由图 6 可知, 所有 MKPC 基钢结构防火涂料试件的背板面温度随着耐火时间的延长逐渐升高后趋于稳定, 其中, G-0.1、G-0.2、G-0.3 和 G-0.4 的钢板背面温度为 190°C、209°C、191°C 和 182°C, 相较于 G-0.0 分别升高了 7.34%、18.08%、7.91% 和 2.82%。结果表明, 聚丙烯纤维的掺入会使 MKPC 基钢结构防火涂料的钢板背面耐火温度提高。

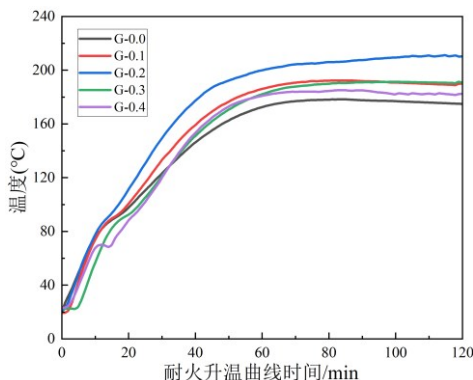


图 6 耐火升温曲线

Fig. 6 Fire resistance temperature rise curve

经 120 分钟耐火测试后, 通过对各组 MKPC 基钢结构防火涂层迎火面形貌的观察发现, 各组之间呈现显著的差异。如图 7 所示, G-0.0 和 G-0.1 均出现了清晰可见的明显裂缝, G-0.2 与 G-0.3 的无开裂、起皮或脱落痕迹, 且整体结构在经历长时间高温后依然保持完整, G-0.4 出现与钢板脱落的现象。结果表明, 掺入适量聚丙烯纤维能够改善 MKPC 基钢结构防火涂料的高温抗裂性能, 其在 MKPC 基钢结构防火涂料内部可以形成三维网络结构, 高温熔融形成孔道, 缓解水蒸气压力, 从而提升 MKPC 基钢结构防火涂料高温抗裂性能。

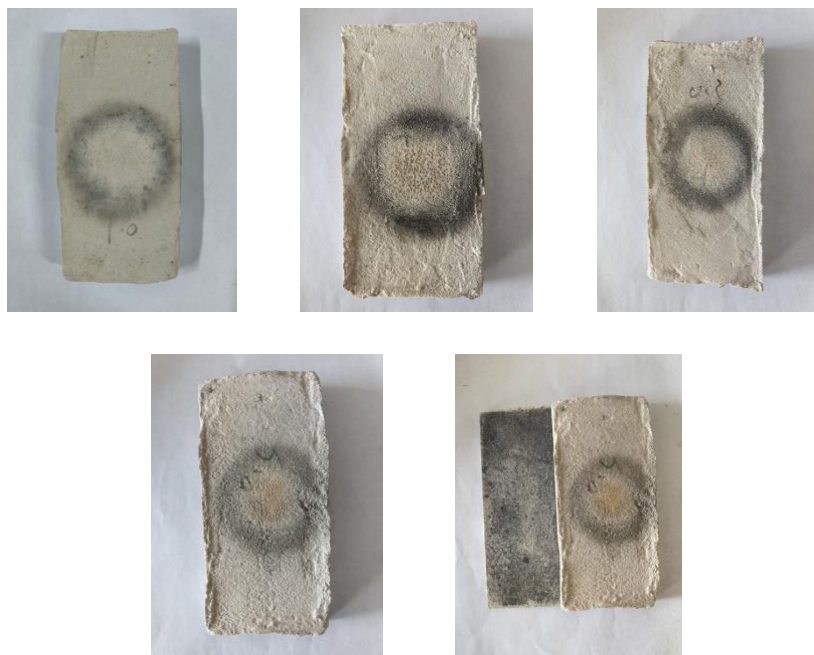


图7 迎火面形貌

Fig. 7 Morphology of fire-facing surface

3 结论

本文通过试验研究,探讨了聚丙烯纤维掺量对MKPC基钢结构防火涂料性能的影响规律,得出的主要结论如下:

(1) 在聚丙烯纤维掺量 0.1%~0.4%范围内,聚丙烯纤维的掺入提高了MKPC基钢结构防火涂料的抗压强度,呈现先增后减的规律,当掺量为 0.3%时, MKPC基钢结构防火涂料的抗压强度达到最大值,较基准组提升了 16.13%。

(2) 在聚丙烯纤维掺量 0.1%~0.4%范围内,聚丙烯纤维的掺入降低了MKPC基钢结构防火涂料与钢板的粘结强度,呈现逐渐降低的趋势,当掺量为 0.3%时, MKPC基钢结构防火涂料与钢板的粘结强度较基准组下降了 27.66%。

(3) 聚丙烯纤维的掺入提高了MKPC基钢结构防火涂料的初期干燥抗裂性能和高温抗裂性能,其最佳掺量为 0.2%~0.3%。

(4) 当聚丙烯纤维的掺量为 0.3%, MKPC基钢结构防火涂料的综合性能最好,符合《钢结构防火涂料》(GB14907-2018)要求。

参考文献

- [1] 温婧. MKPC基钢结构防火涂料组成结构设计及其防火性能评价[D]. 安徽理工大学, 2020.
- [2] 刘凯, 李东旭. 磷酸镁水泥的研究与应用进展[J]. 材料导报, 2011, 25(13): 97-100.
- [3] Qiao F, Chau C K, Li Z. Setting and strength development of magnesium phosphate cement paste [J]. Advances in Cement Research, 2009, 21(4): 175-80.
- [4] Wei X, Lin L, Zhang X, et al. Effect of boric acid and triethanolamine compound on early hydration properties of magnesium potassium phosphate cement[J]. Construction and Building Materials, 2024, 449: 138364.
- [5] Mo L, Lv L, Deng M, et al. Influence of fly ash and metakaolin on the microstructure and compressive strength of magnesium potassium phosphate cement paste[J]. Cement Concrete Research, 2018, 111: 116-29.

- [6] Lu J, Yuan H, Wang D. Understanding the improvement of Mg-rich electrical ferronickel slag on magnesium potassium phosphate cement's performance[J]. Journal of Building Engineering, 2023, 75: 106893.
- [7] Qiao F, Chau C K, Li Z. Property evaluation of magnesium phosphate cement mortar as patch repair material[J]. Construction and Building Materials, 2010, 24(5): 695-700.
- [8] 俞家欢, 熊攀辉, 汲野, 等. 聚丙烯纤维掺量对磷酸镁水泥混凝土性能影响[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2017, 33(2): 266-274.
- [9] 单春明, 杨建明, 陈延东, 等. 聚丙烯纤维增韧改性磷酸钾镁水泥基材料的力学性能试验[J]. 沈阳大学学报(自然科学版), 2020, 32(1): 58-65.
- [10] 孙旻, 王军, 王洋. 纤维增强磷酸钾镁水泥砂浆工作性、力学性能与韧性研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2024, (1): 64-66.
- [11] 唐建明, 李剑, 石磊. 改性聚丙烯纤维增强磷酸镁水泥砂浆的力学性能研究[J]. 重庆建筑, 2017, 16(2): 41-44.
- [12] GB 14907-2018. 钢结构防火涂料[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.

基金项目: 2025 年辽宁科技大学大学生创新训练项目 (X202510146314): 基于机器视觉的磷酸钾镁水泥基钢结构防火涂料配合比优化设计; 2024 年辽宁省教育厅高校基本科研项目 (LJ212410146007): 多元固废磷酸镁水泥基 3D 打印材料的低碳制备与增强性能研究; 2025 年辽宁省科技厅项目-联合计划-博士科研启动项目 (2025-BSLH-197): 基于硼泥矿化助烧作用的菱镁矿尾矿基磷酸镁水泥低碳制备原理和性能调控。

第 1 作者简介: 李诗程 (2005-), 男, 辽宁科技大学, 本科在读, 研究方向: 镁质胶凝材料。E-mail: 2714860252@qq.com。

*** 通讯作者简介:** 王南 (1990-), 女, 博士研究生, 辽宁科技大学, 讲师, 研究方向: 镁质胶凝材料。E-mail: wangnan@ustl.edu.cn。