

膨胀珍珠岩对水镁石基磷酸镁防火涂料性能的影响

王楠¹, 李悦¹, 龙世儒¹, 林辉¹, 刘雄飞²

(1. 北京工业大学, 城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 北京 100124; 2. 河北工业大学土木与交通学院, 天津 300401)

摘 要: 磷酸镁水泥(MPC)具有强度高、耐高温及优异的黏结性能等优点, 但高密度限制了其在保温隔热和防火领域中的应用。采用天然水镁石和磷酸二氢铵为 MPC 基础组成材料, 以膨胀珍珠岩为耐火隔热材料, 制备了钢结构用水镁石基磷酸镁(BMPC)防火涂料。研究了膨胀珍珠岩对 BMPC 防火涂料物理力学性能及耐火隔热性能的影响, 结合 XCT、XRD、TG-DTA 和 SEM 对耐火试验前后 BMPC 的微观结构进行分析。结果表明: 膨胀珍珠岩吸水处理后对 BMPC 力学性能的影响最小, 当掺量为 20%(质量分数)时, BMPC 表现出最优的综合性能, 其密度最低可达到 647 kg/m³, 28 d 抗压强度为 7.2 MPa, 黏结强度为 0.51 MPa, 导热系数可降低 49.3%, 耐火极限可达 206 min, 是适用于钢结构无机防火涂料的理想材料。

关键词: 水镁石; 磷酸镁防火涂料; 膨胀珍珠岩; 导热系数; 耐火性能

中图分类号: TU561.66 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2026)05-1555-09

网络出版时间: 2025-08-07



钢结构建筑作为一种新型的节能环保建筑体系, 被誉为 21 世纪的“绿色建筑”之一。随着中国经济建设的快速发展, 钢结构已经广泛应用在各个建筑领域中^[1-3], 其防火保护措施已成为设计与施工过程中不可或缺的组成部分^[4-5]。目前, 应用最为广泛有效的防火措施是在钢基材表面涂覆防火涂料, 其防火涂料可分为有机膨胀型和无机非膨胀型, 有机膨胀型涂层持续防火时间短(通常在 2 h 以内), 在燃烧的过程中可能会排放 CO、CO₂、NO_x、HCN、NH₃ 等有害且具有腐蚀性的气体^[6]。无机非膨胀型防火涂料相比有机膨胀型涂料具有高热阻性、耐久性、耐磨性、低成本等特性, 是理想的钢结构防火材料^[7]。

目前研发的非膨胀型防火涂料包括石膏^[8]、普通硅酸盐水泥^[9-10]、氯氧镁水泥^[11]、地质聚合物^[12]等。Li 等^[13]采用丙烯酸乳胶作为外加剂和界面黏结剂, 提高胶凝复合材料与钢材之间的黏结性能。Marcos 等^[14]研究了含中、高掺量膨胀珍珠岩的轻质石膏的防火性能, 发现厚度为 20 mm 时, 防火涂层暴露于火源的一面会受到火灾的严重影响。季晓丽

等^[15]、罗俊瑶等^[12]研究了地质聚合物作为厚型钢结构防火涂料, 具有优异的耐火隔热性能, 但地质聚合物收缩大、易风化劣化, 导致涂层开裂。由此可以看出, 现有的无机钢结构防火涂料虽然在防火性能上有所改进, 但仍面临着黏结性能不足、耐久性差等问题, 极大限制了水泥基材料在钢结构防火工程中的广泛应用。

磷酸镁水泥(MPC)是由重烧氧化镁、磷酸盐、缓凝剂和功能组分等通过酸碱反应而产生强度的一种新型胶凝材料, 具有强度高、耐高温、与钢界面之间具有优异的黏结性能等优点^[16-19]。Fang 等^[20]研究了含膨胀珍珠岩的 MPC 复合材料在火灾下的热学性能, 研究表明膨胀珍珠岩的加入可降低材料密度, 并通过多孔结构降低热传递效率, 从而提升复合材料的隔热与耐火性能; 同时填充效应使 MPC 基体微观结构致密, 显著降低涂层耐火试验后表面可见裂纹的产生, 提高耐火试验后的残余黏接强度。但由于 MPC 的原材料 MgO 的制备工艺必须经过高温煅烧, 极大地提高了材料的密度和碳排放量^[21-22]。为此, 本工作选用免烧低品位水镁石粉末完全代替重烧

收稿日期: 2025-04-07。 修订日期: 2025-04-27。

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFC3803103); 国家自然科学基金(52308229, 52278252)。

第一作者: 王楠(1997—), 女, 博士研究生。

通信作者: 李悦(1972—), 男, 博士, 教授;

林辉(1989—), 男, 博士, 副教授。

Received date: 2025-04-07. Revised date: 2025-04-27.

First author: WANG Nan (1997—), female, Doctoral candidate.

E-mail: wangnanikw@163.com

Correspondent author: LI Yue (1972—), male, Ph.D., Professor.

LIN Hui (1989—), male, Ph.D., Associate Professor.

E-mail: liyue@bjut.edu.cn; linhui5290@bjut.edu.cn

氧化镁制备磷酸镁水泥,天然水镁石粉以氢氧化镁为主要矿物组分,但具体成分会因地质形成条件的不同而有所差异;本工作所用低品位水镁石粉中会含有白云石和蛇纹石等矿物,这些矿物与磷酸盐反应生成气体可降低结构的密度。因此,采用低品位水镁石粉制备磷酸镁水泥不仅提升其性能,还有助于降低生产过程中的碳排放,促进资源的可持续利用。

本工作以水镁石粉代替重烧氧化镁制备水镁石基磷酸镁复合材料(BMPC),并采用改性膨胀珍珠岩优化 BMPC 钢结构防火涂料的防火性能。系统研究了膨胀珍珠岩掺量对 BMPC 钢结构防火涂层物理力学和阻燃性能的影响规律,并结合 X 射线衍射仪(XRD)、热重分析仪(TG-DTA)和扫描电子显微镜(SEM)对耐火试验前后 BMPC 的水化形貌、产物和微观结构进行分析,进一步探明 BMPC 作为钢结构防火涂料在高温下的阻燃机理。

1 实验

1.1 原材料

制备 BMPC 钢结构防火涂料的原材料包括天然水镁石、磷酸二氢铵、硼砂和膨胀珍珠岩。天然水镁石产自辽宁凤城,经破碎、球磨至 75~150 μm 的粒径范围内,其化学组成见表 1。磷酸二氢铵由天津市大茂化学试剂厂提供。硼砂由福晨(天津)化学试剂有限公司提供。膨胀珍珠岩由南通市永丰保温材料有限公司提供,粒径范围为 0.5~1.0 mm。

1.2 配合比

在所有试验系列中,水镁石粉与磷酸二氢铵的

质量比 $[w(\text{M/P})]$ 为 2.5 : 1.0,硼砂(B)的比例固定为 15%,水灰比 $[w(\text{W/C})]$ 为 0.17。膨胀珍珠岩与胶凝材料(水镁石和磷酸二氢铵之和)的质量比分别为 0%、5%、10%、15%、20%,配合比见表 2。

1.3 方法

1.3.1 膨胀珍珠岩的处理 BMPC 防火涂料按照表 2 配合比进行制备。膨胀珍珠岩的处理方式分为 2 种:一种是原状不处理;另外一种是经过吸水处理,具体方法是将膨胀珍珠岩浸泡于清水中,浸泡后取出膨胀珍珠岩,去除表面多余的水分,静置其质量不再发生变化,达到稳定的水分含量,经测量含水率为 43%,EP(未经处理的膨胀珍珠岩)和 HEP(吸水处理的膨胀珍珠岩)的微观形貌如图 1 所示。将磷酸二氢铵、硼砂与水混合溶解 1 min 后,将水镁石粉加入上述溶液中慢速搅拌 30 s 得到水镁石基磷酸镁水泥浆体,再逐渐加入 EP 或者 HEP,继续混合 1min,将混合后的浆体倒入模具,置于 $(20\pm 2)^\circ\text{C}$ 自然环境养护至规定龄期。

1.3.2 物理性能 干密度实验根据 GB 14907—2018《钢结构防火涂料》进行测试,制备尺寸为 70 mm $\times$ 70 mm $\times$ 70 mm 的试样,养护 7 d 后放置在 $(60\pm 5)^\circ\text{C}$ 的烘箱中干燥 48 h,然后冷却至室温。干密度结果以 5 个数据值中剔除误差后的平均值表示。表面干燥时间采用指触法进行测试,即以手指轻触涂层表面,无涂料黏在手指上面,以此时作为涂层达到表面干燥的时间。吸水率测试根据 JG/T 266—2011《泡沫混凝土》进行测试,试样尺寸为 40 mm $\times$ 40 mm $\times$ 40 mm。

表 1 天然水镁石的化学组成

Table 1 Chemical compositions of natural brucite

Components	MgO	SiO ₂	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SO ₃	Cl ⁻	P ₂ O ₅	K ₂ O	Firing loss
Mass fraction (w)/%	41.95	21.89	13.41	1.20	0.75	0.23	0.01	0.15	0.11	20.3

表 2 试验的配合比

Table 2 Mix ratio of the test

Sample	w(M/P)	w(B)/%	w(W/C)	w(EP)/%	w(HEP)/%	Surface drying time/min
BMPC	2.5 : 1.0	15	0.17	0	0	12
BMPC-E1	2.5 : 1.0	15	0.17	5	0	12
BMPC-E2	2.5 : 1.0	15	0.17	10	0	11
BMPC-E3	2.5 : 1.0	15	0.17	15	0	11
BMPC-E4	2.5 : 1.0	15	0.17	20	0	10
BMPC-H1	2.5 : 1.0	15	0.17	0	5	12
BMPC-H2	2.5 : 1.0	15	0.17	0	10	13
BMPC-H3	2.5 : 1.0	15	0.17	0	15	15
BMPC-H4	2.5 : 1.0	15	0.17	0	20	17

w(M/P) is the mass ratio of brucite to ammonium dihydrogen phosphate. B is borax, and borax content is expressed as a percentage of the total mass of brucite. w(W/C) is the ratio of water to the total mass of all cementitious materials and expanded perlite. EP is untreated expanded perlite. HEP is expanded perlite treated with water absorption.

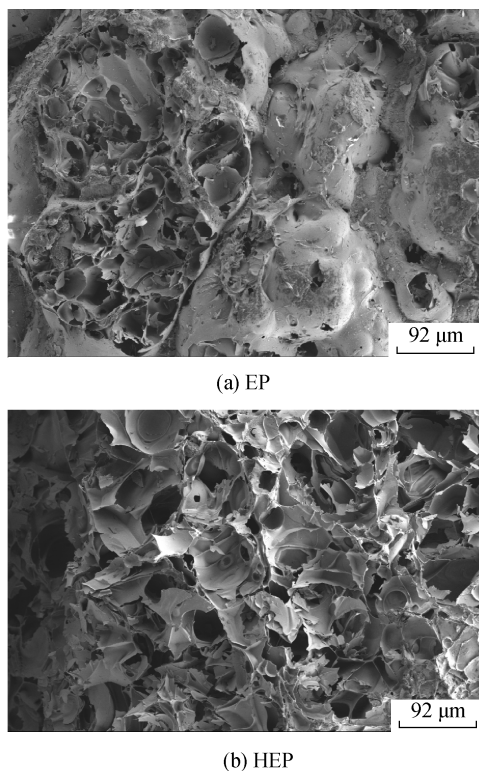


图1 EP和HEP的微观形貌

Fig. 1 Microscopic morphologies of EP and HEP

1.3.3 力学性能 抗压强度和黏结强度实验根据 GB 14907—2018《钢结构防火涂料》进行测试,抗压强度试样尺寸为 40 mm×40 mm×40 mm,使用电液伺服压力试验机进行测试;黏结强度测试采用 70 mm×70 mm×6 mm 的钢板,涂层厚度为(15.0±0.1) mm,使用黏结强度检测仪进行测试。每组实验重复 3 次,结果取 3 个实验值的平均值,误差控制在 15%以内。

1.3.4 导热系数 采用瞬态平面热源法测试 (20±2) °C 自然环境条件下 BMPC 的导热系数,将 BMPC 试样自然养护 28 d,切割尺寸为 20 mm×20 mm×10 mm 的试件,所有表面均进行打磨平整,在(60±5) °C 烘干 24 h。

1.3.5 耐火性能 利用成型框工艺将搅拌均匀的 BMPC 防火涂料涂覆在 150 mm×70 mm×6 mm 的钢板内,控制涂层厚度为(15.0±0.1) mm。涂层耐火极限按照标准 GB/T 9978.1—2008《建筑构件耐火试验方法》进行测试,试验炉燃料内采用丙烷/液化石油气,炉内温升曲线偏差的时间应小于 10 min。

1.3.6 孔结构 采用 YXLON FF35 工业计算机断层扫描系统(XCT),对 BMPC 样品的内部孔隙结构进行扫描。通过科学可视化软件(Avizo 2022)进行图像处理,实现对孔隙特征的数值分析和三维孔隙结构重建。

1.3.7 微观结构特征 BMPC 耐火前后的物相组成采用 Smartlab X 射线衍射仪(XRD)对 BMPC 样品进行试验,测试电位为 40 kV,电流为 100 mV,步长为 0.02°,扫描速率为 6 (°)/min,扫描范围为 5°~90°。采用热重分析(TG-DTA)对 BMPC 复合材料的热稳定性进行评价,所测试温度范围为 30~1000 °C,试验在氮气气氛中进行,升温速率为 10 °C/min,气流速率为 100 mL/min。采用捷克 TESCAN MIRAL 场发射扫描电子显微镜(SEM)进行微观结构表征。

2 结果与讨论

2.1 EP 和 HEP 对 BMPC 物理性能的影响

图 2 为 EP 和 HEP 对 BMPC 干密度和吸水率的影响。由图 2 可以看出,采用不同方式处理的膨胀珍珠岩制备 BMPC 的干密度均呈下降趋势,其中加入 HEP 的 BMPC 干密度下降幅度显著高于 EP 组。当 HEP 掺入量为 20% 时, BMPC 的干密度低于 650 kg/m³(国家标准规定的防火涂料的干密度上限值)。

由图 1 和图 2 可见, EP 对 BMPC 试件吸水率影响较大,其原因是: EP 具有极高的比表面积和多孔结构,能够通过毛细作用和物理吸附迅速吸收水

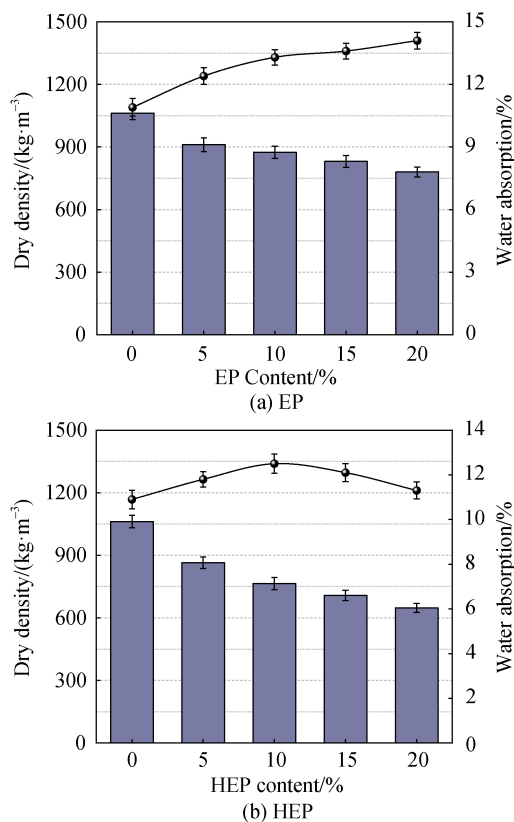


图2 EP和HEP对BMPC干密度和吸水率的影响

Fig. 2 Effect of EP and HEP on dry density and water absorption of BMPC

分,其内部的微小孔隙提供了大量的水分储存空间,从而增加了 BMPC 试件的吸水性。随着 HEP 掺量的增加,其吸水率呈现出先升高后降低的趋势。在 0%至 10%的掺量区间内,吸水率逐渐上升,这是由于 HEP 表面孔隙较为开放,水分能够较为迅速地渗透并被吸收。然而,当掺量增加至 20%时,吸水率出现下降,这是因为随着 HEP 掺量的增多,部分孔隙被填充或水合效应逐渐减弱,使得水分的进一步渗透受限。

2.2 EP 和 HEP 对 BMPC 力学性能的影响

图 3 为 EP 和 HEP 对 BMPC 抗压强度及黏结强度的影响。从图 3 可见,随着龄期的增加, BMPC 的抗压强度和黏结强度逐渐提高。随着 EP 或 HEP 掺量的增加,样品各龄期的抗压强度和黏结强度均呈现下降趋势。未掺入膨胀珍珠岩时, BMPC 抗压强度最高, 28 d 抗压强度和黏结强度分别为 9.8 MPa 和 0.62 MPa。当 EP 掺量增加至 20%时,密度从 1062 kg/m³降到 802 kg/m³, 28 d 抗压强度和黏结强度分别为 4.8 MPa 和 0.30 MPa, 分别降低了 51.0%和 51.6%; HEP 掺量增加至 20%时,材料密

度从 1062 kg/m³降到 647 kg/m³, 28 d 抗压强度和黏结强度分别为 7.20 MPa 和 0.51 MPa, 分别降低了 26.5%和 17.7%, 这表明 HEP 作为低密度轻质骨料的加入会降低 BMPC 的抗压强度,但会使表面粗糙度增加,未显著削弱基体与钢板的界面结合力。上述分析可知,相比于 EP, HEP 对 BMPC 力学性能的影响更小,尤其是在较低密度条件下,仍能保持相对较高的抗压强度和黏结强度。由此可见, HEP 的引入对于 BMPC 需要轻质和隔热性能的应用场合具有潜在优势。

综合考虑 EP 和 HEP 对 BMPC 干密度、吸水率、抗压强度和黏结强度的影响,结果表明,在 HEP 掺量为 20%时, BMPC 性能达到最优,干密度最低可达到 647 kg/m³, 28 d 抗压强度也可达 7.2 MPa, 黏结强度可达 0.51(远高于钢结构防火涂料规范中的要求)。

2.3 HEP 对 BMPC 导热性能的影响

图 4 为不同掺量的 HEP 对 BMPC 导热系数(λ)和热扩散系数(α)的影响, HEP 的加入可以降低 BMPC 试样的导热系数,当掺入量为 20%时,材料的导热系数为 0.311 W/(m·K),与未加入膨胀珍珠岩 BMPC 的导热系数降低约 49.3%,这是因为膨胀珍珠岩的微孔结构减少了热传导。基于有效介质理论及麦克斯韦-欧肯(Maxwell-Eucken)模型, HEP 作为低导热的填料,其闭孔内滞留的空气层[导热系数为 0.026 W/(m·K)]显著降低了复合材料的整体热导率。空气作为导热性能较低的介质,可以有效地隔绝热能传导,尤其是在孔隙结构中形成稳定的空气隔层,有助于热能在材料中的扩散速度变慢,从而降低了材料的热导率。在受火过程中,试件的温升曲线形式上不受导热系数的控制,而是由热扩散系

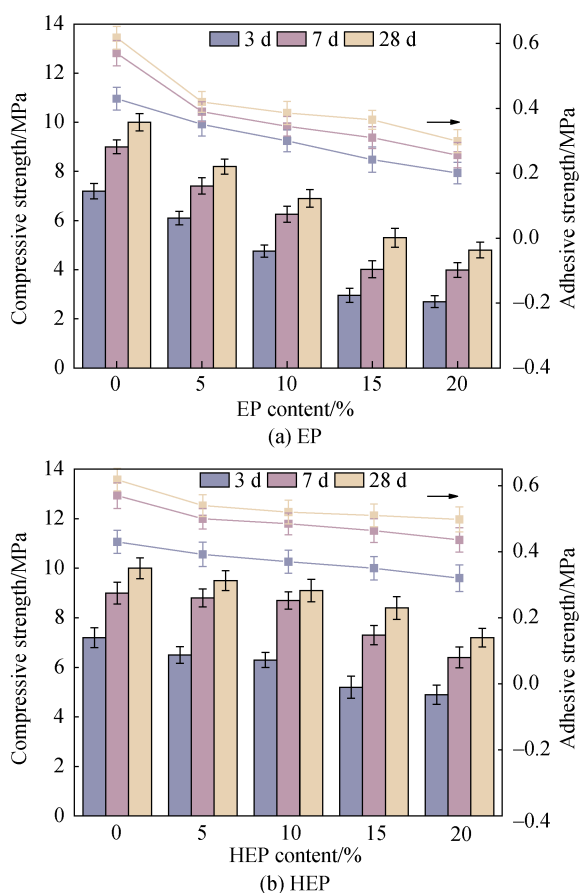


图 3 EP 和 HEP 对 BMPC 抗压强度及黏结强度的影响

Fig. 3 Effect of EP and HEP on compressive strength and adhesive strength of BMPC

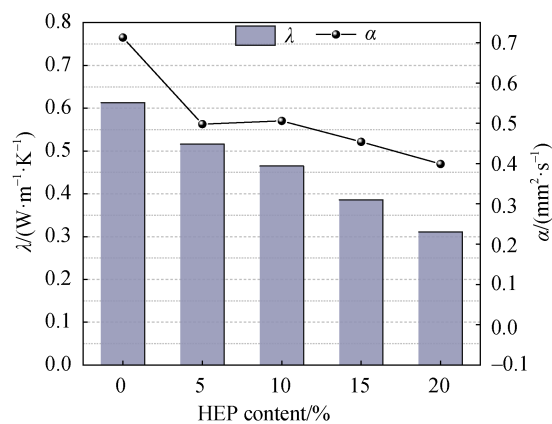


图 4 HEP 对 BMPC 导热系数(λ)及热扩散系数(α)的影响

Fig. 4 Effect of HEP on thermal conductivity (λ) and thermal diffusivity (α) of BMPC

数控制。当掺入量为20%时,材料的热扩散系数最低为 $0.399 \text{ mm}^2/\text{s}$,意味着在温度变化下热量的扩散速率最慢,阻隔了热量向内部基材表面传递,从而降低了基材的热分解速度,致使火焰在材料表面的传播速度显著降低。

2.4 BMPC 钢结构防火涂层的耐火性能

温度监测是评价涂层材料耐火性能最直接的方法,通过测量温度变化可以评估防火涂层承受高温和保护底层基材的能力。对未掺入膨胀珍珠岩及HEP掺量为20%的BMPC钢结构防火涂层进行耐火试验,结果如图5所示,钢板温度达到 100°C 左右时,所有试样在一段时间内温度均保持稳定,这可能是由于BMPC水化产物鸟粪石在高温下脱水,导致结晶水损失,伴随着大量热量的吸收,从而延缓了钢板背部的升温^[23]。当钢板背火面温度达到 500°C 时,BMPC和BMPC-HEP材料的隔热效率分

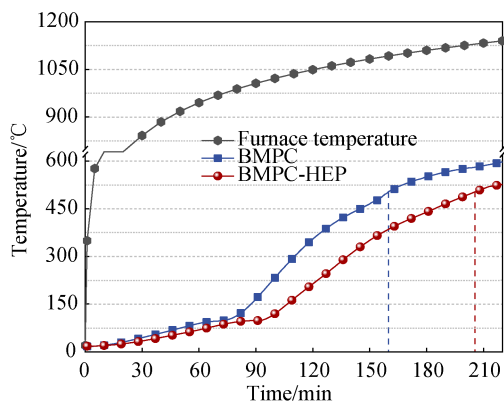


图5 BMPC和BMPC-HEP钢结构防火涂层背火面升温曲线图和炉内温度曲线

Fig. 5 BMPC and BMPC-HEP steel structure fireproof coating back fire surface temperature rise curve and furnace temperature curve

别为165 min和206 min。相关研究表明,膨胀珍珠岩-水泥基体系在同等厚度下的耐火极限仅为85 min,因此BMPC-HEP材料防火性能优于BMPC及传统水泥基体系,且受火后的试样表面均未发生明显损坏。故将HEP引入BMPC复合材料中可显著提高其防火性能,表现出优于BMPC复合材料的隔热效果和结构稳定性。由导热性能和耐火性能可知,该材料能够有效降低火焰传播速度,满足建筑防火性能的要求。

2.5 孔结构

图6a~图6c为BMPC和BMPC-HEP耐火试验前后孔隙率的定量分析结果和孔结构均匀性。由图6a可见,BMPC和BMPC-HEP中 $d < 0.1 \text{ mm}$ 的孔隙累积百分比分别为50.7%和65.2%,且BMPC-HEP中 $d > 1 \text{ mm}$ 的孔隙累积百分比仅为0.066%,这说明相比于BMPC,BMPC-HEP试件的孔隙更多集中在小孔径范围,大孔隙较少。图6b进一步显示,HEP的加入使BMPC孔径分布峰值从 0.137 mm 降至 0.111 mm ,大孔隙显著降低。文献研究表明,较小的孔径结构可以有效限制气相导热对传热过程的贡献,与大孔隙相比,具有更佳的保温性能。同时由于小孔隙中空气分子间的热交换较为有限,热辐射效应在微小孔隙中起到了更为显著的作用,这一作用减少了热能在材料内部的传递。总体而言,HEP的引入通过改变孔隙结构,优化热传导路径,使得材料的导热系数显著降低。由图4结果进一步证明,HEP的加入可降低BMPC多孔结构的有效导热系数及热扩散率。HEP的增加使得结构总孔隙率降低,故吸水率也随之降低。由图6b~图6c可见,耐火试验后BMPC-HEP的孔隙率高于对照组,对应孔隙波

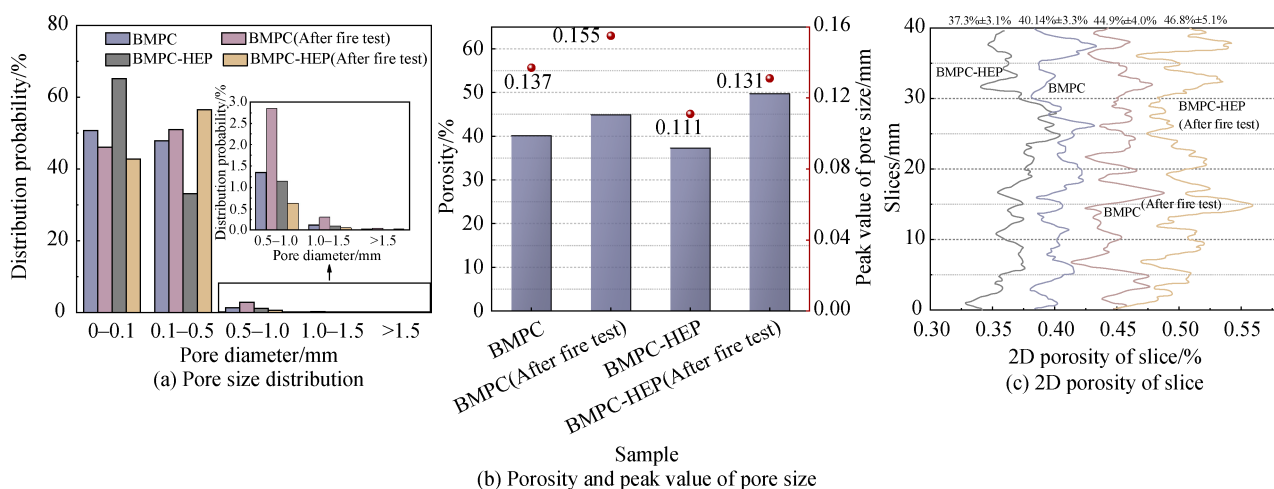
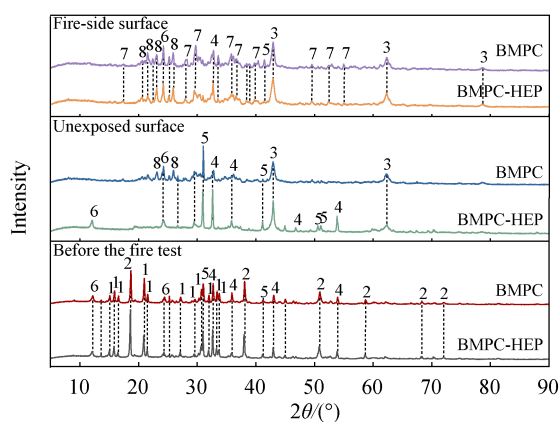


图6 X-CT三维扫描结果
Fig. 6 Three-dimensional scanning results by X-CT

动标准差从 4% 增加到 5.1%，表明 HEP 在高温下形成轻质多孔结构，从而增强材料的隔热性能和热稳定性。

2.6 BMPC 防火涂料的微观结构性能

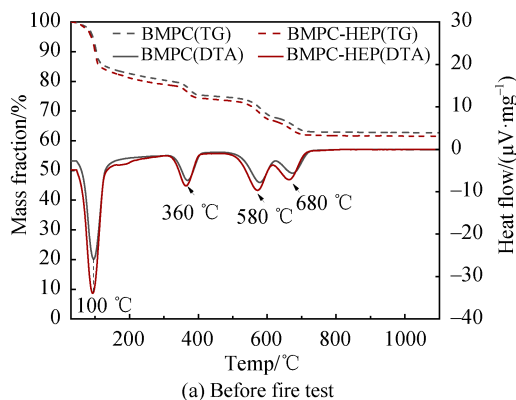
2.6.1 物相组成 BMPC 和 BMPC-HEP 耐火试验前及试验后的迎火面和背火面的物相 XRD 分析如图 7 所示。耐火试验前，水化产物为鸟粪石， $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 、 $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ 、 $\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ 和 MgCO_3 是原材料天然水镁石的矿物成分。添加 HEP 后并未出现新生成产物对应的衍射峰，因此，在 BMPC 中添加 HEP 不会改变水化产物类型。耐火试验后，所有试样中鸟粪石已完全分解，XRD 衍射峰中检测到 MgO 的衍射峰，这是因为 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 在 360 °C 分解



1: $\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. 2: $\text{Mg}(\text{OH})_2$. 3: MgO . 4: MgCO_3 . 5: $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$. 6: $\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$. 7: Mg_2SiO_4 . 8: $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2$.

图 7 BMPC 和 BMPC-HEP 在耐火试验前后迎火面和背火面的 XRD 谱

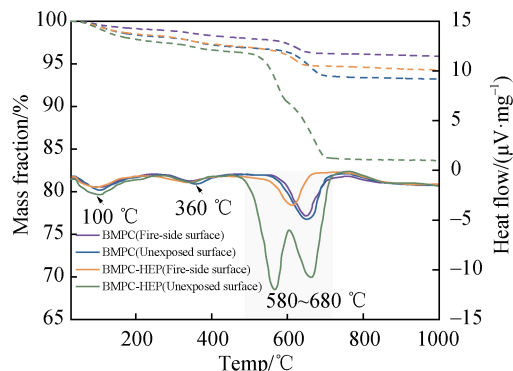
Fig. 7 XRD patterns of BMPC and BMPC-HEP before the fire test and on the fire-exposed and fire-protected surfaces after the fire test



(a) Before fire test

生成 MgO 和水。由于迎火面鸟粪石的脱水作用和 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 的分解，延缓了背火面(未暴露面)与钢板温度的升高，导致背火面的温度低于迎火面温度。BMPC 背火面的物相组成为 $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2$ 、 MgO 及其他矿物成分，迎火面还生成新产物 Mg_2SiO_4 。由此可知，试件的表面(迎火面)和基体与钢板界面处(背火面)的物相组成表现出 inconsistency。此外，研究表明当环境温度超过 600 °C 时，BMPC 中会生成 $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2$ ，但掺入 20%HEP 试样的背火面未出现 $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2$ 衍射峰，这说明 BMPC-HEP 的耐火隔热性能优于 BMPC。

2.6.2 TG 分析 图 8 为 BMPC 和 BMPC-HEP 耐火试验前及试验后迎火面和背火面的 TG/DTA 曲线。由图 8a 可见，耐火试验前，所有试样均在 100 °C 左右出现吸热峰，这与水化产物 $\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 的脱水有关^[24]；在 360 °C 左右出现吸热峰，主要是 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 分解生成 MgO 和水引起的；在 480~740 °C 范围内，分别在 580 °C 和 680 °C 出现吸热峰，由 XRD 可知该温度范围内的质量损失主要是原材料水镁石的成分中 MgCO_3 、 $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ 和 $\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ 分解引起的^[24]。由图 8b 可见，在耐火试验后，BMPC 和 BMPC-HEP 在迎火面表现出相似的 TG 和 DTA 曲线，仅在 620 °C 出现吸热峰，可能是由于 $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ 和 $\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ 发生分解^[24]。在背火面 BMPC-HEP 表现出更强的峰值，其物相分解吸收了大量的热量，导致背火面的升温延缓。在 480~740 °C 范围，BMPC-HEP 的质量损失为 12.48%，高于 BMPC 的 1.86%，说明 BMPC-HEP 在分解过程中吸收了更多的热量。因此，BMPC-HEP 涂层的钢板达到最高温度所需的时间比 BMPC 涂层的钢板要长。



(b) Fire-side surface and unexposed surface after fire test

图 8 BMPC 和 BMPC-HEP 的 TG/DTA 曲线

Fig. 8 TG/DTA curves of BMPC and BMPC-HEP

2.6.3 微观形貌 多孔水泥基材料因其封闭的孔隙结构，具有较低的导热系数以及优异的隔热

性能^[25]。图 9 为 BMPC 和 BMPC-HEP 耐火试验前后的微观形貌图。由图 9a 和图 9b 可见，BMPC 微

观结构不致密且无多孔结构,这使得热量主要通过其固体骨架传递,BMPC 表面存在裂纹,这些裂纹的存在将加速火焰的传播,降低结构的稳定性和阻燃性。由图 9c 和图 9d 可见,受耐火试验后,膨胀珍珠岩表面会因硅酸盐成分的熔融而形成光滑的玻璃态薄层,这一薄层能够封闭表面微裂纹,HEP 的加入能够有效缓解 BMPC 基体因热膨胀不均而产生的应力,同时其多孔结构在高温下能够吸收部分热

应力,降低材料的整体热传导性,增加热传导路径的阻力,从而降低传热效率。此外,在高温受火情况下,BMPC-HEP 结构未出现明显的坍塌或熔化,表明其基体的骨架结构具有较高的热稳定性,这种热稳定性确保其在高温环境中能够持续发挥隔热作用。综上所述,BMPC-HEP 优异的隔热性能主要源于其多孔结构、低导热材料成分以及高温环境下的结构稳定性。

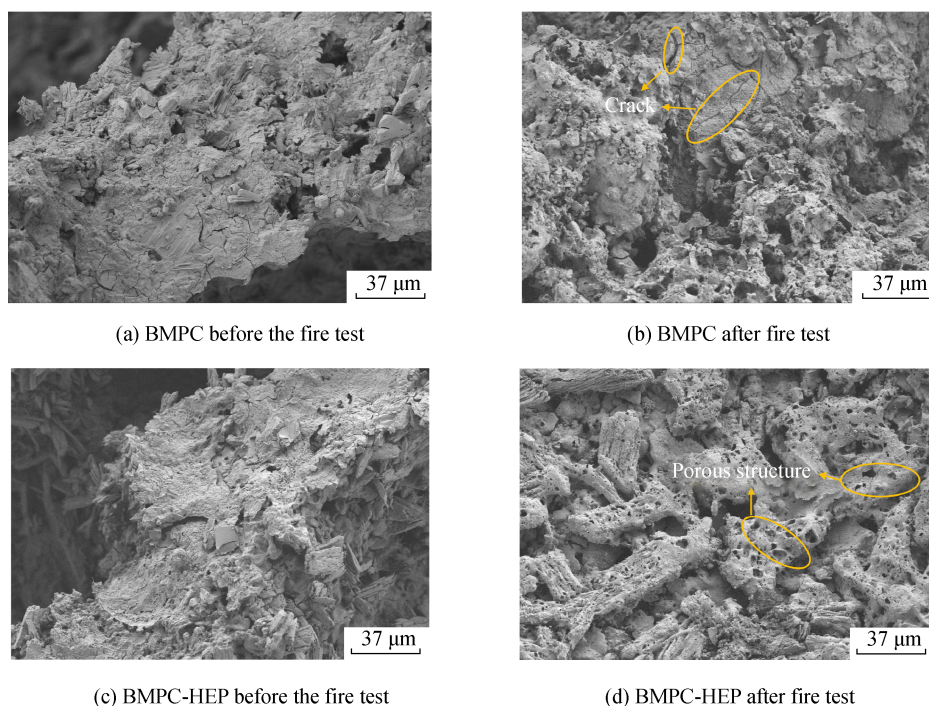


图 9 BMPC 和 BMPC-HEP 耐火试验前后的微观形貌

Fig. 9 Microstructure of BMPC and BMPC-HEP before and after fire test

3 结论

本工作采用低品位水镁石粉末为原材料,膨胀珍珠岩为耐火隔热材料,成功制备了轻质、隔热性能优异及低碳的 BMPC 钢结构防火涂料,得到以下结论:

1) 吸水处理膨胀珍珠岩(HEP)对 BMPC 力学性能影响最小,尤其是在低密度条件下仍能保持较高的抗压和黏结强度。当密度从 1062 kg/m^3 降至 647 kg/m^3 时,抗压强度从 9.8 MPa 降至 7.2 MPa ,黏结强度从 0.62 MPa 降至 0.51 MPa ,导热系数降低 49.3% ,热扩散系数降低 44.0% ,由于 HEP 具有轻质、较低的密度和热扩散系数小的特点,可减缓温度变化时释放热量的速率,因此,BMPC-HEP 耐火极限可达 206 min 。

2) HEP 的加入对 BMPC 在高温受火后的微观

结构产生显著影响。鸟粪石和未反应原材料的分解在高温下吸收了大量的热量,延缓了温度的上升。同时,HEP 的加入使 BMPC 具有多孔特性,降低材料的整体热传导性,增加热传导路径的阻力,从而降低传热效率。在高温受火情况下,BMPC-HEP 结构未出现明显的坍塌或熔化,其基体骨架结构具有较高的热稳定性。因此,BMPC-HEP 优异的隔热性能主要源于其多孔结构、低导热材料成分以及高温环境下的结构稳定性。

参考文献:

- [1] SELVARAJ S, CHAN T. M. Recommendations for implementing circular economy in construction: Direct reuse of steel structures[J]. J Constr Steel Res, 2024, 214:108439.
- [2] RAABE D, TASAN C C, OLIVETTI E A. Strategies for improving the sustainability of structural metals[J]. Nature, 2019, 575(7781): 64–74.
- [3] 赵娟,牛泽鹏,胡大柱,等. “双碳” 战略下钢结构建筑低碳发展策略研究[J]. 建筑经济, 2024, 45(10): 25–32.

- ZHAO Juan, NIU Zepeng, HU Dazhu, et al. Constr Econ, 2024, 45(10): 25–32.
- [4] HU X C, ZHU X J, SUN Z Q. Fireproof performance of the intumescent fire retardant coatings with layered double hydroxides additives[J]. Constr Build Mater, 2020, 256: 119445.
- [5] TANG Z L, GAO M H, ZHANG Z Y, et al. Biomimetic construction of green, fire-proof and super-hydrophobic multifunctionality-integrated coatings *via* one-step spraying method for steel structures[J]. Colloids Surf A Physicochem Eng Aspects, 2024, 683: 133056.
- [6] NASIR K M, SULONG N H R, JOHAN M R, et al. Synergistic effect of industrial- and bio-fillers waterborne intumescent hybrid coatings on flame retardancy, physical and mechanical properties[J]. Prog Org Coat, 2020, 149: 105905.
- [7] DAI X B, QIAN J S, QIN J H, et al. Preparation and properties of magnesium phosphate cement-based fire retardant coating for steel[J]. Materials, 2022, 15(12): 4134.
- [8] 应姗姗, 王彦超, 邵平, 等. 石膏基钢结构防火保护材料及界面剂研究[J]. 消防科学与技术, 2019, 38(9): 1285–1289.
- YING Shanshan, WANG Yanchao, SHAO Ping, et al. Fire Sci Technol, 2019, 38(9): 1285–1289.
- [9] LI Q T, LI H X, LIANG T L. Effect of non-intumescent fireproof coating on the durability of concrete exposed to elevated temperature[J]. Constr Build Mater, 2023, 404: 133211.
- [10] 沈玉令. 厚型隧道防火涂料环境适应性及防火性能[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2019.
- SHEN Yuling. Study on environmental adaptability and fire performance of non-expanded tunnel fire retardant coatings[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2019.
- [11] LI K, WANG Y S, ZHANG X, et al. Intrinsically hydrophobic magnesium oxychloride cement foam for thermal insulation material[J]. Constr Build Mater, 2021, 288: 123129.
- [12] 罗俊瑶, 李雪莹, 侯莉, 等. 硅灰对偏高岭土基聚合物防火涂料性能影响[J]. 功能材料, 2022, 53(4): 4121–4127.
- LUO Junyao, LI Xueying, HOU Li, et al. J Funct Mater, 2022, 53(4): 4121–4127.
- [13] ZHANG Q, LI V C. Adhesive bonding of fire-resistive engineered cementitious composites (ECC) to steel[J]. Constr Build Mater, 2014, 64: 431–439.
- [14] LANZÓN M, CASTELLÓN F J, AYALA M. Effect of the expanded perlite dose on the fire performance of gypsum plasters[J]. Constr Build Mater, 2022, 346: 128494.
- [15] 季晓丽. 复合膨胀型钢结构防火涂料的制备与性能研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
- Ji Xiaoli. The composite expansion of steel structure fire retardant coating preparation and performance study[D]. Chongqing: Chongqing University, 2016.
- [16] WANG D Q, YUE Y F, QIAN J S. Effect of carbonation on the corrosion behavior of steel rebar embedded in magnesium phosphate cement[J]. Compos Part B Eng, 2024, 268: 111088.
- [17] LIU X F, WANG N, ZHANG Y, et al. Optimization of printing precision and mechanical property for powder-based 3D printed magnesium phosphate cement using fly ash[J]. Cem Concr Compos, 2024, 148: 105482.
- [18] ZHUANG J P, NI P J, XU R X, et al. Dynamic properties of steel fiber-reinforced potassium magnesium phosphate cement-based materials after high-temperature treatment[J]. J Clean Prod, 2023, 429: 139530.
- [19] 蒋晚晚, 朱金才, 孟晓凯, 等. 石灰石粉复合磷酸镁水泥高温性能及机理[J]. 建筑材料学报, 2025, 28(6): 499–507.
- JANG Wanwan, ZHU Jincai, MENG Xiaokai, et al. Journal of Building Materials, 2025, 28(6): 499–507.
- [20] FANG Y, YIN X H, CUI P, et al. Properties of magnesium potassium phosphate cement-expanded perlite composites applied as fire resistance coating[J]. Constr Build Mater, 2021, 293: 123513.
- [21] FORMOSA J, CHIMENOS J M, LACASTA A M, et al. Novel fire-protecting mortars formulated with magnesium by-products[J]. Cem Concr Res, 2011, 41(2): 191–196.
- [22] 王倩倩, 陈中航, 李晓安, 等. 热处理菱镁矿制备氧化镁的国内研究进展[J]. 矿产综合利用, 2019(2): 9–15.
- WANG Qianqian, CHEN Zhonghang, LI Xiaolan, et al. Multipurp Util Miner Resour, 2019(2): 9–15.
- [23] DAI X B, JIA X W, QIAN J S, et al. Preparation and properties of hydrotalcite-foamed magnesium phosphate cement for fire protection of steel structures[J]. J Build Eng, 2023, 76: 107165.
- [24] LONG S R, LI Y, WANG N, et al. Research on the influence of ultrafine metakaolin on the properties of magnesium phosphate cement prepared by natural brucite[J]. Constr Build Mater, 2024, 452: 138952.
- [25] ZHANG C P, FAN D Q, LU J X, et al. Ultra-stable foam enabled by nano silica engineering for foam concrete improvement[J]. Cem Concr Compos, 2024, 150: 105575.

作者贡献声明:

王楠: 绘制图表、参与数据分析与论文撰写
李悦: 提出研究方向、设计论文框架、修订论文
龙世儒: 参与数据分析
林辉: 完善论文框架、修订论文
刘雄飞: 实验测试、参与数据分析

Effect of Expanded Perlite on Properties of Brucite-Based Magnesium Phosphate Fire Retardant Coating

WANG Nan¹, LI Yue¹, LONG Shiru¹, LIN Hui¹, LIU Xiongfei²

(1. Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. School of Civil and Transportation Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

Extended Abstract

Introduction As a type of energy-saving and environmental protection building system, steel structure building is widely used in

engineering construction in recent years, and its fire protection measures are particularly important. At present, the commonly used fire retardant coatings are mainly divided into two categories, *i.e.*, organic intumescent and inorganic non-intumescent coatings. Although organic intumescent coatings exhibit a good fire resistance in the initial stage, their duration of protection is relatively short, and they may release toxic and corrosive gases during combustion, posing certain safety risks. In contrast, inorganic non-intumescent fireproof coatings have advantages such as high thermal resistance, strong durability, good wear resistance, and low cost, making them considered as an ideal fire protection material for steel structures. However, some issues such as insufficient adhesion and poor overall durability seriously limit its widespread application in practical engineering. Magnesium phosphate cement (MPC) is regarded as a fireproof material with an application potential due to its high strength, high-temperature resistance and excellent interfacial bonding performance with steel. However, the conventional raw material for MPC like dead-burned magnesia has a high density and carbon emissions, which is unfavorable for its green and sustainable development. To address the above issues, this study was to select a low-grade natural brucite powder as a complete substitute for dead-burned magnesia to prepare magnesium phosphate cement, and optimize the physical, mechanical, and fire insulation properties of brucite-based magnesium phosphate steel structure fireproof coatings (BMPC) *via* introducing modified expanded perlite.

Methods The raw materials for the preparation of BMPC included natural brucite powder, ammonium dihydrogen phosphate, analytical grade borax, and expanded perlite. Expanded perlite was divided into two types, *i.e.*, untreated (EP) and water absorption pretreatment (HEP) according to different treatment methods. Under the condition of fixed process parameters (*i.e.*, M/P mass ratio of 2.5, borax content of 15%, water-cement ratio of 0.17, and expanded perlite content of 0–20% of the total mass of brucite powder and ammonium dihydrogen phosphate), the BMPC slurry was prepared.

The dry density and surface drying time of the BMPC coating under natural curing conditions were tested in accordance with the standard GB 14907—2018. The compressive strength and adhesive strength tests were conducted on the specimens after 3-d, 7-d and 28-d curing, respectively. The thermal conductivity of BMPC was determined by a transient plane source method. The fire resistance limit was tested according to the standard GB/T 9978.1—2008. The internal pore structure of BMPC samples was analyzed by an industrial computed tomography system, and its microstructure was analyzed by field emission scanning electron microscopy. The phase change of BMPC coating before and after fire test was analyzed by X-ray diffractometry, and its thermal stability in the range of 30–1000 °C was analyzed by thermogravimetric analysis.

Results and discussion The expanded perlite (HEP) after water absorption treatment has a more open pore structure and a higher surface roughness rather than the untreated expanded perlite (EP). In the BMPC system, the HEP has a relatively small effect on the mechanical properties, especially under low density conditions, it can still maintain high compressive strength and adhesive strength. At the HEP content of 20%, the microporous structure inside the material significantly reduces the thermal conductivity and thermal diffusion coefficient. This is mainly since the HEP acts as a low thermal conductivity filler, and the air layer retained in its pores (*i.e.*, thermal conductivity of 0.026 W/(m·K)) effectively blocks heat transfer. Also, the introduction of HEP optimizes the pore structure, reduces the proportion of large pores, makes the heat conduction path more complex, delays the diffusion process of heat into the substrate, and significantly slows down the flame propagation rate and thermal decomposition process. The results of fire resistance test and pore structure show that the porosity of BMPC-HEP sample is higher than that of the control group, and the standard deviation of pore fluctuation increases from 4.0% to 5.1%, indicating that HEP forms a lightweight porous structure at a high temperature, further improving the thermal insulation performance and thermal stability of the material. The addition of HEP has a significant effect on the microstructure of BMPC at a high temperature. Some struvite and unreacted raw materials absorb a large amount of heat during pyrolysis, which plays a role in delaying temperature rise and enhancing thermal buffering, and provides an important support for the thermal insulation protection mechanism of fire retardant coatings.

Conclusions The expanded perlite after water absorption treatment had little effect on the mechanical properties of BMPC system. When the density reduced from 1062 kg/m³ to 647 kg/m³, the 28-d compressive strength and adhesive strength were only reduced by 26.5% and 17.7%, respectively. At the content of HEP of 20%, the thermal conductivity and thermal diffusivity of BMPC were 49.3% and 44.0% lower than those of BMPC without HEP, respectively. The significant improvement of this thermal performance could be mainly attributed to the fact that HEP itself had low density and low thermal diffusion characteristics, effectively slowing down the heat transfer rate in the process of temperature change, and thereby improving the thermal insulation performance of the material. The fire resistance limit of BMPC-HEP system reached 206 min, which was significantly better than that of the control sample. Its excellent fire resistance was mainly attributed to the synergistic effect of porous structure, low thermal conductivity filler and microstructure stability at a high temperature, indicating that it could have a promising application potential in the field of fire retardant coatings for steel structures.

Keywords brucite; magnesium phosphate fireproof coating; expanded perlite; thermal conductivity; fire resistance