磷石膏基免烧轻骨料的制备及性能研究

王　剑，贾　洋，孙万万，程　铠，张剑峰，刘仕琪，李　蒙

（中冶武汉冶金建筑研究院有限公司，湖北 武汉　430081）

［摘　要］以磷石膏为主要原料，复配S95级矿粉、P·O 42.5普通硅酸盐水泥作为胶凝活性组分，水玻璃为碱激发剂，采用搓丸法制备磷石膏基免烧轻骨料，系统研究磷石膏掺量、养护方式、蒸养温度及蒸养时间对轻骨料筒压强度、堆积密度、吸水率的影响规律，并进一步探究轻骨料掺量与粒径对磷石膏砂浆力学性能、干密度及导热系数的影响。结果表明：当磷石膏掺量为90%时，轻骨料综合性能满足使用要求，28 d筒压强度6.6 MPa，堆积密度896 kg/m^3，吸水率11.8%；采用55 ℃蒸汽养护15 h可显著提升轻骨料早期强度，28 d筒压强度可达10.23 MPa；当轻骨料掺量为20%、粒径为5 mm时，磷石膏砂浆综合性能最优，绝干抗压强度4.0 MPa，干密度923 kg/m^3，导热系数0.275 3 W/(m·K)。本研究验证了搓丸法制备高掺量磷石膏基免烧轻骨料的技术可行性，为磷石膏的高值化利用提供了新的技术路径。

［关键词］磷石膏；免烧轻骨料；制备；性能

［中图分类号］TQ177.3$^+$75；X781.3　　［文献标志码］A　　［文章编号］2097-4566（2026）10-0018-06

Preparation and performance research of phosphogypsum-based non-burnt lightweight aggregate

WANG Jian, JIA Yang, SUN Wanwan, CHENG Kai, ZHANG Jianfeng, LIU Shiqi, LI Meng

(*MCC Wuhan Metallurgical Construction Research Institute Co., Ltd., Wuhan* 430081, *China*)

Abstract: Using phosphogypsum as the main raw material, compounded with S95 grade mineral powder and P·O 42.5 ordinary Portland cement as the cementitious active components, and water glass as the alkali activator, the phosphogypsum-based non-burnt lightweight aggregate is prepared by the pelletizing method. The influence of phosphogypsum content, curing method, steam curing temperature, and steam curing time on the compressive strength, bulk density, and water absorption of the lightweight aggregate is systematically studied. Furthermore, the effects of lightweight aggregate content and particle size on the mechanical performance, dry density, and thermal conductivity of phosphogypsum mortar are further investigated. The results show that when the phosphogypsum content is 90%, the comprehensive performance of the lightweight aggregate meets the requirements for use, with a 28-day compressive strength of 6.6 MPa, a bulk density of 896 kg/m^3, and a water absorption rate of 11.8%. Steam curing at 55 ℃ for 15 hours significantly improves the early strength of the lightweight aggregate, and the 28-day compressive strength reaches 10.23 MPa. When the lightweight aggregate content is 20% and the particle size is 5 mm, the phosphogypsum mortar exhibits optimal comprehensive performance, with an absolute dry compressive strength of 4.0 MPa, a dry density of 923 kg/m^3, and a thermal conductivity of 0.275 3 W/(m·K). This study verifies the technical feasibility of preparing high-content phosphogypsum-based non-burnt lightweight aggregate by the pelletizing method, providing a new technological path for the high-value utilization of phosphogypsum.

Key words: phosphogypsum; non-burnt lightweight aggregate; preparation; performance

0　引言

磷石膏是湿法磷酸生产过程中产生的大宗工业固体废弃物，全球年排放量已超过2.8亿t[1]，但其综合利用率低。大量磷石膏长期露天堆存，不仅占用宝贵的土地资源，还会因可溶性磷、氟等有害物质的渗漏造成严重的土壤和水体污染[2]，已成为制约磷化工行业可持续发展的关键环境问题。

目前，磷石膏在建材领域的应用主要集中在水

收稿日期：2026-07-14

作者简介：王　剑（1996—　），男，湖北黄冈人，工程师，主要从事新型建筑材料研发工作。

泥缓凝剂、墙体材料等传统方向[3]，而用其制备免烧轻骨料的研究相对较少。传统轻骨料的生产通常需要经过1 100～1 300 ℃的高温煅烧工艺，能耗高、碳排放大，且烧结过程中易出现散粒现象，成品率较低[4]。相比之下，免烧轻骨料无须高温煅烧，可显著降低能源消耗和生产成本，同时减少二氧化碳排放，符合国家“双碳”目标要求。

冷黏结法是目前制备固体废弃物基人造轻骨料最常用的方法之一。任骏等[5]以激发剂、矿渣粉和磷石膏为原材料，制备的细骨料细度模数为4.4，筒压强度为4.5 MPa，但孔隙率高达37.29%。马文青等[6]采用碱激发技术和压力成型法制备磷石膏基人造骨料，当$w(Na_2O)$为3%、水泥掺量为30%时，骨料抗压强度可达25.16 MPa，但其工艺复杂，成型压力须达到63 MPa，且堆积密度超过1 000 kg/m^3。王晓东等[7]采用圆盘造粒法制备了大掺量磷石膏基免烧轻骨料，当磷石膏掺量为70%时，骨料堆积密度为860 kg/m^3，28 d筒压强度达4.03 MPa，1 h吸水率为9.2%，微观分析表明水泥水化生成的AFt和C-S-H凝胶有效包裹了石膏颗粒并填充了孔隙。汪洋等[8]优化了磷石膏–粉煤灰–煅烧磷尾矿免烧轻集料的制备工艺，最优配比下制备的轻骨料堆积密度为952 kg/m^3，21 d实际筒压强度达5.42 MPa，吸水率为24.5%，微观分析显示板状磷石膏穿插胶凝在水化硅铝酸钙地聚物网格中，针状钙矾石和钙沸石填充了内部孔隙。马彦涛等[9]采用冷黏结法制备了矿渣–硅灰–磷石膏基免烧轻骨料，当磷石膏掺量80%、水泥掺量5%、矿渣掺量6%、硅灰掺量9%时，经28 d标准养护后，骨料筒压强度达5.34 MPa，1 h吸水率为8.4%，堆积密度为929 kg/m^3，满足GB/T 17431.1—2010中密度等级1 000的要求。总体而言，现有研究已证实冷黏结法制备磷石膏免烧轻骨料的技术可行性，可实现较高的磷石膏资源化利用率，但普遍存在强度与堆积密度、吸水率之间的性能协同性不足问题，且制备工艺多集中于圆盘造粒和压力成型，搓丸法相关研究仍较为匮乏。搓丸法作为一种新型的免烧轻骨料制备方法，具有生产效率高、产品球形度好、颗粒级配均匀等优点。

基于上述背景，本研究采用搓丸法制备磷石膏基免烧轻骨料，研究磷石膏掺量、养护方式、蒸养温度和蒸养时间对磷石膏免烧轻骨料堆积密度、筒压强度、吸水率等性能的影响规律，并进一步探讨该轻骨料对磷石膏砂浆性能的影响，旨在为磷石膏的高值化利用提供新的技术思路。

1　原材料及实验方法

1.1　原材料

磷石膏：湖北某化工厂湿法磷酸生产的副产品，经球磨、筛分、水洗及干燥得到粒径小于48 μm（300目）的细粉。

水泥：P·O 42.5普通硅酸盐水泥，比表面积356 m^2/kg，表观密度3.11 g/cm^3。

矿粉：S95级粒化高炉矿渣粉，比表面积415 m^2/kg，28 d活性指数96%，表观密度2.90 g/cm^3。

水玻璃：采用NaOH固体粉末调整水玻璃模数为2.0，实验中作为碱激发剂使用。

水：去离子水。

磷石膏、P·O 42.5普通硅酸盐水泥、矿粉化学成分见表1。

表1　磷石膏、P·O 42.5普通硅酸盐水泥、矿粉的化学成分

Table 1　Chemical composition of phosphogypsum, P·O 42.5 ordinary Portland cement and mineral powder　%

原材料	$w(SiO_2)$	$w(CaO)$	$w(Al_2O_3)$	$w(Fe_2O_3)$	$w(MgO)$	$w(SO_3)$	$w(K_2O)$	$w(Na_2O)$	$w(P_2O_5)$	$w(CaCO_3)$	$w(F)$	w(灼失)
磷石膏	4.15	38.42	1.08	0.52	0.29	43.16	0.16	0.10	0.82	2.07	0.30	8.93
P·O 42.5普通硅酸盐水泥	21.74	62.15	5.68	3.09	2.31	2.37	0.72	0.55				1.39
矿粉	33.87	37.94	15.21	0.83	9.57	2.14	0.59	0.42				2.43

1.2　制备方法

将磷石膏粉和矿粉、水泥按照一定比例混合，再加入一定量的水和水玻璃，揉搓成团状，再用制条器按照粒径大小制成不同直径的长条，经搓球板一次搓制成型后自然养护。自然养护完成后对样品的性能进行测试。

图1为搓球装置，图2为搓制的不同粒径磷石膏基轻骨料。

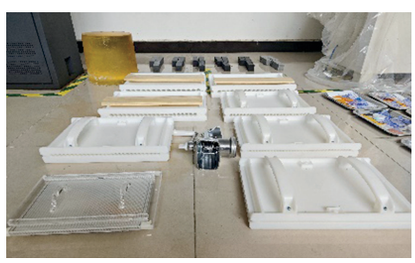

图1　搓球装置

Fig. 1　Ball rolling device



图 2　不同粒径磷石膏基轻骨料

Fig. 2　Phosphogypsum-based lightweight aggregate with different particle sizes

1.3　样品检测方法

筒压强度、堆积密度、吸水率：参照 GB/T 17431.1—2010《轻集料及其试验方法　第 1 部分：轻集料》试验方法测定。

干密度：取 3 块养护后烘干至恒质量的试样，称量，取平均值，该平均值与体积的比值即为试样的表观干密度。

绝干抗压强度、绝干抗折强度：参照 JC/T 1023—2021《石膏基自流平砂浆》测定。

导热系数：参照 GB/T 10294—2008《绝热材料稳态热阻及有关特性的测定　防护热板法》，将试件按照 300 mm × 300 mm 尺寸成型，烘干至恒质量后放入导热系数仪中对试件进行加热，使实验材料的温度发生变化，根据其变化特点，通过导热微分方程计算出实验材料的导热系数。

2　实验结果与讨论

2.1　磷石膏掺量对磷石膏基免烧轻骨料性能的影响

固定水泥掺量 5%、水玻璃掺量 6%（与总胶凝材料质量比）、水胶比 0.25 及自然养护制度，调整磷石膏与矿粉比例，磷石膏掺量对磷石膏基免烧轻骨料性能的影响如表 2 所示。

表 2　磷石膏掺量对磷石膏基免烧轻骨料性能的影响

Table 2　Effect of phosphogypsum content on performance of phosphogypsum-based non-burnt lightweight aggregate

磷石膏掺量/%	28 d 筒压强度/MPa	堆积密度/(kg·m^{-3})	吸水率/%
80	9.7	1 156	5.3
82	8.8	1 098	6.4
84	7.9	1 073	8.2
86	7.3	994	9.1
88	6.9	945	11.5
90	6.6	896	11.8

从表 2 可知，随着磷石膏掺量增加，磷石膏基免烧轻骨料的堆积密度逐渐降低，当磷石膏掺量达 90%时堆积密度最低为 896 kg/m^3；筒压强度也随着磷石膏掺量的增加而降低，且筒压强度与堆积密度呈正相关。这可能是因为当磷石膏掺量增大时，矿粉掺量减少，使得水化产物之间搭接紧密程度降低，形成的三维网状骨架结构变得疏松，从而导致磷石膏基免烧轻骨料内部存在大量空隙，削弱水化产物的骨架搭建与孔隙填充效应，同步造成强度、密度下降[10]。此外，吸水率随着磷石膏掺量的增加而增大，且在磷石膏掺量为 88%时出现陡增现象。这可能是因为随着磷石膏掺量增大，矿粉掺量随之减少，其与水泥水化产物 $Ca(OH)_2$ 反应生成的 C-S-H 凝胶和钙矾石减少，导致磷石膏基免烧轻骨料内部存在大量空隙，所以吸水率随之升高。

综合 3 项性能来看，在磷石膏掺量为 90%时压制后的磷石膏基轻骨料 28 d 筒压强度为 6.6 MPa、堆积密度 896 kg/m^3、吸水率 11.8%，满足轻骨料使用性能要求（免烧轻骨料强度≥5 MPa，吸收率≤15%，堆积密度≤900 kg/m^3）。

2.2　养护方式、蒸养温度、蒸养时间对磷石膏基免烧轻骨料筒压强度的影响

2.2.1　养护方式对磷石膏基免烧轻骨料筒压强度的影响

固定磷石膏掺量 90%、水泥掺量 5%、矿粉掺量 5%、水玻璃掺量 6%、水胶比 0.20，考察在 40 ℃蒸汽养护与自然养护 2 种养护条件下磷石膏基免烧轻骨料 3 d 和 28 d 筒压强度，测试结果如表 3 所示。由表 3 可知，自然养护下 3 d 筒压强度仅为 2.28 MPa，强度较低。而早期采用蒸汽养护一定时间后就能形成一定的强度，并且蒸汽养护组 28 d 筒压强度也高于自然养护组，这是因为温度升高加速

表 3　两种养护方式下磷石膏基免烧轻骨料的筒压强度

Table 3　Cylindrical compressive strength of phosphogypsum-based non-burnt lightweight aggregate under two curing methods

养护方式	3 d 筒压强度/MPa	28 d 筒压强度/MPa
40 ℃蒸汽养护	4.25	8.52
自然养护	2.28	6.65

了磷石膏中的水化反应，这种反应生成了更多的水化产物，这些产物能够填充颗粒间的空隙，增强材料的密实性和强度。此外，40 ℃蒸汽养护促进了晶体生长，使得晶体结构更加完整和有序。这种晶体结构的改善有助于提高材料的筒压强度。并且蒸汽养护过程中，材料内部的应力得到有效释放，减少了内部缺陷和微裂纹的产生，湿热环境对碱激发矿渣–水泥复合体系水化的促进作用可显著缩短水化诱导期，提前生成C-S-H凝胶与钙矾石等胶结产物，从而提高了材料的整体强度[11]。

2.2.2　蒸养温度对磷石膏基免烧轻骨料筒压强度的影响

固定磷石膏掺量90%、水泥掺量5%、矿粉掺量5%、水玻璃掺量6%、水胶比0.20，考察在不同温度下蒸养15 h后，磷石膏基免烧轻骨料的3 d和28 d筒压强度，测试结果如表4所示。由表4可知，随着养护温度升高，磷石膏基免烧轻骨料的3 d和28 d筒压强度呈先增大后减小的趋势，当温度为55 ℃时，3 d和28 d筒压强度最高，分别为7.28 MPa和10.23 MPa。这说明，对于磷石膏基免烧轻骨料的蒸养，存在一个合理温度范围，高于55 ℃后内部组分会分解，导致内部结构被破坏，反而不利于强度的增长，最佳蒸养温度为55 ℃。

表4　不同蒸养温度下磷石膏基免烧轻骨料筒压强度

Table 4　Cylindrical compressive strength of phosphogypsum-based non-burnt lightweight aggregate at different steam curing temperatures

蒸养温度/℃	3 d筒压强度/MPa	28 d筒压强度/MPa	3 d筒压强度占比/%
40	4.25	8.52	49.9
45	5.63	8.92	63.1
50	6.76	9.87	68.4
55	7.28	10.23	71.1
60	6.14	9.40	65.3

2.2.3　蒸养时间对磷石膏基免烧轻骨料筒压强度的影响

固定磷石膏掺量90%、水泥掺量5%、矿粉掺量5%、水玻璃掺量6%、水胶比0.20，考察在最佳蒸养温度（55 ℃）下改变蒸养时间，即55 ℃下分别养护0、5、10、15、20、25、30 h后磷石膏基免烧轻骨料的3 d和28 d筒压强度，测试结果如表5所示。由表5可知，随蒸养时间延长，磷石膏基免烧轻骨料早期强度增进明显，在蒸养10 h后，3 d强度就达到28 d强度的62.4%，28 d强度也有稳定增长。

表5　不同蒸养时间下磷石膏基免烧轻骨料筒压强度

Table 5　Cylindrical compressive strength of phosphogypsum-based non-burnt lightweight aggregate at different steam curing times

蒸养时间/h	3 d筒压强度/MPa	28 d筒压强度/MPa	3 d筒压强度占比/%
0	2.28	6.65	34.3
5	3.44	7.89	43.6
10	5.54	8.88	62.4
15	7.28	10.23	71.1
20	7.96	10.77	73.9
25	8.25	11.10	74.3
30	8.39	11.22	74.8

2.3　磷石膏基免烧轻骨料掺量对磷石膏砂浆性能的影响

以前述方式制备的磷石膏基免烧轻骨料和已有的磷石膏砂浆配方为基础，固定轻骨料粒径（5 mm）、水胶比及养护条件，研究磷石膏基免烧轻骨料掺量（10%、20%、30%）对磷石膏砂浆绝干抗压强度、绝干抗折强度、干密度及导热系数的影响，结果如表6所示。其中磷石膏基免烧轻骨料均用5 mm搓丸板制备而成，并以玻化微珠作为对照组。

表6　磷石膏基免烧轻骨料掺量对磷石膏砂浆性能的影响

Table 6　Effect of phosphogypsum-based non-burnt lightweight aggregate content on performance of phosphogypsum mortar

骨料类型	掺量/%	绝干抗压强度/MPa	绝干抗折强度/MPa	干密度/（kg·m^{-3}）	导热系数/（W·m^{-1}·K^{-1}）
玻化微珠	10	5.7	2.1	883	0.264 2
磷石膏基免烧轻骨料	10	5.0	2.3	977	0.288 6
	20	4.0	1.3	923	0.275 3
	30	3.0	1.1	902	0.251 9

由表6可知，随着轻骨料掺量增加，磷石膏砂浆抗压和抗折强度均下降，主要是因为轻骨料孔隙率不断提高引起的，同时，轻骨料本身强度低于基体，且骨料–基体界面过渡区为受力薄弱环节，掺量提升会增大薄弱区域占比，进一步加剧力学性能衰减[12]。在干密度方面，在同样10%掺量下，磷石膏砂浆干密度高于玻化微珠。在导热系数方面，掺30%的磷石膏基免烧轻骨料后砂浆的导热系数略低于玻化微珠组，保温性能更优，这与其内部微孔结构有关。磷石膏基免烧轻骨料可有效降低磷石膏砂浆的密度和导热系数，但会牺牲部分力学性能。因此，在需保证强度时掺量宜小于10%，若需提升保温隔热性能，则可将掺量提升至20%～30%。

从综合性能来看，磷石膏基免烧轻骨料在20%掺量下最佳，此时砂浆干密度为923 kg/m³，导热系数为0.275 3 W/(m·K)，抗压强度为4.0 MPa。

2.4 磷石膏基免烧轻骨料粒径对磷石膏砂浆性能的影响

通过前述实验并基于提高保温性能角度出发，后续实验采用磷石膏基免烧轻骨料和已有的磷石膏砂浆配方为基础，固定轻骨料养护条件（蒸养温度55 ℃、蒸养时间15 h）及掺量20%，研究粒径为3、4、5 mm的磷石膏基免烧轻骨料对磷石膏砂浆的绝干抗压强度、绝干抗折强度、干密度及导热系数的影响，结果如表7所示。不同粒径的磷石膏基免烧轻骨料均用相应尺寸的搓丸板制备而成。

表7 磷石膏基免烧轻骨料粒径对磷石膏砂浆性能的影响

Table 7 Effect of particle size of phosphogypsum-based non-burnt lightweight aggregate on performance of phosphogypsum mortar

骨料粒径/mm	掺量/%	绝干抗压强度/MPa	绝干抗折强度/MPa	干密度/(kg·m⁻³)	导热系数/(W·m⁻¹·K⁻¹)
3	20	5.8	2.0	1 075	0.289 7
4	20	5.1	1.8	986	0.283 2
5	20	4.0	1.3	923	0.275 3

由表7可知，磷石膏砂浆绝干抗压强度和绝干抗折强度随粒径增大而降低，粒径3 mm时砂浆绝干抗压强度最高为5.8 MPa，主要是因为细颗粒填充孔隙更密实。轻骨料粒径5 mm时磷石膏砂浆绝干抗压强度最低，为4.0 MPa，这是由于粗颗粒相比于细颗粒的界面过渡区多，而界面过渡区是最薄弱部位。磷石膏砂浆干密度随粒径增大而减小，当轻骨料粒径从3 mm增大至5 mm时干密度由1 075 kg/m³降至923 kg/m³，这可能是由于粗颗粒自身孔隙率更高引起的。当轻骨料粒径从3 mm增大至5 mm时导热系数由0.289 7 W/(m·K)同步降低至0.275 3 W/(m·K)，这是因为粗颗粒导致内部结构稀疏，孔隙率增大从而引入更多气孔。

磷石膏基免烧轻骨料的粒径显著影响砂浆性能：粒径越小，强度越高，但密度和导热系数增大；粒径越大，保温性越好，但力学性能下降[13]。

3 结论

（1）搓丸法可稳定制备高掺量磷石膏基免烧轻骨料。磷石膏掺量与轻骨料性能显著相关：随掺量提升，轻骨料堆积密度、筒压强度持续下降，吸水率持续上升；磷石膏掺量达90%时轻骨料28 d筒压强度6.6 MPa、堆积密度896 kg/m³、吸水率11.8%，满足轻骨料使用要求，可实现磷石膏的大掺量消纳。

（2）蒸汽养护可有效加速胶凝材料水化，显著提升轻骨料早期强度，且后期强度优于自然养护组。蒸养温度存在最优值，55 ℃时轻骨料3 d与28 d强度均达到峰值，温度过高会破坏水化产物结构，导致强度回落；随蒸养时间延长，轻骨料早期强度增长显著，后期强度增幅趋缓。综合性能与生产成本考量，55 ℃蒸养15 h为最优蒸养制度，对应28 d筒压强度可达10.23 MPa。

（3）磷石膏基免烧轻骨料掺入可同步降低磷石膏砂浆的干密度与导热系数，但会造成砂浆力学性能衰减。与玻化微珠对照组相比，30%掺量下磷石膏轻骨料砂浆保温性能更优。兼顾力学性能与保温隔热需求时，20%为最优掺量，此时磷石膏砂浆绝干抗压强度4.0 MPa、干密度923 kg/m³、导热系数0.275 3 W/(m·K)。

（4）轻骨料粒径对磷石膏砂浆性能调控作用显著。轻骨料粒径越小，骨料填充效应越强，砂浆密实度越高，力学性能越好，但磷石膏砂浆干密度与导热系数随之升高。轻骨料粒径越大，磷石膏砂浆内部孔隙率越高，保温性能越好，但界面薄弱区增多导致力学性能下降，可根据工程场景的性能需求选择适配粒径。

[参考文献]

[1] 韩蔚杰，张志军.磷石膏预处理及综合利用现状[J].现代化工，2025，45(12)：19-24.
Han Weijie，Zhang Zhijun. Current status of pretreatment and comprehensive utilization of phosphogypsum[J]. Modern Chemical Industry，2025，45(12)：19-24.

[2] Tayibi H，Choura M，López F A ，et al. Environmental impact and management of phosphogypsum [J]. Journal of Environmental Management，2009，90(8)：2377-2386.

[3] 杜明霞，王进明，董发勤，等.磷石膏资源化利用研究进展[J].矿产保护与利用，2020，40(3)：121-126.
Du Mingxia，Wang Jinming，Dong Faqin，et al. Research progress on resource utilization of phosphogypsum [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources，2020，40(3)：121-126.

[4] 张凯，刘舒豪，张日新，等.免烧法煤气化粗渣制备陶粒工艺及其性能研究[J].煤炭科学技术，2018，46(10)：222-227.
Zhang Kai，Liu Shuhao，Zhang Rixin，et al. Research on preparation of non-sintered ceramsite from coal gasification cinder and its properties [J]. Coal Science and Technology，2018，46(10)：222-227.

[5] 任骏，余永昆，毛雯婷，等.基于磷石膏基细轻骨料的砂浆性能研究[J].硅酸盐通报，2025，44(4)：1420-1427.
Ren Jun，Yu Yongkun，Mao Wenting，et al. Performance of mortar

based on phosphogypsum-based fine lightweight aggregate [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2025, 44(4): 1420-1427.

[6] 马文青,李子木,李灿华,等.磷石膏制备免烧人造骨料及其性能[J].建筑材料学报,2024,27(4):375-380.
Ma Wenqing, Li Zimu, Li Canhua, et al. Preparation of calcined-free artificial aggregate from phosphogypsum and its performance [J]. Journal of Building Materials, 2024, 27 (4): 375-380.

[7] 王晓东,龙广成,何松涛,等.磷石膏基免烧人造轻骨料的制备及性能研究[J].铁道科学与工程学报,2026,23(2):713-722.
Wang Xiaodong, Long Guangcheng, He Songtao, et al. Study on preparation and performance of phosphogypsum-based cold-bonded artificial lightweight aggregate [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2026, 23(2): 713-722.

[8] 汪洋,李谋玉,樊晨阳,等.磷石膏免烧轻集料的性能研究及固化机理分析[J].新型建筑材料,2023,50(8):84-88.
Wang Yang, Li Mouyu, Fan Chenyang, et al.Study on properties and curing mechanism of phosphogypsum unfired light aggregate [J]. New Building Materials, 2023, 50(8): 84-88.

[9] 马彦涛,房小健,黄绪泉,等.矿渣-硅灰-磷石膏基骨料的制备及性能[J].化工环保,2025,45(2):255-260.
Ma Yantao, Fang Xiaojian, Huang Xuquan, et al. Preparation and properties of slag-silica fume-phosphogypsum based aggregate [J]. Environmental Protection of Chemical Industry, 2025, 45 (2): 255-260.

[10] 廖宜顺,汪凯,李豪.大掺量磷石膏矿渣水泥的水化历程与长期强度研究[J].硅酸盐通报,2023,42(12):4408-4415.
Liao Yishun, Wang Kai, Li Hao. Hydration process and long-term strength of high-volume gypsum slage cement with high content of phosphogypsum [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2023, 42(12): 4408-4415.

[11] Etcheverry J M, Yue Zengliang, Krishnan S, et al. Phase Evolution of Hybrid Alkali Sulfate-Activated Ground-Granulated Blast Furnace Slag Cements [J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2023, 11(49): 17519-17531.

[12] 李春云,薛善彬,张鹏,等.轻骨料对砂浆力学与毛细吸水性能的影响[J].硅酸盐通报,2022,41(1):41-50.
Li Chunyun, Xue Shanbin, Zhang Peng, et al. Effect of lightweight aggregate on mechanical properties and capillary water absorption of mortar [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2022, 41(1): 41-50.

[13] Leyton-Vergara M, Pérez-Fargallo A, Pulido-Arcas J, et al. Influence of granulometry on thermal and mechanical properties of cement mortars containing expanded perlite as a lightweight aggregate[J]. Materials, 2019, 12(23): 4013.

(上接第17页)

[8] Wang Wengui, Wang Fan, Li Heng, et al. Synthesis of phosphorus-nitrogen hybrid flame retardant and investigation of its efficient flame-retardant behavior in PA6/PA66 [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2022, 140 (8): e53536.

[9] Tawiah B, Ullah S, Cordeiro I, et al. Nanodiamond decorated phosphor-silicone thermally conductive PA6 composites with excellent flame retardancy, nanomechanical and thermo-pyroelectric response [J]. Chemical Engineering Journal, 2025, 511: 162249.

[10] Liu Zhongsheng, Huang Baoli, Ma Meng, et al. Strong Synergistic Effects between Boron-Containing Compounds and Aluminum Diethylphosphinate for Enhanced Fire Safety and Mechanical Properties of Polyamide 6[J]. ACS Applied Polymer Materials, 2024, 7 (1): 512-521.

[11] Shen K K. Boron-based flame retardants in non-halogen based polymers [M]//Morgan A B. Non-Halogenated Flame Retardant Handbook, Hoboken: John Wiley & Sons, 2021: 309-336.

[12] Lu Yixia, Chu Tao, Huo Siqi, et al. Green synthesis of a P/N/B-containing aggregate for boosting fire-retardancy of PA6/aluminum diethylphosphinate composites[J]. Polymer Degradation and Stability, 2024, 229: 110949.

[13] Liu Bo, Gong Hua, Ji Xian, et al. Recent remediation strategies for flame retardancy via nanoparticles [J]. Chemosphere, 2024, 354: 141323.

[14] Yin Zheng, Jiang Zhiyang, Wu Tingsen. The development and application of contemporary phosphorus flame retardants: a review[J]. Frontiers in Materials, 2025, 12: 1508000.

[15] 瞿发海,张振环,查坐统,等. 磷系阻燃剂阻燃机制及高分子材料阻燃技术研究进展[J]. 生态产业科学与磷氟工程,2025,40 (5):71-79.
Qu Fahai, Zhang Zhenhuan, Zha Zuotong, et al. Mechanism of phosphorus-based flame retardants and research progress on flame retardant technology for polymeric materials [J]. Eco-industry Science & Phosphorus Fluorine Engineering, 2025, 40 (5): 71-79.

[16] 袁英杰,张家涛,彭巨擘,等. 羟基锡酸锌/锡酸锌的阻燃应用与研究进展[J]. 现代塑料加工应用, 2019, 31 (3): 60-63.
Yuan Yingjie, Zhang Jiatao, Peng Jubo, et al. Flame retardant application and research progress of zinc hydroxystannate/zinc stannate [J]. Modern Plastics Processing and Applications, 2019, 31 (3): 60-63.

[17] 李换换. 新型锡基阻燃剂的合成及其在阻燃尼龙6中的应用[D]. 上海:东华大学, 2019.
Li Huanhuan. Synthesis of new tin-based flameretardants and their flame retardant applications in polyamide 6[D]. Shanghai: Donghua University, 2019.

[18] 胡艳丽. 哌嗪改性聚磷酸铵与羟基锡酸锌复配协效阻燃聚丙烯[D]. 昆明:昆明理工大学, 2021.
Hu Yanli. Piperazine-modified ammonium polyphosphate compounded with zinc hydroxystannate for synergistic flame-retardant polypropylene [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2021.