

磷石膏水泥基复合材料及泡沫轻质材料的强度特性研究

Strength Characteristics of Phosphogypsum Cement-based Composites and Foamed Lightweight Materials

周纪陈¹, 姜涛², 邹涛³

(1. 南通市城市建设工程管理中心, 南通 226000; 2. 江苏双宁工程咨询有限公司, 南京 211212;
3. 无锡市锡山区厚桥水利管理站, 无锡 214000)

摘要: 为缓解大量废弃磷石膏对环境的污染, 同时降低传统高能耗水泥的消耗。以磷石膏、水泥、微硅粉、硫铝酸盐水泥、熟石灰为主要原材料外掺减水剂制备磷石膏水泥基复合材料及泡沫轻质材料, 通过复合材料单因素试验, 确定复合材料最优配合比, 再以复合材料最优配合比为基准配合比制备泡沫轻质材料, 研究磷石膏掺量、水固比和泡沫掺量对泡沫轻质材料性能的影响, 结果表明: 磷石膏水泥基泡沫轻质材料满足使用要求的磷石膏最大掺量为 60%, 水固比以 0.4~0.5 为宜, 满足使用要求的泡沫掺量为 4%~7%。因此在实际工程中可制备磷石膏掺量 60% 的磷石膏水泥基泡沫轻质材料用于路基填筑。

关键词: 磷石膏; 复合材料; 泡沫轻质材料; 湿密度; 抗压强度

中图分类号: U414 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2025) 05-0072-07

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.05.014

ZHOU Jichen¹, JIANG Tao², ZOU Tao³

(1. Nantong Municipal Urban Construction Engineering Management Center, Nantong 226000, China;
2. Jiangsu Shuangning Engineering Consulting Co., Ltd., Nanjing 211212, China;
3. Wuxi Xishan Houqiao Water Conservancy Management Station, Wuxi 214000, China)

Abstract: In order to alleviate the environmental pollution caused by a large amount of discarded phosphogypsum (PG) and reduce the consumption of traditional high-energy cement. PG cement-based composites and foam lightweight materials are prepared with PG, cement, micro silica powder, sulphoaluminate cement and hydrated lime as the main raw materials and water reducer. Through the single factor test of composite materials, the optimal mix proportion of composite materials is determined, and then foam lightweight materials are prepared with the optimal mix proportion of composite materials as the benchmark mix proportion. The effects of PG content, water solid ratio and foam content on the performance of foam lightweight materials are studied. The results show that the maximum PG content of PG cement-based foam lightweight materials that meet the use requirements is 60%, the water solid ratio is 0.4~0.5, and the foam content that meets the use requirements is 4%~7%. Therefore, PG cement based foam lightweight material with 60% PG content can be prepared for subgrade filling in practical projects.

Key words: phosphogypsum; composites; foam lightweight materials; wet density; compressive strength

作者简介: 周纪陈 (1989—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向: 城市道路绿色新材料。

通信作者: 姜涛 (1998—), 男, 硕士, 助理工程师, 研究方向: 公路工程建设新材料。

收稿日期: 2024-12-10

0 引言

在湿法磷酸生产过程，每生产 1 吨磷酸产生约 5 吨^[1]磷石膏；磷石膏中含有氟、磷、有机物及重金属等众多杂质；磷石膏露天堆放占用大量土地资源；因此实现磷石膏大量资源化利用的问题迫在眉睫^[2]。

肖刘飞等^[3]分别使用 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和普通硅酸盐水泥对磷石膏进行中和改性；Liu 等^[4]将磷石膏与矿渣等活性掺料结合制备磷石膏基水泥，制备的材料水化速率小，但早期强度较低；张彪等^[5]将减水剂掺入磷石膏中，结果发现磷石膏内部结构变得更为致密，增加了磷石膏试件的强度；王健^[6]研究发现将粉煤灰和水泥掺加发泡磷石膏轻质材料中可降低结构孔隙率和孔径，使空隙结构细化；丁建文等^[7]在水泥中掺加赤泥与磷石膏用于固化淤泥，磷石膏掺入使得复合固化土的破坏应变大幅提升，塑性变形能力增强；马彦涛等^[8]在磷石膏中掺入矿渣和硅灰所制备的骨料，材料强度大幅度提升；赵丽华等^[9]对比利用硅酸钠改性前后的水泥稳定磷石膏材料，随着龄期的增长，硅酸钠对材料强度的增强作用逐渐降低；沈雪坤等^[10]研究了钢渣掺量对超硫磷石膏矿渣胶凝材料强度的影响，在钢渣一定掺量范围内呈现先增后减的趋势；黄盛龙^[11]研究了钙硅比对石膏矿渣水泥微结构演化机理与强化机制，研究出石膏矿渣水泥最佳的钙硅比为 2.34，其水化产物具有最密实的结构；付汝松^[12]研究了硅灰掺量对磷石膏基胶凝材料强度的影响，发现硅灰的最佳掺量为

7%；苗训^[13]以原状磷石膏和半水磷石膏为主要材料分别掺加水泥、硅灰、生石灰制备轻质泡沫磷石膏复合材料，硅灰对材料性能的提升优于水泥、生石灰；程树范等^[14]分析改性磷石膏基层和磷石膏-水泥稳定碎石基层的路用性能，水泥掺量 7%~10% 最佳；薛凯喜等^[15]研究了孔隙率对磷石膏基发泡建筑石膏强度的影响，发现抗压强度与孔隙率的关系符合方程 $f_c = 34.69 - 39.66P$ (f_c 抗压强度， P 孔隙率)。

综上可知，磷石膏可以制备出性能较为优异的复合胶凝材料，但仍存在生产过程中凝结硬化过快、能耗高、工艺复杂等问题，阻碍了固废磷石膏的广泛应用。因此，采用磷石膏复配水泥和微硅粉，外掺少量的熟石灰和硫铝酸盐水泥，在保持同一流动度的前提下，加入适量减水剂制备复合材料，优化其配比。并在最优配比下制备泡沫轻质材料，通过对其进行掺量优化和用水量调整，以期制备出大掺量磷石膏泡沫轻质材料用于路基填筑。与传统工艺相比，所采用的磷石膏处理方法可以有效地避免二次污染，为磷石膏低成本无害化应用提供参考。

1 试验

1.1 试验材料

磷石膏：pH 值 6.1，化学成分见表 1；水泥：P·O 42.5 级水泥，密度 3.07 g/cm³，比表面积 391 m²/kg，化学成分见表 1；微硅粉：pH 值 7.3，比表面积 18 m²/g，化学成分见表 1；熟石灰：Ca (OH)₂ 纯度不少于 95%。其他：高性能聚羧酸减水剂。

表 1 磷石膏、水泥和微硅粉的化学成分
Table 1 Chemical composition of PG, cement and micro silica powder

类型	SO ₃	CaO	SiO ₂	P ₂ O ₅	Al ₂ O ₃	F	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	Na ₂ O	C	其他
磷石膏	48.81	37.36	10.68	1.16	0.67	0.38	0.31	0.21	0.12	—	—	0.30
水泥	2.10	66.17	21.14	0.27	3.60	—	3.07	0.75	1.88	0.30	—	0.72
微硅粉	—	0.15	96.00	—	0.17	—	0.20	—	—	0.20	0.78	2.50

1.2 试验配合比

微硅粉对磷石膏起到裹覆作用并对水泥起到强化作用；熟石灰能降低磷石膏中有害可溶性磷对复合材料的不良影响；硫铝酸盐水泥可以促进复合材料凝结。为确定复合材料中微硅粉、熟石灰、硫铝酸盐水泥的最佳掺量，所以通过单因素试验设计方法设计出相应的配合比，试验配合比见表 2。

1.3 试样制备及试验方法

1.3.1 磷石膏水泥基复合材料试件的制备

将水泥、微硅粉、磷石膏和熟石灰等固体物料放入搅拌锅中均匀混合；将减水剂放入水中，然后缓慢将水倒入拌锅中，搅拌 3 min 后成凝胶状；最后将浆体倒入 40 mm × 40 mm × 160 mm 的试模中，在振动台上进行振实。试件成型后放入自然养护条件

材料科学

下进行养护 24 h 后拆模，在规定养护方式（自然养护和标准养护）下养护至龄期。

表 2 试验配合比						
Table 2 Test the mix ratio						
编号	P·O42.5	微硅粉	磷石膏	熟石灰	硫铝酸盐水泥	减水剂
A1	40		60	2		0.3
A2	36	4	60	2		0.3
A3	32	8	60	2		0.3
A4	28	12	60	2		0.3
A5	24	16	60	2		0.3
A6	20	20	60	2		0.3
B1	32	8	60			0.3
B2	32	8	60	1		0.3
B3	32	8	60	2		0.3
B4	32	8	60	3		0.3
B5	32	8	60	5		0.3
B6	32	8	60	7		0.3
C1	32	8	60	2		0.3
C2	32	8	60	2	2	0.3
C3	32	8	60	2	4	0.3
C4	32	8	60	2	6	0.3
C5	32	8	60	2	8	0.3
C6	32	8	60	2	10	0.3

1.3.2 磷石膏水泥基泡沫轻质材料的制备

将磷石膏、水泥及微硅粉等固体材料按比例均匀混合后，倒入搅拌机中和水混合搅拌一定时间形成浆体。再与准备好的泡沫混合，继续搅拌一段时间后取样测试泡沫轻质材料的湿密度，最后倒入 100 mm×100 mm×100 mm 立方体试模中进行浇筑成型，再按照试验要求进行养护至龄期。

1.3.3 试件的测试

养护至龄期的胶凝材料试件，按照 GB/T 17671—2021《水泥胶砂强度检验方法（ISO 法）》上测试方法分别测定试样 3、7、28 d 的抗折强度和抗压强度；取 28 d 龄期的试件，破碎成豌豆大小的小块后采用无水乙醇终止水化，在测试前取出烘干，采用扫描电子显微镜对水化产物的形貌进行分析。养护至龄期的泡沫轻质材料试件，按照 CJJ/T 177—2012《气泡混合轻质土填筑工程技术规范》上测试方法测定试样湿密度和 28 d 抗压强度。

2 结果与分析

2.1 复合材料

2.1.1 水泥微硅粉掺量比对力学性能的影响

水泥微硅粉掺量比对复合材料力学性能的影响，测试结果如图 1 所示。试件 A1 到 A3 抗压强度和抗折强度大幅度增加，A3 组试件强度达到最大，从 A3

到 A6 抗压强度和抗折强度逐渐减小。因为微硅粉主要成分是活性 SiO₂，合适的掺比能够促进水泥水化，其次微硅粉细小的颗粒裹覆着磷石膏不规则的晶体充当水泥和磷石膏的连接者，从而增强复合材料强度；但是微硅粉代替一部分水泥致使水泥用量减少，微硅粉的胶凝性相对较弱，过大减少水泥的用量会导致材料胶凝性减弱而引起材料强度的降低。故选择磷石膏：水泥：微硅粉 = 60：32：8 的最佳配合比进行下一步试验。

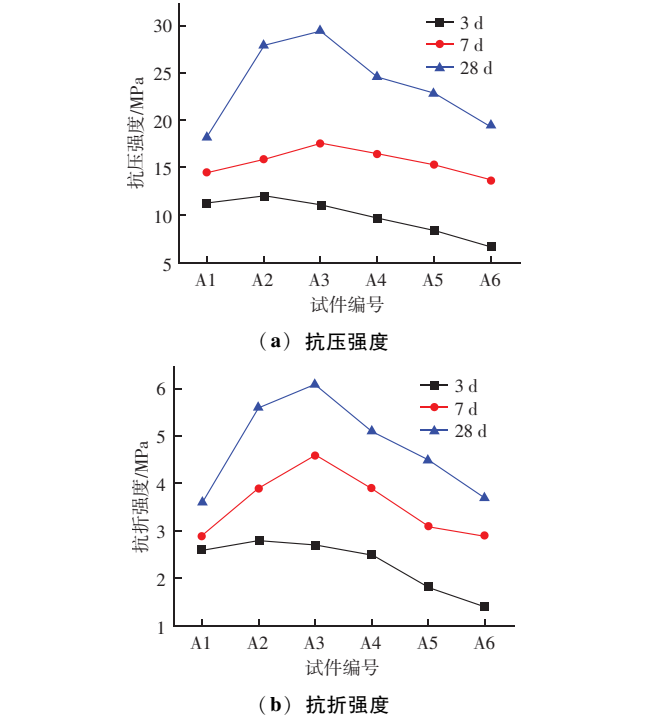


图 1 水泥微硅粉掺量比对抗压、抗折强度的影响
Fig. 1 Influence of the proportion of cement micro silica powder on compressive strength and flexural strength

2.1.2 熟石灰对力学性能的影响

由图 2 可知，熟石灰掺量不超过 2% 时，随着掺量的增加，强度逐步上升；掺量超过 2%，强度随着掺量的增加而明显减小，且减小梯度较大。水泥水化后生成水化硅酸钙（C-S-H）凝胶、Ca（OH）₂ 和钙矾石，由于熟石灰的加入，加速了水泥水化的速度；同时加入使得液相中的 Ca²⁺ 浓度进一步增加，磷石膏中的硫酸钙与 Ca²⁺ 和从水泥中溶出的 Al³⁺ 反应生成较多钙矾石，水化产物的积累使得浆体内部逐渐密实，强度不断提高，再者磷石膏呈弱酸性会阻碍（C-S-H）凝胶的形成，适量的熟石灰加入可以改变液相的 pH 值。当熟石灰过量时，一方面液相

中 Ca^{2+} 浓度进一步增加, 使得钙矾石积累量巨大, 过量的钙矾石会随着时间的推移而不断膨胀, 破坏试件内部结构, 从而降低强度; 另一方面, 过量的 Ca^{2+} 与磷石膏中残留的磷杂质结合生成磷酸钙沉淀并附着在颗粒表面, 对水泥和磷石膏的水化过程有抑制作用, 因此选择熟石灰掺量 2% 进行试验。

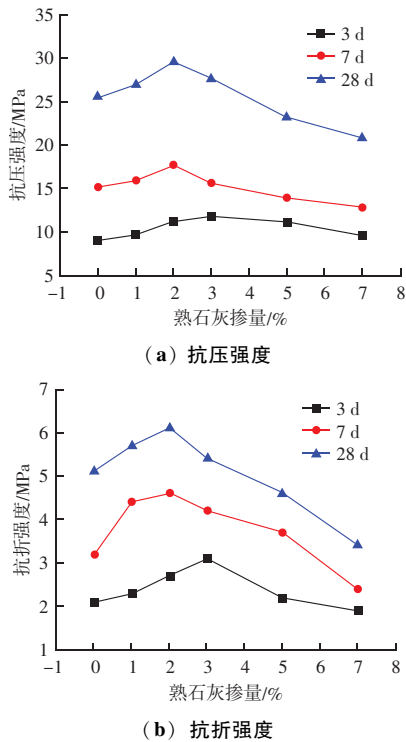


图2 熟石灰掺量对抗压、抗折强度的影响

Fig. 2 Influence of hydrated lime content on compressive strength and flexural strength

2.1.3 硫铝酸盐水泥对力学性能的影响

研究不同硫铝酸盐水泥掺量对复合材料凝结时间及力学性能的影响, 测试结果见表 3。

表3 不同硫铝酸盐水泥掺量对复合材料凝结时间和抗压强度的影响
Table 3 Effect of different content of sulphoaluminate cement on setting time and compressive strength of composites

编号	初凝 /min	终凝 /min	3 d 抗压强度/MPa	7 d 抗压强度/MPa	28 d 抗压强度/MPa
C1	950	1 240	11.1	17.6	29.5
C2	440	855	9.7	19.6	29.9
C3	150	450	13.5	20.7	30.5
C4	105	390	11.8	21.0	31.0
C5	95	375	10.2	20.9	30.1
C6	80	350	11.8	20.1	29.7

加入硫铝酸盐水泥使得基体的凝结时间明显缩短, 初凝时间由 C1 的 950 min 迅速缩短至 80~440 min, 终凝时间由 C1 的 1 240 min 迅速缩短至 350~855 min,

而且随着掺量的不断增加, 凝结时间呈递减趋势。硫铝酸盐水泥同一掺量下, 基体的强度随龄期的增长而持续增加; 各个时期基体的抗压强度相差不大, 没有明显的强弱规律, 尤其是后期强度最大的 C4 仅比最小的 C1 大 1.5 MPa, 故硫铝酸盐水泥对凝结时间的影响较大, 对基体最终强度影响较小。从终凝时间及经济效益上看, 选择 C3 即 4% 掺量的硫铝酸盐水泥用作泡沫轻质材料促凝剂为宜。

2.1.4 养护条件对力学性能的影响

选取试件 C3 研究自然养护与标准养护对磷石膏复合材料的抗压、抗折强度的影响, 结果如图 3 所示。

自然养护对于早期强度提升较大, 但随着养护周期变长, 自然养护强度增长率慢慢低于标准养护, 到 28 d 时, 标准养护的试件强度已超过自然养护。一方面, 磷石膏有着部分石膏的特性, 即长时间在潮湿的空气中不仅强度增长缓慢甚至可能出现溶解现象, 标准养护的相对湿度在 90% 以上, 这极大的降低了试件的强度, 但是随着小部分磷石膏参与水化, 剩下的大部分磷石膏特性稳定充当填充料不参与水化, 后续强度将由水泥、微硅粉提供; 另一方

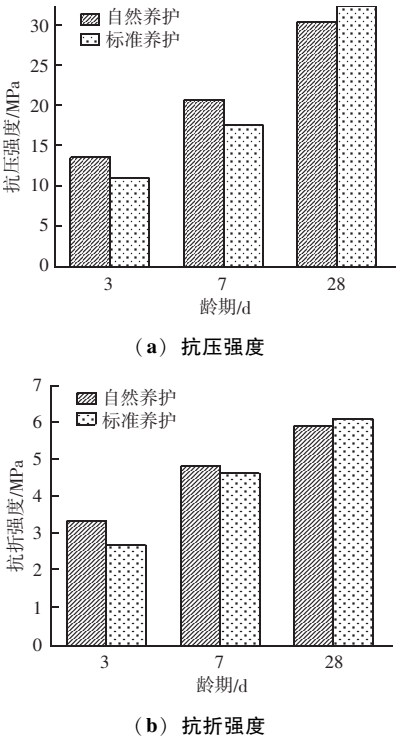


图3 复合材料在不同养护条件下强度变化规律
Fig. 3 Strength variation of composites under different curing conditions

材料科学

面,水泥在标准养护的情况下强度增长会比自然养护大大提高;此消彼长,随着养护时间的增加,试件在标准养护条件下强度会超过自然养护条件下的强度。

2.1.5 SEM 分析

磷石膏复合材料的抗压强度、抗折强度等力学性能主要取决于其内部的微观结构,同时磷石膏、水泥及微观粉的最终水化产物不仅会影响材料强度性能,还会导致材料内部结构发生改变。为了更好地了解复合材料内部结构和水化产物,对具有较优配比的 C3 进行了 SEM 扫描电镜分析,并对其微观机理进行简单讨论。微观结构如图 4 所示。

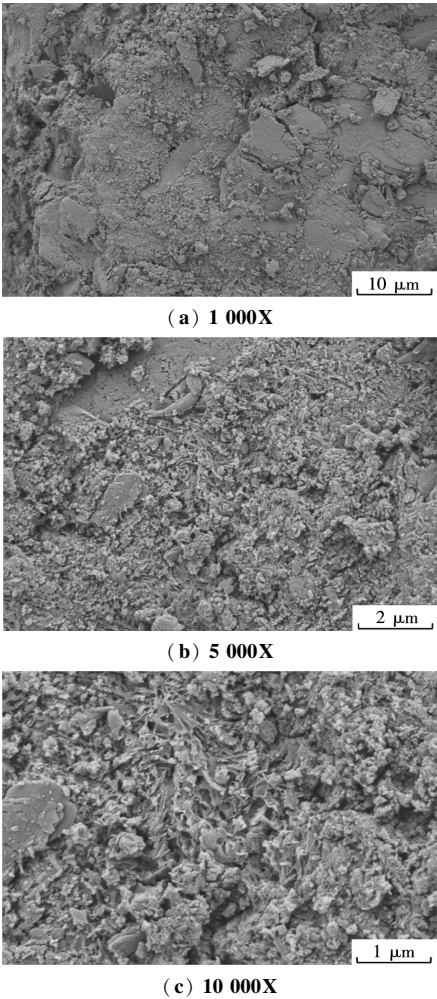


图 4 试件 C3 的 SEM 图
Fig.4 SEM images of C3

(a) 中试件结构比较平整,无显著的空隙和开裂,其上分布着零零散散的附着物;进一步放大后的 (b)、(c) 中出现了大量的胶黏物质并且这些胶

黏物质将板块状磷石膏牢牢地固定住,这是由于微硅粉的细度较大,能够填补磷石膏和水泥之间的缝隙,从而紧紧地包裹住磷石膏和水泥,加强水泥对磷石膏的黏结力,同时微硅粉颗粒还能填补试件结构中一些细小的裂缝,增加密实度,使得试件微观结构更加完整;除此之外,微硅粉中含有大量的活性 SiO_2 ,与熟石灰发生化学反应生成硅酸钙,促进水泥水化过程,提高早期和最终强度。由此可得,微硅粉的加入增加了试件的密实度,提高了试件的力学性能。

2.2 泡沫轻质材料

泡沫轻质材料原料配比以复合材料的最优配合比为基础,即磷石膏掺量 60%,水泥:微硅粉=32:8,熟石灰外掺 2%,硫铝酸盐水泥外掺 4%,减水剂 0.5%。探究磷石膏掺量、水固比和泡沫掺量对泡沫轻质材料湿密度和抗压强度的影响。

2.2.1 磷石膏掺量对湿密度和抗压强度的影响

固定水固比 0.5,泡沫掺量 4%,讨论磷石膏掺量对泡沫轻质材料性能的影响,结果如图 5 所示。

随着磷石膏掺量不断增大,泡沫轻质材料的湿密度和抗压强度在不断减小。磷石膏掺量由 50% 到 70%,湿密度由 $1\,085\text{ kg/m}^3$ 下降至 $1\,010\text{ kg/m}^3$,强度由 2.1 MPa 减小至 0.3 MPa,尤其当磷石膏掺量超过 60% 时,抗压强度直线下降,由 1.9 MPa 直接下降到 0.5 MPa,已不满足路基填料使用要求,故磷石膏水泥微硅粉泡沫轻质材料中磷石膏掺量不能超过 60%。

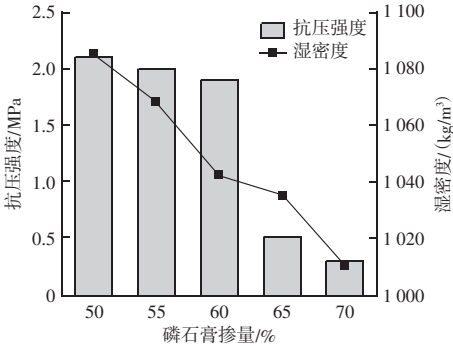


图 5 磷石膏掺量对泡沫轻质材料性能的影响
Fig.5 Effect of PG content on performance of foamed lightweight materials

2.2.2 水固比对湿密度和抗压强度的影响

水固比是影响泡沫轻质材料制备的关键因素之一,减水剂和水固比的作用一致,浆体的黏稠度对

泡沫轻质材料的密度和强度有着一定的影响。固定磷石膏掺量 60%，泡沫掺量 4%，讨论水固比对泡沫轻质材料性能的影响，试验结果如图 6 所示。

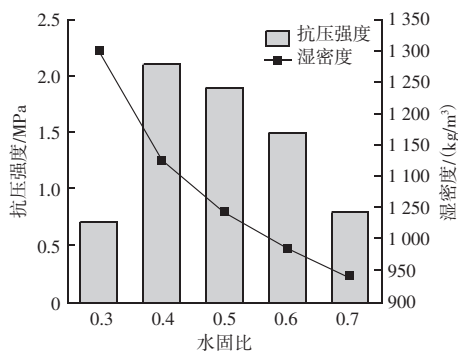


图 6 水固比对泡沫轻质材料性能的影响

Fig. 6 Effect of water cement ratio on performance of foamed lightweight materials

随着水固比的增加，泡沫轻质材料湿密度从 1300 变化到 940 kg/m³；而强度呈先增后降的趋势，且水固比在 0.4 时达到峰值 2.1 MPa。用水量过少导致浆体无法拌合均匀，少量材料处于半干状态聚合度不够，加入泡沫后结团形成大量的粉粒颗粒；用水量过多，自由水含量增加，烘干后气孔率增大，强度降低，还会导致浆体流动度过大，则会致使泡沫上浮与浆体出现分层。因此在减水剂掺量 0.5% 的情况下，可控制水固比在 0.4~0.5 之间为宜。

2.2.3 泡沫掺量对湿密度和抗压强度的影响

泡沫掺量对于强度的影响很大，随着泡沫掺量的增加，试块的强度迅速下降；泡沫掺量同时也是决定泡沫轻质材料密度的主要因素。固定磷石膏掺量 60%，水固比 0.5，讨论泡沫掺量对泡沫轻质材料性能的影响，试验结果如图 7 所示。

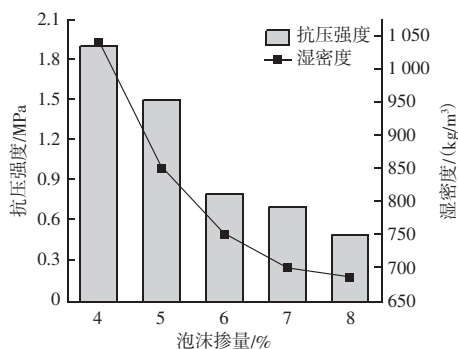


图 7 泡沫掺量对泡沫轻质材料性能的影响

Fig. 7 Effect of foam cement ratio on performance of foamed lightweight materials

泡沫轻质材料湿密度和强度随着泡沫掺量的增加而降低，且具有较强的相关性。随着泡沫掺量从 4% 到 8%，湿密度由 1042 kg/m³ 下降到 685 kg/m³，相应强度由 1.9 MPa 减小到 0.5 MPa，泡沫掺量 7% 时强度为 0.7 MPa，满足路基填料使用要求的泡沫掺量为 4%~7%。改变泡沫掺量是控制泡沫轻质材料湿密度和强度最有效的途径，因此可根据此图调整泡沫掺量，以制备不同湿密度和强度要求的泡沫轻质材料。

3 结论

通过磷石膏水泥基复合材料单因素试验和微观结构分析以及探究磷石膏掺量、水固比和泡沫掺量对泡沫轻质材料性能的影响，得到了以下结论：

(1) 磷石膏水泥基复合材料在磷石膏掺量 60% 时，最优配合比为水泥：微硅粉 = 4:1，熟石灰 2%，硫铝酸盐水泥 4%。

(2) 微硅粉水化能够产生胶状物质增强复合材料强度，同时微硅粉的细度较大能够填补磷石膏和水泥之间的缝隙，从而紧紧地包裹住磷石膏和水泥，加强水泥对磷石膏的黏结力；通过对比自然养护和标准养护对复合材料强度增长的影响，后期强度来看，标准养护更加有利。

(3) 泡沫轻质材料中能够满足使用要求的磷石膏最大掺量为 60%，水固比以 0.4~0.5 为宜，满足路基填料使用要求的泡沫掺量为 4%~7%，改变泡沫掺量是控制泡沫轻质材料湿密度和强度最有效的途径，可调整泡沫掺量以制备不同湿密度和强度要求的泡沫轻质材料。

参 考 文 献

- [1] 崔荣政, 王臣, 修学峰. 2023 我国磷石膏综合利用情况及产业发展现状分析 [J]. 生态产业科学与磷氟工程, 2024, 39 (11): 1-6.
- [2] 李东旭, 焦嘉伟, 廖大龙. 我国磷石膏在新型建筑材料行业的发展及思考 [J]. 新型建筑材料, 2021, 48 (11): 1-4, 11.
- [3] 肖刘飞, 朱教群, 周卫兵, 等. 碱性剂对磷建筑石膏凝结硬化性能的影响 [J]. 非金属矿, 2021, 44 (6): 26-29.
- [4] LIU S H, WANG L, YU B Y. Effect of modified PG on the hydration properties of the PG-based supersulfated cement [J]. Construction and Building Materials, 2019, 243 (30): 9-16.

材料科学

- [6] 邓英华. 脲酶诱导矿化提高弱胶结砂岩力学与抗渗特性研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2024.
- [7] 梁仕华, 牛九格, 房采杏, 等. 微生物固化砂土的研究进展 [J]. 工业建筑, 2018, 48 (7): 1-9, 15.
- [8] 吴敏, 高玉峰, 何稼, 等. 大豆脲酶诱导碳酸钙沉积与黄原胶联合防风固沙室内试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2020, 42 (10): 1914-1921.
- [9] GAO Y F, HE J, TANG X, 等. Calcium carbonate precipitation catalyzed by soybean urease as an improvement method for fine-grained soil [J/OL]. Soils and Foundations, 2019, 59 (5): 1631-1637.
- [10] 李文涛, 孙章皓, 庄妍, 等. 氧化镁复合水泥固化硫酸盐渍土的力学、膨胀性能及微观机理 [J]. 岩土工程学报, 2024, 46 (9): 1840-1848.
- [11] 陆加越, 白坤, 张成君, 等. 氧化镁矿粉复配加固砂土的强度特性 [J]. 土木与环境工程学报 (中英文), 2025, 47 (3): 36-40.
- [12] 袁建议, 袁建华, 吴成皓, 等. 活性氧化镁固化软土的微观机理分析 [J]. 湖北理工学院学报, 2020, 36 (5): 28-32, 39.
- [13] WU H L, FEI J, DU Y J. 干湿循环作用下氧化镁激发矿渣-膨润土竖向隔离墙耐久特性研究 (英文) [J]. Journal of Zhejiang University-Science A (Applied Physics & Engineering), 2019, 20 (12): 948-960.
- [14] XIAO X, GOH L X, UNLUER C, et al. Bacteria-induced internal carbonation of reactive magnesia cement [J/OL]. Construction and Building Materials, 2021, 267: 121748.
- [15] TUNG H, NGUYEN T D, UNLUER C, 等. Use of microbial carbonation process to enable self-carbonation of reactive MgO cement mixes [J/OL]. Cement and Concrete Research, 2021, 143: 106391.
- [16] 王布康, 贾苍琴, 王贵和, 等. 氧化镁-微生物与微生物诱导碳酸盐沉淀固化尾矿砂效果的试验研究 [J]. 工业建筑, 2022, 52 (11): 79-83.
- [17] YANG Y, RUAN S, WU S, et al. Biocarbonation of reactive magnesia for soil improvement [J/OL]. Acta Geotechnica, 2021, 16 (4): 1113-1125.
- [18] 朱明琴. 微生物固化技术改良砂土性能研究进展 [J]. 青海交通科技, 2024, 36 (2): 71-75.
- [19] HE J, GAO Y F, GU Z, et al. Characterization of Crude Bacterial Urease for CaCO_3 Precipitation and Cementation of Silty Sand [J/OL]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2020, 32 (5): 04020071.
- [20] 董旭光, 方礼鑫, 马渊博, 等. 大豆脲酶诱导碳酸钙固化黄土的强度试验研究 [J]. 地震工程学报, 2024, 46 (5): 1009-1020.
- [21] 亓永帅, 高玉峰, 何稼, 等. 可溶性大豆多糖对大豆脲酶诱导碳酸钙沉积固化风积沙效果的影响研究 [J]. 岩土工程学报, 2024, 46 (4): 823-832.
- [22] 吴林玉, 缪林昌, 孙满昊, 等. 植物源脲酶诱导碳酸钙固化砂土试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2020, 42 (4): 714-720.
- [23] 赵志峰, 王俊杰. MICP 与 MgO 联合加固粉土试验 [J]. 林业工程学报, 2024, 9 (6): 173-179.

(上接第 77 页)

- [5] 张彪, 郑光亚, 刘家宁, 等. 减水剂对磷石膏基建筑石膏性能的影响 [J]. 硅酸盐通报, 2020, 39 (5): 1540-1546.
- [6] 王健. 发泡磷石膏轻质材料的制备与基本性能 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [7] 丁建文, 万星, 高洪梅, 等. 赤泥磷石膏与水泥协同固化淤泥的力学特性与微观机理 [J/OL]. 岩土工程学报, 1-10 [2025-04-27]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1124.TU.20250418.1435.002.html>.
- [8] 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.
- [9] 赵丽华, 张家豪, 高奥东, 等. 基于硅酸钠与熟石灰改性的水泥稳定磷石膏性能研究 [J]. 四川水泥, 2025 (2): 4-7.
- [10] 沈雪坤, 蔡巍, 杨博雯, 等. 钢渣粉掺量对超硫磷石膏矿渣胶凝材料性能的影响 [J]. 四川水泥, 2025 (1): 29-32.
- [11] 黄盛龙. 石膏矿渣水泥微结构演化机理与强化机制研究 [D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2024.
- [12] 付汝松. 磷石膏基胶凝材料耐久性能研究 [D]. 贵阳: 贵州大学, 2023.
- [13] 苗训. 轻质泡沫磷石膏复合材料制备与性能研究 [D]. 贵州大学, 2022.
- [14] 程树范, 曾卫新, 殷源, 等. 大掺量改性磷石膏基层材料路用性能试验研究 [J/OL]. 武汉理工大学学报 (交通科学与工程版), 1-7 [2025-04-27]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1824.U.20250319.1745.026.html>.
- [15] 薛凯喜, 司鹏超, 王天源, 等. 磷石膏基发泡建筑石膏的热传导与强度特性研究 [J]. 硅酸盐通报, 2023, 42 (12): 4416-4426.