◆研究开发与生态设计◆

磷矿浮选尾矿复合固废制备胶结充填材料实验研究

董颢敏[1]，刘明霞[1,2]，姚兆辉[1]，汪国靖[3]，张汉泉[1,2]

（1. 武汉工程大学 资源与安全工程学院，湖北 武汉 430205；
2. 磷矿及其共伴生资源绿色高效开发利用全国重点实验室，湖北 武汉 430073；
3. 湖北三峡实验室，湖北 宜昌 443007）

［摘 要］针对磷矿浮选尾矿利用率低及传统水泥基充填材料成本偏高、碳排放量大等问题，以磷矿正反浮选尾矿为主要原料，采用普通硅酸盐水泥作为基础胶凝组分，利用煅烧磷尾矿、磷石膏部分替代水泥，并外加聚羧酸高效减水剂，制备固废基胶结充填材料。系统研究原料配比、固废替代比例、外加减水剂对充填体成型性能及抗压强度的影响，并结合水化过程与物相变化揭示材料硬化机制。实验结果表明，在磷矿正浮选尾矿体系下，充填最优磷尾矿与水泥质量比为12∶1，养护时间3、14 d的抗压强度分别为1.12、1.31 MPa。煅粉替代水泥后，养护3、14 d试块无法脱模，28 d抗压强度最高1.27 MPa。掺入0.8%减水剂，抗压强度升至1.668 MPa。采用磷石膏复配，28 d抗压强度最高达2.635 MPa。在磷矿反浮选尾矿体系下，充填最优磷尾矿与水泥质量比12∶1，养护时间14、28 d抗压强度分别为2.34、2.42 MPa。煅粉替代水泥早期难以脱模，28 d抗压强度仅0.28～1.03 MPa。当掺入0.8%减水剂后，水泥与煅粉质量比为0.75∶0.25时抗压强度最高（1.402 MPa）。当水泥与磷石膏质量比为0.9∶0.1时，28 d抗压强度为2.894 MPa，综合性能更佳。反浮选尾矿充填体系的抗压强度优于正浮选尾矿体系。经配比优化后的充填材料能够满足矿山井下充填的强度标准，实现磷尾矿、磷石膏等大宗工业固废协同资源化处理，降低充填成本，为磷系固废绿色低碳利用及绿色矿山建设提供技术参考。

［关键词］磷矿浮选尾矿；固废胶凝材料；煅烧磷尾矿；磷石膏；胶结充填材料
［中图分类号］TD926 ［文献标志码］A ［文章编号］ 2097-4566（2026）09-0007-07

Preparation of cemented backfill materials from flotation phosphorus tailings and composite solid waste

DONG Haomin[1], LIU Mingxia[1,2], YAO Zhaohui[1], WANG Guojing[3], ZHANG Hanquan[1,2]

（1. *School of Resources & Safety Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan* 430205, *China*;
2. *State Key Laboratory of Green and Efficient Development of Phosphorus Resources, Wuhan* 430073, *China*;
3. *Hubei Three Gorges Laboratory, Yichang* 443007, *China*）

Abstract: Aiming at the low utilization rate of flotation phosphorus tailings, high cost and high carbon emissions of traditional cement-based backfills, cemented backfill materials based on solid wastes are prepared using positive and reverse flotation phosphorus tailings. Cement is partially replaced by calcined phosphorus tailings and phosphogypsum, and polycarboxylate superplasticizer (water reducing agent) is added. The effects of raw material ratio, solid waste replacement rate and admixture content on material performance are investigated, and the hardening mechanism is analyzed via hydration and phase characteristics. The results show that under the positive flotation phosphorus tailings system, the optimal mass ratio of phosphorus tailings to cement for filling is 12∶1, the compressive strengths are 1.12 MPa and 1.31 MPa after 3 days and 14 days of curing, respectively. After replacing cement with calcined powder, the test blocks can not be demolded after 3 and 14 days of curing, and the compressive strength reaches a maximum of 1.27 MPa after 28 days. By adding 0.8% water reducing agent, the compressive strength is increased to 1.668 MPa. Using phosphogypsum compound, the maximum compressive strength after 28 days of curing can reach 2.635 MPa. Under the reverse flotation

收稿日期：2026-07-10
作者简介：董颢敏（2000— ），女，河南开封人，在读硕士研究生，研究方向为固废资源化利用。
通信作者：张汉泉（1971— ），男，湖北黄冈人，博士，教授，主要从事矿产资源综合利用研究。
基金项目：湖北三峡实验室开放基金（No.SC250003）

phosphorus tailings system, the optimal mass ratio of phosphorus tailings to cement for filling is 12∶1, and the compressive strengths are 2.34 MPa and 2.42 MPa after 14 and 28 days of curing. The use of calcined powder as a substitute for cement is difficult to demold in the early stages, with a compressive strength of only 0.28 - 1.03 MPa after 28 days. After adding 0.8% water reducing agent, the maximum compressive strength is 1.402 MPa when the mass ratio of cement to calcined powder is 0.75∶0.25. When the mass ratio of cement to phosphogypsum is 0.9∶0.1, the compressive strength after 28 days is 2.894 MPa, indicating better overall performance. Reverse flotation tailings deliver better compressive strength. This approach realizes the collaborative utilization of bulk industrial solid wastes, such as phosphorus tailings and phosphogypsum, reduces filling costs, and supports the green and low-carbon utilization of phosphorus solid waste and the construction of green mines.

Key words: flotation phosphorus tailings; solid waste cementitious materials; calcined phosphorus tailings; phosphogypsum; cemented backfill materials

我国磷矿资源储量大，但贫矿多、富矿少，往往需经浮选富集才能用于工业生产，随之产生大量磷尾矿[1-2]。我国磷尾矿年产生量达700万～1 000万t，累计堆存量已超12亿t，而综合利用率仅10%左右，资源化程度整体偏低[3-4]。磷尾矿长期堆存占用大量土地资源，且含磷、氟、重金属及残留浮选药剂，经雨水淋溶易造成水土污染，并通过食物链危害人体健康；细颗粒磷尾矿长期堆放易风化飘散，引发大气扬尘污染[5]；同时，尾矿库存在溃坝、滑坡、泥石流等地质灾害风险，严重威胁生态安全[6]，已成为制约我国磷化工行业绿色低碳与可持续发展的关键问题[7]。

磷尾矿的综合利用途径主要包括：有用矿物回收；制作建筑材料，如陶粒、混凝土、耐火材料和胶凝材料等；制作农业材料，如肥料、土壤调理剂、保水剂等；制作环保材料；用作充填材料等[8]。而将磷尾矿充填至地下采空区，既可以解决磷尾矿堆存的占地及环境污染问题，又可以控制采空区地压灾害，是一种环保且安全的处置方法[9]。在充填材料体系中，水泥作为传统胶凝材料应用最为普遍，但由于水泥成本高，存在明显局限性[10-12]。因此，利用煅烧磷尾矿、磷石膏等工业固废部分或全部替代水泥制备低成本充填材料，已成为绿色矿山建设的重要方向[13]。Wang等[14]采用多工业固废制备近零碳胶凝材料用于磷尾矿充填，当磷尾矿掺量达80%时，28 d抗压强度达9.70 MPa，CO_2排放降低92.70%，并实现了磷的稳定化固化，为磷尾矿规模化无害化处置提供了可行的技术路径。Han等[15]采用碱激发磷石膏–磷尾矿浆体系制备磷基膏体充填材料，最优配比下养护28 d抗压强度达1.817 MPa，有害元素固化率达99.97%，揭示了Ca^{2+}与PO_4^{3-}、F^-反应对早期水化的抑制作用，为磷固废协同充填提供了理论基础。杨建光等[16]采用全磷固废胶凝材料固化云南某磷尾矿，发现提高料浆浓度可显著提升固化体力学性能，揭示了磷尾矿充填体系中浓度与配比的协同调控机制。

目前采用磷浮选尾矿直接制备胶凝材料的研究较少，对磷矿正反浮选两种尾矿的对比研究亦不足，且多元固废复合最优配比研究尚不明确。本文以磷矿正反浮选两种尾矿为研究对象，系统开展胶凝比、固废替代水泥胶凝材料实验，揭示各因素对充填体强度的影响规律，为磷尾矿规模化充填应用提供试验依据。

1 原料与实验方法

1.1 原料

1.1.1 磷矿正反浮选尾矿

实验用磷矿正反浮选尾矿来自湖北钟祥某化工企业，尾矿经晾晒、缩分、取样后检测$w(H_2O)$为5%～6%。采用激光粒度仪进行粒度分析，结果如表1所示。采用X射线荧光光谱仪对其进行化学成分分析，结果如表2所示。采用X射线衍射仪进行XRD分析，结果如图1所示。

表1 磷尾矿粒度分析结果

Table 1 Particle size analysis result of phosphorus tailings

样品	D_{10}/μm	D_{50}/μm	D_{90}/μm	平均粒径/μm	比表面积/($m^2 \cdot kg^{-1}$)
正浮选磷尾矿	2.524	9.287	21.09	5.786	384.50
反浮选磷尾矿	3.103	14.010	56.32	6.506	341.90

表2 磷尾矿化学成分

Table 2 Chemical composition of phosphorus tailings %

样品	$w(P_2O_5)$	$w(SiO_2)$	$w(CaO)$	$w(MgO)$	$w(SO_3)$
正浮选磷尾矿	4.78	29.80	21.23	9.23	0.581
反浮选磷尾矿	4.68	9.80	28.92	11.09	12.570
样品	$w(Al_2O_3)$	$w(Fe_2O_3)$	$w(K_2O)$	w(烧失)	
正浮选磷尾矿	1.94	1.28	1.163	23.70	
反浮选磷尾矿	0.93	1.05	0.660	27.64	

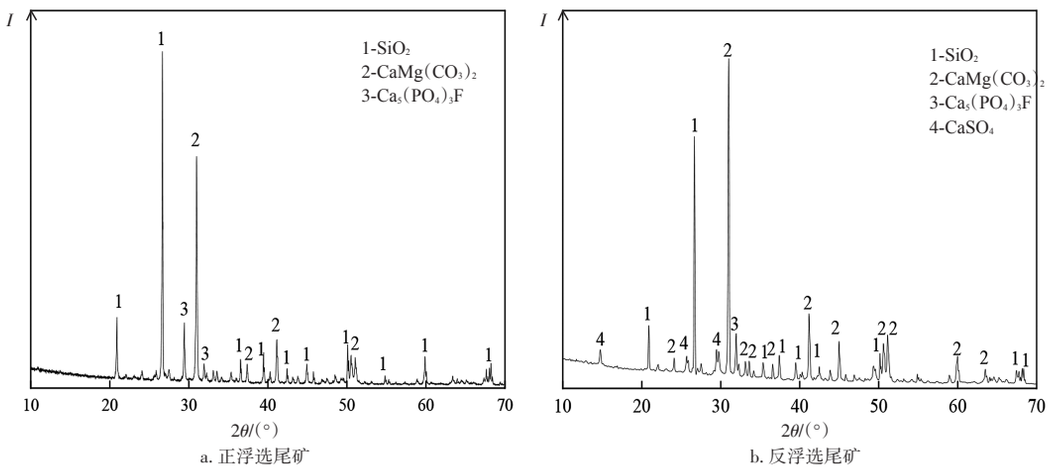

图1　磷尾矿XRD分析结果

Fig. 1　XRD analysis results of phosphorus tailings

由表1可知，正反浮选磷尾矿粒度均呈颗粒极细的特点。其中正浮选磷尾矿平均粒径为5.786 μm，比表面积384.50 m^2/kg；反浮选磷尾矿平均粒径为6.506 μm，比表面积为341.90 m^2/kg。

由表2可知，正浮选磷尾矿中SiO_2含量最高，$w(SiO_2)$高达29.80%，其他依次为CaO、MgO、P_2O_5；反浮选磷尾矿中$w(CaO)$、$w(MgO)$分别为28.92%、11.09%，$w(SO_3)$为12.570%，远高于正浮选磷尾矿。

由图1可以看出，正浮选磷尾矿中主要成分是石英，其次是白云石，另有少量钙以磷灰石形式存在。反浮选磷尾矿中主要成分是白云石，其次是石英，还有少量钙以磷灰石与石膏形式存在。

1.1.2　胶凝材料

水泥为42.5号普通硅酸盐水泥，煅粉由正浮选磷尾矿和反浮选磷尾矿分别在950、900 ℃煅烧1 h制得；磷石膏取自湖北兴发化工集团股份有限公司，化学成分如表3所示。

表3　磷石膏化学成分

Table 3　Chemical composition of phosphogypsum　%

$w(CaO)$	$w(SO_3)$	$w(SiO_2)$	$w(Al_2O_3)$	$w(MgO)$
34.33	49.04	2.31	1.10	0.58
$w(Na_2O)$	$w(K_2O)$	$w(SrO)$	$w(P_2O_5)$	$w(F)$
1.62	0.24	0.67	4.63	0.86

1.2　实验方法

称取磷尾矿浆（w（固）70%～80%）、胶凝材料，外加减水剂（聚羧酸高效减水剂），干拌2 min，加水湿拌3 min，装入70.7 mm × 70.7 mm × 70.7 mm试模，在（20 ± 2）℃、相对湿度≥95%条件下养护24 h脱模，继续养护至3、14、28 d，测试单轴抗压强度，记录试块成型与脱模情况，抗压强度测试采用YAW-600D微机控制压力机，每组测试3个试块取平均值，技术路线如图2所示。

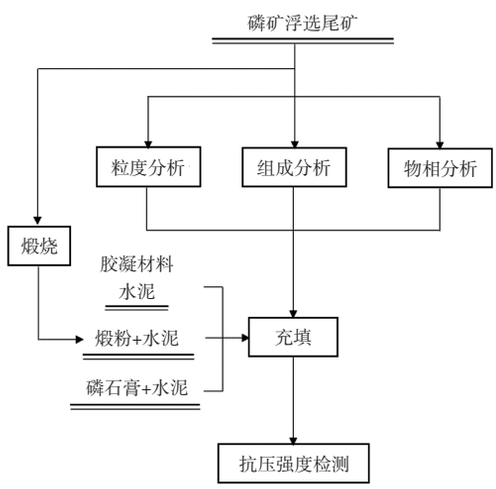

图2　技术路线

Fig. 2　Technical roadway

实验主要研究磷矿正反浮选尾矿与水泥配比、煅粉和磷石膏替代水泥比例、减水剂等参数对充填体性能的影响。

1.3　实验仪器

KLS 30/11箱式马弗炉、YH-90B标准恒温恒湿养护箱、YAW-600D微机控制电液伺服压力试验机、D8 ADVANCE型X射线衍射仪、AxiosmAX型X射线荧光光谱仪。

2　实验结果与分析

2.1　正浮选磷尾矿体系

2.1.1　水泥作胶凝材料

固定磷尾矿浆w（固）为71%，以普通硅酸盐水泥为胶凝材料，考察水泥掺配比例对正浮选磷尾矿充填体抗压强度的影响，结果如图3所示。

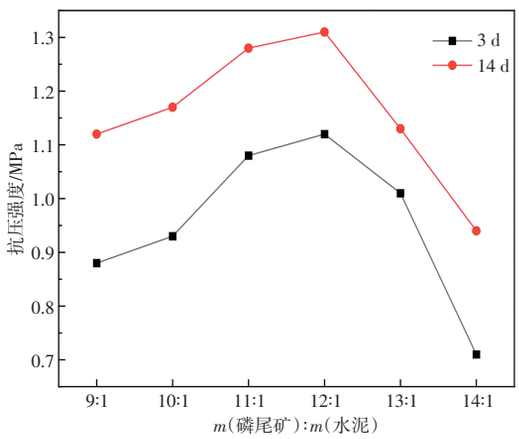

图 3　水泥配比对抗压强度的影响

Fig. 3　Influence of cement ratios on compressive strength

由图 3 可知，随着磷尾矿占比增加，养护时间为 3 d 及 14 d 时，抗压强度均先上升后下降。在磷尾矿与水泥质量比为 12:1 时，养护 3 d 和 14 d 抗压强度均达到最大值，分别为 1.12、1.31 MPa。

2.1.2　煅粉替代水泥作胶凝材料

以普通硅酸盐水泥为胶凝材料，探究以煅粉部分替代水泥对抗压强度的影响。所用煅粉为正浮选磷尾矿经 950 ℃煅烧 1 h 所得，固定矿浆 w(固) 为 70%，m(磷尾矿):m(胶凝材料) =11:1，考察胶凝材料中水泥与煅粉质量比对充填体抗压强度的影响，结果见表 4。

表 4　水泥与煅粉配比对抗压强度的影响

Table 4　Influence of cement-calcined phosphorus tailings ratios on compressive strength

m(水泥):m(煅粉)	不同养护时间(d)抗压强度/MPa		
	3	14	28
无煅粉	1.08	1.28	1.910
0.9:0.1	无法脱模	无法脱模	1.270
0.8:0.2	无法脱模	无法脱模	1.030
0.7:0.3	无法脱模	无法脱模	0.987
0.6:0.4	无法脱模	无法脱模	0.964
0.5:0.5	无法脱模	无法脱模	1.130
0.4:0.6	无法脱模	无法脱模	0.991
0.3:0.7	无法脱模	无法脱模	0.909
0.2:0.8	无法脱模	无法脱模	0.815
0.1:0.9	无法脱模	无法脱模	0.620
0.0:1.0	无法脱模	无法脱模	0.392

由表 4 可知，当煅粉替代部分水泥时，养护时间为 3 d 和 14 d 时试样均无法脱模。当养护时间延长至 28 d 时，试样虽然可以脱模，但抗压强度整体低于未替代时，且抗压强度随煅粉占比增加整体呈下降趋势。

由于煅粉替代水泥后充填体抗压强度急剧下降，可采用外加减水剂的措施缓解[17]。以硅酸盐水泥为胶凝材料，探究以煅粉部分替代水泥时，外加减水剂对抗压强度的影响。固定矿浆 w(固) 70%，m(磷尾矿):m(胶凝材料) =11:1，养护时间为 28 d，减水剂用量为 0.8%，胶凝材料中水泥与煅粉质量配比对充填体抗压强度的影响见图 4。

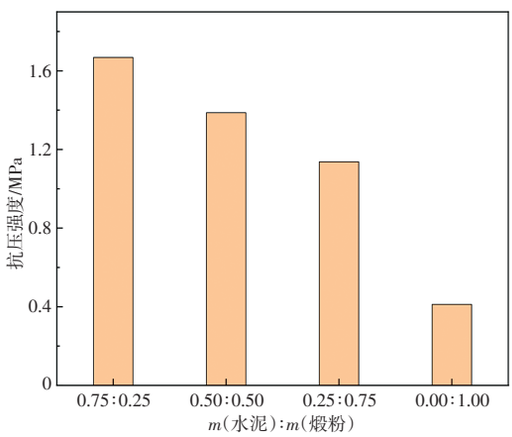

图 4　水泥与煅粉配比对 28 d 抗压强度的影响

Fig. 4　Influence of cement-calcined phosphorus tailings ratios on compressive strength after 28 days

由图 4 可知，与无减水剂作用相比，其他条件相同，加入减水剂后抗压强度增大。随着胶凝材料中煅粉占比增加，充填体抗压强度呈下降趋势。

2.1.3　磷石膏替代水泥作胶凝材料

以硅酸盐水泥为胶凝材料，探究以磷石膏部分替代水泥对抗压强度的影响。固定矿浆 w(固) 72%，m(磷尾矿):m(胶凝材料) =11:1，胶凝材料中水泥与磷石膏质量配比对充填体养护 28 d 抗压强度的影响如图 5 所示。

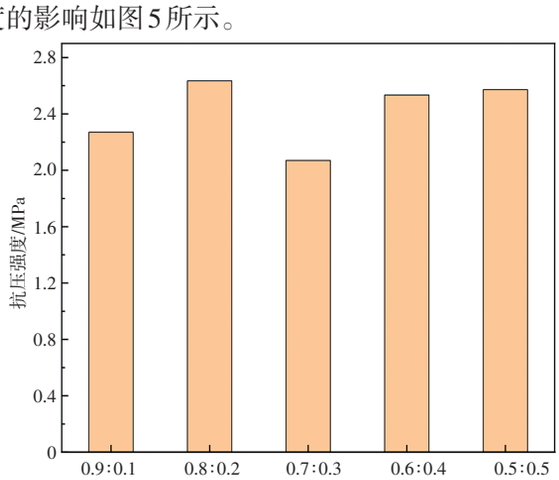

图 5　水泥与磷石膏配比对 28 d 抗压强度的影响

Fig. 5　Influence of cement-phosphogypsum ratios on compressive strength after 28 days

由图5可知，在胶凝材料中添加磷石膏后，试样的抗压强度整体提高。且当水泥与磷石膏质量比为0.8∶0.2时，28 d抗压强度达到最大值2.635 MPa。

2.1.4　小结

磷矿正浮选尾矿充填体系中，磷尾矿与硅酸盐水泥按质量比12∶1配比时效果最优，养护3、14 d抗压强度分别为1.12、1.31 MPa。煅粉部分替代水泥后，充填体无法脱模；养护28 d时，水泥与煅粉质量比为0.9∶0.1时抗压强度最高达1.27 MPa。掺入0.8%减水剂可改善充填体成型与强度，最高可达1.668 MPa。磷石膏替代水泥增韧效果显著，磷尾矿与胶凝材料质量比为11∶1、胶凝材料中水泥与磷石膏质量比为0.8∶0.2，养护28 d强度可达2.635 MPa。

2.2　*反浮选尾矿体系*

2.2.1　水泥作胶凝材料

固定矿浆w(固）为72%，以普通硅酸盐水泥为胶凝材料，研究水泥掺配比例对反浮选尾矿充填体抗压强度的影响，结果如图6所示。

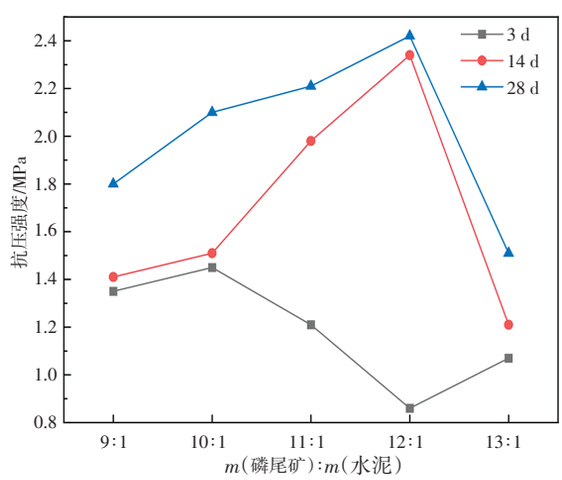

图6　水泥配比对抗压强度的影响

Fig. 6　Influence of cement ratios on compressive strength

由图6可知，随着磷尾矿占比增加，各养护时间下充填体抗压强度均先上升后下降。当m(磷尾矿)∶m(水泥）为10∶1时，养护3 d的抗压强度达到最大值1.45 MPa；当配比为12∶1时，养护14 d与28 d的充填体抗压强度达到最大值，分别为2.34 MPa与2.42 MPa，当配比为14∶1时，试样无法脱模，充填体无法形成。

2.2.2　煅粉替代水泥作胶凝材料

以硅酸盐水泥为胶凝材料，探究以煅粉部分替代水泥对抗压强度的影响。所用煅粉为反浮选尾矿经900 ℃煅烧1 h所得，固定矿浆w(固）70%，m(尾矿)∶m(胶凝材料）=11∶1，胶凝材料中水泥与煅粉质量配比对充填体抗压强度的影响如表5所示。

表5　水泥与煅粉配比对抗压强度的影响

Table 5　Influence of cement-calcined phosphorus tailings ratios on compressive strength

m(水泥)∶m(煅粉)	不同养护时间(d)抗压强度/MPa		
	3	14	28
无煅粉	1.21	1.98	2.210
0.9∶0.1	无法脱模	无法脱模	1.030
0.8∶0.2	无法脱模	无法脱模	0.672
0.7∶0.3	无法脱模	无法脱模	0.581
0.6∶0.4	无法脱模	无法脱模	0.783
0.5∶0.5	无法脱模	无法脱模	0.825
0.4∶0.6	无法脱模	无法脱模	0.560
0.3∶0.7	无法脱模	无法脱模	0.450
0.2∶0.8	无法脱模	无法脱模	0.370
0.1∶0.9	无法脱模	无法脱模	0.360
0.0∶1.0	无法脱模	无法脱模	0.280

由表5可知，反浮选尾矿煅粉替代水泥时充填体抗压强度变化规律与正浮选尾矿相似，当煅粉部分替代水泥时，3 d和14 d养护时间下无法脱模；当养护时间延长至28 d时，试块虽然可以脱模，但是抗压强度整体低于未替代时的情况，且抗压强度随煅粉占比增加整体下降。可见，用煅粉替代水泥作为磷尾矿充填的胶凝材料有一定的可行性，但抗压强度较低。

为进一步提高抗压强度，以硅酸盐水泥为胶凝材料，探究以煅粉部分替代水泥时，外加减水剂对抗压强度的影响。所用煅粉为反浮选尾矿经900 ℃煅烧1 h所得，固定矿浆w(固）为72%，m(磷尾矿)∶m(胶凝材料）=11∶1，养护时间为28 d，减水剂用量为0.8%，胶凝材料中水泥与煅粉质量配比对充填体抗压强度的影响如图7所示。

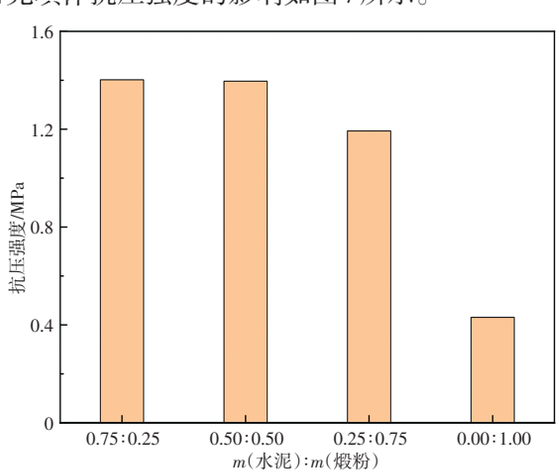

图7　水泥与煅粉配比对28 d抗压强度的影响

Fig. 7　Influence of cement-calcined phosphorus tailings ratios on compressive strength after 28 days

由图 7 可知，与前文无减水剂作用体系对比，其他同等条件下，加入减水剂后充填体抗压强度整体增大。在减水剂作用下，随着胶凝材料中煅粉占比增加，抗压强度亦呈下降趋势。

2.2.3 磷石膏替代水泥作胶凝材料

以硅酸盐水泥为胶凝材料，探究以磷石膏部分替代水泥对抗压强度的影响。固定矿浆 w（固）72%，m（磷尾矿）:m（胶凝材料）=11:1，胶凝材料中水泥与磷石膏质量配比对充填体养护 28 d 抗压强度的影响如图 8 所示。

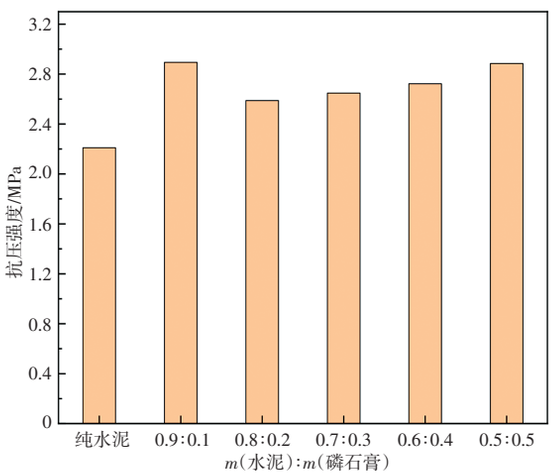

图 8 水泥与磷石膏配比对 28 d 抗压强度的影响

Fig. 8 Influence of cement-phosphogypsum ratios on compressive strength after 28 days

由图 8 可知，在胶凝材料中添加磷石膏后，试样的抗压强度整体上升。且当水泥与磷石膏配比为 0.9:0.1 时，抗压强度达到最大值 2.894 MPa，增强效果优于煅粉。

2.2.4 小结

磷矿反浮选尾矿充填体系中，尾矿与硅酸盐水泥按质量比 12:1，养护 14、28 d 的充填体抗压强度最高，分别为 2.34、2.42 MPa。煅粉替代水泥后无法脱模；养护 28 d 虽可脱模，但抗压强度降至 0.28 ~ 1.03 MPa，整体不及单一水泥组，该方案具备可行性但强度偏低。掺入 0.8% 减水剂，水泥与煅粉质量配比为 0.75:0.25 时 28 d 抗压强度为 1.402 MPa，同条件下减水剂可整体提升充填体强度。水泥与磷石膏按质量比 0.9:0.1 复配，28 d 抗压强度可达 2.894 MPa，效果优于煅粉替代方案。

2.3 固化机制分析

单一普通硅酸盐水泥胶结磷浮选尾矿时，充填体硬化是水泥水化、尾矿矿物辅助反应与磷杂质钝化协同的结果。水泥加水后快速发生水化反应，生成 C-S-H 凝胶与 $Ca(OH)_2$，为充填体构建基础强度骨架与强碱性环境。

尾矿中的白云石在碱性条件下微弱溶解释放 CO_3^{2-}，与水泥铝相及 $Ca(OH)_2$ 反应生成碳铝酸钙微晶，填充基体孔隙，改善硬化体密实度与体积稳定性。

同时，水泥水化生成的 $Ca(OH)_2$ 可激发尾矿中活性硅铝组分的火山灰效应，持续生成水化硅酸钙与水化铝酸钙凝胶，提升充填体中后期强度。此外，体系内 Ca^{2+} 能够与尾矿中微量可溶性磷酸盐反应生成稳定磷酸钙沉淀（见式（1）），有效钝化磷组分的缓凝负面影响，保证浆体正常凝结硬化，最终形成结构致密、性能稳定的充填硬化体 [18]：

$$3Ca^{2+} + 2PO_4^{3-} \longrightarrow Ca_3(PO_4)_2\downarrow 。 \quad (1)$$

采用煅粉部分替代水泥制备复合胶凝剂固化浮选磷尾矿时，煅粉自身的矿物与化学特性严重制约硬化进程。尾矿经高温煅烧后，内部磷组分被充分活化，活化 PO_4^{3-} 会与水泥水化产生的 Ca^{2+} 发生反应，强化缓凝作用 [19]，显著抑制早期水化反应，延缓 C-S-H 凝胶等胶凝产物生成速率，养护 3、14 d 均难以脱模。随着养护时间延长，水化反应逐步推进，试样虽可完成脱模，但煅粉本身胶凝活性有限 [20]，无法充分参与水化反应、填充基体内部孔隙，微观结构疏松多孔。随着煅粉替代比例不断提高，体系水化产物生成量进一步减少，最终导致充填体 28 d 抗压强度持续下降，整体力学性能表现不佳。

采用磷石膏部分替代水泥制备复合胶凝剂固化磷浮选尾矿时，胶凝体系反应机制更为完善。少量水泥水化生成的 C-S-H 凝胶与氢氧化钙为体系提供基础强度与碱性环境，外掺磷石膏可补充体系稀缺 SO_4^{2-}，与水泥铝相、水化产物反应生成针状钙矾石 [21]，有效弥补尾矿缺少原生石膏导致的早期骨架缺失，显著提升浆体早期硬化速率与早期强度。

同时，碱性环境持续激发尾矿硅铝组分的火山灰反应，生成水化凝胶填充孔隙，保障充填体中后期强度稳步增长；白云石溶出的 CO_3^{2-} 与体系铝相、$Ca(OH)_2$ 生成碳铝酸钙，与钙矾石、水化凝胶相互嵌套填充，进一步优化孔隙结构，提升充填体密实度与体积稳定性 [22-23]。此外，高钙高硫的碱性环境可快速固化可溶性磷酸盐，生成稳定磷酸钙微晶，有效抑制磷杂质的缓凝作用，确保浆体正常硬化。

综上所述，纯水泥、煅粉替代水泥、磷石膏替代水泥均可实现磷浮选尾矿的有效固化，充填体养

护28 d，抗压强度分别为2.42、1.27、2.894 MPa。对照矿山充填各工序强度设计标准：2.42 MPa适配一步骤充填矿柱受力标准，1.27 MPa满足二步骤采空区充填强度要求，2.894 MPa接近打底充填3 MPa常规控制指标，3组充填体强度均符合标准及现场工程设计阈值。其中，磷石膏部分替代水泥效果最优，煅粉替代水泥的充填性能相对较差，可通过掺入0.8%减水剂改善浆体工作性能与充填体硬化效果。

3　结论

（1）在磷矿正浮选尾矿体系下，充填最优磷尾矿与水泥质量比为12∶1，养护时间3、14 d抗压强度分别为1.12、1.31 MPa。煅粉替代水泥后，养护3、14 d试块无法脱模，28 d最优配比0.9∶0.1，抗压强度1.27 MPa。在掺入0.8%减水剂后，抗压强度升至1.668 MPa。采用磷石膏复配，28 d抗压强度最高达2.635 MPa。

（2）在磷矿反浮选尾矿体系下，充填最优磷尾矿与水泥质量比为12∶1，养护时间14、28 d强度为2.34、2.42 MPa。煅粉替代水泥早期难以脱模，28 d抗压强度仅0.28～1.03 MPa。在掺入0.8%减水剂后，水泥与煅粉质量比0.75∶0.25时强度最高，为1.402 MPa，抗压强度整体提升。当水泥与磷石膏质量比为0.9∶0.1时，28 d抗压强度为2.894 MPa，综合性能更佳。

（3）在利用纯水泥作胶凝材料时，反浮选尾矿体系28 d抗压强度2.42 MPa，高于正浮选尾矿体系14 d抗压强度1.31 MPa；煅粉替代水泥组早期均难以脱模，掺入0.8%减水剂后抗压强度明显提升，其中反浮选尾矿体系抗压强度最高为1.402 MPa，略低于正浮选尾矿体系的1.668 MPa；采用磷石膏复配时，两体系抗压强度均提升，反浮选尾矿体系28 d抗压强度达2.894 MPa，优于正浮选尾矿体系抗压强度2.635 MPa。综上，反浮选尾矿更适宜制备高性能充填材料。

［参考文献］

［1］ 李维，高辉，罗英杰，等.国内外磷矿资源利用现状、趋势分析及对策建议[J].中国矿业，2015，24(6)：6-10.
Li Wei，Gao Hui，Luo Yingjie，et al. Status，trends and suggestions of phosphorus ore resources at home and abroad[J]. China Mining Magazine，2015，24(6)：6-10.

［2］ 张晋，贺爱平，李国栋，等.钙镁质磷矿选矿尾矿综合利用技术现状及展望[J].矿产综合利用，2021(2)：199-203.
Zhang Jin，He Aiping，Li Guodong，et al. Status and prospect of comprehensive utilization technology of calcium-magnesium phosphate tailings [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources，2021 (2)：199-203.

［3］ 张全其，隋竹银.磷尾矿资源化利用的研究进展与展望[J].新疆钢铁，2025(3)：67-69.
Zhang Quanqi，Sui Zhuyin. Research progress and prospects for the resourceful utilisation of phosphate tailings[J]. Xinjiang Iron and Steel，2025(3)：67-69.

［4］ 张汉泉，许鑫，胡超杰，等.磷化工固体废弃物综合利用技术现状[J].中国矿业，2021，30(4)：50-55，63.
Zhang Hanquan，Xu Xin，Hu Chaojie，et al. Current situation of comprehensive utilization technology of solid waste of phosphorus chemical[J]. China Mining Magazine，2021，30(4)：50-55，63.

［5］ 王保明，王兴龙，杨英，等.磷尾矿综合利用现状及研究进展[J].无机盐工业，2024，56(10)：1-11.
Wang Baoming，Wang Xinglong，Yang Ying，et al. Current status and research progress of comprehensive utilization of phosphorus tailings[J]. Inorganic Chemicals Industry，2024，56(10)：1-11.

［6］ 李天华，黄杰，李小双.尾矿库坝体溃决参数预测[J].现代矿业，2016，32(7)：191-193.
Li Tianhua，Huang Jie，Li Xiaoshuang. Prediction of the outburst parameters of tailings dam[J]. Modern Mining，2016，32(7)：191-193.

［7］ 周雪娜，关洪亮，何东升，等.磷尾矿综合利用研究进展[J].广州化工，2021，49(5)：24-27.
Zhou Xuena，Guan Hongliang，He Dongsheng，et al. Research progress on comprehensive utilization by phosphate tailings[J]. Guangzhou Chemical Industry，2021，49(5)：24-27.

［8］ 申畅，范培强，刘丹丹，等.磷尾矿综合利用研究进展[J].矿产保护与利用，2026，46(1)：206-218.
Shen Chang，Fan Peiqiang，Liu Dandan，et al. Research progress on comprehensive utilization of phosphorus tailings resources[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources，2026，46(1)：206-218.

［9］ 于雪飞，陈慧，叶雨航.某浮选磷尾矿胶结充填试验研究[J].现代矿业，2026，42(4)：193-196.
Yu Xuefei，Chen Hui，Ye Yuhang.Experimental study on cemented filling of a flotation phosphorus tailings[J]. Modern Mining，2026，42(4)：193-196.

［10］ 张振平，刘经民，陈智宏，等.某矿细粒级全尾砂充填材料性能研究及配比优化[J]. 铜业工程，2024(5)：139-145.
Zhang Zhenping，Liu Jingmin，Chen Zhihong，et al. Performance and proportion optimization of fine particle grade full tailings fill material in a mine[J]. Copper Engineering，2024(5)：139-145.

［11］ Tariq A，Yanful K E. A review of binders used in cemented paste tailings for underground and surface disposal practices [J]. Journal of Environmental Management，2013，131：138-149.

［12］ Xu Wenbin，Li Qianlong，Liu Bin. Coupled effect of curing temperature and age on compressive behavior，microstructure and ultrasonic properties of cemented tailings backfill [J]. Construction and Building Materials，2020，237：117738.

［13］ 温震江.钢渣协同矿渣制备超细尾砂充填胶结料及应用研究[D]. 北京：北京科技大学，2022.
Wen Zhenjiang.Study on preparation and application of binder with steel slag and slag for the cemented superfine tailings backfill [D]. Beijing：University of Science and Technology Beijing，2022.

（下转第27页）