粉煤灰基泡沫混凝土试验研究及矿井充填工业应用*

钟兴昌

(洛阳坤宇矿业有限公司， 河南 洛阳市 471000)

摘要:为解决洛阳某金矿矿岩破碎区域上向进路充填采矿法的充填需求,采用粉煤灰基泡沫混凝土充填采空区。开展了坍落度试验和单轴压缩试验,探究粉煤灰掺量对充填体抗压强度的影响,并分析了粉煤灰基泡沫混凝土的胶凝机理。结果表明:泡沫混凝土可以通过发泡率(湿容重)控制其流动状态,不同水泥掺量的料浆坍落度值均控制在24～27 cm之间,此时料浆流动性良好,且无泌水现象;无论是否添加粉煤灰,泡沫混凝土试块强度均能满足上向进路充填采矿法的强度要求,但添加粉煤灰可使泡沫混凝土材料成本降低46.7%,粉煤灰基泡沫混凝土具备较好的应用前景;粉煤灰通过生成C-S-H凝胶和钙矾石优化孔结构,提高了充填体后期强度。泡沫混凝土现场工业试验累计充填空区体积为525 m^3,充填材料成本约5.5万元,综合充填成本42元/t,充填料浆流平性好、无泌水,充填体强度与室内试验值一致,充填工业试验达到了预期效果,解决了矿山充填生产的燃眉之急。

关键词:泡沫混凝土;粉煤灰掺量;上向进路充填采矿法;抗压强度

中图分类号:TD853.34 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2025)11-0105-08

Experimental Study on Fly Ash-Based Foam Concrete and Its Industrial Application in Mine Filling

ZHONG Xingchang

(Luoyang Kunyu Mining Co., Ltd., Luoyang, Henan 471000, China)

Abstract: In order to solve the filling demand of upward drift filling mining method in the broken rock area of a gold mine in Luoyang, fly ash-based foam concrete was used to fill the goaf. The slump test and uniaxial compression test were carried out to explore the influence of fly ash content on the compressive strength of filling body, and the cementitious mechanism of fly ash based foam concrete was analyzed. The results show that the foam concrete can control its flow state through the foaming rate (wet bulk density), and the slump values of the slurry with different cement contents are controlled between 24 cm and 27 cm. At this time, the slurry has a good flow performance and no bleeding phenomenon. Whether fly ash is added or not, the strength of foam concrete specimen can meet the strength requirements of upward drift filling mining method, but the costs of foam concrete materials can be reduced by 46.7% by adding fly ash, and fly ash-based foam concrete has a good application prospect. The fly ash optimizes the pore structure by generating C-S-H gel and ettringite to improve the later strength of the filling body. In the industrial test of foam concrete, the total volume of goaf is 525 m^3, the costs of filling materials are about 55, 000 yuan, and the comprehensive filling cost is 42 yuan/t. The filling slurry has good leveling and no bleeding, and the strength of filling body is consistent with the indoor test values. The industrial test of filling has achieved the expected effect and solved the urgent problem of mine filling production.

Key words: Foam concrete, Fly ash content, Upward drift filling mining method, Compressive strength

0 引言

洛阳某金矿的资源丰富,其矿床蕴藏金、银、铜、铅等稀贵金属和有色金属资源。目前,矿山主要开采金矿和银矿,采用地下开采方式,采矿方法以浅孔留矿法为主。经多年开采,矿山浅部资源接近枯竭,为保障生产的正常接续和扩大生产规模,该矿山正着手开发深部资源,计划将矿山产能提升至90×10^4 t/a。矿区深部矿体倾角介于40°～80°之间,矿体厚度为0.2～1.65 m,属倾斜至急倾斜极薄矿脉,针对部分矿岩稳固性较差的区域,拟采用上向进路充填采矿法进行回采。然而矿山充填系统尚未建成,为解决采充矛盾,保证采矿工业试验顺利开展,决定采用轻质泡沫混凝土充填空区,以保证上向进

* **收稿日期**:2025-03-20

作者简介:钟兴昌(1988—),男,福建龙岩人,工程师,主要从事矿山采矿生产技术管理工作。E-mail:364907590@qq.com

路充填采矿法的顺利进行。

泡沫混凝土具有节能、环保和工艺技术成熟等特点,技术层面较普通水泥增加发泡技术,其内部存在大范围孔洞结构。目前,中外学者对泡沫混凝土技术的工程应用展开了大量研究。BOKE 等[1]采用南非 F 级粉煤灰、氢氧化钠和新型发泡剂次氯酸钠,在 90℃下成功合成了发泡地质聚合物,研究结果表明,该聚合物在轻质防火隔热材料、内墙或天花板瓷砖等领域具有良好的应用前景。姜立帅[2]介绍了制备轻质泡沫混凝土的工艺流程和应用方法,并通过实例将轻质泡沫混凝土用于道路工程中,取得了良好的经济效益。黄志超等[3]在无砟轨道路基新型填料研究中发现,玄武岩纤维泡沫混凝土作为路基填料时,通过纤维增强与多孔结构的协同作用,可显著提升动强度、阻尼比和动模量,有效均匀扩散列车荷载,而且高速行车工况下,路基表面最大沉降仅 0.3 mm,且振动响应在高频荷载作用下恢复迅速,为新型路基设计提供了兼具力学性能与环保效益的解决方案。WATABE 等[4]在机场跑道的特殊路段使用了轻质泡沫混凝土,工程实践中证明轻质泡沫混凝土的低弹减震优势比较明显。LEE 等[5]探讨了泡沫混凝土应用于地下管道回填的适用性,同时对泡沫混凝土与河流疏浚土材料的性能进行了对比评估,结果表明,泡沫混凝土在地下管道回填中能显著降低土压力和管道变形。邓飞[6]在深厚层软土路基处理中,创新性地采用了泡沫混凝土技术,成功解决了空间受限条件下软土路基的沉降及填筑压实问题。卢正等[7]创新性地将盐渍土掺入泡沫混凝土用于路基回填工程,该技术既实现了开挖废土的资源化利用,又凭借泡沫混凝土优异的保温隔热性能,显著提升了新疆寒旱地区路基的抗冻融耐久性。杨慧等[8]通过开展有无泡沫混凝土减震层的浅埋偏压连拱隧道振动台模型对比试验发现,泡沫混凝土凭借内部孔隙结构的波能折射反射机制与材料自身的塑性变形能力,对隧道非偏压侧(左洞)的加速度响应及全隧道衬砌应变呈现显著抑制效果,试验结果证明泡沫混凝土是一种需结合工程偏压条件与地震动特性进行差异化设计的自适应减震材料,其孔隙耗能与变形吸能的双重机制为浅埋偏压隧道抗震提供了新的技术路径。马旭等[9]将一种新型泡沫混凝土应用于煤矿采空区回填,该材料具有质量轻、流动性强、成本低且强度适中的特点,能够有效解决传统水泥胶结混凝土充填中水泥掺量高(占成本的 30%～60%)的问题。此外,泡沫混凝土在沿海软基、地板隔热层和军事等[10-12]领域亦有应用。

综上可知,尽管泡沫混凝土在多个领域得到了广泛应用,但在矿山充填尤其是非煤矿山中的应用研究仍较为有限。本文首先开展坍落度试验,探索不同水泥掺量条件下,泡沫混凝土料浆达到膏体状态时的基础数据(发泡率和湿容重);随后开展不同水泥掺量、不同的粉煤灰掺量的强度配比试验,并结合采矿方法推荐充填配比、计算充填成本;继而利用 X 射线衍射(XRD)和扫描电镜(SEM)手段,研究分析粉煤灰基泡沫混凝土胶凝机理;最后通过工业试验验证粉煤灰基泡沫混凝土的实际充填效果。

1 充填材料试验

1.1 试验材料准备

泡沫混凝土试验相关材料包括粉煤灰、水泥、发泡剂等。粉煤灰取自洛阳当地火力发电厂的一级粉煤灰,胶凝活性高,单价为 100 元/t。水泥采用洛阳当地水泥厂生产的 P·C 42.5 水泥,单价为 440 元/t。发泡剂为绿林重工出品 A 型发泡剂,出厂价 13 元/kg,发泡剂∶水=1∶60。

1.2 坍落度试验

通常采用坍落度试验测试充填料浆的稠度,评价充填料浆的流动性能[13]。随着坍落度增大,料浆流动性能明显改善,但相同灰砂比条件下的强度亦会相应降低[14]。固定水灰比为 0.5,探索不同水泥掺量条件下,泡沫混凝土料浆达到膏体状态(坍落度为 24～27 cm)时的基础数据(发泡率和湿容重),为泡沫混凝土输送提供依据,表 1 为料浆坍落度试验结果。

表 1 料浆坍落度试验结果

Table 1 Experimental results of slurry slump

水泥掺量/(kg/m³)	发泡率/%	料浆湿容重/(kg/m³)	坍落度/cm
300	75	488	24.2
400	67	633	24.4
500	58	779	24.9
600	50	925	25.5
700	42	1 071	26.7

通过调整发泡率,不同水泥掺量(300～700 kg/m³)的料浆其坍落度均稳定在 24～27 cm 的膏体料浆所需流动性区间内,且测试过程中无泌水现象。随着水泥掺量增加、发泡率降低、湿容重升高,坍落度呈微增趋势(24.2～26.7 cm),表明料浆在固体相(水泥)占比提升、密度增大的情况下,仍保持良

好的膏体流变性能——既具有足够的流动性以满足输送要求(如泵送时的连续流动、无堵塞),又因坍落度未过度增大(避免泌水、离析)而维持均匀稳定的膏体状态。

这一特性体现了料浆流动性的可控性(通过发泡率实现不同水泥掺量下料浆的流动性精准调控)与工程适应性,在"流动性-强度-密度"耦合优化中,为充填工艺(如管道输送、采场充填)提供了较大的参数调节空间,确保料浆在输送过程中流动均匀、稳定性高,同时为后续强度配比试验(水泥掺量影响强度)和输送参数设计(如泵送压力、管径匹配)奠定了基础。

综上,料浆的膏体流动性特征(坍落度为 24～27 cm,无泌水,流动状态稳定)不仅验证了发泡率调控对流动性的有效控制,更反映了其在采矿充填工程中具有"可输送、易扩散、保稳定性"的优势,为工艺优化提供了直接的数据支撑。

1.3 泡沫混凝土充填体单轴压缩试验

通过对不同水泥添加量、不同的粉煤灰掺入量的充填体强度进行检测,得到试块强度数据,并以此探究不同配比试块的强度变化规律。

1.3.1 试验设备

试验仪器包括:水泥发泡机、数显电子压力试验机、标准养护箱、量程为 20 kg 和 500 g 的电子天平、游标卡尺、70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm 的试模等。

1.3.2 单轴压缩试验结果

(1) 水泥掺量对泡沫混凝土单轴抗压强度的影响。

固定水灰比 0.5,水泥添加量设置为 300～700 kg/m^3,调整发泡率使泡沫混凝土料浆达到膏体状态,共设计 5 组配合比试验,测试每组配合比试块 1 d、3 d、7 d、28 d 等 4 个龄期的强度,共计 60 个试块,每组试块取平均值。单轴压缩试验数据见表 2,结果分析如图 1 所示。

表 2 不同水泥掺量的泡沫混凝土单轴抗压强度

Table 2 Uniaxial compressive strength of foam concrete with different cement contents

序号	水泥掺量/(kg/m^3)	料浆湿容重/(kg/m^3)	单轴抗压强度/MPa				充填成本/(元/m^3)
			1 d	3 d	7 d	28 d	
1	300	487.50	0.00	0.05	0.06	0.09	132
2	400	633.33	0.08	0.22	0.38	0.61	176
3	500	779.17	0.34	1.05	1.40	2.02	220
4	600	925.00	1.18	2.5	3.07	4.24	264
5	700	1 070.83	1.41	3.22	3.92	5.60	308

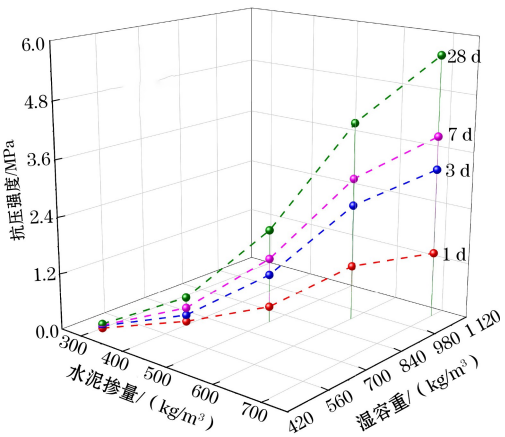


图 1 水泥掺量与泡沫混凝土抗压强度的关系

Fig.1 The relationship between cement content and compressive strength of foam concrete

综合表 2 和图 1 可知,不同水泥掺量的泡沫混凝土各龄期强度差异明显,总的来说,试块强度随水泥掺量增加而增大;水泥掺量为 300～400 kg/m^3 时,试块空隙过多,质量轻,强度增加缓慢;水泥掺量为 500 kg/m^3 以上时,试块空隙明显减少,强度增加迅速。5 组试块强度均可满足上向进路充填采矿法的要求,但水泥用量较大时,充填材料成本较高。

(2) 粉煤灰掺量对泡沫混凝土单轴抗压强度的影响。

固定水灰比和干容重(水泥+粉煤灰)分别为 0.5和 600 kg/m^3,料浆湿容重为 925 kg/m^3,考察不同粉煤灰掺量(120,300,360,420,480 kg/m^3)下的试块强度变化规律。测试泡沫混凝土试块的 1 d、3 d、7 d、28 d 强度,单轴压缩试验数据见表 3,结果分析如图 2 所示。

表 3 不同水泥和粉煤灰掺量条件下泡沫混凝土的单轴抗压强度

Table 3 Uniaxial compressive strength of foam concrete under conditions of different cement and fly ash contents

序号	水泥掺量/(kg/m^3)	粉煤灰掺量/(kg/m^3)	单轴抗压强度/MPa				充填成本/(元/m^3)
			1 d	3 d	7 d	28 d	
1	400	200	1.18	2.39	3.04	7.06	196.0
2	300	300	0.39	1.23	2.36	4.14	161.6
3	240	360	0.29	0.90	1.55	3.58	141.6
4	180	420	0.20	0.61	1.06	1.88	121.2
5	120	480	0.07	0.37	0.80	1.38	100.8

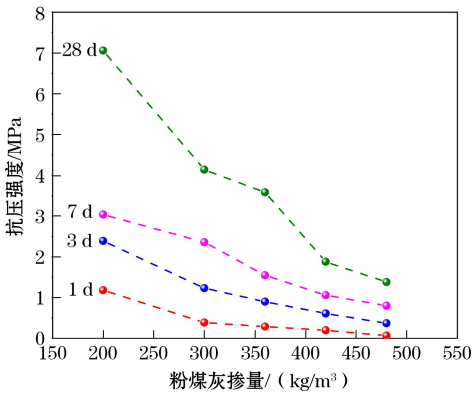


图 2 粉煤灰掺量与泡沫混凝土充填体抗压强度的关系曲线

Fig.2 Relationship curves between fly ash content and compressive strength of foam concrete filling body

综合表 3 和图 2 可知,固定干容重 600 kg/m³,当水泥的掺量逐渐减小,粉煤灰的掺量逐渐增加时,各龄期试块强度逐渐减小;干容重固定 600 kg/m³,不同粉煤灰掺量条件下,试块 3 d 为强度 0.37～2.39 MPa,7 d 强度为 0.8～3.04 MPa,28 d 强度为 1.38～7.06 MPa,充填成本为 100.8～196.0 元/m³,充填体强度均满足上向进路充填采矿法要求,成本合理。

1.3.3 粉煤灰基泡沫混凝土成本分析

前期工程地质调查显示,该金矿部分区域矿岩破碎,矿体平均厚度为 0.6～1 m,矿体倾角为 60°～80°,研究拟采用上向进路充填采矿法,中段高度 40 m,分层高度 2～2.5 m。采空区全部采用胶结充填,采场第一分层采用高强度胶结充填,设计充填体强度为 4 MPa,其他分层底部充填体的强度为 0.2～0.3 MPa,顶部胶面层厚度为 0.5～0.8 m,充填体强度为0.8～1.0 MPa。依据表 2 试验结果计算采场充填材料成本,结果见表 4,依据表 3 试验结果计算采场充填材料成本,结果见表 5。

表 4 不同充填体强度要求下纯水泥充填材料的成本

Table 4 Material costs of pure cement filling under different strength requirements of filling body

充填体强度要求/MPa	水泥掺量/(kg/m³)	材料成本/(元/m³)	占比/%	综合材料成本/(元/m³)
4	600	264	6.25	16.5
0.8～1.0	500	220	30.00	66.0
0.2～0.3	400	176	63.75	112.2

表 5 不同充填体强度要求下水泥+粉煤灰充填材料的成本

Table 5 Material costs of filling material containing cement and fly ash under different strength requirements of filling body

充填体强度要求/MPa	水泥掺量/(kg/m³)	粉煤灰掺量/(kg/m²)	材料成本/(元/m³)	占比/%	综合材料成本/(元/m³)
4	300	300	161.6	6.25	10.1
0.8～1.0	240	360	141.6	30.00	42.5
0.2～0.3	60	540	80.4	63.75	51.2

上向进路充填采矿法采用纯水泥泡沫混凝土充填时,综合材料成本为 194.7 元/m³,添加粉煤灰后,即采用粉煤灰+水泥进行泡沫混凝土充填时,综合材料成本为 103.8 元/m³,材料成本下降 90.9 元/m³,下降幅度为 46.7%,表明采用粉煤灰基泡沫混凝土充填技术上可行,经济上合理,具备较好的应用前景。

2 粉煤灰基泡沫混凝土胶凝机理分析

利用 X 射线衍射(XRD)对粉煤灰基泡沫混凝土水化产物进行分析[15-16],结合扫描电镜(SEM)对其微观形貌进行观察[17],分析粉煤灰基泡沫混凝土胶凝机理。

根据表 3 的试验结果,选取粉煤灰掺量分别为 300 kg/m³、360 kg/m³、420 kg/m³ 和 480 kg/m³ 的 4 组试块进行 XRD 和 SEM 微观结构分析,试样编号分别为 F1、F2、F3 和 F4。

2.1 X 射线衍射分析

试验使用德国某公司的 X 射线衍射仪,设置扫描范围 20°～80°,步数选择 0.15 s⁻¹。各试样的 XRD 图谱如图 3 所示。

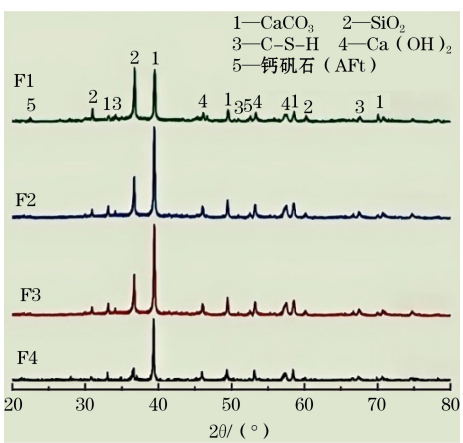


图 3 各试样的 XRD 图谱

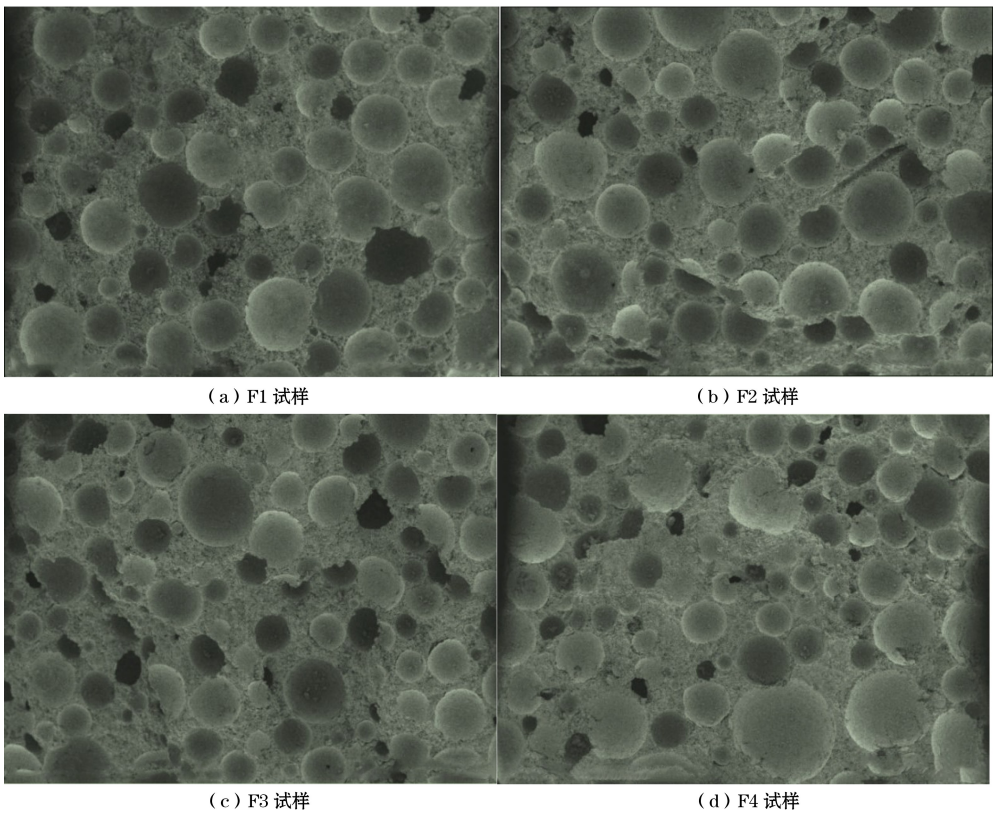
Fig.3 XRD patterns of each sample

由图 3 可以看出,各试样主要晶相有 5 种,分别是 C-S-H、$Ca(OH)_2$、钙矾石(AFt)、$CaCO_3$ 和 SiO_2。其中 C-S-H 和钙矾石(AFt)是水泥水化最终产物,$Ca(OH)_2$ 是水化中间产物,4 个试样中 $Ca(OH)_2$ 特征峰均不明显,表明泡沫混凝土水化较充分。在掺入粉煤灰的条件下,泡沫混凝土水化反应机理为:粉煤灰中活性 SiO_2 和活性 Al_2O_3 与水泥水化产物 $Ca(OH)_2$ 发生二次化学反应,生成低碱度 C-S-H 凝胶和钙矾石。此反应滞后于水泥初期水化反应,但能持续优化胶凝材料结构,提高充填体后期强度并减少游离 $Ca(OH)_2$ 对界面的弱化作用。

2.2 扫描电镜分析

本小节利用扫描电镜对泡沫混凝土的微观形貌进行观察,进一步研究粉煤灰对泡沫混凝土充填体强度的影响机理。使用扫描电子显微镜拍摄粉煤灰泡沫混凝土试样的微观结构图片,结果如图 4 所示。从图 4 可以看出,随着粉煤灰掺量的增加,泡沫混凝土的孔结构大幅改善,孔结构分布更为均匀,且结构内部的有害孔隙占比降低。

为了更加直观地观察泡沫混凝土试样内部的微观形貌与产物,用 SEM 电镜继续放大 100 倍来观察泡沫混凝土的微观结构。图 5 展示了 10 μm 下各试样的微观形貌特征。

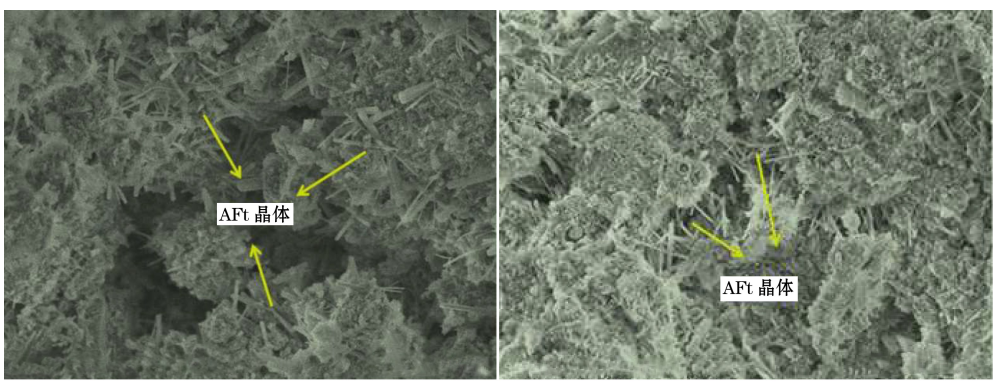


(a) F1 试样 (b) F2 试样

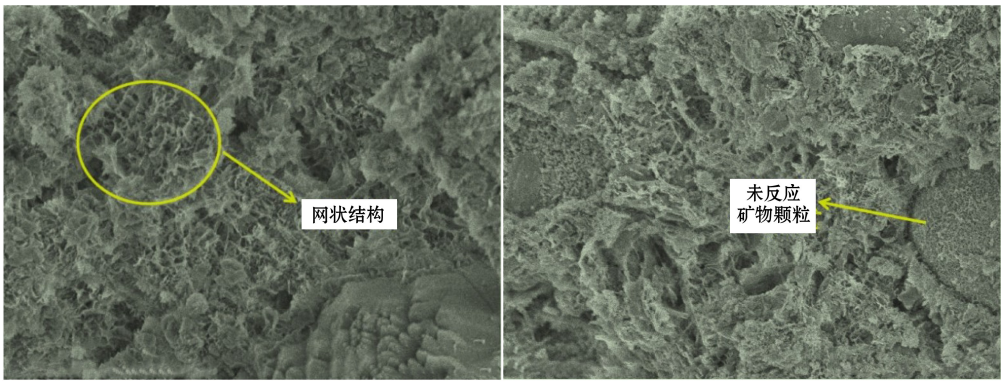
(c) F3 试样 (d) F4 试样

图 4 各试样微观形貌(1 mm)

Fig.4 The microstructure of each sample (1 mm)



(a) F1 试样 (b) F2 试样



(c) F3 试样 (d) F4 试样

图 5 各试样微观形貌(10 μm)

Fig.5 The microstructure of each sample (10 μm)

从图 5 可以清晰观察到,F1 和 F2 试样中形成了细密的针叶状钙矾石(AFt)产物,这些产物以有序的方式紧密排列在孔壁外表面,形成了良好的界面过渡区。F3 试样的凝胶结构呈现出高度致密的排列特征,与部分晶体相互交织,形成了稳定的网状结构,这种结构整体性能稳定。相比之下,F4 试样中存在大量未反应的矿物颗粒,这些颗粒的粒径分布不均匀,表明部分粉煤灰尚未完全发生水化反应,这可能与配比参数或养护条件有关。

生成的 AFt 晶体倾向于在孔壁的光滑表面定向生长,并在孔隙内富集,最终形成高纯度的 AFt 发育区。这种独特的结构特征显著增强了孔隙结构对外部荷载的抵抗能力,提高了材料的抗压性能。同时,气孔被晶体包裹形成封闭的球体结构,这种结构特征显著降低了孔隙间的连通性,从而有效提高了泡沫混凝土的密闭性能。这些球体结构充当了泡沫混凝土的骨料,通过应力传递,能有效改善材料的力学性能。

粉煤灰因其较大的比表面积和良好的火山灰活性,在水泥水化过程中发挥了重要作用。其活性主要源于富含的 SiO_2 和 Al_2O_3 活性颗粒,这些颗粒能够作为晶核,促进未反应颗粒参与水化过程。这一机制不仅加速了水化反应速率,还显著增加了水化产物的生成量。水化产物与水泥浆体反应生成 C-S-H 凝胶和 AFt 晶体,这些产物能够有效填充连通孔隙,弥补大孔、连通孔和微裂缝等结构缺陷。随着孔隙的逐步填充,泡沫混凝土致密性得到显著提升,从而促进了材料强度的持续增长。此外,粉煤灰还能促进水泥的二次水化反应,进一步增加水化产物,密实泡沫混凝土的孔隙,提高材料的耐久性和长期性能。

3 充填工业试验

3.1 泡沫混凝土充填工艺流程

通过调研泡沫混凝土使用现状[9,18-20],考察相关设备,结合某金矿井下实际生产情况,提出充填采场现场制浆,通过管道泵送泡沫混凝土到空区的充填工艺,工艺流程如图 6 所示。

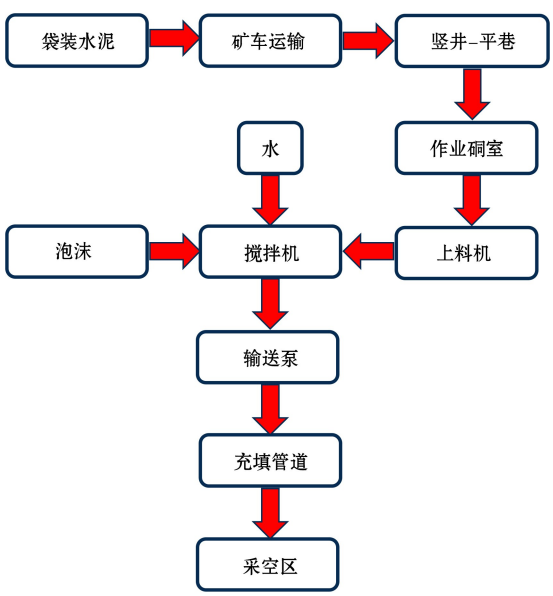


图 6 某金矿泡沫混凝土充填工艺流程

Fig.6 The filling process of foam concrete in a gold mine

3.2 泡沫混凝土充填设备

选用发泡混凝土设备 KH-20,该设备由主机(包括气泵、发泡器和混合器等)、搅拌机和上料机组成。其工作原理是利用软管泵将水泥混合浆泵送至混合器内,同时由发泡器将泡沫推至混合器内与水泥混合,然后利用软管泵及增压器辅助将泡沫混凝土输送至目的地。充填设备流量为 20 m^3/h,输送

水平距离 300 m,垂直高度 80 m,配套电机总功率 30 kW,总质量 1.5 t,设备整体外形尺寸(长×宽×高)为 6 m×0.9 m×3 m。

3.3 试验地点及结果

试验采场位于 270 m 中段 10～14 线之间,矿体平均品位为 6 g/t,平均厚度为 0.8 m,矿体倾角为 60°～80°,采场设计尺寸(长×宽×高)为 50 m×1.4 m×40 m,采用上向进路充填采矿法,分层高度为 2.5 m。为保障人员通行与充填作业,于采场下盘脉外布置人行充填井,并贯通至 310 m 中段联通。充填硐室选址在 310 m 中段邻近试验采场的穿脉巷道内,具体位于试验采场的东南侧,距脉外运输巷道约 10 m。通过扩挖反井钻机硐室形成充填硐室,充填硐室标高+310 m(地表标高为+990 m),硐室尺寸(长×宽×高)为 10 m×2.1 m×3 m。

270 m 中段试验采场充填工业试验历时 3 个月,共充填 3 个分层,累计充填空区体积为 525 m^3,累计消耗粉煤灰 256 t,消耗水泥 66 t,充填材料成本约 5.5 万元,综合充填成本 42 元/t。充填料浆流平性好、无泌水,充填配比计量准确,充填体强度与室内试验值一致,充填工业试验达到了预期效果,为上向进路充填采矿法的顺利实施提供了有力支撑,解决了矿山充填生产的燃眉之急。在全尾砂充填系统建成之前,该充填工艺将在全矿推广应用。

4 结论

本文从矿山采矿充填面临的实际难题出发,借鉴其他行业成熟工艺技术,以室内试验为基础探索满足上向进路充填采矿法要求的充填配比,通过添加粉煤灰达到大幅降低充填成本的目的;通过电镜扫描和 X 射线衍射等手段分析了粉煤灰基泡沫混凝土的胶凝机理;最后通过工业试验验证充填效果。通过试验研究和实践,得出如下的结论。

(1) 泡沫混凝土可以通过发泡率(湿容重)控制其流动状态。固定水灰比为 0.5,不同水泥用量的料浆坍落度值在 24～27 cm 之间,此时料浆流动性良好,且无泌水现象。

(2) 无论是否添加粉煤灰,泡沫混凝土试块强度均能满足上向进路充填采矿法对充填体强度的要求,但添加粉煤灰可使泡沫混凝土材料成本由 194.7 元/m^3 降至 103.8 元/m^3,显然粉煤灰基泡沫混凝土充填技术上可行,经济上合理,具备较好的应用前景。

(3) XRD 和 SEM 分析结果进一步表明,粉煤灰掺量的增加,会大幅改善泡沫混凝土的孔结构,使试块孔结构分布更为均匀,减少结构中的有害孔隙。

(4) 泡沫混凝土现场工业试验历时 3 个月,共充填 3 个分层,累计充填空区体积 525 m^3,充填材料成本约 5.5 万元,综合充填成本为 42 元/t,充填料浆流平性好、无泌水,充填配比计量准确,充填体强度与室内试验值一致,充填工业试验达到了预期效果,解决了矿山充填生产的燃眉之急。

参考文献(References):

[1] BOKE N, BIRCH G D, NYALE S M, et al. New synthesis method for the production of coal fly ash-based foamed geopolymers[J]. Construction and Building Materials, 2015, 75: 189-199.

[2] 姜立帅.轻质泡沫混凝土填料在路基施工中的应用[J].西部交通科技,2020(7):56-61.
JIANG Lishuai. Application of lightweight foamed concrete filler in subgrade construction [J]. Western China Communications Science & Technology, 2020(7): 56-61.

[3] 黄志超,张宗宇,苏谦,等.无砟轨道玄武岩纤维泡沫混凝土路基动力特性分析[J/OL].西南交通大学学报:1-9[2025-03-15].https://doi.org/10.3969/j.issn.0258-2724.20240142.
HUANG Zhichao, ZHANG Zongyu, SU Qian, et al. Dynamic characteristics of ballastless track basalt fiber foam concrete subgrade[J/OL]. Journal of Southwest Jiaotong University: 1-9 [2025-03-15]. https://doi.org/10.3969/j.issn.0258-2724.20240142.

[4] WATABE Y, NOGUCHI T. Site-investigation and geotechnical design of D-runway construction in Tokyo Haneda airport[J]. Soils and Foundations, 2011, 51(6): 1003-1018.

[5] LEE Y J, YAE G G, PARK S W, et al. Behavior characteristics of underground flexible pipe backfilled with lightweight foamed soil [J]. Journal of the Korean Geosynthetic Society, 2015, 14(1): 43-50.

[6] 邓飞.泡沫轻质土在杭州东站软土路基地基处理中的应用[J].铁道标准设计,2018,35(6):102-107.
DENG Fei. Research on foundation treatment of soft soil subgrade of the east Hangzhou railway station building[J]. Railway Standard Design, 2018, 35(6): 102-107.

[7] 卢正,张荣,赵阳,等.盐渍土基泡沫轻质土工程特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2025,44(增刊 1):1-13.
LU Zheng, ZHANG Rong, ZHAO Yang, et al. Experimental study on engineering characteristics of foamed lightweight soil based on saline soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2025, 44(Suppl.): 1-13.

[8] 杨慧,江学良,刘潺,等.浅埋偏压连拱隧道泡沫混凝土减震层减震效果的振动台试验研究[J/OL].振动工程学报:1-10[2025-03-15]. https://link.cnki.net/urlid/32.1349.tb.20241101.1539.002.

YANG Hui, JIANG Xueliang, LIU Chan, et al. Seismic reduction effects of foam concrete damping layer on shallow-buried and bias double-arched tunnel based on shaking table test [J/OL]. Journal of Vibration Engineering:1-10[2025-03-15]. https://link.cnki.net/urlid/32.1349.tb.20241101.1539.002.

[9] 马旭,高蕾,王桐,等.采空区充填泡沫混凝土制备及其性能研究[J].煤矿现代化,2022,31(6):84-91.
MA Xu, GAO Lei, WANG Tong, et al. Study on preparation and performance of foamed concrete filled with goaf[J]. Coal Mine Modernization,2022,31(6):84-91.

[10] SATOH T, TSUCHIDA T, MITSUKURI K, et al. Field placing test of lightweight treated soil under seawater in Kumamoto Port [J]. Soils and Foundations, 2001, 41(5):145-154.

[11] 梁军,李恩泽.现浇轻质泡沫混凝土在某工程屋面保温层和找坡层的应用技术[J].甘肃科技,2014(21):114-116.
LIANG Jun, LI Enze. Application technology of cast-in-place lightweight foamed concrete in the roof thermal insulation layer and slope-finding layer of a certain project [J]. Gansu Science and Technology,2014(21):114-116.

[12] 刘文波,连海瑛,郝世波,等.尾砂泡沫混凝土在地下矿山工程中的应用探析[J].黄金,2012(1):28-31.
LIU Wenbo, LIAN Haiying, HAO Shibo, et al. Application of tailings foamed concrete in underground mining engineering[J]. Gold,2012(1):28-31.

[13] 王树帅,杨仁树,李永亮,等.红沙制备胶结充填材料性能可行性试验研究[J].煤炭学报,2025,50(增刊1):324-335.
WANG Shushuai, YANG Renshu, LI Yongliang, et al. Feasibility experimental study on the performance of cemented filling materials prepared with red sand [J]. Journal of China Coal Society,2025,50(Suppl.1):324-335.

[14] 李明,李起行,吴相儒,等.粉煤灰膏体充填材料工作性能影响因素研究[J].矿业研究与开发,2024,44(6):65-71.
LI Ming, LI Qihang, WU Xiangru, et al. Study on influencing factors of working performance of fly ash paste filling materials [J]. Mining Research and Development, 2024,44(6):65-71.

[15] 程纬华,程海勇,乔登攀,等.基于促凝和缓凝技术的含硫充填体力学损伤调控[J].煤炭学报,2019,44(增刊2):553-559.
CHENG Weihua, CHENG Haiyong, QIAO Dengpan, et al. Regulation of mechanical damage of filling body with sulfur based on coagulation and retarding technology[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(Suppl.2):553-559.

[16] 姜关照,吴爱祥,李红,等.含硫尾砂充填体长期强度性能及其影响因素[J].中南大学学报(自然科学版),2018,49(6):1504-1510.
JIANG Guanzhao, WU Aixiang, LI Hong, et al. Long-term strength performance of sulfur tailings filling and its affecting factors [J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2018,49(6):1504-1510.

[17] 王炳文,甘肃,董平波,等.高寒地区尾砂胶结充填体固结特性试验研究[J].中国有色金属学报,2022,32(8):2446-2457.
WANG Bingwen, GAN Su, DONG Pingbo, et al. Experimental study on consolidation characteristics of tailings cemented backfill in alpine regions[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals,2022,32(8):2446-2457.

[18] 王大鹏,吴凯.碱激发矿渣-金尾矿基泡沫混凝土的制备及其特性研究[J].矿业研究与开发,2023,43(5):216-222.
WANG Dapeng, WU Kai. Study on preparation and properties of alkali activated slag-gold tailings based foam concrete [J]. Mining Research and Development, 2023, 43 (5):216-222.

[19] 于力昌,高尚忠,李永靖,等.隧道卸压支护结构相似模拟试验研究[J].建筑结构,2022,52(增刊1):2855-2859.
YU Lichang, GAO Shangzhong, LI Yongjing, et al. Study on similar simulation test of tunnel pressure relief support [J]. Building Structure,2022,52(Suppl.1):2855-2859.

[20] 卢迈超.铁尾矿砂制备岩溶空洞充填用泡沫混凝土的试验研究[J].福建建材,2023(7):9-11.
LU Maichao. Experimental study on the preparation of foamed concrete for karst cavity filling with iron tailings sand[J]. Fujian Building Materials,2023(7):9-11.