

全尾砂胶结充填材料流动性和强度改性研究

黎凡秀

(辽宁二道沟黄金矿业有限责任公司)

摘要:尾砂胶结充填材料的流动性和强度是决定充填质量和效果的2个最为重要的性能指标。研究了复合外加剂(主要为液体硅酸钠和减水剂等)的掺入对二道沟金矿全尾砂胶结充填材料流动性和强度的改善效果。结果表明:塌落度与料浆浓度间存在明显的非线性关系。料浆浓度越高,料浆浓度的增加造成的流动性降幅越大。复合外加剂能够显著改善全尾砂充填料浆的流动性,随着料浆浓度和灰砂比的增加,复合外加剂对充填料浆流动性改善效果愈显著。灰砂比和龄期显著影响着复合外加剂对强度的改善效果,而料浆浓度影响基本可以忽略;灰砂比和龄期对复合外加剂改善效果存在着耦合影响。在实际生产中,可以考虑使用外加剂来提高充填体强度,可以大幅降低水泥用量,节省充填成本。

关键词:全尾砂;胶结充填;复合外加剂;流动性;强度;塌落度

中图分类号:TD853.34

文章编号:1001-1277(2025)08-0024-05

文献标志码:A

doi:10.11792/hj20250805

引言

尾砂胶结充填是将尾砂、胶结料混合后加水拌合成充填料浆经管道运送至采空区^[1-2]。该技术能够大规模处理金属矿山开采过程中产生的大量尾砂固废,减少堆存造成的环境污染;还可改善地下采场围岩的稳定性^[3]。同时,硬化的胶结充填体作为一种支承结构可以管理采场周边的地压,防止围岩崩落和地表沉降,提高井下开采的安全性和效率^[4]。此外,尾砂胶结充填显著改善了采场围岩的稳定性,为矿柱回收提供了有利条件,提高了资源回收率,增加了矿山的经济效益^[5]。

流动性和强度是影响充填质量和效率的2个重要指标。国内外学者在充填料浆流动性和充填体强度改性方面开展了较多的研究。例如:OUATTARA等^[6]研究了减水剂类型和掺量对高浓度尾砂胶结充填料浆流变参数改善效果。JIANG等^[7]研究了不同矿物外加剂(矿渣、粉煤灰和硅灰)下充填料浆流变和触变参数及其时变规律。唐志新等^[8]发现掺入矿渣不仅可以改善浆体的流动性,而且能够大幅度提高充填体强度。白丽伟等^[9]研究发现养护温度会对胶结充填体试件的强度产生显著影响,养护温度越高,充填体试件强度越高。

为了同时提高充填料浆的流动性和充填体强度,本文研究了复合外加剂(主要为液体硅酸钠和减水剂

等)的掺入对辽宁二道沟黄金矿业有限责任公司(下称“二道沟金矿”)全尾砂胶结充填材料流动性和强度的改善效果,分析了灰砂比、料浆浓度及养护龄期对复合外加剂改善程度的影响,相关研究成果能够为提高充填质量、降低充填成本提供一种新思路。

1 充填料物化特性

1.1 全尾砂

1.1.1 物化性质

采用激光粒度仪对二道沟金矿全尾砂进行了级配分析,结果如图1和表1所示。由图1和表1可知:全尾砂中 $-20\mu\text{m}$ 粒级占比28.77%,不均匀系数 C_u 和曲率系数 C_c 分别为63.94和1.47。采用容量瓶法和定容称量法测得全尾砂密度和松散密度分别为 2.81 g/cm^3 和 1.39 g/cm^3 ,并计算得到其孔隙率为51.33%。

采用X射线荧光光谱法对全尾砂化学成分进行了分析,其主要成分为 SiO_2 (63.19%)、 Al_2O_3 (17.71%)、 Fe_2O_3 (6.49%)和 K_2O (5.95%)。此外,尾砂含硫量低,对胶结料水化影响基本可忽略。

1.1.2 沉降特性

利用沉降试验测试了二道沟金矿全尾砂沉降特性,全尾砂料浆初始浓度为45%,以沉降终了时全尾砂沉缩区浓度作为最大沉降浓度。沉降试验结果如图2所示。

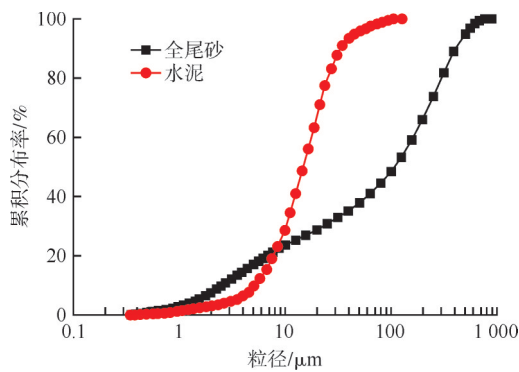


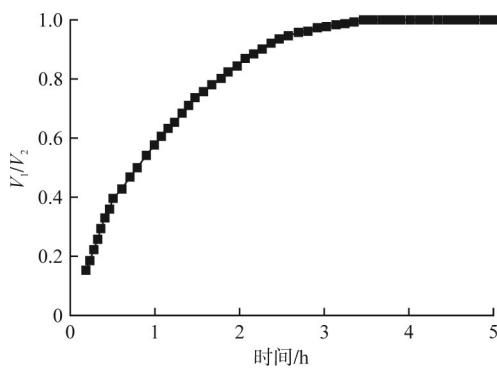
图1 全尾砂和水泥级配分布曲线

Fig. 1 Grading curves of ungraded tailings and cement

表1 全尾砂和水泥主要物理化学性质参数

Table 1 Main physicochemical parameters of ungraded tailings and cement

材料	w/%						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	CaO	Na ₂ O	MgO
全尾砂	63.19	17.71	6.49	5.95	2.0	1.7	1.3
水泥	23.6	9.9	4.7	1.1	53.8	0.2	3.2
材料	w/%			密度/ (g·cm ⁻³)	孔隙 率/%	松散密度/ (g·cm ⁻³)	d ₁₀ / μm
	SO ₃	TiO ₂	MnO				
全尾砂	0.7	0.4	0.3	2.81	51.33	1.39	2.6
水泥	2.4	0.8	0.2	3.2	58.7	1.6	2.7
材料	d ₃₀ / μm	d ₅₀ / μm	d ₆₀ / μm	C _u	C _c	w(-20 μm)/ %	
全尾砂	25.0	108.1	165.0	63.94	1.47	28.77	
水泥	7.1	13.6	17.8	6.6	1.0	64.8	



V₁—某时刻沉降水量(mm) V₂—达到最大沉降后的沉降水量(mm)

图2 全尾砂沉降特性曲线

Fig. 2 Settling characteristics curve of ungraded tailings

由图2可知,二道沟金矿全尾砂沉降可大致划分为3个阶段:①快速沉降阶段,主要发生在试验的前0.5 h内;②缓慢下沉阶段,主要对应沉降后0.5~3.5 h;③稳定阶段,此时沉降已基本结束,测得最大沉降浓度为64 %。

1.2 胶结料

制备充填料用的胶结料为强度等级42.5的普通硅酸盐水泥,其主要物理参数和化学成分如图1和表1所示。

1.3 复合外加剂

本试验中使用的复合外加剂主要由液体硅酸钠和减水剂等组成,其用量为水泥的1.5 %。硅酸钠模数为2.31,密度为1 490 kg/m³,pH值为12.5。

1.4 拌合水

拌合水为实验室自来水,其主要物理化学性质如表2所示。

表2 拌合水的主要物理化学性质

Table 2 Main physicochemical properties of mixing water

电导率/ (μS·cm ⁻¹)	pH 值	ρ(Cl ⁻)/ (mg·L ⁻¹)	ρ(Al ³⁺)/ (μg·L ⁻¹)	ρ(S ²⁻)/ (mg·L ⁻¹)	ρ(Na ⁺)/ (mg·L ⁻¹)	ρ(Fe ³⁺)/ (μg·L ⁻¹)
1.93	7.35	5.69	4.32	4.62	7.84	2.36

2 试验方案

本试验共包括3个部分,分别为塌落度、流变参数和强度测试,具体试验方案如表3所示。

表3 试验设计方案

Table 3 Test design scheme

指标	料浆浓度/%	灰砂比	复合外加剂掺量/%
塌落度	62~76	1:4	0
	62~76	1:4	1.5
	62~76	1:10	0
	62~76	1:10	1.5
流变参数	66, 68	1:4	0
	66, 68	1:4	1.5
	66, 68	1:6	0
	66, 68	1:6	1.5
	66, 68	1:10	0
	66, 68	1:10	1.5
强度	66, 68	1:4	0
	66, 68	1:4	1.5
	66, 68	1:6	0
	66, 68	1:6	1.5
	66, 68	1:8	0
	66, 68	1:8	1.5
	66, 68	1:10	0
	66, 68	1:10	1.5

3 试样制备、养护及测试方法

3.1 试样制备与养护

将干尾砂和水泥手工混合均匀,再依次加入复合外加剂和拌合水,采用搅拌机强力搅拌5 min,形成均质充填料浆^[10]。制备好的充填料浆直接用于塌落度

和流变参数测试;而对于强度测试,将制备好的料浆装入7.07 cm×7.07 cm×7.07 cm标准三联试模,养护2~3 d进行脱模,脱模后的试块在标准养护箱中进行养护,养护温度(20±1)℃,相对湿度95 %。

3.2 测试方法

3.2.1 塌落度测试

分3次将料浆装入标准塌落度筒(塌落度筒内部尺寸为:顶部直径15 cm,底部直径20 cm,高度30 cm)中,每次装入塌落度筒体积的1/3。待顶层插捣完后,刮去多余的料浆并用抹刀抹平,最后垂直缓慢提起塌落度筒。

3.2.2 强度测试

利用NYL-300D型压力试验机测定其强度,加载速率为1 mm/min。每龄期取3个试块进行试验,取平

均值作为该龄期充填体的强度。

4 结果与分析

4.1 塌落度

复合外加剂对全尾砂胶结充填料浆塌落度影响结果如图3、图4所示。由图3、图4可知:无论灰砂比大小和是否含有复合外加剂,充填料浆的塌落度都随着料浆浓度的增加而降低。需要指出的是,当料浆浓度从62 %升高到70 %时,塌落度呈缓慢降低;当料浆浓度继续增加,塌落度出现了快速降低。这表明,①塌落度与料浆浓度存在非线性关系;②料浆浓度越高,提高料浆浓度造成的流动性降幅越大,因此在实际生产中,通过提高料浆浓度来增加充填体强度时,需仔细评估充填料浆的流动性^[11]。

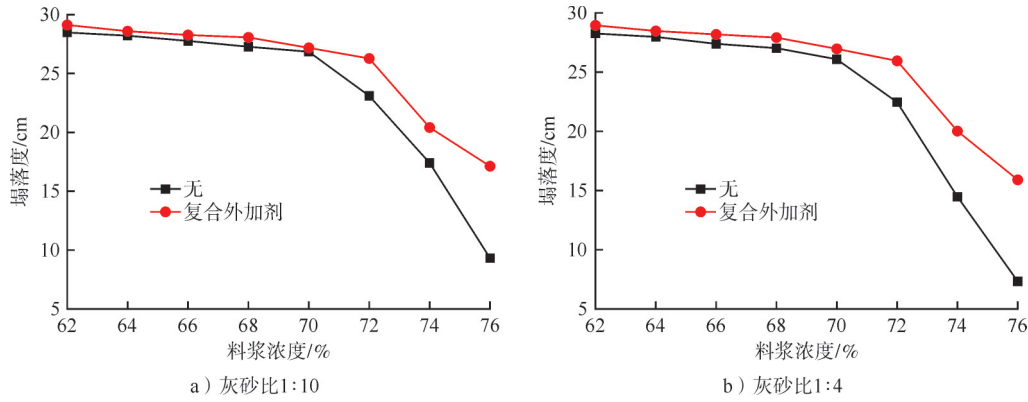


图3 不同灰砂比下含/不含复合外加剂充填料浆塌落度
Fig. 3 Slump of backfill slurry with/without compound additive



图4 含/不含复合外加剂充填料浆塌落度实拍
Fig. 4 Photos of slump of slurry with/without compound additive

复合外加剂掺入后料浆塌落度增长率如图5所示。由图5可知:无论灰砂比大小,复合外加剂的掺入均可提高充填料浆的流动性,且料浆浓度越高,流动性改善效果愈显著。此外,灰砂比越高,复合外加剂改善效果愈明显,这是因为减水剂主要作用于水泥颗粒,而灰砂比越高,水泥含量越高。

4.2 充填体强度

料浆浓度66 %和68 %下含/不含复合外加剂充填体强度如图6、图7所示。由图6、图7可知:无论有无外加剂和灰砂比大小,所有充填体强度均随龄期的

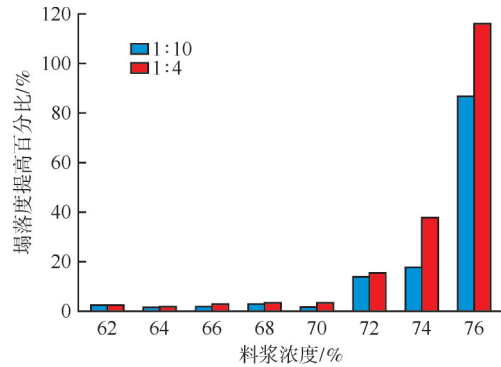


图5 复合外加剂掺入后料浆塌落度增长率
Fig. 5 Growth rate of slurry slump after addition of compound additive

增长而增加。随着水化反应的持续进行,水化产物数量越来越多,不断填充尾砂间的孔隙,使得充填体更加致密^[12]。灰砂比越高,充填体强度也越高,这是因为灰砂比越高,意味着胶结料含量越高,因此相同龄

期内水化产物越多。对比图 6 和图 7 结果可知,当料浆浓度由 66 % 提高至 68 %,所有配比充填体强度均出现了增长。

无论充填料浆浓度高低、灰砂比大小,复合外加

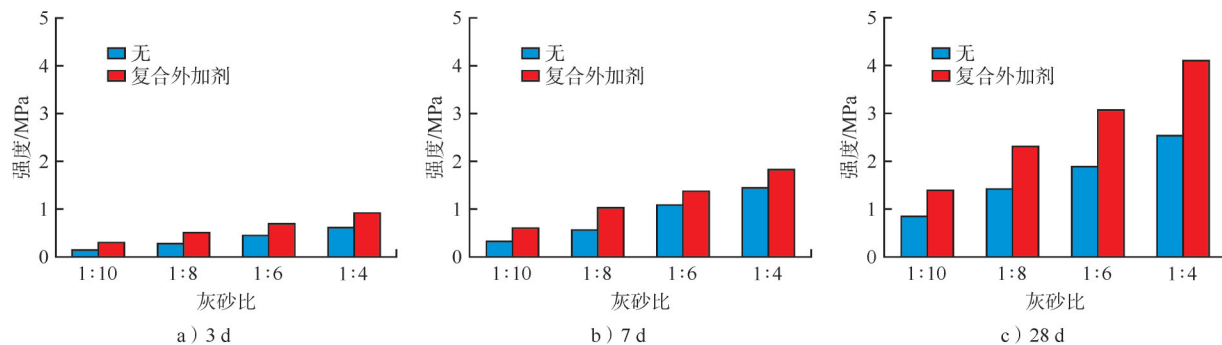


图 6 料浆浓度 66 % 时复合外加剂对不同灰砂比和龄期充填体强度影响

Fig. 6 Effect of compound additive on backfill strength at different cement-sand ratios and curing ages (66 % slurry concentration)

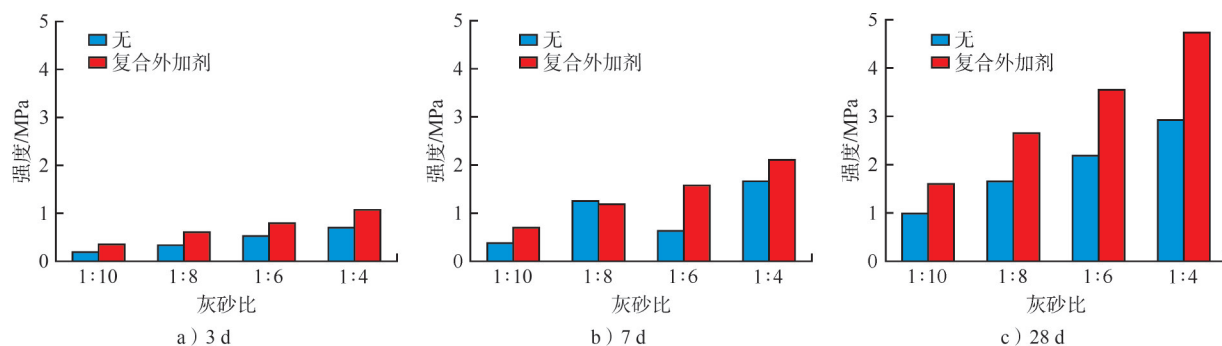


图 7 料浆浓度 68 % 时复合外加剂对不同灰砂比和龄期充填体强度影响

Fig. 7 Effect of compound additive on backfill strength at different cement-sand ratios and curing ages (68 % slurry concentration)

剂的加入均提高了各龄期充填体强度。分析认为,硅酸钠中水玻璃水解产生的硅酸与水泥水解产生的氢氧化钙反应生成了难溶于水的水合硅酸钙,同时还破坏了硅酸三钙和硅酸二钙的水解平衡,促进了硅酸三钙和硅酸二钙水解(水化),使之在很短的时间内生成大量水合硅酸钙而凝结成结石体^[13-15]。复合外加剂掺入后不同料浆浓度、灰砂比和龄期充填体强度增长百分比如图 8 所示。由图 8 可知:灰砂比和龄期显著影响复合外加剂对充填体强度的改善效果,而料浆浓度影响基本可以忽略。在养护早期(3 d 和 7 d),复合外加剂对低灰砂比(1:10 和 1:8)充填体强度改善效果要明显高于高灰砂比(1:6 和 1:4)充填体;而在养护后期(28 d),复合外加剂对不同灰砂比充填体强度影响差别很小。对于低灰砂比(1:10 和 1:8)充填体,复合外加剂的早期(3 d 和 7 d)增强效果要高于后期(28 d);而对于高灰砂比(1:6 和 1:4)充填体,增强效果则恰好相反。

为了得到充填体强度影响因素的重要程度,对 7 d 充填体强度结果进行了极差分析,结果如表 4 所示。由表 4 可知:影响充填体 7 d 强度的因素主次顺

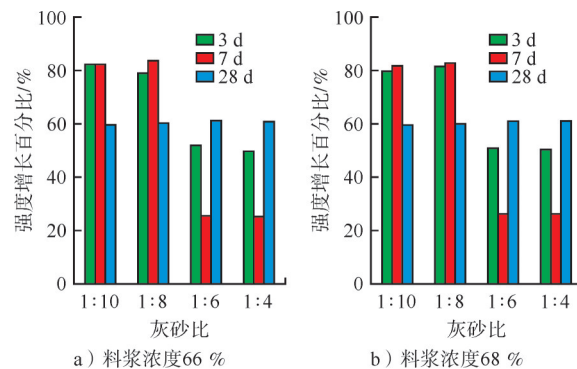


图 8 复合外加剂掺入后不同料浆浓度、灰砂比和龄期充填体强度增长百分比

Fig. 8 Strength increase percentages of backfill with different slurry concentrations, cement-sand ratios, and curing ages after addition of compound additive

序为灰砂比>复合外加剂>料浆浓度。灰砂比、复合外加剂对充填体质量具有较大影响,料浆浓度对充填体质量的影响相对较小。水泥掺量是影响强度极其重要的因素,灰砂比 1:15 到 1:4,其 7 d 强度增长了 5 倍以上;在其他参数相同的条件下,复合外加剂的掺入对充填体质量影响也非常明显。因此对于矿山而言,灰砂比、复合外加剂是控制充填体质量的首要因素。

结合配合比试验结果和经济比较,达到相同的充填体强度,使用复合外加剂可以大幅降低水泥用量,节省充填成本。

表 4 充填体 7 d 强度极差分析结果

Table 4 Range analysis results of the backfill strength after 7 d

序号	各水平平均值		
	料浆浓度	复合外加剂	灰砂比
1	1.25	1.05	2.23
2	1.44	1.63	1.67
3			1.22
4			0.73
极差	0.19	0.58	1.50

5 结 论

1)测得了全尾砂的粒级分布、密度、松散密度、孔隙率等参数,其主要成分为 SiO_2 和 Al_2O_3 ,含硫量低。沉降主要发生在前 0.5 h 内,在 3.5 h 内沉降基本稳定。

2)塌落度与料浆浓度间存在明显的非线性关系,料浆浓度越高,提高料浆浓度造成的流动性降幅越大;复合外加剂能够显著改善全尾砂充填料浆的流动性;随着料浆浓度和灰砂比的增加,复合外加剂对充填料浆流动性改善效果愈显著。

3)无论充填料浆浓度高低、灰砂比大小,复合外加剂的加入均提高了各龄期充填体强度;灰砂比和龄期显著影响复合外加剂对强度的改善效果,而料浆浓度影响基本可以忽略;灰砂比和龄期对复合外加剂改善效果存在着耦合影响。

4)影响充填体 7 d 强度的因素主次顺序为灰砂比>复合外加剂>料浆浓度。在实际生产中,可以考虑使用复合外加剂来提高充填体强度,可以大幅降低水

泥用量,节省充填成本。

[参 考 文 献]

[1] 何哲祥,谢开维,张常青,等.活化搅拌技术及其在矿山充填中的应用[J].黄金,2000,21(9):18-20.

[2] 王洪武,吴爱祥.胶结充填体矿柱结构可靠性设计方法[J].黄金,2003,24(3):26-30.

[3] 谢开维,何哲祥,张常青,等.下向分层进路充填采矿法中采用尾砂胶结充填的研究[J].黄金,2000,21(2):17-20.

[4] 赵传卿,徐建民,林建华.焦家金矿尾砂固结充填体自立性能研究[J].黄金,2011,32(2):30-32.

[5] 张海波,宋卫东,许英霞.充填采矿技术应用发展及存在问题研究[J].黄金,2010,31(1):23-25.

[6] OUATTARA D, MBONIMPA M, YAHIA A, et al. Assessment of rheological parameters of high density cemented paste backfill mixtures incorporating superplasticizers[J]. Construction & Building Materials, 2018, 190: 294-307.

[7] JIANG H Q, FALL M, YILMAZ E, et al. Effect of mineral admixtures on flow properties of fresh cemented paste backfill: Assessment of time dependency and thixotropy[J]. Powder Technology, 2020, 372: 258-266.

[8] 唐志新,范东林,谢朝武.胶结充填材料优选及配比优化试验研究[J].黄金,2019,40(5):33-37.

[9] 白丽伟,赵润康,屈春来,等.养护温度对胶结充填体力学特性的影响试验研究[J].黄金,2021,42(11):33-38.

[10] 肖柏林.钢渣矿渣制备胶结剂及其在全尾砂胶结充填的应用[D].北京:北京科技大学,2020.

[11] 王冲,刘国磊,何国志,等.全尾砂固废基充填材料胶凝特性与纤维强化效应研究[J].矿业研究与开发,2024,44(6):112-120.

[12] 方林,翟会超,孙长坤,等.基于扩散度试验的减水剂对超细全尾砂充填料浆流动性影响研究[J].中国矿业,2023,32(6):146-151.

[13] 祝鑫,彭亮,尹旭岩,等.黄沙坪多金属矿全尾砂胶结充填试验研究及工程应用[J].矿业研究与开发,2022,42(8):83-86.

[14] 杨纪光,王义海,吴再海,等.某金矿全尾砂高浓度充填流变特性与微观结构的分析[J].有色金属科学与工程,2023,14(2):249-256.

[15] 侯永强,尹升华,赵国亮,等.聚丙烯纤维增强尾砂胶结充填体力学及流动性能研究[J].材料导报,2021,35(19):19 030-19 035.

Study on the fluidity and strength modification of cemented ungraded tailings backfill materials

Li Fanxiu

(Liaoning Erdaogou Gold Mining Co., Ltd.)

Abstract: The fluidity and strength of cemented tailings backfill materials are 2 of the most critical performance indicators that determine the quality and effectiveness of backfilling. This study investigates the effects of incorporating compound additives that are mainly liquid sodium silicate and water reducers on improving the fluidity and strength of cemented ungraded tailings backfill materials at the Erdaogou Gold Mine. The results show a clear nonlinear relationship between slump and slurry concentration: the higher the slurry concentration, the greater the decrease in fluidity caused by further increases in concentration. Compound additives can significantly enhance the fluidity of ungraded tailings backfill slurry, with their effects becoming more pronounced as slurry concentration and cement-sand ratio increase. The cement-sand ratio and curing age have a significant influence on the strength improvement effect of compound additives, whereas the influence of slurry concentration is negligible. There is a coupling effect between the cementsand ratio and curing age on the strength enhancement of compound additives. In practical production, the use of additives to improve the backfill strength can significantly reduce cement consumption and lower backfilling costs.

Keywords: ungraded tailings; cemented backfill; compound additive; fluidity; strength; slump