

搅拌时间对粗骨料膏体均质性及早期强度的影响

闫泽鹏^{1,2}, 尹升华^{1,2}, 严荣富^{1,2}, 邹龙³, 寇永渊³, 寇鹏飞³

(1. 北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 100083;

2. 北京科技大学 金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室, 北京 100083

3. 金川集团股份有限公司 镍钴资源综合利用国家重点实验室, 金昌 737100)

摘要: 搅拌时间是保证膏体拌合物均匀的最快捷且经济的方法。本文以金川矿区粗骨料及全尾砂为主要研究对象, 采用全面实验的方法研究了固体质量分数、及搅拌时间对膏体表面状态、流动性及早期强度的影响, 并结合 SEM 电镜扫描对不同搅拌时间条件下膏体强度的发生机制进行探讨。研究表明: 搅拌轴不同位置的膏体振动扩散度并未呈现明显的规律性, 对工业搅拌机不同位置膏体均质性的指导意义不大。随着搅拌时间增加, 膏体振动扩散度越来越大, 流动性逐渐得到改善。质量分数较大时会影响膏体物料混合的均质性, 试验中质量分数为 78% 的充填物料, 6 min 的搅拌时间尚不足以得到密实均匀的高质量浆体。搅拌作用可以促进膏体内部结构的形成, 充分的搅拌时间可以使得水泥在膏体中的分散提高, C-S-H 凝胶产量增大, 提高硬化膏体的早期强度, 结合膏体制备工艺, 建议搅拌时间在 4~5 min。

关键词: 搅拌时间; 膏体均质性; 流动性; 早期强度; 粗骨料

分类号: TD862.2

The effect of mixing time on the homogeneity and early strength of the coarse aggregate paste

YAN Zepeng^{1,2}, YIN Shenghua^{1,2}, YAN Rongfu^{1,2}, KOU Yongyuan³, ZOU Long³, KOU Pengfei³

(1. School of Civil and Resources Engineering, University of Science and Technology Beijing,

基金项目(Foundation item): 国家优秀青年科学基金资助项目(51722401); 国家自然科学基金重点资助项目(51734001); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(FRF-TP-18-003C1); 镍钴资源综合利用国家重点实验室基金资助项目(201902)

通讯作者: 尹升华, 博士, 教授, 从事膏体充填和金属矿高效开采等研究; E-mail: csuysh@126.com

Beijing 100083, China;

2. key Laboratory of High-Efficient Mining and Safety of Metal Mines, Ministry of Education,
University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

3. National Key Laboratory of Nickel and Cobalt Resources Comprehensive Utilization, Jinchuan
Group Co Ltd, Jinchang 737100, China)

Abstract: Mixing time is the quickest and the most economical way to ensure the homogeneity of paste mixes. In this paper, the effects of mass concentration and mixing time on the surface state, fluidity, and early strength of the paste were investigated by a comprehensive experimental method using coarse aggregate and whole tailing sand from the Jinchuan mine as the main research objects. The mechanism of paste strength under different mixing time conditions was also investigated by SEM electron microscope scanning. The results show that the paste vibration diffusivity at different positions of the stirring shaft does not show obvious regularity, which is not significant to guide the homogeneity of the paste mixing at different positions of the industrial mixer. With the increase of mixing time, the vibration diffusion coefficient gradually increases, which indicates that the paste fluidity gradually improves. Concentration affects the homogeneity of the paste mix, and a mixing time of 6 min is not sufficient to convert a filler with a concentration of 78% into a dense and homogeneous quality paste. Mixing action can promote the formation of the internal structure of the paste, and sufficient stirring time can make the dispersion of cement in the paste increase and promote the C-S-H gel yield, thus improving the strength of the hardened paste. Combined with the paste preparation craft, the mixing time is recommended to be 4~5 min.

Key words: mixing time; homogeneity of paste; fluidity; early strength; coarse aggregate

引言

随着社会发展速度加快, 矿产资源消耗巨大, 地表浅部资源开发越来越困难, 国内外矿山开始进行深部开采^[1-3]。大规模开采地下矿产资源时, 采区附近岩体应力环境受到扰动, 极易发生变形破坏, 造成地表塌陷。另一方面, 在选矿过程中会产生大量的尾砂, 通常是将其排放至尾矿库中^[4]。据统计, 全国有尾矿库 12000 多座, 堆存的尾矿达到 80 亿 t 并以每年 6 亿 t 的速率增长。废弃尾砂在地表的大量堆存, 会污染矿区周围土地, 并且存在滑坡、

溃坝等严重的安全隐患^[5-6]。

膏体充填采矿法的出现既解决了废弃尾砂对地表环境污染的问题,又对矿区地压进行了有效的控制,提高了井下工作人员的安全系数,随着近年来国家对矿山绿色开采要求的提高,膏体充填采矿法被越来越多国内地下矿山所采用^[7-9]。膏体以尾矿浆、水泥、棒磨砂、废石和水为原料,且充填膏体浓度高,物料种类多、细颗粒组分占比大,使得其均质化困难。膏体的均质性直接影响着膏体的输送性能及后期强度性能,而搅拌是实现浆体(尾砂浆混合物)向膏体转变的重要过程,搅拌效果的优劣直接影响到充填膏体的均质性 & 输送性能^[10]。国内外专家学者针对拌合物搅拌后的性能进行了大量的研究。MAZANEC O^[11]等对掺入粗骨料及硅灰的混凝土的混合特性进行了实验,结果表明搅拌过程所产生的剪切作用力会破坏团块中的网状结构,释放出被包裹的自由水,提高浆体的流动性。ROY D M^[12]等研究了搅拌时间对水泥混合料流变特性的影响,发现随着搅拌时间的延长水泥拌合物的粘度变小,表明其输送性能提高。KWELLE S O^[13]等对水泥基材料的水化进程与搅拌之间的关系进行了研究,结果表明搅拌可以明显的加快水化反应进度,提高硬化物料的早期强度。VARMA M B^[14]等对标号为 M-20 的混凝土拌合物进行了搅拌实验,搅拌时间设置为 1~10 min,强度结果表明搅拌时间在 4~7 min 时有利于拌合物强度的形成。郑东昊^[15]等发现过长的搅拌时间会导致拌合物离析,通过实验得出合理的搅拌区间在 75~90 s。程云虹^[16]等对多个影响混凝土拌合物的因素进行正交实验,结果表明对混凝土抗压强度影响程度最大的为搅拌,其次为养护条件和振捣。

根据国内外大量的研究发现控制搅拌机的搅拌时间是实现膏体混合物均质性的最快捷的方式。搅拌时间过短,则膏体均匀性差且强度较低;而搅拌时间太长,搅拌效率低且影响生产进度。因此,有必要确定一个最佳的搅拌时间。合适的搅拌时间可大大节约水泥等凝结剂的用量,降低矿山生产成本。现有文献大多是基于混凝土等材料开展实验,混凝土与粗骨料膏体在材料状态、粒级分布及物料性质等方面存在极大的差异,目前对于粗骨料膏体搅拌作用下均质性能的研究尚未开展,造成膏体精细化制备技术缺乏理论支撑。

膏体的均质化是指在搅拌作用下,悬浮体系中的聚集体充分打散,不同尺度颗粒均匀分布,最终完成物料从浆体、散体到膏体的相变,强度特征和流动行为特征可以更加明显且直观的表现出膏体物料的均质化程度。因此,本文以振动扩散度和 3 天、7 天、28 天强度为考量指标,评价膏体的拌合物的均质性。选用金川二矿区采集全尾砂、废石及棒磨砂作为充填骨料,并按照尾砂:废石:棒磨砂质量比为 5:2.5:2.5 的比例进行膏体配制,进行流动性及强度试验,得到最佳的搅拌时间参数,为实际生产提供指导意见。

1 实验材料

本实验所用实验材料均取自金川二矿区，其中全尾砂取自二矿区选厂、粗骨料（废石和棒磨砂）取自二矿区充填站料仓，主要材料及其物理性质如下：

（1）全尾砂。比重（密度）为 $2.785 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 、松散容重及密实容重分别为 $1.217 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 和 $1.527 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。尾砂松散孔隙率为 56.30%，密实孔隙率为 45.16%。采用激光粒度仪对全尾砂的粒级组成进行测试（粒级分布如图 1），其中粒径为 $80 \mu\text{m}$ 以内的尾砂颗粒占总量的 91.31%，级配分布均匀。

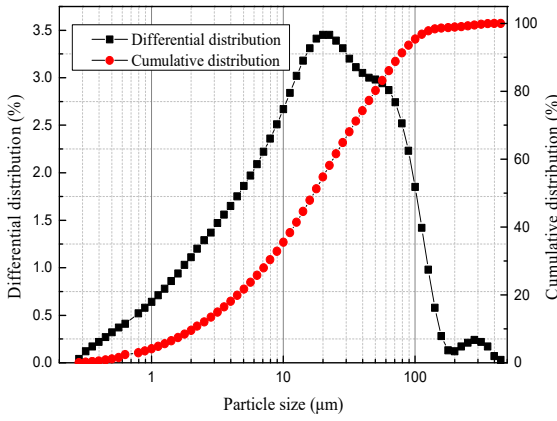
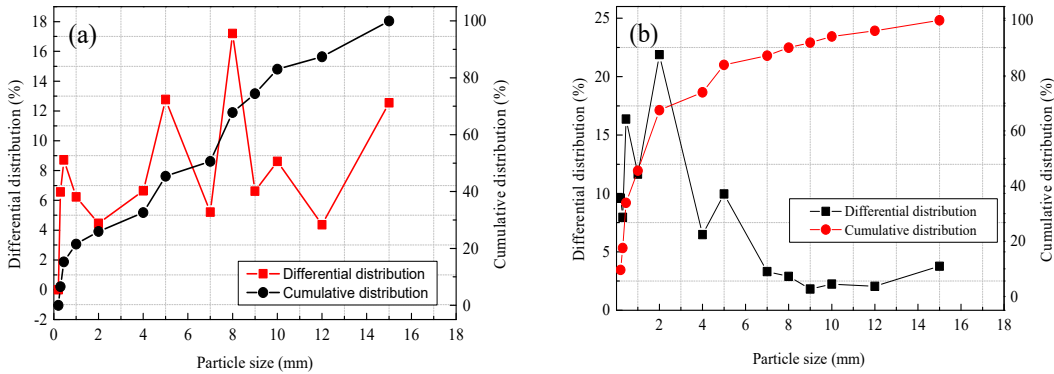


图 1 尾矿粒度分析结果

Fig. 1 Results of tailing particle size analysis

（2）粗骨料（废石和棒磨砂）。金川二矿区废石比重（密度）为 $2.876 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。其松散容重和密实容重分别为 $1.675 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 、 $1.968 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。废石松散孔隙率为 41.76%，密实孔隙率为 31.57%。棒磨砂比重（密度）为 $2.794 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 、松散容重和密实容重分别为 $1.558 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 、 $1.670 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。棒磨砂松散孔隙率为 44.24%，密实孔隙率为 40.23%。采用筛分法分别对粗骨料的粒级分布进行测试（如图 2 所示），可以看出粒径在 0~12 mm 的废石占总量的 87%，小于 15 mm 的废石占总量的 99.9%；棒磨砂的主要粒径在 0.2~8 mm。综上，可以看出充填材料级配良好，适用于井下充填。



（a）废石；（b）棒磨砂

图 2 粗骨料粒度分析结果

Fig. 2 Results of coarse aggregate particle size analysis

(3) 水泥。依据中国《通用硅酸盐水泥标准》(编号: GB175-2007), 采用#325 矿渣硅酸盐水泥作为粘结剂, 比重为 $3.05 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。

2 实验

2.1 实验方案

膏体拌合物在外界搅拌动力的作用下要产生流动, 必须克服其内在物料间的摩擦力以及膏体中颗粒间的粘聚力等阻力, 膏体的质量浓度是颗粒间的粘聚力大小的主要因素。金川矿山常用膏体充填质量分数为 75%~80%。同时, 根据文献[17-18]中的建议, 将质量分数设置为 75%、76%、77%、78%四个水平。

搅拌时间是影响料浆质量和充填成本的一个关键因素。如新疆某铜矿膏体系统搅拌时间 4.5~6.0 min, 谦希比某铜矿膏体系统搅拌时间 4.4~5.5 min, 参考前述矿山的设计参数进行预实验 (2~7 min) 后发现短时间 (2 min) 的搅拌效果极差, 而时间过长时 (7 min) 会导致料浆离析。因此, 将搅拌时间设置为 3 min、4 min、5 min、6 min 四个水平。其他实验参数分别为: 灰砂比 1:4; 尾砂: 粗骨料之比 5:5 (预实验所得最佳比例), 实验因素水平见表 1, 考虑到实验因素较少, 采用全面实验法, 共进行 16 组测试。

表 1 实验因素设计水平

Table 1 Experimental Factor Design Level

Cement-sand ratio	Tailings-coarse aggregate ratio	Concentration/%	Mixing time/min
1:4	5:5	75	3
		76	4
		77	5
		78	6

注: 粗骨料为废石和棒磨砂, 各占 50%

2.2 实验设备

(1) 水泥胶砂流动度仪, 简称跳桌。流动度是表示膏体在外力振动下流动性的一种量度, 其试验规范清晰, 试验过程容易规范化, 试验结果可重复性高^[19]。本文采用 NLD-3 型水泥胶砂流动度仪对膏体的流动度进行测量 (如图 3 所示)。其主要包括: 试模, 用金属材

料制成，由截锥圆模和模套组成。截锥圆模内壁应光滑，尺寸为：高度 60 ± 0.5 mm，上口内径： 70 ± 0.5 mm，下口内径： 100 ± 0.5 mm，下口外径：120 mm。

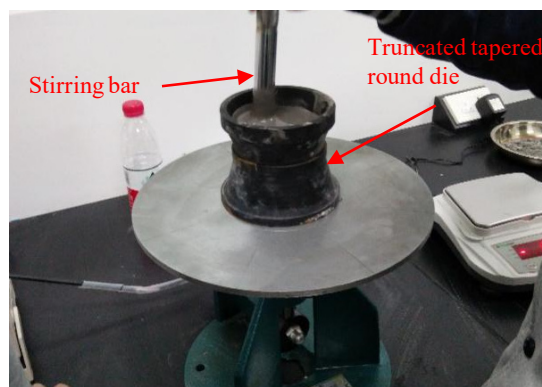


图3 水泥胶砂流动度仪

Fig. 3 Cement mortar fluidity meter

(2) 压力机。采用 WEW—600D 型微机屏显示液压万能试验机，其最大负荷 600 kN，精度为 $\pm 1\%$ ，分辨率 0.1 kN。

(3) 扫描电镜 (SEM)。进行 SEM 测试的主要仪器设备包括：SEM 电镜扫描仪、烘箱、研磨机、小勺、导电胶、载样铜片、操纵杆，数据处理专用电脑等。

2.3 料浆制备及取样

(1) 全尾砂制浆：根据膏体充填工艺，尾矿是以浆体形式进入搅拌机，而后，水泥和骨料等颗粒物料在投入搅拌机中（采用单卧轴强制式搅拌机，型号为 HJW-30，搅拌机转速 48 ± 3 r/min），而实验室尾砂为干料，为此，实验过程先将尾矿与水投放至搅拌机，设定搅拌时间为 3 min，使尾砂干料与水充分混合，配制形成指定浓度全尾砂浆体。尾矿制浆过程中，水泥与骨料在干燥状态下初步混合（灰砂比 1:4），待尾矿混合均匀后再投放至搅拌机内进行计时测试。

(2) 流动度测试取样：搅拌至指定时间，取膏体拌合物进行流动度（振动扩散度）测试，以测试膏体的均质性，为保证试验效果，采用多点取样方式，沿搅拌轴轴向的前、中、后三个位置取样（如图 4），测试各自的流动性。

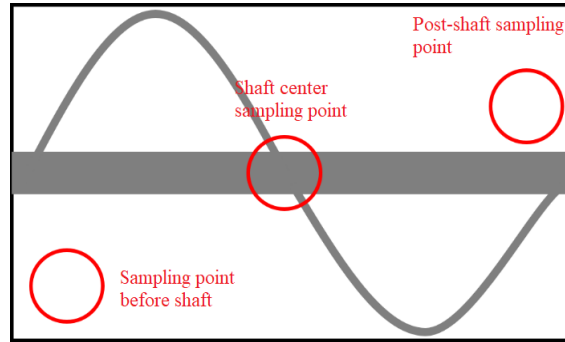


图 4 流动度测试取样点示意图

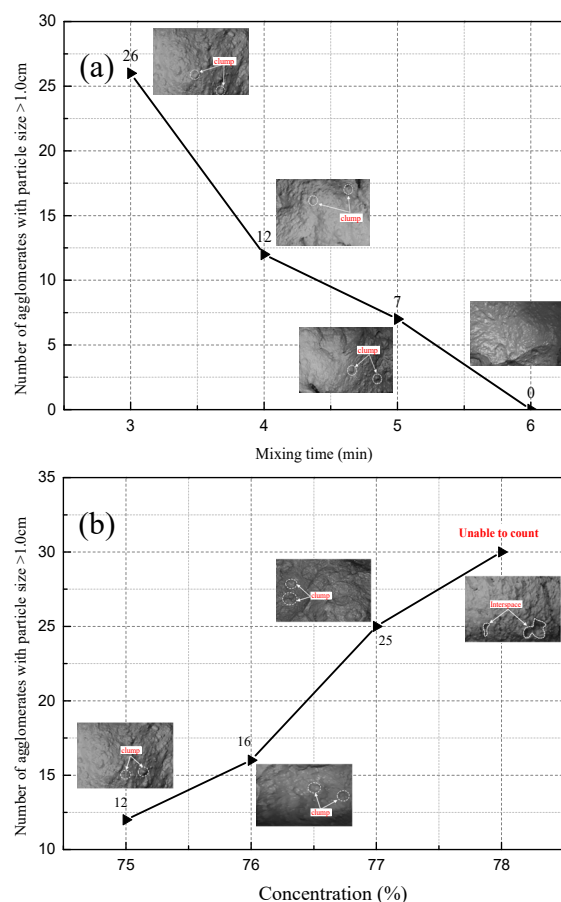
Fig. 4 Schematic diagram of sampling points for liquidity test

(3) 膏体试块制备：为保证实验的标准性和准确性，从而真实的反应膏体的实际强度，本实验条件及步骤均按照《建筑砂浆基本性能试验方法标准（JGJ/T70-2009）》中关于“立方体抗压强度试验”相关部分所做的规定进行试块制备。在流动度取样同时，以此料浆制备膏体试块（ $70.7 \times 70.7 \times 70.7 \text{ mm}^3$ ）以备进行膏体强度测试。

3 结果与分析

3.1 不同因素对膏体表面状态的影响

在膏体拌合的过程中，由于流体的表面张力作用，固体颗粒易聚集成小的球体，被流体介质包围，称为微观组分的团聚现象^[20-21]。团聚现象影响了膏体物料的微观匀质性，对膏体的强度和耐久性能有很大影响。通过相机对膏体的表面进行拍摄后采用 Image J 对粒径大于 1.0 cm 的团聚体进行统计。图 5 为不同搅拌时间下膏体的表面状态。由图 5（a）可以看出，当膏体搅拌 3 min 后，浆体表面均质性较差，出现了大量未搅散的水泥包裹体。搅拌 4 min~5 min 时膏体表面呈现出较好的均质性，大颗粒团聚体数量大大减少，骨料分散较为均匀；将搅拌时间延长至 6 min 后，粗骨料（废石、棒磨砂）在膏体中基本分散均匀，且表面没有较大的团聚体。搅拌可以有效的抑制团聚体的形成，提高胶凝材料的分散度，优化搅拌参数对于矿山的高效开采具有重要的指导意义。



(a) 搅拌时间；(b) 膏体质量分数

图 5 不同因素对膏体表面状态的影响

Fig. 5 Effect of different factors on the surface state of the paste

图 5 (b) 为不同质量分数条件下膏体的表面状态情况。由图 5 (b) 可以看出，质量分数为 76% 的膏体与质量分数为 75% 的膏体相比稠度明显增加且较高的质量分数使得粗骨料克服重力作用沉降离析更小，在浆体中的悬浮状态更好，这也使得拌合物从表面状态看来均质性明显有所改善。77% 质量分数下的膏体流动性变差，搅拌 5 min 时的浆体仍表现出“团与团”粘合的状态。质量分数继续增加至 78% 时，浆体由于浓度过高而出现尾砂浆包裹其他物料形成较大团聚体（不易统计），且彼此之间存在明显的空隙。高质量分数的膏体需要较长时间的搅拌，否则其产生的不规则空隙将会使充填体整体强度大打折扣，这会导致较低的充填效率与较高的功耗。因此，在实际应用中，尽可能通过调整质量分数来达到充填效率、功耗及强度之间的平衡。

3.2 不同因素对膏体流动性影响

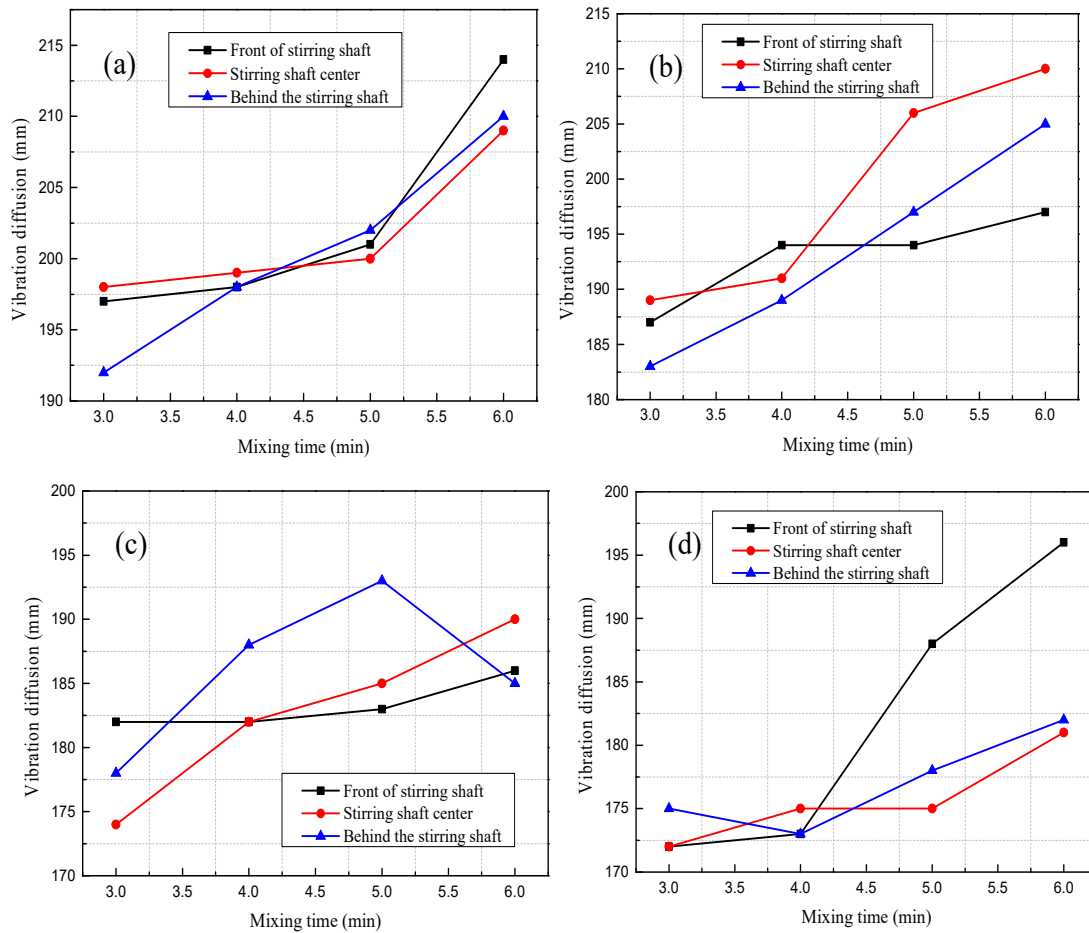
当到达预设搅拌时间后，沿搅拌轴轴向的前中后位置分别取样测试其振动扩散度，测试结果见表 2。

表 2 膏体振动扩散度测试结果

Table 2 Paste vibration dispersion test results

concentration /%	Mixing time /min	Vibration diffusivity /mm								
		Test1/ Forepart			Test2/ Middle part			Test3/ Posterior part		
		1	2	Mean	1	2	Mean	1	2	Mean
75	3	198	195	197	196	199	198	190	194	192
	4	195	200	198	202	195	199	189	206	198
	5	203	198	201	201	199	200	205	198	202
	6	210	218	214	210	207	209	209	211	210
76	3	189	185	187	188	190	189	186	179	183
	4	198	189	194	193	189	191	189	188	189
	5	192	195	194	203	209	206	193	201	197
	6	192	201	197	205	214	210	206	204	205
77	3	183	181	182	175	172	174	178	177	178
	4	181	183	182	185	179	182	185	190	188
	5	180	185	183	180	190	185	190	195	193
	6	187	185	186	190	190	190	185	185	185
78	3	176	168	172	175	168	172	177	172	175
	4	172	174	173	174	176	175	174	171	173
	5	185	191	188	176	174	175	181	174	178
	6	197	194	196	182	179	181	186	177	182

将不同浓度下不同位置的振动扩散度与搅拌时间的关系绘制图像，如图 6 所示。



(a) 75%质量分数; (b) 76%质量分数; (c) 77%质量分数; (d) 78%质量分数

图6 不同质量分数下膏体的震动扩散度曲线

Fig. 6 Vibration diffusion curves of paste in different concentrations

不同浓度下, 搅拌轴不同位置的膏体振动扩散度并未呈现明显的规律性。质量分数较低的情况下 (75%), 除了轴后位置在 3min 时扩散度比前中位置低约 5 mm 外, 其他搅拌时间下轴的前中后位置的流动性差别不大。质量分数为 76% 时, 3/4 min 的搅拌时间下, 轴后位置的流动性均低于前中位置, 这可能与废石、棒磨砂、水泥混合物料的入料位置有关。膏体质量分数为 77% 时, 搅拌时间为 4/5 min 时, 轴后位置较轴前振动扩散度大了约 10 mm, 而质量分数为 78% 时, 表现出轴前位置的扩散度更大, 流动性更好。综上, 由于搅拌机体积小及人工放料的误差, 使得不同位置的膏体振动扩散度的规律性并不统一, 对工业搅拌机不同位置膏体均质性的指导意义不大。

粗细物料间的摩擦力及粘聚力是膏体内部阻力的主要来源, 也是影响膏体流动性的内在因素^[22-23]。骨料间摩擦力的大小主要取决于尾砂、水泥等颗粒表面的物理特性及水膜厚度。颗粒间的粘聚力大小主要取决于颗粒之间的间距, 而影响颗粒之间间距主要为膏体的质量分数。将同一浓度, 同一搅拌时间下搅拌轴前中后位置的膏体振动扩散度取平均值, 用来表征

搅拌槽内所有浆体的流动性，得到浓度、搅拌时间、振动扩散度的关系，如图 7 所示。

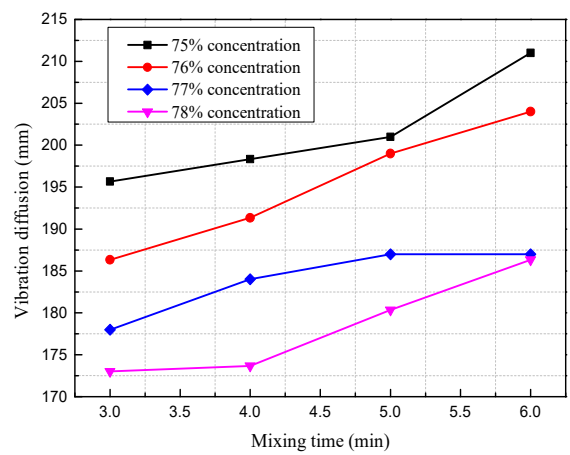


图 7 不同质量分数条件下膏体振动扩散度与搅拌时间关系图

Fig. 7 The relationship between the vibration diffusion of different concentrations of paste and the mixing time

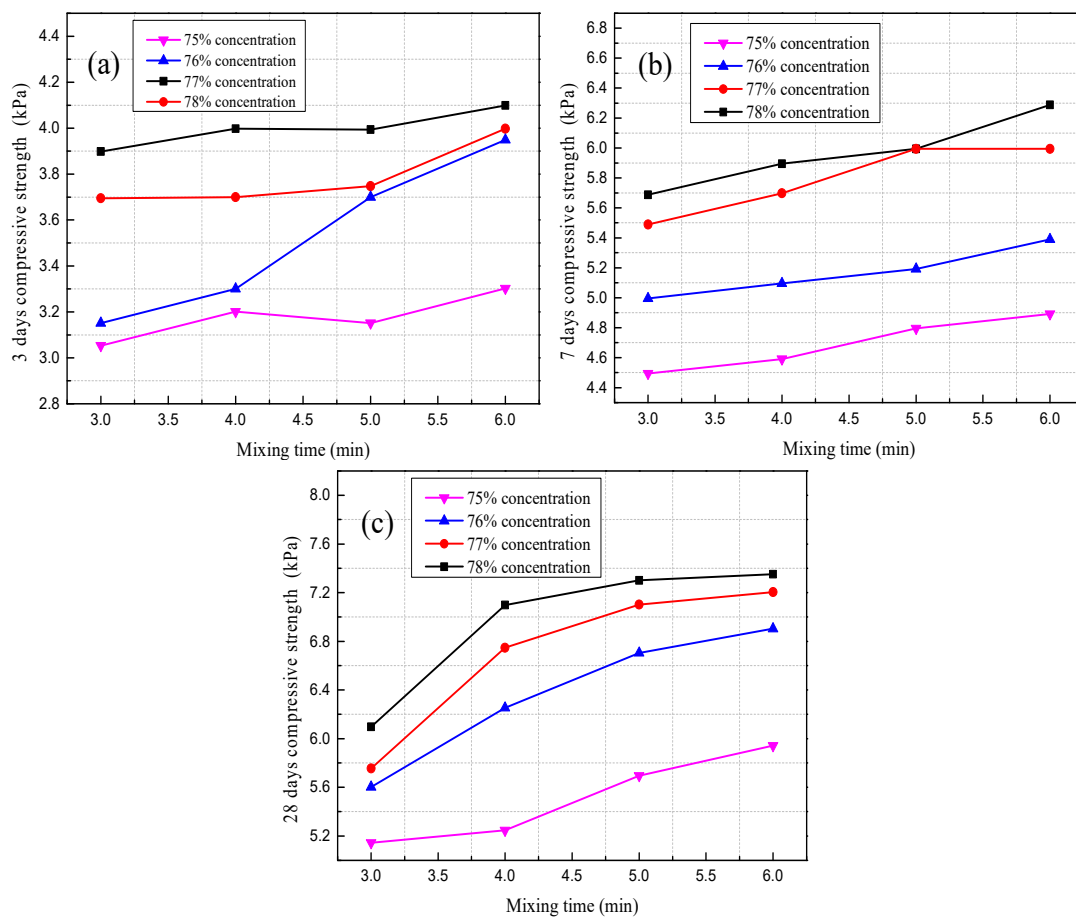
相同搅拌时间下，膏体振动扩散度随质量分数的增加呈现出逐渐减小的规律，即质量分数越高流动性越差。在实验设计的四个拌和时间内，膏体浓度不变时，膏体振动扩散度与搅拌时间呈现正相关关系，这是由于搅拌时间的增加使得水泥、尾砂等细粒级颗粒在浆体中的分散性更好，细颗粒在膏体中的润滑作用得以发挥^[24]。随着搅拌时间的不断增加，料浆的拌合度越来越高、振动扩散度越来越大，即膏体的流动性逐渐得到改善。在制备过程中，由于膏体的组成成分一直在发生变化，不可能始终保持合格的状态。当物料瞬间或者局部失衡时，膏体会出现离析现象。质量分数为 77% 和 78% 的膏体的震动扩散度在搅拌时间为 6 min 时基本相同，这是因为膏体拌合物在保持配比不变的情况下，其质量分数越高，颗粒与颗粒之间的间距越小，颗粒之间的作用力增强，所需的外界搅拌动力更大，打散颗粒之间的聚集所需能量也随之增加。质量分数为 77% 的膏体的扩散度在较短的搅拌时间内（5 min）达到了平衡，而质量分数为 78% 的膏体的扩散度随搅拌时间的增加呈增大的趋势，在 6 min 时这种趋势还一直在保持。因此，在实际操作中高质量分数的膏体需要更长的搅拌时间。

3.3 搅拌时间对硬化膏体抗压强度影响

在实际搅拌过程中，混合料要达到均匀混合的运动方式是综合性的，各运动良好配合，同时作用，使混合料各组分相互碰撞、相互渗透，促使各组分颗粒，特别是水泥颗粒的弥散分布，提高膏体在宏观和微观上的匀质性，进而改善膏体的抗压强度。搅拌时间对膏体 3 天、7 天、28 天的抗压强度的影响如图 8 所示。

图 8（a）表明 3 天抗压强度的增长基本与搅拌时间的长度呈现正相关关系。随着搅拌

时间的延长,不同质量分数下的 3 天强度都有小幅度的增长,但质量分数为 76%时增长幅度较其他组偏大,这可能是因为向尾砂浆体加入其他混合骨料时,下料过于集中,使得 3 min 搅拌并没有将其分散,加之取料位置的原因,使得 3 天强度与其他浓度下增幅不一致。在较短的搅拌时间内,大颗粒团聚体被分解成较小的絮团(如图 5(a)),导致颗粒间孔隙率降低、内部微观结构的致密性增强。同时使水泥与水的接触面积增大,加快水化反应进程,水化产物与粗颗粒之间形成高强度的网状结构,提高膏体抗压强度^[25];随着搅拌时间的加长,絮团被破坏,水泥、尾砂颗粒与水的接触面积持续增大,水泥水化更加完全,孔隙率变得更低,膏体强度进一步增强。搅拌可以提高水泥颗粒在膏体中的均匀度,增大与水分的接触面积,影响水泥的水化反应,因此不同质量分数的膏体其搅拌效果有所差异。



(a) 3 天; (b) 7 天; (c) 28 天

图 8 搅拌时间与硬化膏体初期强度的关系

Fig. 8 The relationship between mixing time and initial strength of hardened paste

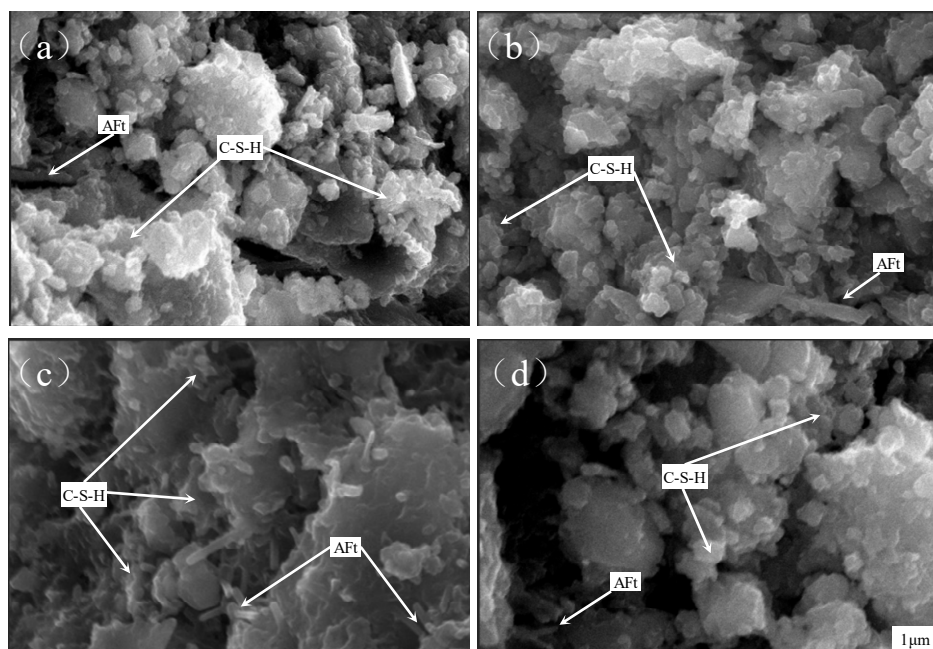
图 8 (b) 为不同固体质量分数膏体的 7 天强度变化。由图 8 (b) 可以看出,相同搅拌时间下,固体质量分数越高,试样强度越大;搅拌对不同浓度膏体的强度都有加强作用,在实验范围内延长搅拌时间可以提高膏体的强度。当质量分数为 75%时,搅拌时间的延长对

强度的增加效果较为微弱，此浓度下由于浆体浓度较低 3 min 时间已经使得水泥分散较为充分，粗骨料在浆体中呈现均质化分布。质量分数为 76%、77% 时，膏体 7 天强度随搅拌时间增加程度较大，说明该质量分数与实验设置搅拌时间范围及增加梯度较为匹配；而 78% 质量分数条件下，3/4/5/6 min 的搅拌时间下膏体的单轴抗压强度呈小幅度增长趋势，最长搅拌时间 6 min 强度增长较明显，但是 78% 质量分数的膏体强度与 77% 质量分数相比而言，强度增幅较小。分析认为，在预设搅拌时间条件下 78% 质量分数的膏体物料不能够充分混合，较多的空隙是影响其强度发展的原因所在。

搅拌时间与膏体 28 天单轴抗压强度的关系如图 8 (c) 所示。由图 8 (c) 可知，搅拌时间的增加对 28 天强度的影响较大。75% 质量分数条件下，6 min 搅拌时间比 3 min 的膏体强度增长了约 0.8 Mpa (强度提高约 15%)，但与其他质量分数相比，这种增长仍属于小幅度增长，即低质量分数下物料更容易实现短时间拌合均匀。膏体质量分数为 76%、77%、78% 时，4 min 搅拌时间比 3 min 搅拌时间下膏体强度增长了约 1 Mpa (强度提高约 17%)，而 4~5 min 强度增幅放缓 (仅提高约 5%)，5 min 与 6 min 强度增长微弱 (提高约 1%)，强度增长速率逐渐减小。分析认为是过度搅拌会破坏膏体的内部结构，中和水泥分散所带来的增益效果，导致强度增长缓慢。以上结果表明，通过改善搅拌工艺，优化搅拌时间，可以使骨料充分被水泥浆包裹，从改善膏体内部的组织结构，提高抗压强度。结合膏体流动度测试与强度测试，认为金川充填站的最佳搅拌时间应控制在 4~5 min。

3.4 搅拌时间对硬化膏体初期强度影响的微观机制

为了探讨搅拌时间对硬化膏体的作用机制，选择 77% 质量分数条件下养护 28d 的试样为研究对象进行切片观察。不同搅拌时间条件下硬化膏体切片表面的微观形态分布如图 9 所示。



(a) 3min; (b) 4min; (c) 5min; (d) 6min

图9 不同搅拌时间条件下硬化膏体的微观形貌

Fig. 9 Microscopic morphology of hardened paste under different mixing time conditions

由图9(a)~(d)可知,不同搅拌时间条件下C-S-H凝胶量及内部空隙结构具有明显的差异。当搅拌时间为3min时,可以看出充填体覆盖的C-S-H凝胶量明显低于其他三类浓度下的充填体;较长时间的搅拌对C-S-H凝胶和AFt晶体的形成起积极作用,这些晶体结构在结构面处搭接,使充填体更加致密,并形成更加稳定的内部结构。因此,随着搅拌时间的增长硬化膏体内部C-S-H凝胶生成量显著增加、硬化膏体致密性增强。当充填体受到加载时,能够表现出更好的力学性能,从而响应出更高的抗压强度。

4 结论

采用HJW-30型单卧轴强制式搅拌机,开展了全尾砂+棒磨砂+废石充填膏体的搅拌试验,探究了膏体质量分数、搅拌时间对充填料浆振动扩散度及单轴抗压强度的影响规律,得到如下结论:

(1)不同膏体质量分数下,搅拌轴不同位置的膏体振动扩散度并未呈现明显的规律性,对工业搅拌机不同位置的膏体拌和均质性指导意义不大。相同搅拌时间下,膏体振动扩散度随质量分数的增加呈现出逐渐减小的规律。增加搅拌时间,膏体的流动性逐渐得到改善。

(2)在实验设计的范围内,延长搅拌时间可以改善膏体拌合物的均质性;质量分数越高,膏体物料实现均匀混合的难度越大。试验中质量分数为78%充填物料,6min的搅拌时

间尚不足以得到密实均匀的高质量浆体。因此,建议矿山在满足安全生产的前提下,应尽可能的降低浆体的质量分数,达到充填效率、功耗及强度之间的平衡。

(3) 搅拌时间的延长,使得 3/7/28 天强度都得到了不同程度的增长,3 天属于微幅增长,7 天属于小幅增长,28 天增幅最大。搅拌作用对膏体内部结构形成具有促进作用,延长搅拌时间,可以使得水泥在膏体中的分散度提高,水化程度更加充分(C-S-H 凝胶产量增大)以减小水泥单耗,降低充填成本。但是,考虑到功耗及充填效率,在实际生产过程中不建议进行超长时间的搅拌。结合膏体输送工艺,建议金川充填站的搅拌时间应控制在 4~5 min。

参考文献

- [1] 李夕兵,周健,王少锋,刘冰.深部固体资源开采评述与探索[J].中国有色金属学报,2017,27(06):1236-1262.

LI Xi-bing, ZHOU Jian, WANG Shao-feng, LIU Bing. Review and practice of deep mining for solid mineral resources[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2017, 27(06): 1236-1262.

- [2] 李帅,王新民,张钦礼,王石.超细全尾砂似膏体长距离自流输送的时变特性[J].东北大学学报(自然科学版),2016,37(07):1045-1049+1060.

LI Shuai, WANG Xin-min, ZHANG Qin-li, WANG Shi. Time-Varying Characteristic of Paste-like super-Fine Unclassified Tailings in Long self-Flowing Transportation[J]. *Journal of Northeastern University(Natural Science)*, 2016, 37(07):1045-1049+1060.

- [3] CHENG H, WU S, LI H, ZHANG X. Influence of time and temperature on rheology and flow performance of cemented paste backfill[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 231:1-10.

- [4] 尹升华,刘家明,陈威,邹龙,寇永渊,李希雯.不同粗骨料对膏体凝结性能的影响及配比优化[J].工程科学学报,2020,42(07):829-837.

YIN Sheng-hua, LIU Jia-ming, CHEN Wei, ZOU Long, KOU Yong-yuan, LI Xi-wen. Optimization of the effect and formulation of different coarse aggregates on performance of the paste backfill condensation[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2020, 42(07):829-837.

- [5] 王小林,王洪江,吴爱祥,彭青松.全尾砂膏体管道输送壁面滑移减阻模型[J].中国有色金属学报,2020,30(09):2201-2205.

WANG Xiao-lin, WANG Hong-jiang, WU Ai-xiang, PENG Qing-song. Wall slip drag

- reduction model of full tailings paste in pipeline transportation[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2020, 30(09):2201-2205.
- [6] 刘晓辉, 吴爱祥, 姚建, 朱权洁. 膏体尾矿管内滑移流动阻力特性及其近似计算方法[J]. 中国有色金属学报, 2019, 29(10):2403-2410.
- LIU Xiao-hui, WU Ai-xiang, YAO Jian, ZHU Quan-jie. Resistance characteristic and approximate calculation of paste tailings slip flow inside pipe[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2019, 29(10):2403-2410.
- [7] LI B, YAN H, ZHANG J, ZHOU N. Compaction property prediction of mixed gangue backfill materials using hybrid intelligence models: A new approach[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 247:118633.
- [8] 谢和平. 深部岩体力学与开采理论研究进展[J]. 煤炭学报, 2019, 44(5):1283-1305.
- XIE He-ping. Research review of the state key research development program of China: Deep rock mechanics and mining theory[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(5):1283-1305.
- [9] 尹升华, 郝硕, 邹龙, 寇永渊, 李希雯, ARMELLE B. 基于 RSM 的胶结充填体强度回归及料浆寻优研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2020, 51(06): 1595-1605.
- YIN Sheng-hua, HAO Shuo, ZOU Long, KOU Yong-yuan, LI Xi-wen, ARMELLE B. Research on strength regression and slurry optimization of cemented backfill based on response surface method[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2020, 51(06): 1595-1605.
- [10] YANG L, WANG H, LI H, ZHOU X. Effect of High Mixing Intensity on Rheological Properties of Cemented Paste Backfill[J]. *Minerals*, 2019, 9(4):240.
- [11] MANZANEC O, LOEKE D, SCHIESSL P. Mixing of high performance concrete: effect of concrete composition and mixing intensity on mixing time[J]. *Materials & Structures*, 2010, 43(3):357-365.
- [12] ROY D, ASAGA K. Rheological properties of cement mixes: III. The effects of mixing procedures on viscometric properties of mixes containing superplasticizers[J]. *Cement & Concrete Research*, 1979, 9(6):731-739.
- [13] KWELLE S, MOFUNLEWI S. The Effect of Mixing Energy and Shear Rate on the Thickening Time of Cement Slurry[J]. *Leonardo Journal of Sciences*, 2008, 7(13).

- [14] VARMA M. Effect of Change in Mixing Time of Mixer on Wet Density, Dry Density, Workability and Compressive Strength of M-20 Grade Concrete[J]. *International Journal of Engineering and Technical Research*, 2016, V5 (12).
- [15] 郑东昊, 侯云芬, 司博旸. 搅拌时间对大流动性混凝土和易性和强度的影响研究[J]. 北京建筑大学学报, 2017, 33(4):18-21, 32.
- ZHENG Dong-hao, HOU Yun-fen, SI Bo-yang. Effect of Mixing Time on Workability and Strength of High Flowing Concrete[J]. *Journal of Beijing University of Civil Engineering and Architecture*, 2017, 33(4):18-21, 32.
- [16] 程云虹, 苟振志, 王元. 搅拌、振捣及养护对高性能混凝土强度影响的试验研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2010, 31(12):1790-1793.
- CHENG Yun-hong, GOU Zhen-zhi, WANG Yuan, et al. Testing Investigation on Effects of Mixing, Vibrating and Curing on Strength of High-Performance Concrete[J]. *Journal of Northeastern University(Natural Science)*, 2010, 31(12):1790-1793.
- [17] 尹升华, 刘家明, 邵亚建, 张海胜, ARMELLE B, 寇永渊. 全尾砂-粗骨料膏体早期抗压强度影响规律及固化机理[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2020, 51(02):478-488.
- YIN Sheng-hua, LIU Jia-ming, SHAO Ya-jian, ZHANG Hai-sheng, ARMELLE B, KOU Yong-yuan. Influence rule of early compressive strength and solidification mechanism of full tailings paste with coarse aggregate[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2020, 51(02):478-488.
- [18] QI C, CHEN Q, ANDY F, ZHAO J, ZHANG Q. Pressure drop in pipe flow of cemented paste backfill: Experimental and modeling study[J]. *Powder Technology*, 2018, 333.
- [19] 李国新, 曾志英, 陈畅, 史琛, 李娜. 泥粉对掺高效减水剂水泥浆体流动性的影响及对策研究[J]. 硅酸盐通报, 2013, 32(07):1340-1345+1351.
- LI Guo-xin, ZENG Zhi-ying, CHEN Chang, SHI Chen, LI Na. Influence of Clay Powder on the Fluidity of the Pastes Containing Superplasticizers[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2013, 32(07):1340-1345+1351.
- [20] LIU J, XING F, DONG B Q. Microscopic Mechanism of the Diffusivity of Concrete Chloride Ion[J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 773:687-692.
- [21] 程海勇, 吴爱祥, 王贻明, 王洪江, 王少勇. 粉煤灰-水泥基膏体微观结构分形表征及动力学特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(S2):4241-4248.

CHENG Hai-yong, WU Ai-xiang, WANG Yi-ming, WANG Hong-jiang, WANG Shao-yong. Fractal features and dynamical characters of the microstructure of paste backfill prepared from fly ash based binder[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(S2):4241-4248.

- [22] 陈寅, 郭利杰, 邵亚平, 杨超. 粗骨料膏体充填料浆流变特性与管道输送阻力计算[J]. 中国矿业, 2018, 27(12):178-182.

CHEN Yan, GUO Li-jie, SHAO Ya-ping, YANG Chao. Rheological properties of coarse aggregate paste slurry and calculation of resistance in pipeline transportation[J]. *China Mining Magazine*, 2018, 27(12):178-182.

- [23] 张修香, 乔登攀. 粗骨料高浓度充填料浆的管道输送模拟及试验[J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(01): 258-266.

ZHANG Xiu-xiang, QIAO Pan-deng. Simulation and experiment of pipeline transportation of high density filling slurry with coarse aggregates[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2015, 25(01): 258-266.

- [24] 侯云芬, 郑东昊, 刘锦涛, 司博旸. 搅拌时间对大流动性混凝土拌合物匀质性的影响[J]. 混凝土, 2018(11):86-89+109.

HOU Yun-fen, ZHENG Dong-hao, LIU Jin-tao, SI Bo-yang. Effect of mixing time on homogeneity of high fluidity fresh concrete[J]. *Concrete*, 2018(11):86-89+109.

- [25] YANG L, WANG H, WU A, LI H, TCHAMBA A, ZHOU X, WANG T. Effect of mixing time on hydration kinetics and mechanical property of cemented paste backfill[J]. *Construction and Building Materials*, 2020(247):1-9.