

极细全尾砂胶结充填参数优化的试验研究*

秦健春¹, 康度^{2,3}, 何裕爵⁴

(1.广西科技大学, 广西 柳州市 545005; 2.中钢集团马鞍山矿山研究总院股份有限公司, 安徽 马鞍山市 243000; 3.南华大学, 湖南 衡阳市 421004; 4.崇左市水利投资有限责任公司, 广西 崇左市 532200)

摘要:针对极细全尾砂胶结充填的充填体强度低、胶凝材料消耗量大等问题,以某矿山为实例,通过细粒全尾砂性能评价、自然沉降试验、坍落度试验、配比强度试验和自流输送试验及计算和分析,获得了最佳的充填技术参数。试验结果表明:全尾砂浆沉降24 h后其最大浓度为73.4%,仅靠自然沉降无法满足矿山连续充填作业的要求。当全尾砂浓度为78%以上时,难于实现自流输送。为全尾砂浆浓度为74%~76%、料浆流量为150 m³/h、管道内径为150 mm时,管内料浆流速为2.36 m/s,管道输送阻力为2.1 kPa/m~4.4 kPa/m,可实现自流输送的充填倍线为4~11。当全尾砂浆浓度为76%、灰砂比1:4~1:8时,充填试块60 d的强度为1.78 MPa~3.62 MPa,可满足矿山采空区充填的强度要求。

关键词:极细粒全尾砂;胶结充填;充填参数;参数优化

中图分类号:TD853.34 **文献标识码:**A

文章编号:1005-2763(2020)02-0119-05

随着国家经济的快速发展,矿产资源的需求日益增大,易于开采的资源也随之日益枯竭,多数深部矿山面临着冲击地压大、温度高、湿度大的风险,行业研究人员普遍认同充填采矿法将是深部矿山最适宜的采矿方法之一^[1-2]。

在构建“资源节约型”、“环境友好型”矿山的背景下,充填采矿法^[3-5]的应用是矿山可持续发展的必然要求。充填采矿法的关键技术在于充填料浆的制备,充填料浆主要由充填骨料、胶凝材料和水组成^[6-7]。

在尾砂充填中,尾砂细粒含量的增多将会导致胶凝材料的消耗量增大,降低充填体强度以及影响充填料浆输送参数的稳定性。试验开发细粒全尾砂高强度的充填工艺,以获得最佳充填技术参数,降低充填胶凝材料的消耗量,以期解决细粒全尾砂充填

技术难题,实现细粒全尾砂充填工艺的推广和应用^[8-9]。近年来,国内外研究人员在细粒全尾砂充填方面做了大量研究工作,葛海源等^[10]针对超细全尾砂胶结充填存在的问题,通过物理模拟试验,建立了超细全尾砂结构成分、材料配比等与充填体强度的关系,揭示充填体力学特性及其变化规律;王新民等^[11]为得到超细全尾砂絮凝沉降最优参数,构建BP神经网络预测模型,经试验对比,该模型预测结果相对误差在5%左右,具有一定的工程意义;贺茂坤等^[12]通过极细全尾砂充填试验,研究了极细粒级尾砂的充填料浆制备、输送及充填体强度,提出了提高充填体强度和充填系统可靠性的措施;周旭等^[13]通过超细全尾砂胶结充填试验,验证了超细全尾砂在采空区充填的应用可行性;甘德清等^[14]采用Fluent^{3D}模拟软件研究充填倍线3的条件下,不同浓度超细全尾砂料浆在大直径管道中的流动特征,研究发现灰砂比为1:6时在管道中形成均质流;王勇等^[15]进行细粒全尾砂絮凝沉降特性研究,探索了矿浆停留时间对絮凝剂的影响,得到最佳因素组合。在借鉴上述研究成果的基础上,本文以某矿山充填系统为例,进行细粒全尾砂胶结充填试验研究,通过尾砂性能评价、自然沉降试验、坍落度试验、配比强度试验和自流输送试验,获得了最佳的充填技术参数。

1 充填系统现状

某矿采用自上而下的开采方式,分别开采了细脉带、91号矿体和92号矿体,其中细脉带、91号矿体现已回采完毕,目前正采用崩落法、分段空场法等

* 收稿日期:2020-06-09

基金项目:广西高校中青年骨干教师科研基础能力提升项目(2019KY0381);金属矿山安全与健康国家重点实验室开放基金项目(2020-JSKSSYS-04);湖南省教育厅青年项目(20b517);湖南省自然科学基金项目(2020jj5094)。

作者简介:秦健春(1988—),男,广西桂林人,硕士研究生,工程师,从事矿岩失稳控制及充填工艺研究,E-mail: qinjianchun988@163.com。

通信作者:康度(1986—),男,江西吉安人,博士,副教授,主要从事矿山安全方向的研究,E-mail: 35763205@qq.com。

采矿方法开采位于下部的 92 号矿体。由于井下采空区未进行充填,地压活动频繁,采空区大面积垮落,致使开采技术条件日益恶化、安全隐患大增,矿石损失贫化大,出矿品位低,资源储量难以合理利用。为此,该矿经研究决定改变采矿方法,由崩落采矿法向充填采矿法转换,并重新启用原有的充填系统。受历史原因的影响,之前建设的充填系统已停用多年,井下主要采用废石充填,充填体无法形成强度,不利于控制地压及采场安全,有必要全面改造旧充填系统。为在满足充填质量要求的前提下尽可能降低充填成本,需要通过全尾砂充填试验^[4]来确定充填技术参数。

在细脉带、91 号矿体开采中,该矿山利用块石胶结充填和棒磨砂胶结充填的方式充填采空区,充填系统设计充填能力为 50 万 m³/a。由于受到当时锡、锌金属价格影响,充填成本高,企业利润薄,充填系统被迫于 2002 年关停。现今由于该矿山改用充填采矿法开采,为缩短基建周期,降低建设投资,需重新启用旧充填系统,并对一些充填设施加以利用。由于旧充填系统搁置了多年,机械设施、管道电缆等均已拆除,钢构件也已完全锈蚀。经多次现场考察,确认可利用的充填设施仅厂房(棒磨砂车间、制备间、配电间、仪表间、工具间等)、2 个立式砂仓(Φ11×30.5 m,容积 2043 m³)、2 个水泥仓(Φ7×21.7 m,容积 544 m³)、蓄水池(300 m³)及钢筋混凝土廊道等。

2 充填材料

因该矿选矿厂距离矿区较远,难以经济利用自产尾砂进行充填。为满足之后 3 a~4 a 内临时充填系统用砂需求,可利用该矿山的干堆浓缩尾矿或选矿厂排放尾砂作为充填骨料,待锌多金属选矿厂运行后,再转而利用该选矿厂的尾砂。按照该矿山尾矿干堆工程计划,将选矿厂尾砂经浓缩、压滤后形成全尾砂滤饼进行干堆,采用汽车运送全尾砂滤饼到充填站,然后再二次稀释造浆,经充填系统输送至井下待充填采空区。充填系统中,充填骨料为该矿山尾矿库中尾砂或选矿厂全尾砂,凝结剂为 32.5 标号硅酸盐水泥,充填用水为 2 号水坝中澄净水。

3 尾砂物理化学性质测定

尾砂物理化学性质^[16-17]对胶结充填体的强度、充填料浆的管道输送、渗滤水性能等有着决定性的

作用,为此,充填材料的物理化学性质的测定与性能评价分析是充填试验的重要内容。

3.1 取样

由于该矿山尾矿库全尾砂压滤系统未正常运行,无法取得全尾砂滤饼。经研究可采用 2 种取样方式。

(1) 该矿山尾矿库的干尾砂。由于尾砂排放过程中自然分级,自排放口至溢流井方向粒径逐渐变细,为尽可能接近全尾砂粒级组成,取样时,沿尾砂排放口至溢流井方向间隔取样(共布置 10 个取样点),形成人工全尾砂样品(简称“混合砂”)。

(2) 选矿厂排放的尾砂。在向尾矿库排砂的过程中,难免会产生尾砂自然分级现象,其组分与选矿厂排放的全尾砂浆有较大区别,因此,须对后期生产所使用的真实全尾砂进行取样,以便与人工全尾砂试验结果进行对比分析。

3.2 尾砂物理性质测定

全尾砂及混合砂的物理力学性质见表 1,全尾砂及混合砂的压缩参数^[18-19]见表 2,全尾砂及混合砂的粒径组成与粒径性状^[20-21]见表 3 和表 4。

表 1 尾砂物理力学性质

名称	比重/ (t/m ³)	松散 容重/ (t/m ³)	密实 容重/ (t/m ³)	渗透 系数/ (cm/s)	水上休 止角/ (°)	水下休 止角/ (°)
全尾砂	3.09	1.43	1.57	2.4×10^{-5}	40.5	30.2
混合砂	2.79	1.62	1.72	2.9×10^{-3}	37.8	28.5

表 2 干尾砂压缩参数测定结果

压力/kPa	压缩系数		压缩模量/MPa	
	全尾砂	混合砂	全尾砂	混合砂
0~50	1.67	0.68	1.21	2.41
50~100	0.83	0.22	2.52	7.63
100~200	0.36	0.11	5.85	16.2
200~400	0.18	0.08	12.4	25.1

表 3 尾砂粒径组成/%

名称	(1~5) μm	(5~20) μm	(20~50) μm	(50~75) μm
全尾砂	1.34	8.24	17.51	36.42
混合砂	—	2.56	5.24	0.8
名称	(75~100) μm	(100~500) μm	(500~1000) μm	
全尾砂	34.83	1.48	0.18	
混合砂	38.9	35.4	27.1	

表 4 尾砂粒径性状

名称	体积 密度/ (kg/m ³)	控制粒 径 d_{60} / mm	中值粒 径 d_{50} / mm	d_{30} / mm	d_{10} / mm	不均匀 系数	曲率 系数
全尾砂	3.09	0.02	0.02	0.02	0.02	1.72	1.34
混合砂	2.79	0.37	0.30	0.17	0.08	4.74	0.96

3.3 尾砂化学成分测定

尾砂样品化学成分测定结果见表 5。从表 5 可以看出,混合砂与全尾砂样品化学组成差别较大,混合砂的 SiO₂ 含量较高,而全尾砂的 SiO₂ 含量相对较低。

表 5 尾砂化学成分测定结果/%

名称	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	Fe ₂ O ₃	S
全尾砂	27.62	17.09	6.03	6.93	2.05	26.59	2.95
混合砂	46.85	10.54	14.14	4.48	1.00	3.31	4.57

3.4 尾砂性能评价

(1) 全尾砂粒径较细,将会削弱充填体强度。全尾砂渗透系数仅为 2.4×10^{-5} cm/s,充填体难以脱水和短时间硬化。

(2) 全尾砂不均匀系数较小,与水泥易结合难离析,对充填管道磨损小,易于尾砂输送。

(3) 全尾砂 SiO₂ 的含量为 27.62%,Fe₂O₃ 占 26.59%,仅从化学成分看,在合适粒度组成条件下有利于充填体强度的提高。

(4) 在 100 kPa~200 kPa 压力范围内,全尾砂压缩系数为 $0.36<0.5$,压缩模量为 $5.85\text{ MPa}>4\text{ MPa}$,全尾砂压缩模量大,利于砂浆沉降。

(5) 混合砂与全尾砂相比,不仅颗粒相对较粗(75 μm 以下颗粒所占比例仅为 8.6%),而且 100 μm 以上颗粒占比达到 62.4%,而全尾砂含 100 μm 以上颗粒仅为 1.7%。更为重要的是,混合砂与全尾砂中化学成分含量差别较大。因此,经研究决定,采用全尾砂进行试验研究。

4 全尾砂充填试验

全尾砂自然沉降试验结果见表 6。

表 6 全尾砂自然沉降试验结果

时间/ min	清水净 增量/ mL	清水 总量/ mL	料浆 量/ mL	总量/ mL	沉降后 料浆浓 度/%	沉降后料 浆体密度/ (g/cm ³)
0	0	0	1000	1000	40	1.36
10	240	240	760	1000	48.6	1.48
30	85	535	465	1000	65.9	1.78
50	5	590	410	1000	70.5	1.89
70	10	600	400	1000	71.5	1.91
90	10	610	390	1000	72.4	1.93
120	5	615	385	1000	72.9	1.95
180	5	620	380	1000	73.4	1.96
360	0	620	380	1000	73.4	1.96
720	0	620	380	1000	73.4	1.96
1440	0	620	380	1000	73.4	1.96

全尾砂充填料浆坍落度测定见表 7。

表 7 全尾砂砂浆坍落度试验结果

质量浓度/%	用料量		坍落度/cm
	全尾砂/kg	水/kg	
80	15	3.75	25.5
78	15	4.23	27.6
76	15	4.74	27.9
74	15	5.27	28.3

全尾砂配比强度试验结果见表 8。

表 8 全尾砂配比强度试验结果

灰砂比	浓度/%	强度/MPa			
		3 d	7 d	28 d	60 d
1∶3	78	1.85	2.04	3.63	5.25
1∶3	76	1.43	1.75	3.04	4.33
1∶3	74	1.44	1.75	3.02	3.83
1∶4	78	1.36	1.53	2.93	4.00
1∶4	76	0.95	1.23	2.51	3.62
1∶4	74	0.88	1.09	2.47	3.63
1∶6	78	0.95	1.35	2.25	2.95
1∶6	76	0.64	0.82	1.49	2.08
1∶6	74	0.61	0.88	1.46	1.98
1∶8	78	0.38	0.68	1.33	1.91
1∶8	76	0.49	0.63	1.22	1.78
1∶8	74	0.30	0.38	0.88	1.41

对不同浓度全尾砂料浆进行 L 型管道自流输送试验,得出的试验结果见表 9。

表 9 全尾砂充填料流动性试验结果

质量浓度/ %	坍落度/ cm	料浆容重/ (t/m ³)	料浆流速/ (m/s)	静料柱高/ cm
78	27.6	2.12	0.49	20
76	27.9	2.06	1.49	6
74	28.3	2.01	2.56	3

不同料浆流量在不同充填管径内的流速测试结果见表 10。

表 10 不同管径内料浆流速测试结果/(m/s)

管道内径/mm	料浆流量/(m ³ /h)			
	130	140	150	160
130	2.72	2.93	3.14	3.35
140	2.35	2.53	2.71	2.89
150	2.05	2.20	2.36	2.52
160	1.80	1.94	2.07	2.21

不同料浆浓度、料浆流量及管道直径条件下,料浆流动阻力及充填倍线的计算结果见表 11 和表 12,其中,充填倍线小于 1 时,表示无法实现自流输送。

表 11 不同流量及管径时的充填料浆流动阻力/(kPa/m)

质量浓度/ %	管道内径/ mm	料浆流量/(m ³ /h)			
		130	140	150	160
78	130	20.40	21.88	23.36	24.85
	140	15.38	16.48	17.58	18.68
	150	11.85	12.69	13.52	14.36
	160	9.32	9.96	10.61	11.25
76	130	6.62	7.10	7.59	8.07
	140	4.99	5.35	5.70	6.06
	150	3.84	4.11	4.39	4.66
	160	3.02	3.23	3.44	3.65
74	130	3.17	3.40	3.63	3.86
	140	2.39	2.56	2.73	2.90
	150	1.84	1.97	2.10	2.23
	160	1.45	1.55	1.65	1.75

表 12 不同输送参数下可实现的自流输送充填倍线

质量浓度/ %	管道内径/ mm	料浆流量/(m ³ /h)			
		130	140	150	160
78	130	0.89	0.83	0.77	0.73
	140	1.174	1.10	1.03	0.97
	150	1.523	1.42	1.34	1.26
	160	1.94	1.81	1.70	1.60
76	130	2.65	2.47	2.31	2.18
	140	3.52	3.28	3.08	2.89
	150	4.57	4.27	4.01	3.77
	160	5.82	5.44	5.10	4.81
74	130	5.39	5.03	4.71	4.43
	140	7.15	6.67	6.26	5.89
	150	9.28	8.67	8.13	7.66
	160	11.81	11.04	10.37	9.77

(1) 自然沉降试验结果表明,全尾砂经过沉降 24 h 后,最大浓度为 73.4%、最大体积密度为 1.96 g/cm³。全尾砂自然沉降速率很慢,工程应用中需要在全尾砂浆浆中添加絮凝剂,以加快砂浆沉降。

(2) 坍落度试验及输送性能分析计算结果表明,当料浆浓度为 74%~78%时,坍落度为 28.3 cm~27.6 cm。当料浆浓度为 78%以上时,难于实现自流输送。料浆浓度为 74%~76%、料浆流量为 150 m³/h、管道内径为 150 mm 时,管内料浆流速为 2.36 m/s,管道输送阻力为 2.1 kPa/m~4.4 kPa/m,可实现自流输送的充填倍线为 4~11。

(3) 配比强度试验结果表明,影响充填体强度的主要因素是灰砂比(水泥添加量)、料浆质量浓度、试块养护龄期。当浓度一定时,水泥添加量越多,试块凝结速度越快,各龄期试块的强度越大。参考国内相似矿山充填体强度的要求,胶结充填体可以自立的充填强度为 1.5 MPa 左右。从表 8 中的试验结果可以看出,当充填料浆的浓度为 76%、灰砂比

1:4~1:8 时,充填体的 60 d 强度为 1.78 MPa~3.62 MPa,可满足采空区充填的强度要求。

5 结论

(1) 该矿山尾矿库干尾砂与选矿厂全尾砂物理力学性质及化学成分测定结果表明,两种尾砂粒径组成和化学成分组成差异较大。其中选矿厂全尾砂粒级较细,同比充填体强度稍低,充填体难以脱水和短时间硬化,但与水泥易结合难离析,对充填管道磨损小,易于料浆的管道输送。

(2) 自然沉降试验结果表明,全尾砂浆浆沉淀 24 h 后,其最大浓度为 73.4%,最大体积密度为 1.96 g/cm³,全尾砂自然沉降速率慢,仅靠自然沉降无法实现矿山的连续充填作业。为此,在工程应用中需要在全尾砂浆浆添加絮凝剂,以加快全尾砂砂浆的沉降速度。

(3) 输送性能分析计算结果表明,料浆浓度为 78%以上时,难于实现料浆的自流输送。当料浆浓度为 74%~76%、料浆流量为 150 m³/h、管道内径为 150 mm 时,管内料浆流速为 2.36 m/s,管道输送阻力为 2.1 kPa/m~4.4 kPa/m,可实现料浆自流输送的充填倍线为 4~11。配比强度试验结果表明,当料浆浓度为 76%、灰砂比为 1:4~1:8 时,充填体的 60 d 强度为 1.78 MPa~3.62 MPa,可满足采空区充填的强度要求。

参考文献(References):

[1] 王新民,古德生,张钦礼.深井矿山充填理论与管道输送技术[M].长沙:中南大学出版社,2010:9-10.

[2] 肖刚,张君鹏,孙胜.大尹格庄金矿尾砂胶结充填实验研究[J].有色金属(矿山部分),2016,68(6):12-15.

[3] 许文远,郭利杰,杨小聪.安庆铜矿不同颗粒级配尾砂优化组合膏体充填技术[J].金属矿山,2018(1):16-20.

[4] 李一帆,张建国,邓飞,等.深部采空区尾砂胶结充填体强度特性实验研究[J].岩土力学,2005,26(6):865-868.

[5] Li X B, Du J, Gao L, et al. Immobilization of phosphogypsum for cemented paste backfill and its environmental effect [J]. Journal of Cleaner Production, 2017,156:137-146.

[6] 栗著,张德明,张钦礼.金矿尾矿胶结充填实验及环境效应研究[J].黄金科学技术,2019,27(6):912-918.

[7] 王丽红,鲍爱华,罗园园.中国充填技术应用与展望[J].矿业研究与开发,2017,37(3):1-7.

[8] 焦华喆,吴爱祥,王洪江,等.全尾砂絮凝沉降特性实验研究[J].北京科技大学学报,2011,33(12):1437-1441.

[9] 杨超,郭利杰,王劼,等.某金矿大倍线加压充填技术研究与应
用[J].黄金科学技术,2019,27(1):89-96.

[10] 葛海源,陈超,李洪宝,等.超细全尾砂充填体强度增长规律
实验研究[J].现代矿业,2014(7):10-13.

[11] 王新民,刘吉祥,陈秋松,等.超细全尾砂充填体强度增长规
律实验研究[J].科技导报,2014,32(17):23-18.

[12] 贺茂坤,吴世剑.极细全尾砂充填实验研究[J].中国矿山工
程,2013,43(4):26-29+49.

[13] 周旭,杨陆海,陈建新.超细全尾砂胶结充填实验研究[J].中
国矿山工程,2016,45(2):8-11.

[14] 甘德清,高峰,陈超,等.超细全尾砂料浆在大直径管道中流
动特性研究[J].中国矿业,2015,24(9):93-97+101.

[15] 王勇,王洪江,吴爱祥,等.细粒全尾矿絮凝沉降特性研究
[J].黄金,2012,33(1):48-51.

[16] 姚中亮.全尾砂结构流体胶结充填的理论与实践[J].矿业研
究与开发,2006,26(S1):15-18+48.

[17] 柳小胜,扈守全,梁超,等.玲南金矿尾砂充填系统改造[J].
矿冶工程,2015(1):17-19.

[18] 梁峰,杨晓炳,边振辉,等.低成本绿色充填胶凝材料实验研
究[J].矿业研究与开发,2019,39(10):16-20.

[19] 徐艳方,宋钊刚,温海滨,等.大红山铁矿细粒级尾砂胶结充
填材料充填强度试验研究[J].现代矿业,2019,(9):89-91.

[20] 皇甫凤成,邓代强,康瑞海,等.阿舍勒铜矿充填材料实验研
究[J].有色金属(矿山部分),2016(2):87-90.

[21] Laky D, Licsko I. Arsenic removal by ferricchloride
coagulation-effect of phosphate, bicarbonate and silicate[J].
Water Science and Technology, 2011, 64(5):1046-1055.

Study on Parameters Optimization of Cemented Filling Test with Ultrafine Full Tailings

QIN Jianchun¹, KANG Qian^{2,3}, HE Yujue⁴

(1.Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou, Guangxi 545005, China;

2.Sinosteel Maanshan General Institute of Mining Research Co., Ltd, Maanshan, Anhui 243000, China;

3.University of South China, Hengyang, Hunan 421004, China;

4.Chongzuo Water Conservancy Investment Co., Ltd, Chongzuo, Guangxi 532200, China)

Abstract: Aiming at the problems of low strength of backfill and large consumption of cementitious materials in cemented filling with ultrafine full tailings, taking a mine as an example, the best filling technical parameters were obtained through performance evaluation of fine full tailings, natural settlement test, slump test, proportioning strength test, gravity transportation test, as well as calculation and analysis. The test results show that, the maximum concentration of the full tailings slurry is 73.4% after 24 hours of settlement, and the natural settlement can not meet the requirements of continuous filling operation. When the concentration of the full tailings is above 78%, it is difficult to realize gravity transportation. When the concentration of the full tailings is 74%~76%, the slurry flow rate is 150 m³/h, and the inner diameter of the pipe is 150 mm, the slurry flow rate in the pipe is 2.36 m/s, and the pipeline transportation resistance is 2.1 kPa/m~4.4 kPa/m, which can realize the gravity transportation under filling times line of 4~11. When the concentration of full tailings is 76% and the ratio of cement to sand is 1:4~1:8, the strength of backfill test block is 1.78 MPa~3.62 MPa in 60 days, which can meet the strength requirements of goaf filling.

Key words: Ultrafine full tailings, Cemented filling, Filling parameters, Parameters optimization