

露天矿坑封底关键层回填体配比优化研究

Research on Optimization of Backfill Ratio of Key Layer Bottom Sealing in Open Pit

宁辰禹¹, 王瑞雪¹, 蔚健¹, 吴迪²

(1. 鞍钢集团矿业设计研究院有限公司, 辽宁 鞍山 114000; 2. 北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 100083)

摘要: 露天坑回填治理是实现露天开采矿区生态治理和解决尾矿地表堆存问题的有效途径, 本文以鞍钢集团大孤山铁矿为工程背景, 通过前期试验探索初步确定了料浆配比的浓度、灰砂比等参数的范围, 在此范围的基础上进行全面试验, 测定胶结体试件的单轴抗压强度、抗剪强度参数。基于全面试验的试验结果分析得出了灰砂比、料浆浓度、养护龄期等因素对胶结体单轴抗压强度和抗剪强度参数的影响规律, 为后续露天坑回填治理提供了可靠的参考依据。

关键词: 回填体; 料浆配比; 单轴抗压强度

中图分类号: TD853

文献标志码: A

文章编号: 1672-609X(2023)04-0016-08

Abstract: Backfilling treatment of open pit is an effective way to realize ecological treatment of open pit mining area and solve the problem of tailing surface accumulation. Based on the engineering background of Dagushan Iron Mine of Angang Group, this paper preliminarily determined the range of parameters such as the concentration of slurry ratio and the ratio of ash and sand through preliminary tests, and conducted a comprehensive test on the basis of this range. The uniaxial compressive strength and shear strength parameters of the cemented specimens were measured. Based on the comprehensive test results, the influences of lime sand ratio, slurry concentration, curing age and other factors on the uniaxial compressive strength and shear strength parameters of the cemented body are obtained, which provides a reliable reference for the subsequent backfilling treatment of open pit.

Key words: backfill body; slurry ratio; uniaxial compressive strength

1 前言

大孤山铁矿隶属鞍钢集团矿业有限公司, 是鞍钢铁矿石原料主要生产基地之一, 自建矿以来, 历经多年的开采, 从原来 260 m 高的孤山顶采至当前 -354 m 左右的大型深凹露天铁矿。目前大孤山铁矿正在进行露天生产, 经设计估算, 露天开采预计 2024 年 3 月结束, 届时将由露天开采转为井下开采, 同时需要对露天矿坑进行回填复垦, 恢复矿区原有生态环境^[1-2]。

众所周知, 胶凝材料的添加量既决定尾砂胶结体的强度与稳定性, 又是影响封底加固层制备成本的重要因素^[3-4]。全尾砂具有颗粒细小、级配不合理、含泥量高、脱水困难等特点。水泥添加量较低时, 全尾砂无法完全胶结, 堆排体在降雨、地震工程扰动下会泥化、流化、失稳^[5-6]。尾砂中重金属也会随水浸出, 排放到环境中, 对环境造成损伤。水泥添

加量较大时, 全尾砂能够较好的胶结, 但胶结成本高^[7-8]。为满足大孤山铁矿露天坑回填要求, 本文将选取东部矿区选厂和大孤山球团厂选厂的尾砂作为试验原材料, 对不同浓度及不同灰砂比条件下的尾砂胶结体进行物理力学特性试验, 研究尾砂胶结体强度与配比之间的关系, 为选择合适的胶凝材料配比提供依据。

2 试验

2.1 试验材料

实验用到的材料主要包括鞍山大孤山铁矿全尾砂、普通硅酸盐水泥(标号 P. O42.5)和水, 其中实验用水为普通自来水。尾砂粒级组成是影响最终形成胶结体力学性能的重要物理参数, 对封底加固层的力学性能有直接影响, 这既与脱水工艺相关, 更与胶凝材料用量有关。若尾砂中细粒级物料含量多, 达到相同的胶结效果则需要更多的胶凝材料。图 1 和表 1 为采用丹东百特仪器有限公司生产的 Bettersize2600 型激光粒度分析仪测得的全尾砂粒度分布图和基本性能参数。通常认为, 尾砂中小于 -20 μm 的颗粒占比超过 15% 时, 该尾砂所制料浆具有较好的保水性, 从试验结果

[作者简介] 宁辰禹(1992—), 男, 工程师, 从事矿山开采设计工作。

[引用格式] 宁辰禹, 王瑞雪, 蔚健, 等. 露天矿坑封底关键层回填体配比优化研究[J]. 中国矿山工程, 2023, 52(4): 16-23.

可知该尾砂的该项参数为 27.86%，满足基本要求。另外,从不均匀系数和曲率系数来看,该尾砂的粒径分布范围和分布连续性均满足尾砂充填的一般性要求。

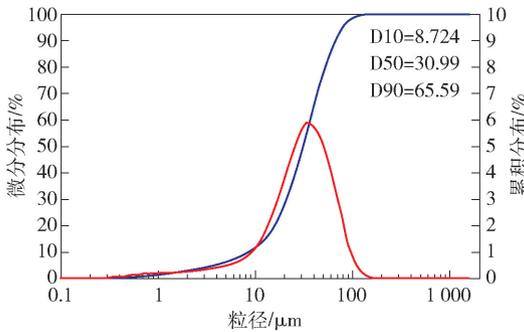


图1 全尾砂粒度分布图

表1 试验全尾砂基本性能参数

比重/ $g \cdot cm^{-3}$	容重/ $g \cdot cm^{-3}$	$D_{10}/\mu m$	$D_{25}/\mu m$	$D_{50}/\mu m$	$D_{90}/\mu m$	不均匀系数 C_u	曲率系数 C_c
2.8	1.62	8.72	18.51	30.99	65.59	4.12	1.31

表2 胶结体力学参数试验方案

参数名称	料浆浓度	灰砂比	养护龄期	测试内容
参数设置	68%	1:4	3 d	单轴抗压试验
	70%	1:10	7 d	
	72%	1:15	28 d	楔形剪切试验
		1:20		

备主要包括 JJ-5 型水泥胶砂搅拌机、东测试验压力机、标准恒温恒湿养护箱、普通天平、电子天平、5 cm × 10 cm 圆柱型试模和 7.07 cm × 7.07 cm × 7.07 cm 试模、振动台、刮刀以及量筒等。需要说明的是 5 cm × 10 cm 圆柱型试模是用于单轴抗压强度试验的试件制作,7.07 cm × 7.07 cm × 7.07 cm 试模则是用于楔形剪切试验的试件制作。

1) 原材料准备

从选厂取出的尾砂由于含水量较大,需要对其进行 80 °C 高温下烘干处理,在此温度下尾砂内部成分不会发生化学反应,烘干过程如图 2 所示。



图2 尾砂烘干处理

2.2 试验方案

本试验设置 68%、70% 和 72% 三种料浆浓度,灰砂比则设置有 1:4、1:10、1:15、1:20 四种,养护龄期为 3 d、7 d 和 28 d。采用全面试验。对不同龄期试块做单轴抗压试验和楔形剪切试验,其中楔形剪切试验采用 20°、30°、40° 和 45° 的四种模具进行测试,每个模具均需要进行试验,以提高拟合精确度,每次试验需要 3 个试块,求其平均值作为本次试验的结果。表 2 为具体的试验方案。

2.3 试验设备与方法

试验主要包括尾砂等原材料的准备(大块剔除、烘干等)、原材料的称量与料浆配制、试块制作与养护、性能参数测试。试验过程中需要用到的设

2) 试块制作与养护

将适量的水泥、全尾砂倒入搅拌锅内,开动水泥胶砂搅拌机,使其搅拌均匀,然后停机,注水,继续搅拌 160 s,机器暂停时将粘在叶片上的料浆刮下,然后继续搅拌 80 s 后停机,再将粘在叶片上的料浆刮下,取下搅拌锅。

成型前,将试模擦净,四周模板均匀涂抹黄油,紧密装配,防止漏浆和变形,内壁均匀刷涂一薄层机油,以便于脱模。将料浆利用刮刀刮入试模中,置于胶砂振动台震动,使其均匀密实,然后用刮刀将试块表面多余的料浆刮去并抹平,然后给试块编号。编号后,将试模放入水泥混凝土标准养护箱养护,试块成型 24 h 后拆模,继续置入养护箱内养护。养护温度为 $20 \pm 1 \text{ } ^\circ\text{C}$ 、湿度 $\geq 95\%$,养护龄期为 3 d、7 d、28 d。试块浇筑与养护过程如图 3 所示。



图3 试块浇筑与养护

3) 性能参数测试

在养护龄期达到设定值后,即可将试件取出并进行单轴抗压强度和抗剪强度测试,测试过程如

图4所示。进行单轴抗压强度测试时,需清除试块受压面和上下加压板间的砂粒或杂物,将试块放置在压力试验机压板中心,压力机的加载速度按规定应为 $5.0 \pm 0.5 \text{ kN}$;而进行抗剪强度测试时,采用的即倾斜压模法,通过该方法获得到尾砂胶结体的内摩擦角 ϕ 和黏聚力 C 的值,以及剪切破坏面上的正应力和剪应力。试验中所使用的每个角度的模具均取3~5个试块进行测试,以保证结果的可靠性。

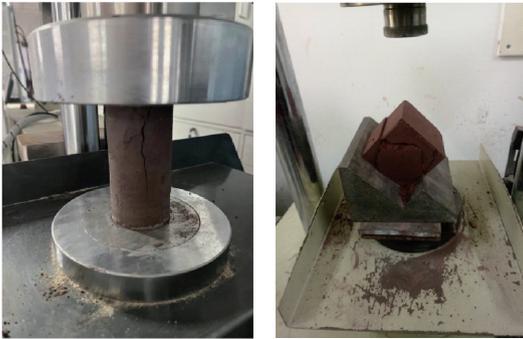


图4 抗压与抗剪强度测试

3 试验结果与分析

3.1 单轴抗压强度与分析

通常来说影响全尾砂胶结体强度的因素主要包括料浆浓度、灰砂比和养护时间三类,本文将针对这三类因素对胶结体的单轴抗压强度的影响规律展开研究,为后续充填料浆配比的选择提供可靠依据。试件单轴抗压强度的试验结果见表2,包括了不同浓度下不同灰砂比各龄期的单轴抗压强度数据。

1) 灰砂比对单轴抗压强度的影响规律分析

图5可知,在料浆浓度68%、70%、72%水平

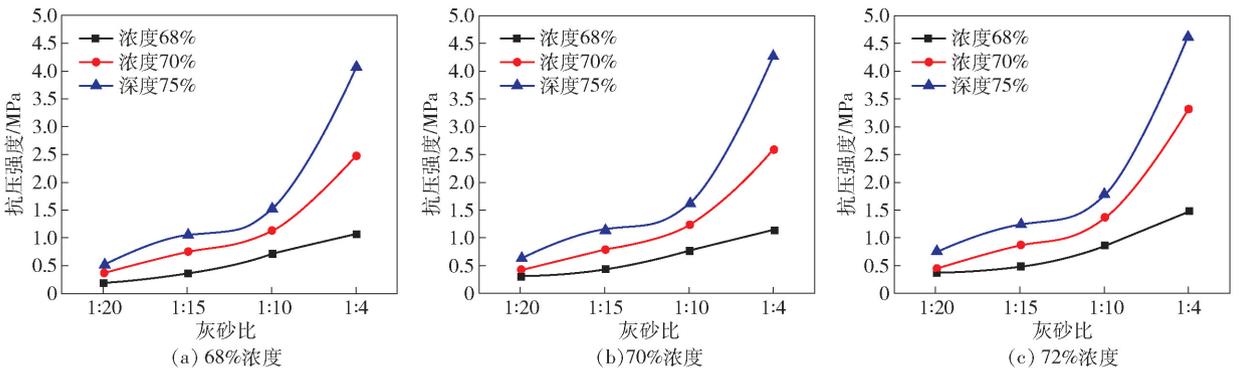


图5 抗压强度-灰砂比增长曲线

综上所述可以看出,灰砂比在1:20~1:4,随着灰砂比的增加,胶结体抗压强度增加,其增长幅度随受养护龄期影响较小,受浓度影响较大。

表2 单轴抗压强度试验结果

料浆浓度	灰砂比	3 d	7 d	28 d
		强度/MPa	强度/MPa	强度/MPa
68%	1:4	1.09	2.48	4.08
	1:10	0.72	1.15	1.53
	1:15	0.37	0.76	1.07
	1:20	0.21	0.38	0.54
70%	1:4	1.14	2.59	4.26
	1:10	0.77	1.23	1.62
	1:15	0.43	0.79	1.16
	1:20	0.31	0.42	0.63
72%	1:4	1.48	3.33	4.65
	1:10	0.87	1.37	1.79
	1:15	0.49	0.88	1.25
	1:20	0.38	0.45	0.76

下,3 d单轴抗压强度的分布曲线为上凸型,曲率较大,曲线很平缓,原因是3 d水泥的强度为初凝强度;料浆浓度较小时(68%),7 d、28 d单轴抗压强度增长较慢,料浆浓度较大时(70%、72%),7 d、28 d单轴抗压强度增长较快;灰砂比小于1:15时,3 d、7 d、28 d的单轴抗压强度距离较近,胶结体试件抗压强度增长速度并不明显。当灰砂比较大(1:15以上),抗压强度增长速度变得明显起来。可以看出,通常情况下7 d、28 d时的抗压强度增长速度较为接近,而3 d时的抗压强度增长速度受浓度影响较大;在低掺量(水泥)范围内,由于胶结能力得不到发挥,各龄期在绝对值上差异不明显,随着掺量增大,抗压强度增大倍数稍高于或等于掺量增长率。

2) 浓度对单轴抗压强度的影响规律分析

图6中的(a),(b),(c),(d)为相同灰砂比条件下,不同龄期、浓度条件下强度的增长变化曲线。

图中可以看出,当龄期增大时,胶结体抗压强度显著增加;而随着料浆浓度增加,胶结体抗压强度有一定

的增加,但整体变化趋势并不显著。

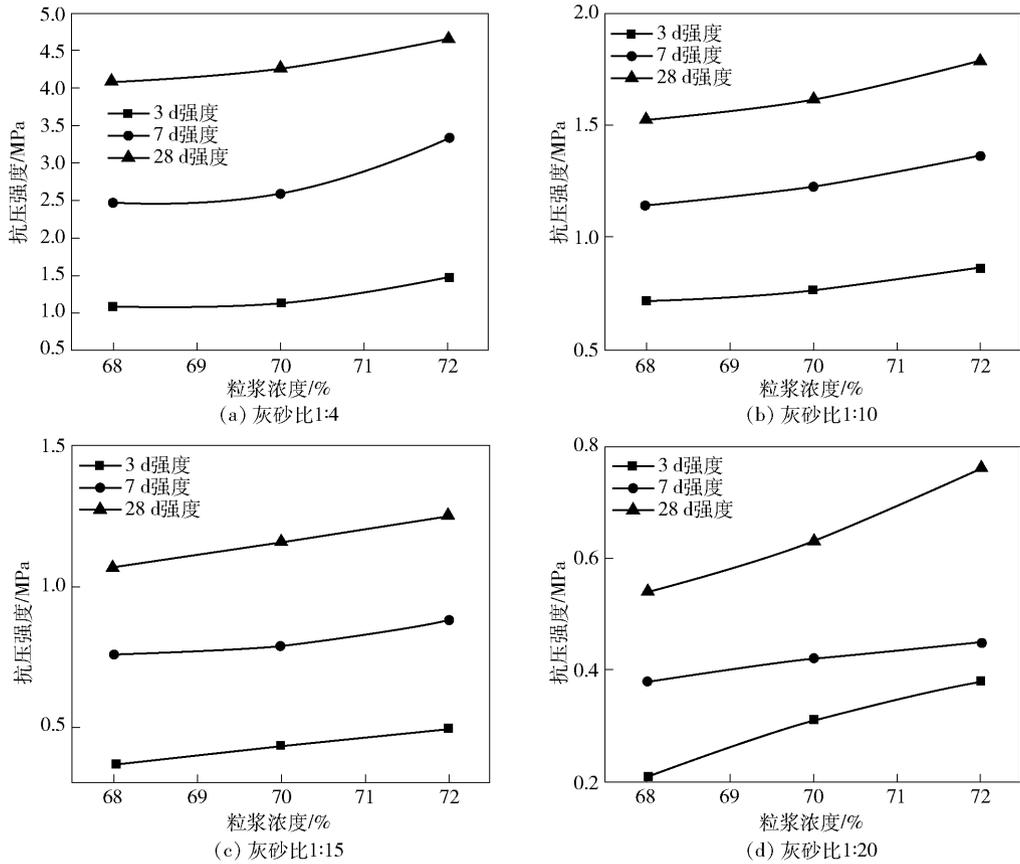


图6 不同灰砂比下抗压强度随浓度及龄期变化曲线

可以看出,胶结体强度随料浆浓度变化并非线性增加或减小,浓度的这种影响在养护 28 d 后比较显著,养护 3 d、7 d 时不够显著。整体上看,浓度对胶结体强度影响较小,且并非浓度越大胶结体强度越大。料浆浓度过大,水泥添加量较小时反应可能不充分,导致胶结体强度较低;料浆浓度过小,泌水量较大,孔隙结构发育,也会导致胶结体强度降低。

稀释;寒区堆排,胶结体要受到冻融的循环损伤;干旱地区,会产生干缩裂纹。因此,采取合理的工艺,保证全尾砂胶结的养护条件也尤为重要。

4) 单轴抗压强度与各因素的数值关系

3) 龄期-标准养护阶段增长规律

图7所示为不同浓度下标准养护阶段料浆龄期-灰砂比强度关系曲线,可以看出灰砂比对试件强度随龄期增长的变化影响极其明显,无论何种浓度,都具有同一性,灰砂比越大,曲线越陡,即强度增长越快。同时灰砂比对于试块早期3d的强度的影响较小,对于长期7d、28d的影响逐渐增大,曲线呈现下凹形证明了这一点。

如图8所示,将3d、7d、28d强度作为因变量,灰砂比作为单一变量作图分析,说明灰砂比因素与强度的关系。而且图8(a),(b),(c)中灰砂比小于1:20时,各浓度的强度值差距较小;三条曲线都是由灰砂比较大时的放射状离散,随着灰砂比的减小逐渐聚合一点,呈现牛角状分布;如果控制各浓度水平料浆的灰砂比为固定值,对于3d、7d强度曲线,灰砂比大于1:15以后,72%浓度的强度偏离70%和68%浓度的强度曲线,而这两条曲线在灰砂比小于1:10时彼此平行且距离很近,灰砂比大于1:15以后彼此才产生偏离,说明灰砂比越大,浓度的效应越明显,掺量较小时浓度作用微弱。68%浓度曲线和70%浓度曲线在28d强度值上是近于平行的,这说明在一定浓度范围内,在灰砂比固定的情况下

不同于井下充填,尾砂地面堆排时受地表环境影响较大。多雨地区料浆养护要受到雨水的影响而

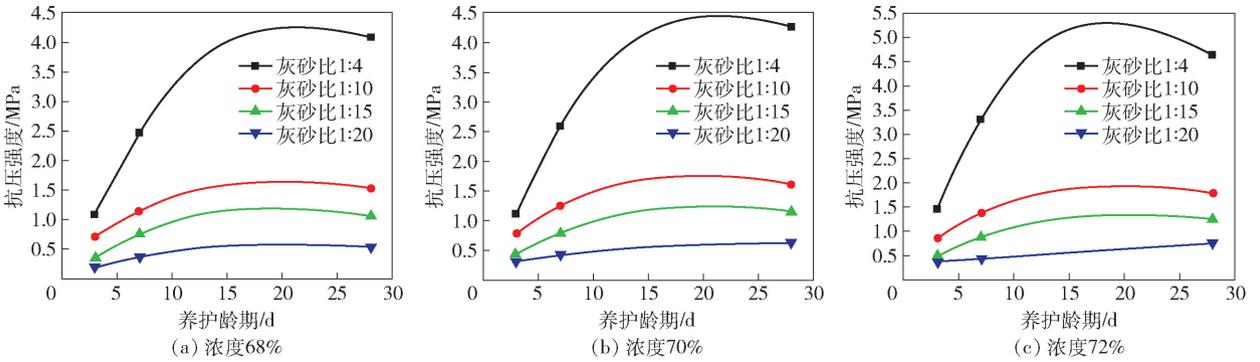


图7 不同浓度下标准养护阶段料浆龄期-灰砂比强度关系曲线

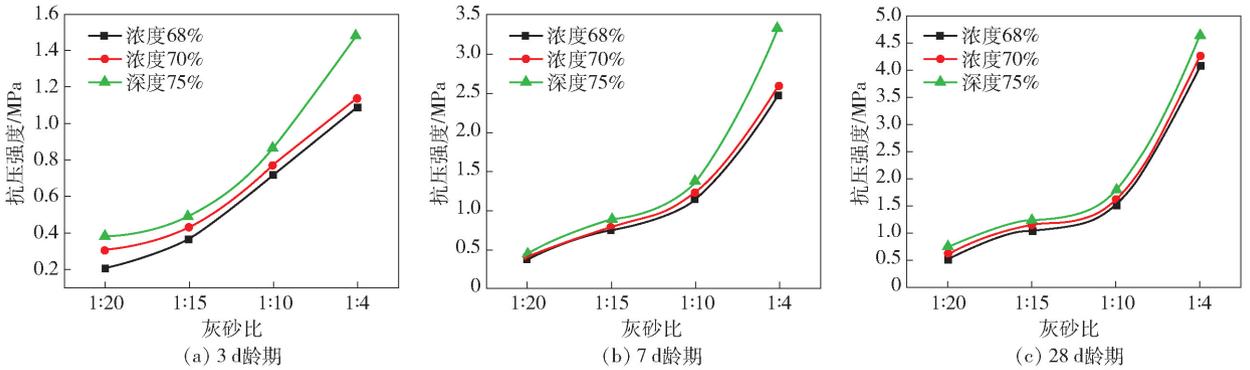


图8 不同龄期下标准养护阶段尾砂胶结体试块抗压强度增长曲线

28 d强度的差值是固定的,这与图8(a),(b)中牛角状分布曲线的偏离规律不同,但根据牛角分布曲线末端的发展趋势也是符合差值固定规律的。

分析图8可知,随着胶凝材料添加量的增加,胶结体强度增加。这种增加在浓度较高时更为明显(72%)。浓度降低时,强度随胶凝材料增长趋势降低。此外,分析还可看出,灰砂比由1:20增加到1:15时,胶结体强度变化幅度不大,由1:15增加到1:4时,胶结体强度增加开始明显。

3.2 抗剪强度与分析

评价尾砂胶结体抗剪强度大小,仅从单一的黏聚力或内摩擦角来考察是不够全面的,这主要是因为散体物料的抗剪强度是由内摩擦角和黏聚力共同产生的,要将两者区分清楚十分困难,因此,除将两者综合考虑,采用散体抗剪强度来综合评价,且需探讨内摩擦角和黏聚力作用的大小。通过对剪切试验结果进行拟合等处理后可得到不同试件各龄期的剪切参数,具体结果见表9、表10、表11。

1) 浓度及灰砂比对内聚力的影响规律

对于非饱和土,由于水的张力作用会产生负孔隙水压力,在外表现为有效应力-即表观内聚力;对于超胶结,超压密的饱和黏土,由于历史上的卸荷作

表9 养护3 d不同浓度、灰砂比的C和φ

料浆浓度	灰砂比	C/MPa	tan φ	φ/(°)
72%	1:4	0.52	0.42	22.78
	1:10	0.48	0.08	4.57
	1:15	0.31	0.34	18.78
	1:20	0.11	0.26	14.57
70%	1:4	0.56	0.31	17.22
	1:10	0.21	0.64	32.62
	1:15	0.11	0.44	23.75
	1:20	0.054	0.43	23.27
68%	1:4	0.34	0.49	26.10
	1:10	0.28	0.26	14.57
	1:15	0.087	0.29	16.17
	1:20	0.065	0.24	13.50

用,土体回弹使含水率增大;若不能充分吸水,则土体中产生负孔隙水压力,代替卸荷的有效应力,此时土体非常坚硬,表观黏聚力非常大。在本次试验中,黏聚力主要是水泥的化学作用,考虑到砂浆泌水胶结也是正常胶结过程,所以忽略表观黏聚力与真黏聚力的差别,统一作为内聚力。

表 10 养护 7 d 不同浓度、灰砂比的 C 和 φ

料浆浓度	灰砂比	C/MPa	tan φ	φ/(°)
72%	1:4	1.64	0.45	24.23
	1:10	0.71	0.53	27.92
	1:15	0.83	0.38	20.81
	1:20	0.35	0.15	8.53
70%	1:4	0.79	0.63	32.21
	1:10	0.54	0.60	30.96
	1:15	0.64	0.39	21.31
	1:20	0.27	0.18	10.20
68%	1:4	0.68	0.72	35.75
	1:10	0.53	0.55	28.81
	1:15	0.37	0.38	20.81
	1:20	0.27	0.21	11.86

表 11 养护 28 d 不同浓度、灰砂比的 C 和 φ

料浆浓度	灰砂比	C/MPa	tan φ	φ/(°)
72%	1:4	2.17	0.56	29.25
	1:10	1.96	0.26	14.57
	1:15	1.64	0.32	17.74
	1:20	0.67	0.13	7.41
70%	1:4	2.57	0.14	7.97
	1:10	1.28	0.51	27.02
	1:15	1.08	0.32	17.74
	1:20	0.69	0.18	10.20
68%	1:4	1.87	0.52	27.47
	1:10	1.34	0.29	16.17
	1:15	0.89	0.44	23.75
	1:20	0.57	0.17	9.65

图 9 所示为料浆浓度及灰砂比对内聚力 c 的影响曲线,比较灰砂比与单轴抗压强度的关系曲线,可

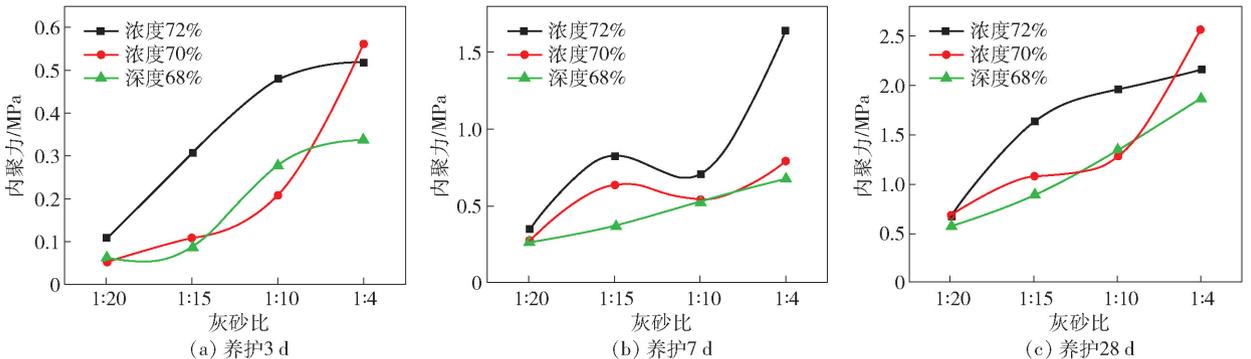


图 9 料浆浓度及灰砂比-内聚力曲线

知内聚力对这两个因变量的影响具有一致性。随着灰砂比的增加,胶结体内聚力呈增长趋势,随着料浆浓度的增大,内聚力也有显著的增大。内聚力增加说明水化反应增加了尾砂颗粒之间的黏结力,而灰砂比的增加恰恰提供了更多的水化产物,增大了这种黏结力。料浆浓度的增加虽有可能降低反应的程度,但由于其泌出水少,孔隙较少,胶结体内颗粒间黏结力更大。

从图 10 可以看出,随着胶结体养护龄期的增加,胶结体内聚力显著增加。其中,相比于养护 3 d 时的变化曲线,养护 7 d、28 d 时的胶结体内聚力增加更为显著。由于水泥性能的发挥,3 d 内聚力增长倍数与掺量增长倍数几乎相等,但是 7 d、28 d 增长倍数就远高于掺量的增大。

2) 内摩擦角变化规律分析

摩擦强度取决于剪切面上的正应力 σ 和内摩擦角 φ。从微观角度来描述,内摩擦包括颗粒之间相互滑动时所产生的滑动摩擦和颗粒之间的咬合摩擦,即剪胀分量。密砂的强度主要由滑动及咬合摩擦阻力构成,而松砂主要来源为滑动摩擦阻力及颗粒重分布摩擦阻力。

滑动摩擦一般是固定的常数,太沙基认为颗粒间接触面非常小,所以常会在凸起的点产生屈服,滑动力是由接触面积与抗剪强度决定。现代钻着摩擦理论指出,土体的摩擦强度也是一种分子行为,因为接触处距离是单分子尺度,会形成吸附作用。

对于细砂或粗砂等粗粒土,在低应力作用下,峰值内摩擦角取决于初始孔隙比 e,周围压力对内摩擦角的影响较小,这与黏性土取决于剪破时的孔隙比不同。如果空隙比 e 相同,那么内摩擦角就相同;由于细砂最大密实度要大于粗砂,在相同的相对密度条件下,粗砂的内摩擦角要大于细砂。

一般将砂土的天然休止角认为是剩余摩擦角,而且与初始孔隙比无关,无塑性粉砂的剩余摩擦角为 $26^{\circ} \sim 30^{\circ}$,中密粉砂为 $28^{\circ} \sim 32^{\circ}$,密实粉砂为 $30^{\circ} \sim 34^{\circ}$ 。

图 11 所示为料浆浓度、灰砂比对内摩擦角的影响曲线。可以看出,随着灰砂比的增加,胶结体内摩擦角呈增大的趋势;而随着浓度的变化,内摩擦角

的变化并无一致规律。整体上看,胶结体试件内摩擦角变化范围为 $5^{\circ} \sim 35^{\circ}$ 。

图 12 所示为养护龄期灰砂比对内摩擦角的影响曲线。可以看出,养护龄期对的内摩擦角影响也无一致规律,胶结体内摩擦角变化范围为 $5^{\circ} \sim 35^{\circ}$ 。

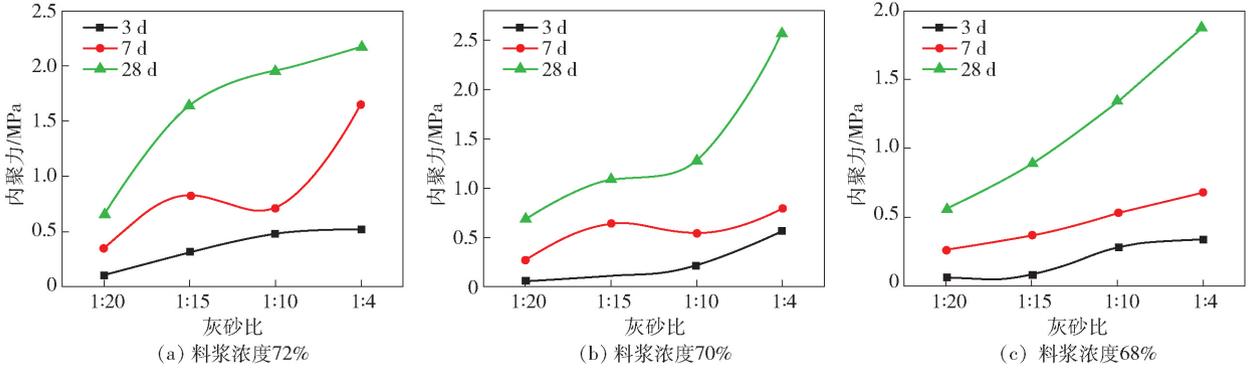


图 10 养护龄期及灰砂比-内聚力曲线

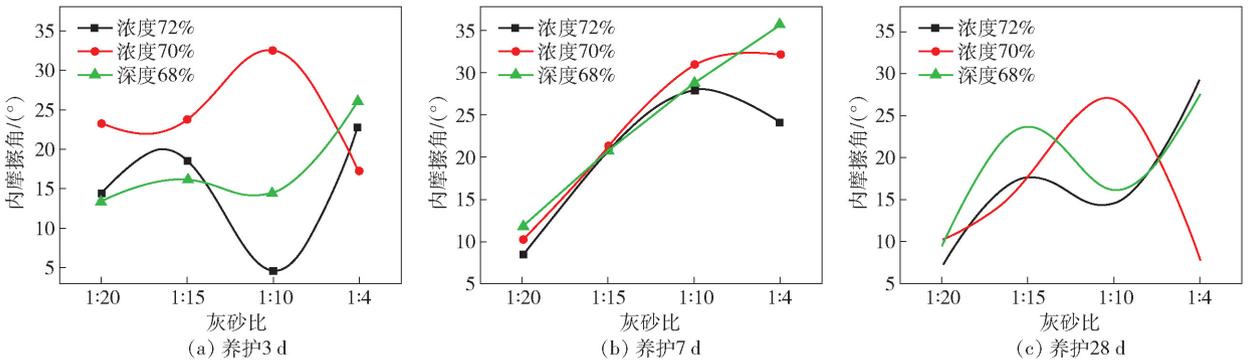


图 11 料浆浓度及灰砂比-内摩擦角曲线

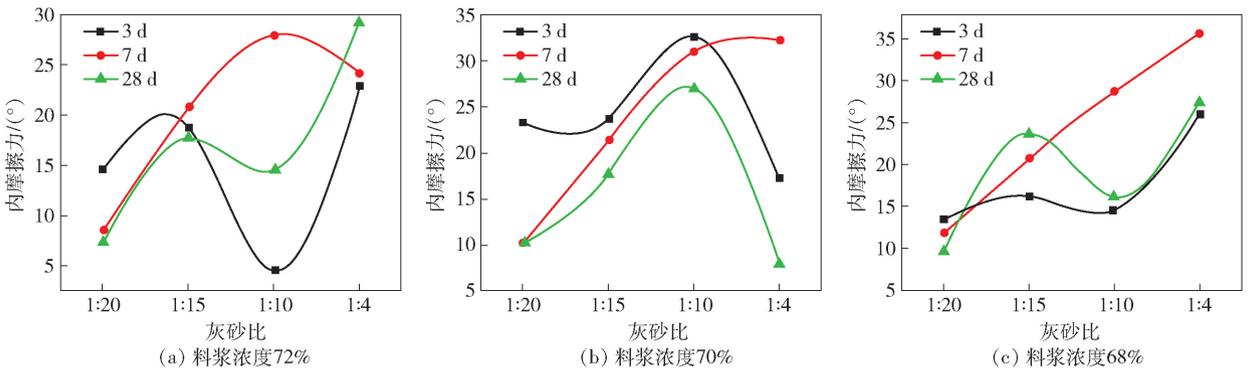


图 12 不同浓度下的养护龄期灰砂比-内摩擦角曲线

4 结论

(1) 灰砂比在 1:20 ~ 1:4 范围内,随着灰砂比的增加,胶结体抗压强度增加,其增长幅度随受养护龄

期影响较小,受浓度影响较大;浓度对于胶结体的早期(3 d 和 7 d)强度影响较小,对后期(28 d)强度的影响相对显著

(2)灰砂比对试件强度随龄期增长的变化影响极其明显,无论何种浓度,都具有同一性,灰砂比越大,曲线越陡,即强度增长越快。同时灰砂比对于试块早期3 d的强度的影响较小,对于长期7 d,28 d的影响逐渐增大。

(3)随着灰砂比和料浆浓度的增加,胶结体内聚力呈增长趋势;随着胶结体养护龄期的增加,胶结体内聚力也显著增加,相比于养护3 d时的变化曲线,养护7 d,28 d时的胶结体内聚力增加更为显著。

(4)随着灰砂比的增加,胶结体内摩擦角呈增大的趋势,而料浆浓度和养护龄期的变化对内摩擦角的变化并无一致规律,整体上看,试验涉及的胶结体试件内摩擦角变化范围为 $5^{\circ} \sim 35^{\circ}$ 。

[参考文献]

[1] 宋子岭,徐晋博. 深凹露天矿坑溜槽回填工艺关键技术[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2015,

34(6):672-676.

- [2] 胡涛. 露天矿采坑回填移动式散料输送系统应用探索[J]. 煤炭与化工,2015,38(3):131-133.
- [3] 赵龙,王楠. 尾砂胶结充填体强度影响因素研究[J]. 采矿技术,2021,21(6):91-95+115.
- [4] 王怀勇,高圣成,梁新民. 基于灰关联法的影响充填体强度因素的敏感性分析[J]. 中国矿山工程,2021,50(5):31-34.
- [5] 张震,陈超,马姣阳,等. 尾砂粒径对胶结充填体抗压强度的影响[J]. 华北理工大学学报(自然科学版),2022,44(1):9-15+23.
- [6] 孙凯年. 尾砂粒径对充填体压力传递的影响[J]. 黄金,1983(3):4-8.
- [7] 黄明发. 大型矿山低成本胶结充填关键技术研究与应用[J]. 矿业研究与开发,2023,43(1):20-25.
- [8] 闵忠鹏,刘龙琼,杨准,等. 胶结充填过程中的成本管控[J]. 黄金,2017,38(3):42-44+49.

(上接第9页)

含量,碳化物尺寸、形态和分布情况,残余奥氏体的转变行为及占比的共同作用,使磨球的洛氏硬度和冲击功呈现规律性变化。

[参考文献]

[1] 中研普华研究院. 2022—2027年耐磨钢球行业市场深度分析与投资风险预测报告[R]. 北京:2022.

[2] JIA X, HAO Q, ZUO X, et al. High hardness and toughness of white cast iron: The proposal of a novel process[J]. Materials Science & Engineering A, 2014, 618:96-103.

[3] 潘继勇. 我国铸造磨球的生产及研发现状[J]. 铸造, 2013,62(3):210-217, 221.

[4] 徐向宏,何明珠. 试验设计与 Design-Expert、SPSS 应用[M]. 北京:科学出版社,2010.

[5] 李莉,张赛,何强,等. 响应面法在试验设计与优化中的应用[J]. 实验室研究与探索,2015,34(8):41-45.

[6] 洪旗,史耀耀,路丹妮,等. 基于灰色关联分析和响应面法的复合材料缠绕成型多目标工艺参数优化[J].

复合材料学报,2019,36(12):2822-2832.

- [7] 刘树龙,王发刚,李公成,等. 基于响应面法的复合充填料浆配比优化及微观结构影响机制[J]. 复合材料学报,2021,38(8):2724-2736.
- [8] 中国钢铁工业协会. 金属材料 洛氏硬度试验 第1部分:试验方法 GB/T 230.1—2018[S]. 北京:中国标准出版社,2018.
- [9] 中国钢铁工业协会. GB/T 229—2020 金属材料 夏比摆锤冲击试验方法[S]. 北京:中国标准出版社,2020.
- [10] 张浩,黄新杰,宗志芳,等. 基于热湿综合性能的棕榈醇-棕榈酸-月桂酸/SiO₂ 复合材料制备方案的响应面法优化[J]. 复合材料学报,2017,34(1):203-209.
- [11] 林天扬,王春红,Siddique Yousfani Sheraz Hussain,等. 碱处理提取竹黄纤维的响应曲面优化[J]. 复合材料学报,2018,35(4):876-884.
- [12] 张妍,周威. 基于响应面法的超细矿渣粉-水泥胶凝材料开发及配比优化研究[J]. 有色金属工程,2022,12(5):135-143.