佩吉铜金矿二采区充填材料配合比的优化与应用*

张金坤[1,2,3],何银东[1,2,3],刘龙琼[1,2,3],易云佳[1,2,3]

(1.低品位难处理黄金资源综合利用国家重点实验室, 福建 上杭县 364204;
2.紫金矿业集团股份有限公司, 福建 上杭县 364200;
3.紫金(长沙)工程技术有限公司, 湖南 长沙 410036)

摘要:为了满足塞尔维亚佩吉铜金矿矿区二步骤采场回采对充填体强度的要求,同时降低充填成本,对充填材料配比进行了优化设计。通过理论计算初步确定采场不同部位的充填体强度,并进行了多组室内充填料配比试验。试验表明,随着充填料浆质量浓度和灰砂比的增大,充填体的单轴抗压强度逐渐增大,当质量浓度为68%、灰砂比为1∶6和1∶8时充填体强度可以满足理论计算的充填体强度要求。在此基础上进行工业试验,结果表明,一步骤采场底部采用1∶6的灰砂比、顶部及中部采用1∶8的灰砂比进行充填,可以满足二步骤采场回采对充填强度的要求,同时与采用原充填配合比方案相比,充填成本可减少2.53元/t。

关键词:充填材料配合比;灰砂比;质量浓度;充填体强度

中图分类号:TD853 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2025)02-0066-07

Optimization and Application of Backfill Material Mix Ratio in the Second Mining Area of Peki Copper-Gold Mine

ZHANG Jinkun[1,2,3], *HE Yindong*[1,2,3], *LIU Longqiong*[1,2,3], *YI Yunjia*[1,2,3]

(1.State Key Laboratory of Comprehensive Utilization of Low-Grade Refractory Gold Ores, Shanghang, Fujian 364204, China;
2.Zijin Mining Group Co., Ltd., Shanghang, Fujian 364200, China;
3.Zijin (Changsha) Engineering Technology Co., Ltd., Changsha, Hunan 410036, China)

Abstract: In order to meet the requirements of the two-step stope mining in the Peki Copper-Gold Mine of Serbia for the backfill strength and reduce the backfill cost, the backfill material mix ratio was optimized. The backfill strength in different parts of the stope was preliminarily determined by theoretical calculation, and several groups of indoor tests of backfill material mix ratio were carried out. The test shows that the uniaxial compressive strength of the backfill increases with the increase of the mass concentration of the backfill material and the cement-sand ratio. When the mass concentration is 68%, the cement-sand ratio is 1∶6 and 1∶8, the backfill strength can meet the strength requirements of the theoretical calculation. On this basis, the industrial test was carried out. The results show that the backfill strength requirements of the two-step stope mining can be met using 1∶6 cement-sand ratio at the bottom of the first-step stope and 1∶8 cement-sand ratio at the top and middle of the first-step stope. At the same time, compared with the original backfill ratio scheme, the backfill cost can be reduced by 2.53 yuan/t.

Key words: Mix ratio of backfill material, Cement-sand ratio, Mass concentration, Backfill strength

0 引言

佩吉铜金矿上矿带开采的原充填方案为:充填料浆质量浓度67%,一步骤采场下部10 m充填灰砂比1∶5,上部充填灰砂比1∶6,中部充填灰砂比1∶8;二步骤采场下部10 m充填灰砂比1∶5,中上部充填灰砂比1∶8。因水泥用量较多,充填成本较高。为了满足佩吉铜金矿矿区两步骤回采的要求,降低充填成本,需要对矿区充填方案及充填材料配比进行优化设计。充填体强度主要受水泥掺量、混合骨料配比和质量浓度等因素的影响,因而大量学者都针对充填配比优化开展了研究。巴蕾等[1]针对金川矿区粗骨料充填料浆离析问题进行充填材料配比试验,结果表明,掺入适量铜渣尾砂,能有效改善

* **收稿日期**:2024-03-01

作者简介:张金坤(1998—),男,河南周口人,硕士研究生,助理工程师,主要从事金属地下矿山开采工艺研究。E-mail:1104550825@qq.com

通信作者:刘龙琼(1988—),男,江西吉安人,硕士研究生,高级工程师,主要从事金属地下矿山开采工艺研究。E-mail:472889332@qq.com

粒径级配,提高充填体强度。邓国梁等[2]通过室内废石胶结充填配比试验,发现随着灰砂比的减小,充填体的单轴抗压强度呈先增大后减小的趋势。贺桂成等[3]通过对多组不同配比的废石胶结充填体进行抗压强度试验,发现水灰比和灰砂比是控制废石胶结充填体抗压强度的关键因素。刘德峰等[4]通过进行不同级配废石胶结充填材料的力学特性及流动性能试验,揭示了废石颗粒配级与水泥及粉煤灰固化作用机制。付自国等[5]基于 RSM-BBD 的废石-风砂胶结体配合比试验,研究了不同影响因素与骨料配比的交互作用对充填体不同龄期强度的影响,并通过现场验证,优选出了合理的料浆配合比。杨金维等[6]从混合骨料的粒径配比和掺量控制入手,揭示了混合骨料充填体强度发展规律。针对采用尾砂充填的研究中,张明[7]采用正交试验方法研究了不同因素对胶结充填体单轴抗压强度的影响规律,结果表明,随充填料浆浓度、养护龄期和灰砂比的增大,充填体强度呈增长趋势。朗岩旺弦等[8]、张秀勇等[9]针对金川矿区充填体强度不足、强度分布不均等问题,基于充填体 7 d 强度要求和充填料浆流动性要求,通过室内试验,确定了最佳充填材料配合比。于澎等[10]针对银鑫矿采空区治理问题进行充填材料配比室内试验,发现使用胶固粉骨料作为胶凝材料,质量浓度为 74%、灰砂比为 1∶10 时,可以达到 3 d 强度 1 MPa 以上;质量浓度为 74%、灰砂比为 1∶6 时,可以达到 28 d 强度 4 MPa 以上。高志荣等[11]基于抗压强度试验结果,利用一元线性回归法拟合出不同养护龄期下充填体试块抗压强度与胶凝材料添加量之间的数量关系。吴钒等[12]针对某铜矿分级尾砂和铜冠新型胶凝材料开展充填试验,验证铜冠新型胶凝材料与现有充填系统的匹配性,研究表明,应用铜冠 5# 胶凝材料替代基准水泥充填时,全矿充填胶凝材料成本可降低 20%。刘勋等[13]针对某铜矿原有充填方案存在充填体强度不足、成本过高等问题,进行多种材料的充填配比试验,研究结果表明,合适的絮凝剂类型及优化配比下可以在满足充填体强度要求的同时,降低充填成本。张增庆等[14]针对金厂河多金属矿一步骤破碎顶板垮塌治理难题,基于充填料浆配比试验、扩展度试验和流变试验,综合确定充填工艺参数为料浆质量浓度 68%~72%,灰砂比 1∶8。覃星朗等[15]根据铜山铜矿的充填胶凝材料选择和充填材料配比参数设计,开展了全尾砂新型胶凝材料胶结充填体和水泥胶结充填体的强度对比试验,发现在灰砂比为 1∶8、质量浓度为 68%的条件下,新型胶凝材料胶结试块 28 d 抗压强度是水泥胶结试块同龄期抗压强度的 8.2 倍。朱斌等[16]通过 FLAC3D 数值模拟软件研究了充填体厚度及采空区跨度与高度之比对充填体顶板稳定性的影响规律,结果表明,充填体厚度与顶板下沉位移量呈负相关关系。

为优化佩吉铜金矿二采区的充填配比设计,降低充填成本,本文结合理论计算、室内充填体强度试验和现场工业试验等手段,研究料浆质量浓度和灰砂比对充填体强度的影响规律,并优化充填材料配合比。基于现场工业试验,分析验证各部位充填体强度是否满足生产要求,为矿山安全生产及降低充填成本提供参考。

1 充填体强度计算

国内外的采矿科技工作者们对确定胶结充填体强度提出了很多理论方法。通过对充填体受力状态、充填体与围岩的相互作用进行一定的条件假设,求出充填体内应力与充填体暴露参数之间的关系,并以此为依据,确定充填体保持稳定所需的强度,然后再确定充填配比。

目前国内外在充填体强度计算时常用的力学模型和计算公式有 Thomas 模型法、Terzaghi 模型法、Mitchell 计算法、杨辛公式法、覆岩承重计算法和蔡嗣经经验公式法等。其中,杨辛公式法和蔡嗣经经验公式法的计算结果最接近生产实际,安全可靠性更强。因此,本研究采用这两种方法计算充填体内的垂直应力,为了提高安全可靠性,取两种方法计算结果的较大值作为确定充填材料配比的依据。

1.1 杨辛公式法计算充填体内垂直应力

计算充填体内垂直应力 σ_v 的杨辛公式如下:

$$\sigma_v=\frac{\gamma}{\left(\frac{S}{F}-\lambda\cdot\tan\delta\right)}\left(1-e^{-\left(\frac{S}{F}-\lambda\cdot\tan\delta\right)H}\right) \quad (1)$$

式中:σ_v 为充填体内垂直应力,MPa;γ 为充填体的容重,$\gamma=20.5$ kN/m^3;S 为充填采场周长,$S=114$ m;F 为充填采场水平断面积,充填采场宽度取 12 m 时,$F=540$ m^2;δ 为充填体与岩体之间的摩擦角,$\delta=22°$;λ 为侧压系数,$\lambda=1-\sin\varphi$,φ 为充填体的内摩擦角,$\varphi=35°$,$\lambda=0.426\ 4$;H 为距充填体顶

面的高度,m。

同样引入安全系数 k,取 k=1.0,1.5 和 2.0。在本研究中充填采场宽度取 12 m,不同安全系数下,充填体内垂直应力与距充填体顶面高度之间的关系曲线见图 1。

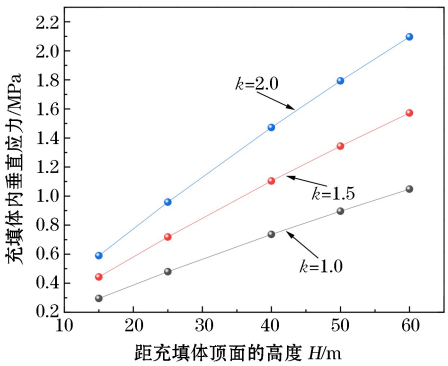


图 1 杨辛公式法得到的充填体内垂直应力与距充填体顶面高度之间的关系曲线

Fig.1 Relationship curves between vertical stress in backfill and height from the top surface of the backfill according to Yang Xin's formula

1.2 蔡嗣经经验公式计算充填体内垂直应力

计算充填体内垂直应力的蔡嗣经经验公式如下:

$$H^2=a\cdot\sigma_v^3 \tag{2}$$

式中,a 为经验系数,a=600～1 100,建议充填体高度小于 50 m 时,a 取 600,大于 100 m 时,a 取 1 000,本次研究 a 取 1 000。

取安全系数 k=1.0,1.2 和 1.5。不同安全系数情况下,充填体内垂直应力与距充填体顶面高度之间的关系曲线见图 2。

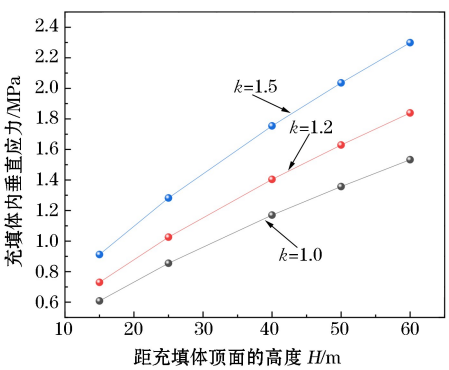


图 2 蔡嗣经经验公式法得到的充填体内垂直应力与距充填体顶面高度之间的关系曲线

Fig.2 Relationship curves between vertical stress in backfill and hieght from the top surface of the backfill according to the Cai's formula

1.3 充填体合理强度推荐

通过比较可知,蔡嗣经经验公式法的计算结果相对更加安全可靠。参照国内外充填体强度研究成果与设计经验,根据矿房不同高度与宽度,基于蔡嗣经经验公式确定佩吉铜金矿所需的充填体强度推荐值,见表 1。

表 1 佩吉铜金矿充填体强度推荐值

Table 1 Recommended strength values of backfill body in Peji Copper-Gold Mine

矿房高度 H/m	28 d 充填体强度推荐值/MPa
25	≥1.3
40	≥1.8
50	≥2.0
60	≥2.5

表 1 中的强度推荐值以充填体自重为基础,同时也考虑了上部岩层(或充填体)的应力传递、爆破和充填质量的影响,充填配比根据试验确定。

佩吉铜金矿二采区采矿方法以阶段空场嗣后充填采矿法为主,将同一个盘区的矿体划分为矿房、矿柱两步骤回采。佩吉铜金矿的矿石品位高,需要回采盘区间柱,因此,需要采用较高强度的胶结充填体进行充填。此外,采场底部结构为堑沟,设计隔三采一,需要在底部充填体内反掘巷道,底部需要更高强度的充填体。综上所述,本研究推荐该矿采用表 2 所列的充填体强度值。

表 2 采场充填体强度推荐值

Table 2 Recommended strength values of backfill in stope

充填部位	高度/m	28 d 强度/MPa
采场底部	约 10	≥4.0
一步骤采场中部	30～45	≥1.8
一步骤采场顶部	5～6	≥2.5
二步骤采场中部	35～50	1.0～1.2
二步骤采场顶部	2	≥2.5

(1) 采场底部充填体强度。由于需要在底部充填体中掘进巷道,类比相似矿山,高强度充填体的高度一般为底部巷道高度的 2 倍左右,本矿山底部巷道高度均为 5 m,因此推荐底部 10 m 的充填体强度 R_{28}≥4.0 MPa。

(2) 一步采场中部充填体强度。二步采场回采时,要求一步采场充填体能够自立,且能承受一定的爆破动载荷的扰动,根据计算,中部充填体强度(凿岩硐室以下)R_{28}≥1.8 MPa。

(3) 一步采场顶部充填体强度。考虑人员作业

和爆破对充填体的影响，一步采场的上部充填体强度要高于中部充填体强度，顶部充填体强度(5～6 m)R_{28}≥2.5 MPa。

(4) 二步采场中部充填体强度。盘区间柱回采时仅暴露采场端部的充填体约 12 m，与开采二步采场暴露一步采场充填体长度 45 m 不同，所以二步采场充填体的强度略低于一步采场充填体的强度，推荐中部(顶板往下 2 m 至底部)充填体强度 R_{28} 为 1.0～1.2 MPa。

(5) 二步采场顶部充填体强度。矿体上部有隔离矿柱，回采隔离矿柱时，采场顶部充填体将作为回采平台，需要承载铲运机等设备的运行，因此顶部充填体强度(2 m)R_{28}≥2.5 MPa。

2　室内充填配合比试验

2.1　试验材料

试验材料均为现场充填所采用的全尾砂、水泥和工业用水。尾砂的粒级组成与化学成分分析结果来源于矿山选厂提供的资料，尾砂的粒级组成见图 3，化学成分组成见表 3。

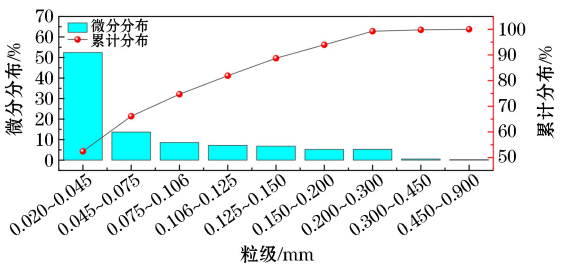


图 3　尾砂粒级组成

Fig.3　Particle size composition of the tailings

表 3　尾砂的化学成分

Table 3　Chemical compositions of the tailings　%

SiO_2	Al_2O_3	S	Ag	Na_2O	Au
60.43	9.6	8.56	1.1	0.82	0.8
MgO	Cu	Zn	As	Pb	其他
0.25	0.098	0.016	0.009	0.009	18.308

2.2　充填材料配比

根据深锥浓密机的底流质量浓度(63%～65%)，设计了充填料浆的质量浓度为 65%～68%，灰砂比为 1∶6、1∶8、1∶10、1∶16、1∶20，并开展了充填料浆配比正交试验，试验方案见表 4。

对表 4 中的各组试验方案进行了塌落度测试，结果表明，各组配比的料浆其塌落度均大于 28 cm，说明料浆的流动性均满足管道输送的要求。

表 4　充填料浆配比方案

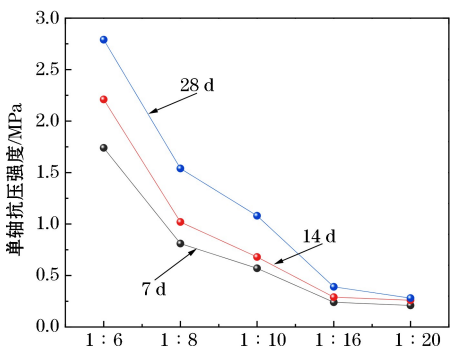
Table 4　Schemes of filling slurry proportioning

灰砂比	质量浓度/%	水泥含量/%	尾砂含量/%	水含量/%
1∶6	68	9.71	58.29	32
1∶8	68	7.56	60.44	32
1∶10	68	6.42	61.58	32
1∶16	68	4.02	63.98	32
1∶20	68	3.24	64.76	32
1∶6	67	9.54	57.46	33
1∶8	67	7.41	59.59	33
1∶10	67	6.09	60.91	33
1∶16	67	3.91	63.09	33
1∶20	67	3.18	63.82	33
1∶6	66	9.31	56.69	34
1∶8	66	7.32	58.68	34
1∶10	66	6.14	59.86	34
1∶16	66	3.88	62.12	34
1∶20	66	3.21	62.79	34
1∶6	65	9.27	55.73	35
1∶8	65	7.19	57.81	35
1∶10	65	6.11	58.89	35
1∶16	65	3.81	61.19	35
1∶20	65	3.10	61.90	35

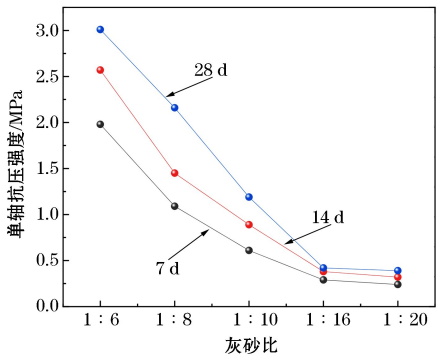
2.3　充填体试块抗压强度试验

根据表 4 的配比方案，采用 70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm 的标准试模制备充填体试块，分别养护 7 d、14 d 和 28 d，并测试试块的单轴抗压强度，测试结果如图 4 所示。

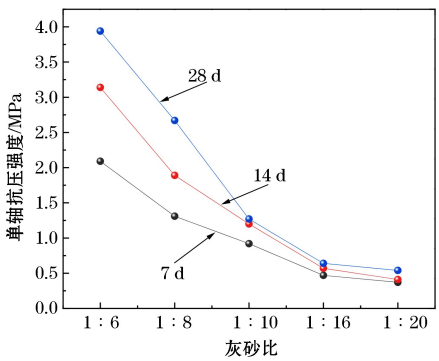
由图 4 中试块单轴抗压强度测试结果可知，随着灰砂比的降低，充填体单轴抗压强度逐渐降低；随着水泥含量的增加，充填体强度明显增加，各组配比充填体胶结效果均较好。其中，质量浓度为 68%的充填体试样具有较好的单轴抗压强度，且符合理论计算所需的充填体强度要求，灰砂比为 1∶6 的充填体其 28 d 单轴抗压强度达到 4.72 MPa，灰砂比为 1∶8 的充填体其 28 d 单轴抗压强度达到 2.28 MPa，可满足充填体作为顶板和立柱的强度要求。



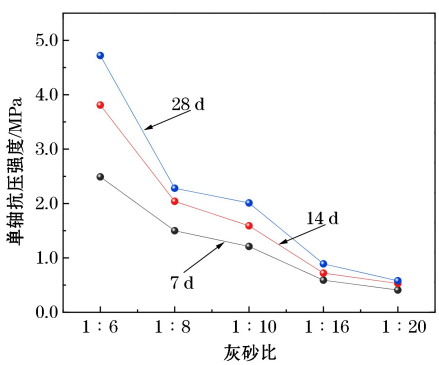
(a) 质量浓度 65%



(b) 质量浓度 66%



(c) 质量浓度 67%



(d) 质量浓度 68%

图 4 充填体试块单轴抗压强度测试结果

Fig.4 The test results of uniaxial compressive strength of backfill specimens

3 现场工业试验

为了获取不同配比充填体的整体充填效果,用 DiamecPHC6 型探矿钻机在试验采场钻取岩芯直径为 45 mm 左右的充填体试样。结合矿山的现场实际情况和取芯目的,共施工了 6 个取芯钻孔,如图 5 所示。

3.1 充填体抗压强度测试

在充填站实验室利用 TTE-300 型压力试验机对充填体取样岩芯进行抗压强度测试。岩芯直径约为 45 mm,根据试验要求,按照径高比 1∶2 加工成试块,即试块直径 45 mm,高 90 mm。

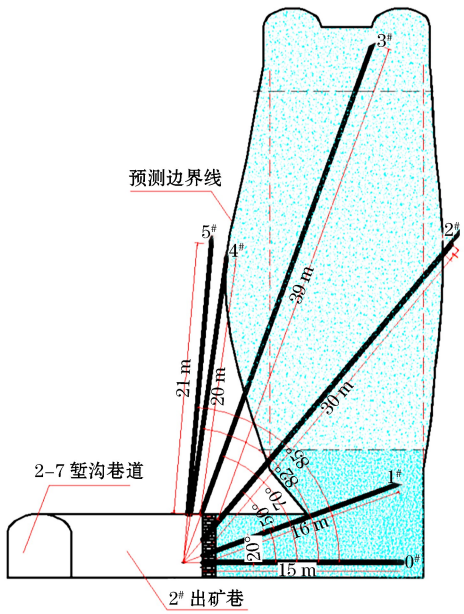


图 5 取芯位置及钻孔布置

Fig.5 Core sampling locations and drilling layout

根据每个钻孔的情况,制作不同数量的试块。0# 钻孔为底部水平钻孔,将 0# 钻孔岩芯制作成 6 个试块,1# 钻孔岩芯制作成 12 个试块,2# 钻孔岩芯制作成 11 个试块,3# 钻孔岩芯制作成 15 个试块,共计 44 个试块。试块的抗压强度测试结果见表 5。

表 5 充填体岩芯抗压强度测试结果

Table 5 Test results of compressive strength of backfill cores

孔号	灰砂比	28 d 强度/MPa	孔号	灰砂比	28 d 强度/MPa
0#	1∶6	4.46	2#	1∶8	1.8
	1∶6	3.66		1∶8	2.43
	1∶6	4.29		1∶8	2.53
	1∶6	3.79		1∶8	2.24
	1∶6	3.00		1∶8	2.09
	1∶6	4.13		1∶8	1.82
1#	1∶6	4.47		1∶8	1.96
	1∶6	3.30	3#	1∶8	2.42
	1∶6	4.14		1∶8	2.15
	1∶6	3.35		1∶8	1.90
	1∶6	3.40		1∶8	1.69
	1∶6	3.69		1∶8	1.42
	1∶6	3.87		1∶8	2.30
	1∶6	4.65		1∶8	2.04
	1∶6	4.74		1∶8	1.87
	1∶6	3.70		1∶8	2.09
	1∶6	3.92		1∶8	2.19
	1∶6	4.35		1∶8	1.96
2#	1∶8	2.40		1∶8	1.82
	1∶8	2.96		1∶8	1.78
	1∶8	2.17		1∶8	1.92
	1∶8	2.03		1∶8	2.13

对于底部充填体,由 0# 钻孔取芯试块获得的充

填体平均抗压强度为 3.89 MPa,由 1# 钻孔取芯试块获得的充填体平均抗压强度为 3.97 MPa,底部充填体强度相对稳定。由充填体中部的 2# 钻孔取芯试块获得的充填体平均抗压强度为 2.22 MPa。由充填体顶部的 3# 钻孔取芯试块获得的充填体平均抗压强度为 1.98 MPa。

设计要求的充填体强度为:底部 $R_{28}\geqslant 4.0$ MPa,中部 $R_{28}\geqslant 1.8$ MPa,顶部 $R_{28}\geqslant 2.5$ MPa。对比分析可知,中部充填体强度可满足要求,顶底部充填体强度略低于要求,考虑试验误差造成强度值偏低的因素,综合判定充填体整体强度基本可以满足需求。

3.2 成本分析

矿山充填材料主要为水泥和尾砂。水泥外购价有较大浮动,平均约 120 美元/t,合人民币约 840 元/t。水泥容重约 2 790 kg/m^3,尾砂容重约 2 620 kg/m^3,矿石容重取 3.18 t/m^3,据此计算得到的各种配比的充填料浆成本见表 6。

表 6 充填料浆综合成本

Table 6 Cost of filling slurry

质量浓度 67%		质量浓度 68%	
灰砂比	成本/(元/m^3)	灰砂比	成本/(元/m^3)
1∶5	190.74	1∶5	194.17
1∶6	155.63	1∶6	160.46
1∶8	124.37	1∶8	127.70
1∶10	102.76	1∶10	106.63

原充填方案中,一步骤采场下部 10 m 高充填体的灰砂比为 1∶5,上部充填体的灰砂比为 1∶6,中部充填体的灰砂比为 1∶8,二步骤采场下部 10 m 高充填体的灰砂比为 1∶6,中上部充填体的灰砂比为 1∶8,共 3 种充填灰砂比,充填体沉缩率约为 5%,计算得到充填成本约为 41.94 元/t。

优化后,一步骤采场下部 10 m 高充填体的灰砂比为 1∶6,中部和上部充填体的灰砂比为 1∶8,二步骤采场下部 10 m 高充填体的灰砂比为 1∶6,中部充填体的灰砂比暂定 1∶10,上部 2 m 高充填体的灰砂比为 1∶8,共 3 种充填灰砂比,充填体沉缩率约为 5%,计算得到充填成本约为 39.41 元/t。采用优化后的充填方案比原充填方案减少充填成本 2.53 元/t。

4 结论

通过理论计算、室内试验和工业试验,研究了充填材料配合比对充填体强度的影响。首先,通过杨辛公式和蔡嗣经经验公式法对所需要的充填体强度进行了计算,并依据佩吉铜金矿二采区生产情况推荐了充填体强度值。以现场材料为基础,开展室内充填体强度试验,确定了充填料浆质量浓度为 68%、灰砂比为 1∶6 和 1∶8 的充填参数方案。在此基础上进行现场工业试验,对采区不同部位的充填体进行取芯和强度试验。工业试验表明,一步骤采场底部采用 1∶6 的灰砂比、顶部及中部采用 1∶8 的灰砂比进行充填,可以满足二步骤采场回采充填体强度的要求,同时充填成本上比采用原充填配合比方案减少了 2.53 元/t,降低了矿山生产成本。

参考文献(References):

[1] 巴蕾,周尧,卓庆奉,等.混合骨料粒径级配对充填体早期强度的影响[J].现代矿业,2023,39(11):196-199+203.
BA Lei, ZHOU Yao, ZHUO Qingfeng, et al. Influence of mixed aggregate particle size gradation on early strength of backfill[J]. Modern Mining,2023,39(11):196-199+203.

[2] 邓国梁,梁炳金,史文豪,等.废石胶结充填体配比优化及与围岩合理匹配研究[J].矿业研究与开发,2023,43(7):12-18.
DENG Guoliang, LIANG Bingjin, SHI Wenhao, et al. Study on proportion optimization of waste rock cemented filling body and reasonable matching with surrounding rock [J]. Mining Research and Development,2023,43(7):12-18.

[3] 贺桂成,刘永,丁德馨,等.废石胶结充填体强度特性及其应用研究[J].采矿与安全工程学报,2013,30(1):74-79.
HE Guicheng, LIU Yong, DING Dexin, et al. Strength characteristic of cemented waste rock backfills and its application[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2013,30(1):74-79.

[4] 刘德峰,崔晨冉,郑彦涛,等.废石颗粒级配优化对充填材料性能的影响机制[J/OL].有色金属(矿山部分):1-14[2024-02-15]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1839.tf.20240123.1533.002.html.
LIU Defeng, CUI Chenran, ZHENG Yantao, et al. Influence mechanism of optimization of waste stone particle gradation on the performance of filling materials[J/OL]. Nonferrous Metals (Mining Section): 1-14[2024-02-15]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1839.tf.20240123.1533.002.html.

[5] 付自国,乔登攀,郭忠林,等.基于 RSM-BBD 的废石-风砂胶结体配合比与强度试验研究[J].煤炭学报,2018,43(3):694-703.
FU Ziguo, QIAO Dengpan, GUO Zhonglin, et al. Experimental research on mixture proportion and strength of cemented hydraulic fill with waste rock and eolian sand based on RSM-BBD[J]. Journal of China Coal Society,2018, 43(3):694-703.

[6] 杨金维,寇永渊,王瑛.混合骨料充填体强度发展规律与配比优化[J].矿业研究与开发,2022,42(10):35-39.
YANG Jinwei, KOU Yongyuan, WANG Ying. Strength development law and proportion optimization of mixed aggregate backfill[J]. Mining Research and Development, 2022,42(10):35-39.

[7] 张明.基于正交试验的充填体强度演化规律及配比优化研究[J].现代矿业,2022,38(11):199-202+212.
ZHANG Ming. Study on the strength evolution law and proportioning optimization of backfill based on orthogonal experiment[J]. Modern Mining, 2022, 38(11): 199-202+212.

[8] 朗岩旺弦,赵金田,张金来,等.金川二矿区充填配合比优化研究[J].矿业研究与开发,2023,43(11):18-22.
LANG Yanwangxian, ZHAO Jintian, ZHANG Jinlai, et al. An optimization study on the filling mix ratio in Jinchuan No.2 Mining Area[J]. Mining Research and Development, 2023,43(11):18-22.

[9] 张秀勇,乔登攀.金川二矿区胶结充填料浆可泵性影响因素分析[J].金属矿山,2010(9):34-37.
ZHANG Xiuyong, QIAO Dengpan. Analysis of influencing factors on pumpability of camented filling with in Jinchuan No. 2 Mining Area[J]. Metal Mine,2010(9):34-37.

[10] 于澎,张要贺,于立志.井下采空区全尾砂充填材料试验研究[J].采矿技术,2024,24(1):180-183.
YU Peng, ZHANG Yaohe, YU Lizhi. Experimental study on filling materials for underground goaf [J]. Mining Technology,2024,24(1):180-183.

[11] 高志荣,蓝国龙,张亭.矿山充填新型胶凝材料添加量与充填体抗压强度关系研究[J].现代矿业,2024,40(1):181-184.
GAO Zhirong, LAN Guolong, ZHANG Ting. Study on the relationship between the addition amount of new cementitious material and the compressive strength of backfill in mine filling [J]. Modern Mining,2024,40(1):181-184.

[12] 吴钒,吕冠颖,戴超群.某铜矿新型胶凝材料充填试验研究[J].采矿技术,2024,24(2):238-242.
WU Fan, LYU Guanying, DAI Chaoqun. Experimental study on new type of cementitious material filling in a copper mine[J]. Mining Technology,2024,24(2):238-242.

[13] 刘勋,孙远江,欧任泽,等.某铜矿细粒级全尾砂充填试验及应用研究[J].采矿技术,2024,24(2):214-219.
LIU Xun, SUN Yuanjiang, OU Renze, et al. Experimental and application study on fine-grained full tailings filling in a copper mine[J]. Mining Technology,2024,24(2):214-219.

[14] 张增庆,魏晓明,杨灿显,等.破碎顶板垮塌采场胶结充填治理[J].采矿技术,2024,24(1):155-159.
ZHANG Zengqing, WEI Xiaoming, YANG Canxian, et al. Cemented filling management for collapsed goaf with broken roof[J]. Mining Technology,2024,24(1):155-159.

[15] 覃星朗,方志甫,郑攻关.全尾砂充填新型胶凝材料在铜山铜矿的应用研究[J].采矿技术,2020,20(4):17-19+23.
QIN Xinglang, FANG Zhifu, ZHENG Gongguan. Application study of new type of cementitious material for full tailings filling at Tongshan copper mine[J]. Mining Technology,2020,20(4):17-19+23.

[16] 朱斌,高通,涂艾林,等.下向进路倾斜分层胶结充填体稳定性研究[J].矿业研究与开发,2024,44(1):1-12.
ZHU Bin, GAO Tong, TU Ailin, et al. Study on stability of inclined layered cemented backfill in downward drift[J]. Mining Research and Development,2024,44(1):1-12.