



混合骨料胶结充填体强度特性及 与开挖矿体的合理匹配

侯永强^{1,2}, 尹升华^{1,2}, 杨世兴^{1,2}, 张敏哲^{1,2}, 曹 永^{1,2}

(1. 北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 100083;

2. 金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室, 北京 100083)

摘 要: 为了研究混合骨料胶结充填体强度特性及与开挖矿体的合理匹配, 采用单因子多水平试验设计方法对混合骨料胶结充填体进行配比试验研究, 探讨质量浓度、废石掺量对混合骨料充填浆料坍落度及固化强度的影响, 建立固化强度增长模型, 借助 SEM 微观测试手段研究了废石掺量对混合骨料胶结充填体微观结构性能的影响。结合能量耗散原理, 引入能量匹配系数 K 分析充填体与开挖矿体的合理匹配并定量分析了混合骨料胶结充填体作为人工假顶在采场内的合理固化时间。结果表明: 充填浆料坍落度随质量浓度增加呈线性递减规律, 随废石掺量增加呈指数函数增长规律; 在养护龄期 56 d 内, 不同质量浓度、废石掺量的混合骨料胶结充填体固化强度遵循指数函数增长规律。微观结构分析表明, 废石掺量能够对充填体内部微观结构的致密性造成显著性影响, 进而影响充填体的宏观机械强度; 引入能量匹配系数 K 定量表征了充填体与开挖矿体之间的能量关系, 得到了不同配比参数下的混合骨料胶结充填体在采场内的固化时间变化规律; 基于充填浆料坍落度、固化强度和固化时间等指标优选出一组最佳的配比参数, 即水泥掺量为 310 kg/m³, 质量浓度为 76%, 废石掺量为 60%。

关键词: 充填体; 能量匹配分析; 固化时间; 强度增长规律; 坍落度; 微观结构

文章编号: 1004-0609(2021)-12-3750-12

中图分类号: TD823

文献标志码: A

引文格式: 侯永强, 尹升华, 赵国亮, 等. 混合骨料胶结充填体强度特性及与开挖矿体的合理匹配[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(12): 3750–3761. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-37637

HOU Yong-qiang, YIN Sheng-hua, YANG Shi-xing, et al. Strength characteristics of mixed aggregate cemented backfill and reasonable matching with excavated ore body[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(12): 3750–3761. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-37637

尾砂胶结充填开采技术由于其本身兼顾诸多优势, 已广泛用于金属矿山地下开采, 诸多矿山实践证明, 合理的充填材料配比参数是决定充填质量及充填成本的关键因素^[1-3]。

近年来, 诸多矿山科技工作者对充填体的力学性能及破坏特征、充填体强度的计算方法、胶凝材料的研发、充填体稳定性等关键技术问题进行了一些探索和研究^[4-6]。曹帅等^[7]研究了分层尾砂胶结充填体的力学特性和破坏模式与分层次数的关系。卢

宏建等^[8]通过开展充填浆料流动沉降相似模拟试验及充填体单轴和常规三轴压缩试验, 揭示采场充填体的结构特征和强度分布规律, 研究不同围压下不均匀充填体的变形特征和破坏模式。杨磊等^[9]对充填体强度设计模型进行了研究, 得出了符合矿山开采的充填体强度设计公式。赵国彦等^[10]开展了基于响应面法的高寒矿山充填配比优化, 得出了最佳的配比参数。杨志强等^[11]对不同骨料固结粉胶结充填体强度进行试验和对比分析, 研究了固结粉类型及

基金项目: 镍钴资源综合利用国家重点实验室基金资助项目(201902); 山东省重大科技创新工程项目(2019SDZY05); 国家自然科学基金资助项目(51734001); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(FRT-TP-18-003C1)

收稿日期: 2019-11-07; **修订日期:** 2021-07-14

通信作者: 尹升华, 教授, 博士; 电话: 13811668481; E-mail: ustxsh@163.com

含量充填体强度的变化规律。杨啸等^[12]对 3 种骨料的充填浆料配比开展了 9 组正交试验，研究了骨料的不均匀系数及平均粒径对胶结体强度的影响规律。刘志祥等^[13-14]分析了不同配比胶结充填体强度和变形特征，建立了不同配比下充填体损伤本构方程，并探讨了矿岩开采后释放变形能与充填体应变能的合理匹配。

上述研究对尾砂胶结充填体强度、力学特性及配比参数优化等做出了详细分析，所得研究结果为矿山充填材料选择及配比设计提供了一定的指导。然而，随着浅部矿产资源日渐枯竭，国内外诸多矿山转向了深部开采，但深部开采面临着“三高一扰动”的问题，势必对充填体强度作出更高的要求。此时若仍单一采用全尾砂作为充填骨料其强度已很难达到井下开采要求，而矿山企业为提高充填体强度不得不提高胶凝材料用量，这不可避免地增加了充填开采成本，且对充填体强度提升效果一般。

本文以金川二矿区为工程研究背景。二矿区目前采用下向水平分层充填开采方法，充填骨料为河砂、棒磨砂和废石，水泥单耗为 310 kg/m³，质量浓度为 78%~80%。该配比参数下带来了充填成本过高、管道磨损严重及充填体强度分布不均等一系列生产问题，同时尾矿库的尾砂堆存所带来的环境问题也日渐突出。尾砂胶结充填技术是解决上述问题的有效方法，但由于二矿区深部矿体回采对充填体强度要求较高，仅采用全尾砂作为充填骨料难以达到需求。因此，本文在现有研究基础上，选择采用破碎废石作为粗骨料替代部分全尾砂后进行混合骨料胶结充填，采用单因素多水平试验设计不同质量浓度、骨料配比下的废石-全尾砂胶结充填体配比试验，得出不同质量浓度、骨料配比下的充填浆料坍落度及固化强度的变化规律；同时，借助微观测试手段对粗骨料掺量分析混合骨料胶结充填体

力学性能的微观改善机理；最后基于矿体开挖释放能量与胶结充填体的应变能相匹配的原则，分析了废石-全尾砂胶混合结充填体与金川二矿区深部开挖矿体的合理匹配，探讨了下向进路式胶结充填采矿中，上分层胶结充填体作为人工假顶在采场内的合理固化时间，并基于固化时间、浆料坍落度及固化强度指标优选出适用于该矿山充填作业的合理配比参数。

1 混合骨料胶结充填体配比试验设计

1.1 充填材料物化特性

试验采用的全尾砂取自于二矿区选矿厂，采用小型泥浆泵抽取晾干后装袋备用。废石来源于矿山井下生产开拓及矿石回采过程中产生的废石料，经过鄂式破碎机破碎成最大粒径为 15mm 的粗骨料，与全尾砂混合搭配后进行胶结充填。水泥取自于金昌水泥场，标号为 P. C32.5。充填材料的化学成分如表 1 所示。由表 1 可知，废石与全尾砂的化学成分存在明显差异，但主要由 SiO₂组成，属于惰性材料，适合作为充填骨料。

1.2 充填骨料级配分析

对于混合骨料胶结充填而言，骨料级配对其力学及流动性能具有显著的影响。为了获得最佳的流动性及力学强度效果，需对混合骨料胶结充填体级配进行分析。全尾砂粒级组成如图 1(a)所示，其中， $d_{90}=75.991\text{ }\mu\text{m}$ ，不均匀系数为 0.087，密实性良好，属于均匀细骨料。废石作为级配连续的骨料，Talbol 粒级级配理论可以克服粒径连续分布而导致数据空间维数过大的困难。通过计算试验样本中骨料粒径不大于指标 x 的质量 M ，与试验样本总质量 M_t 确定位于某个粒径区间的颗粒质量，其表达式为

表 1 充填材料化学成分

Table 1 Chemical composition of filling material

Ingredient	Mass fraction/%								
	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	TiO ₂	MnO	Others
Tailings	42.20	3.73	32.71	4.04	12.14	0.39	0.33	0	4.46
Waste rock	47.71	16.39	15.22	7.81	7.17	2.58	1.95	0.54	0.63
Cement	28.36	48.28	2.50	11.87	2.88	1.07	0.60	0.12	4.32

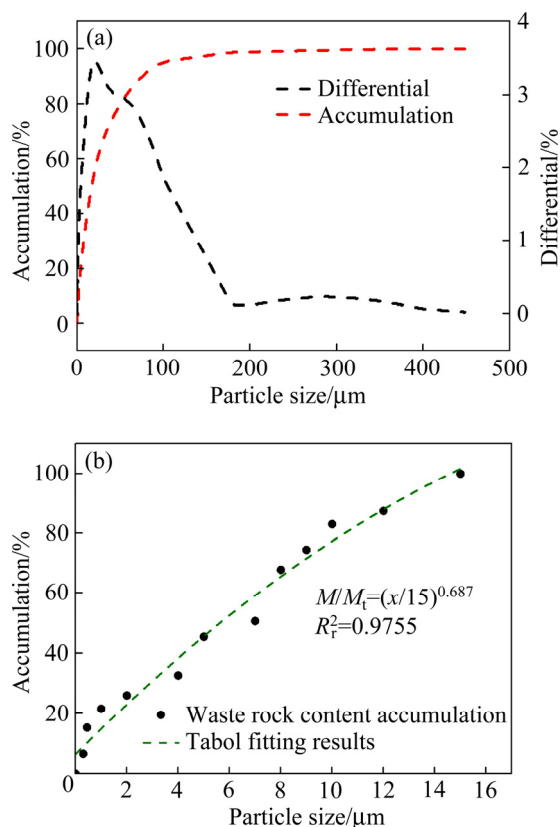


图1 充填骨料粒径累计分布曲线特征

Fig. 1 Characteristics curve negative cumulative distribution of aggregate particles

$$\frac{M}{M_t} = 100 \times \left(\frac{x}{x_{\max}} \right)^n \quad (1)$$

式中: n 为 Talbol 粒级级配指数; $x_{\max}$ 为试样样本中的最大粒径。

根据式(1),采用 Origin 对废石骨料粒径进行拟合处理,拟合结果如图 1(b)所示。

根据曲线拟合结果可知废石骨料的 Talbol 粒级级配指数为 0.687,要大于理想富勒级配指数 0.5,说明破碎废石骨料粗颗粒的含量偏大,需要混合一部分细骨料以构成充填体骨架,从而防止粗骨料掺入过多导致浆料发生严重的离析现象,对充填质量造成不利的影响。

1.3 充填骨料级配计算

为探究破碎废石与全尾砂以何种比例进行混合后,使得在同等水泥用量及浓度条件下,充填体具有最佳的强度值,试验设计了 11 组不同的配比,依据两种混合骨料堆积密实度模型进行不同配比下混合骨料堆积密实度计算,结果如图 2 所示^[15]。

$$\phi = \begin{cases} \frac{1}{\rho} \left(\frac{w}{\rho_1} + 1 - \frac{w}{\rho_2 \phi_2} \right)^{-1}, & w \leq \frac{\rho_1 \phi_1}{\rho} \\ \frac{1}{\rho} \left[\frac{w}{\rho_1 (\phi_1 + 1 - x \rho / \rho_1)} + \frac{1-w}{\rho_2 \phi_2} \right]^{-1}, & w > \frac{\rho_1 \phi_1}{\rho} \end{cases} \quad (2)$$

式中: ρ_1 为粗骨料密度, t/m^3 ; ρ_2 为细骨料密度, t/m^3 ; $\rho = \left[\frac{w}{\rho_1} + \frac{1-w}{\rho_2} \right]^{-1}$, $0 \leq w \leq 1$; ϕ_1 为粗骨料堆积密度; ϕ_2 为细骨料堆积密度; w 为破碎废石在混合骨料中的质量分数。

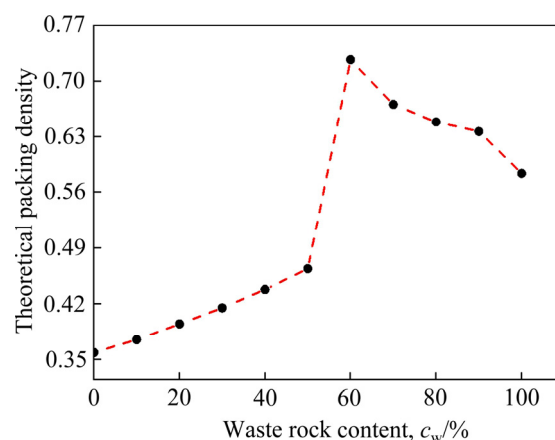


图2 不同废石含量下废石-全尾砂混合骨料的堆积密实度计算结果

Fig. 2 Calculation results of bulk compactness of waste rock-whole tailings mixed aggregate under different waste rock contents

由图 2 可知,当废石在混合骨料占比超过 60% 时,混合骨料的堆积密实度呈下降的趋势,此时充填体在理论上不具备最佳的强度。因此,本次试验选择废石含量为 40%~70% 范围进行混合骨料配比试验。

1.4 试验方案及试样制备

采用废石、全尾砂作为充填骨料,水泥作为胶凝材料,开展不同配比下的充填体单轴压缩的力学试验及流动性能测定。具体的试验参数为:水泥掺量 310 kg/m^3 ,质量浓度设计为 75%、76%、77%、78% 等 4 级水平,每级浆料浓度的尾砂废石质量比为 6:4、5:5、4:6 和 3:7,减水剂选取水泥添加量的 2%。试样规格为 $7.07 \text{ cm} \times 7.07 \text{ cm} \times 7.07 \text{ cm}$,每级试验进行 3、7、14、28 和 56 d 等 5 个龄期的抗压

强度试验, 每个龄期浇筑 3 个试块, 总共浇筑试块 180 个。首先, 参照《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》(GB/T 50080—2002)进行不同配比下的坍落度测试, 测定不同配比下充填浆料的流动性参数; 随后, 进行试块的浇筑, 终凝 24 h 后拆模, 并将试块放置于养护箱进行养护(护温度, 湿度调节到 93%, 20 ℃)。在达到规定的养护龄期后, 参照《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2002)在刚性压力机上进行抗压强度试验。

2 结果与分析

2.1 浆料坍落度变化规律

对不同质量浓度(c_m)及废石含量(c_{ws})下的浆料坍落度进行测试, 灰砂比固定不变时, 浆料坍落度随质量浓度及废石掺量的变化规律如图 3 所示。从图 3(a)中可以看出, 质量浓度与坍落度具有明显的负相关性, 即坍落度随质量浓度的增加呈线性递减规律; 同时, 由表 2 中的拟合方程中变量前的系数

可知, 随着废石掺量的增大, 浆料坍落度降幅呈减小的趋势, 说明随废石掺量的增大, 坍落度表现出的质量浓度敏感性逐渐减小。由图 3(b)可知, 废石掺量与坍落度具有明显的正相关性, 即坍落度随废石掺量的增加呈指数函数增长规律, 且曲线的斜率随质量浓度的增加而增大。这表明随着浓度的增大, 坍落度表现出的废石掺量敏感性逐渐增强, 即高质量浓度下, 掺入一定量的粗骨料能显著改善浆体的流动性能。

2.2 混合骨料胶结充填体抗压强度增长规律

为得到金川二矿区混合骨料胶结充填体抗压强度随养护龄期变化的数学模型, 针对不同质量浓度、废石掺量下的混合骨料胶结充填体抗压强度进行非线性曲线拟合。以养护龄期为横坐标, 胶结充填体单轴抗压强度为纵坐标, 利用 Origin 数值分析软件对试验数据进行拟合, 得出金川二矿区混合骨料胶结充填体抗压强度与养护龄期的拟合关系如表 3 所示, 拟合关系曲线如图 4 所示。从图 4 中可

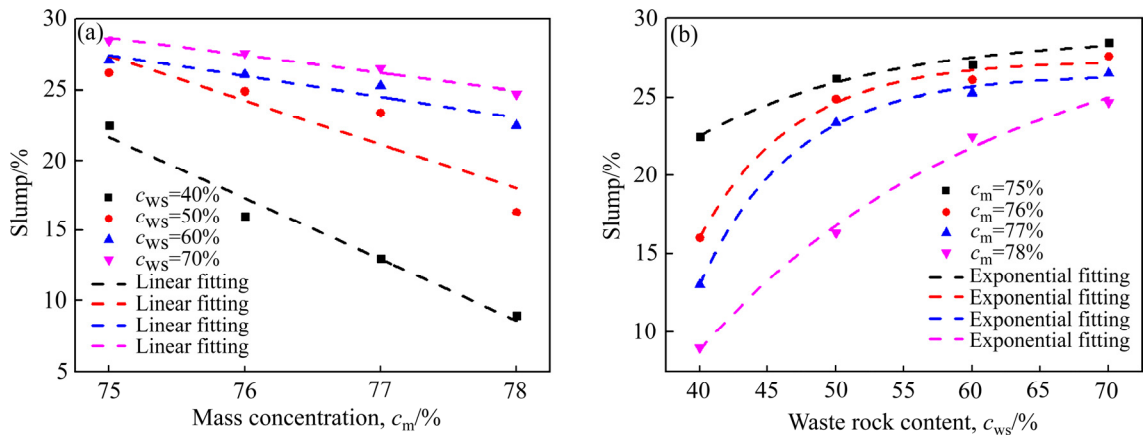


图 3 混合骨料充填浆料坍落度随影响因素的变化规律

Fig. 3 Change law of slurry slump of mixed aggregate filling with influencing factors: (a) Mass concentration; (b) Waste rock content

表 2 充填浆料坍落度拟合方程

Table 2 Filling equation of filling slurry slump

Mass concentration/ %	Fitting results between waste rock content(c_{ws}) and slump		Waste rock content/%	Fitting results between mass concentration(c_m) and slump	
	Fitting equation	R^2_r		Fitting equation	R^2_r
75	$30.5-134.1\exp(-0.04c_{ws})$	0.98	40	$347.9-4.35c_m$	0.96
76	$26.4-4378.3\exp(-0.14c_{ws})$	0.99	50	$261.4-3.12c_m$	0.75
77	$27.3-3765.1\exp(-0.15c_{ws})$	0.98	60	$136.9-1.46c_m$	0.86
78	$28.9-132.4\exp(-0.08c_{ws})$	0.95	70	$122.5-1.25c_m$	0.96

表 3 充填体抗压强度与养护龄期关系式

Table 3 Relation between compression strength of backfill and curing age

Mass concentration/ %	Fitting model of compressive strength and curing time			
	Waste rock content of 40%	Waste rock content of 50%	Waste rock content of 60%	Waste rock content of 70%
75	$\sigma=5.53-5.69e^{-0.13t}$ $R^2=0.990$	$\sigma=5.61-5.88e^{-0.13t}$ $R^2=0.964$	$\sigma=6.02-5.20e^{-0.10t}$ $R^2=0.960$	$\sigma=4.82-4.07e^{-0.07t}$ $R^2=0.990$
76	$\sigma=5.95-7.48e^{-0.26t}$ $R^2=0.990$	$\sigma=6.38-5.25e^{-0.08t}$ $R^2=0.860$	$\sigma=6.10-5.23e^{-0.13t}$ $R^2=0.930$	$\sigma=5.52-5.49e^{-0.11t}$ $R^2=0.990$
77	$\sigma=6.41-7.13e^{-0.22t}$ $R^2=0.980$	$\sigma=6.88-8.08e^{-0.20t}$ $R^2=0.963$	$\sigma=7.87-7.38e^{-0.13t}$ $R^2=0.987$	$\sigma=5.94-6.11e^{-0.14t}$ $R^2=0.930$
78	$\sigma=7.58-7.04e^{-0.14t}$ $R^2=0.963$	$\sigma=7.65-8.32e^{-0.17t}$ $R^2=0.977$	$\sigma=8.42-8.08e^{-0.15t}$ $R^2=0.981$	$\sigma=6.93-6.84e^{-0.12t}$ $R^2=0.963$

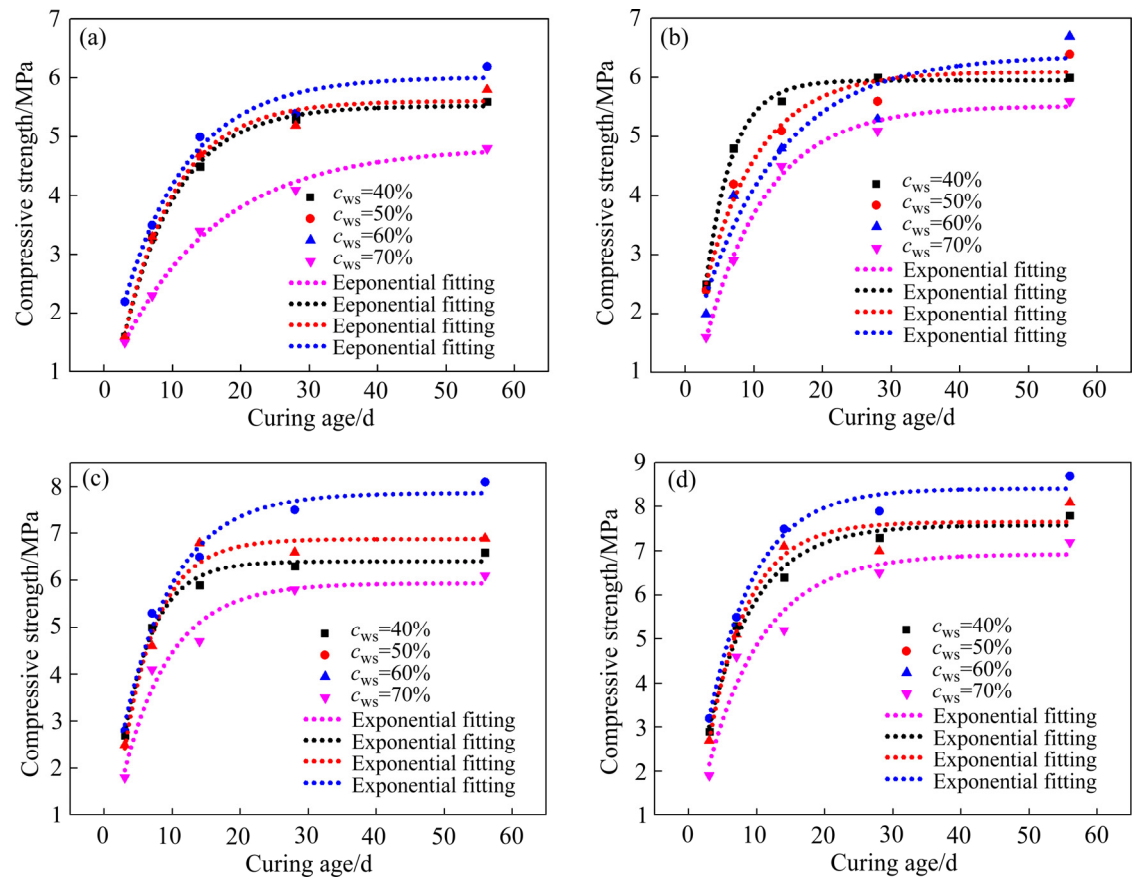


图 4 充填体抗压强度与养护龄期的关系

Fig. 4 Relationship between strength of backfilling and curing age: (a) Mass concentration of 75%; (b) Mass concentration of 76%; (c) Mass concentration of 77%; (d) Mass concentration of 78%

以看出，养护龄期 56 d 内，不同质量浓度、废石掺量下的混合骨料胶结充填体基本遵循指数函数增长规律；同时由试验结果可知，提升浆料质量浓度对混合骨料胶结充填体在各龄期内的抗压强度均有显著的提升作用，而增大废石掺量，混合骨料胶结充填体抗压强度(σ_t)呈先增加后减小的趋势。混

合骨料胶结充填体抗压强度与质量浓度、废石掺量及养护龄期均有关，其强度增长模型总体可表示为

$$\sigma_t = c - ae^{bt} \tag{3}$$

式中： a 、 b 、 c 分别为与质量浓度、养护龄期及废石掺量相关的拟合系数； t 为养护时间。

2.3 废石掺量对充填体微观结构的影响

由充填体强度与养护时间的拟合关系曲线可知, 随着废石掺量的增加, 充填体试样的单轴抗压强度呈先增大后减小的趋势, 为揭示出废石掺量对混合骨料胶结充填体力学性能的影响机理, 采用 AMRAY1820 电子显微镜对不同废石掺量下的充填体试样的微观结构性能进行分析。图 5 所示为水泥掺量 310 kg/m^3 , 质量浓度为 75%, 养护 28 d 时, 废石掺量为 40%、50%、60%和 70%的充填体内部微观结构 SEM 像。

由图 5 可以看出, 充填体养护 28 d 的水化产物显微结构主要由白色团絮状胶凝物质组成, 团絮状胶凝产物主要为水泥水化产物 C-S-H 凝胶^[16]。由图 5 可知, 废石掺量范围能对充填体内部微观结构的致密性产生显著的影响。当废石掺量为 60%时, 充填体内部具有最为致密的微观结构, 主要原因在于废石掺量为 60%时, 充填体具有最佳的堆积密度, 使得充填体能形成最为致密的骨架支撑体系, 从而使得充填体的机械强度达到最大值。而当废石掺量超过 60%后, 由于充填集料中粗骨料的含量过高, 细颗粒不能有效发挥“填充”效应, 导致充填

体内部具有大量的孔隙结构; 此时, 当充填体受到外载荷作用时, 容易产生应力集中现象, 从而降低了充填体承载能力。

3 混合骨料胶结充填体与深部开挖矿体匹配特性

3.1 金川二矿区采矿方法特征

金川二矿区采用下向分层进路式胶结充填采矿法(见图 6)对矿体进行回采。在下向分层充填采矿法中, 在回采上一个分层过程中构筑下一个分层的假顶, 并在假顶保护下回采下一分层的矿体。二矿区分层高度为 4 m, 采用胶结充填体作为构筑人工假顶, 在胶结充填体固化强度达到设计要求后, 进行下一分层矿体的回采。在上一分层矿体回采时, 依靠采场围岩维护采场整体的稳定性; 而下一分层矿体回采过程中, 回采矿体释放的能量部分转移到上一分层胶结充填体上, 降低能量的释放速度, 同时限制采场横向、纵向压力和变形。因此, 可从能量角度定量分析上分层胶结充填体固化时间, 同时在保证上分层胶结充填体固化强度满足设计要求

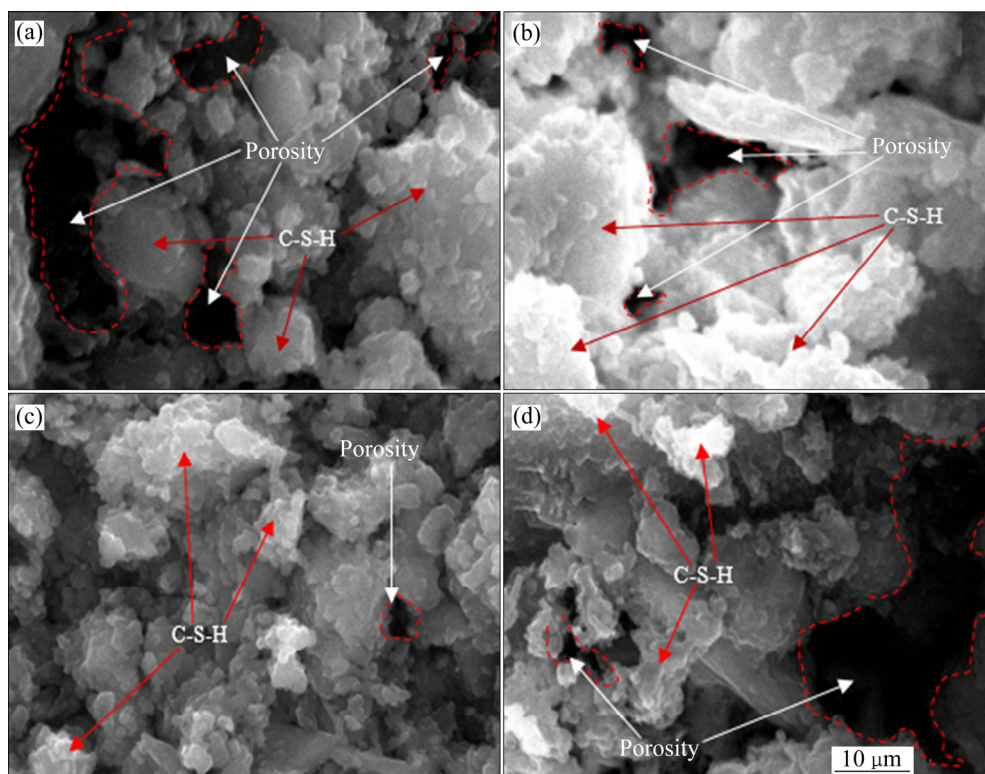


图 5 不同废石含量下充填体内部微观结构 SEM 像

Fig. 5 SEM images showing internal microstructure of backfill with different waste rock contents: (a) 40%; (b) 50%; (c) 60%; (d) 70%

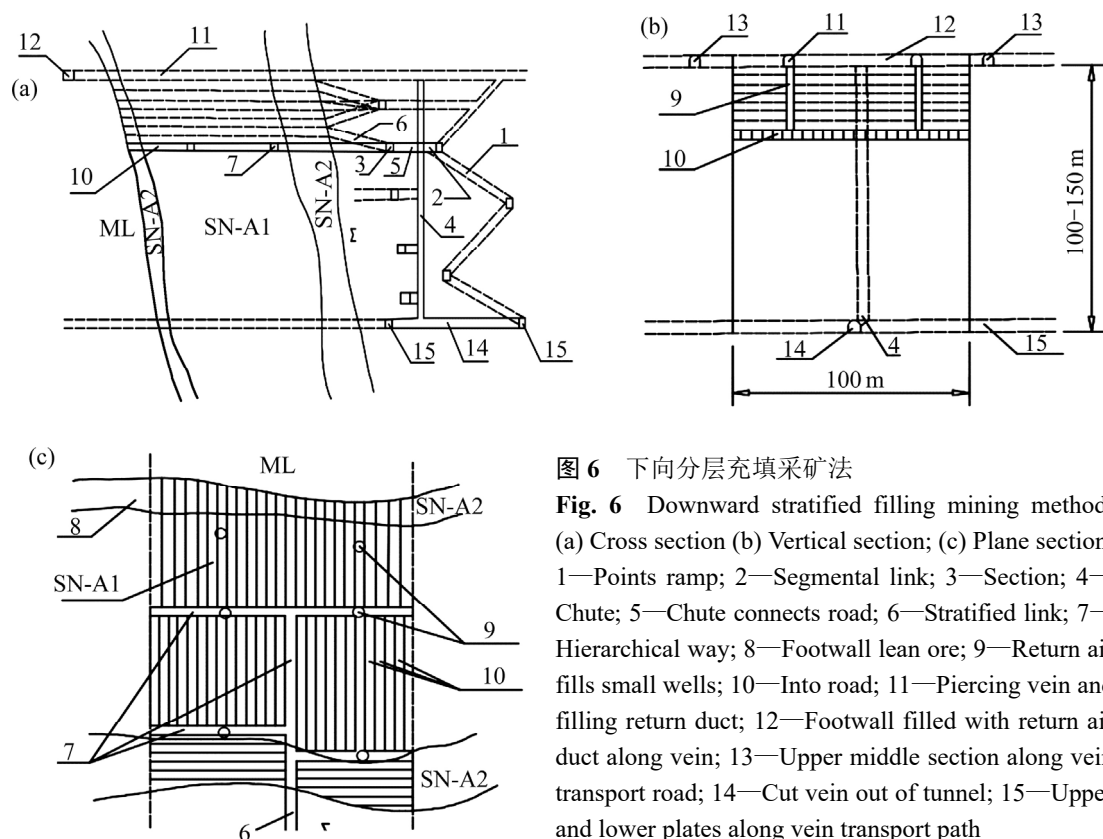


图6 下向分层充填采矿法

Fig. 6 Downward stratified filling mining method: (a) Cross section (b) Vertical section; (c) Plane section. 1—Points ramp; 2—Segmental link; 3—Section; 4—Chute; 5—Chute connects road; 6—Stratified link; 7—Hierarchical way; 8—Footwall lean ore; 9—Return air fills small wells; 10—Into road; 11—Piercing vein and filling return duct; 12—Footwall filled with return air duct along vein; 13—Upper middle section along vein transport road; 14—Cut vein out of tunnel; 15—Upper and lower plates along vein transport path

的前提下, 尽量选择固化时间较短的充填配比参数, 以提高生产效率。

3.2 矿岩回采能量耗散特性

矿岩的强度及弹性模量均大于充填体, 同时矿岩峰值应力前的应力-应变关系近似于线弹性, 因此矿岩可采用线弹性模型进行分析^[17]。

$$\sigma = E_0 \varepsilon \quad (4)$$

式中: σ 为原岩应力; E_0 为弹性模量; ε 为矿岩应变。

假设矿岩应力为自重应力, 不计其他构造应力的作用。因此, 回采后矿岩应力为 $\sigma_z = \gamma H$ (γ 为矿岩的容重, H 为矿岩的埋深)。在一维的情况下, 若矿岩回采后不进行回采处理, 则单位体积释放的应变能(U_r)为

$$U_r = \int_{\varepsilon_0}^0 \sigma_z d\varepsilon = -\frac{\gamma^2 H^2}{2E_0} \quad (5)$$

由式(5)可知, 矿岩回采释放的能量与矿岩的埋深及弹性模量具有紧密的联系。矿岩回采释放的能量与埋深呈正比, 埋深越大则释放的能量越多; 与矿岩的弹性模量呈反比, 弹性模量越大, 则矿岩回

采释放的能量越低。

3.3 胶结充填体受压变形能分析

在实际的采矿过程中, 下分层矿体回采完毕后, 上分层充填体至少有一侧处于临空状态, 因此, 需要考虑最危险的情况并对模型进行简化处理, 即本文将混合骨料胶结充填体受力简化为一维受力情况(见图 7)。根据 SIDOROFF^[18]提出的有效应力能量等价原理, 假设胶结充填体为各向同性连续介质, 在一维的情况下可采用有效应力计算充填体的弹性变形能。从充填体中选取一微元体 $dsdydz$ 作为研究对象, 当微元体受到的应力由 0 逐渐增加至 σ_t , 微元体变形 ε_t , 微元体的弹性变形能 dw 可表示如下:

$$dw = \frac{dw}{dv} = \frac{dw}{dx dy dz} = \int_0^{\varepsilon_t} \sigma_t d\varepsilon_t = \frac{\sigma_t^2}{2E} \quad (6)$$

由式(6)可得单位体积胶结充填体的比能为

$$U_p = \frac{dw}{dv} = \frac{dw}{dx dy dz} = \int_0^{\varepsilon_t} \sigma_t d\varepsilon_t = \frac{\sigma_t^2}{2E} \quad (7)$$

式中: σ_t 为充填体抗压强度; E 为充填体弹性模量。

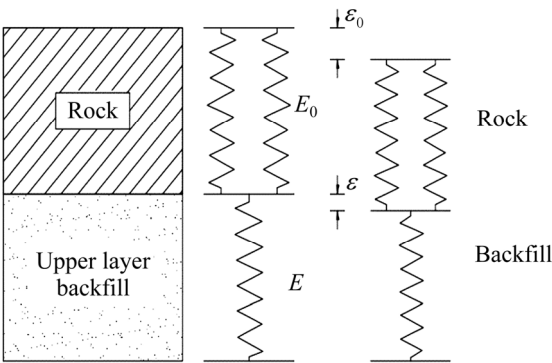


图 7 充填体与岩体力学模型示意图
Fig. 7 Schematic diagram of mechanics model between backfilling and rock mass

由室内试验得出充填体试样固化强度的增长规律模型如式(3)所示,忽略井下采场与室内养护箱间的温度、湿度差异,将式(3)代入到式(7)可得单位体积胶结充填体的比能与固化时间的关系^[19]:

$$U_p = \frac{\sigma_t^2}{2E} = \frac{(c - ae^{bt})^2}{2E}$$

(8)

由式(6)可知,质量浓度和灰砂比固定时,充填体的变形比能与固化时间呈正相关。

3.4 混合骨料胶结充填体与深部矿岩的匹配分析

根据能量守恒原理,即废石-全尾砂胶结充填体受压峰值变形能与矿岩开挖后释放的能量应近似相等,基于此原理考虑废石-全尾砂胶结充填体与矿岩的匹配。假设混合骨料胶结充填体变形比能 U_p 与岩体释放比能 U_r 之比为能量匹配系数 K ,根据式(5)、(8)可得:

$$K = \frac{U_p}{U_r} = \frac{E_0(c - ae^{bt})^2}{E\gamma^2 H^2}$$

(9)

根据 SWAN 等^[20]的力学试验及数据处理方法,得到废石-尾砂胶结充填体弹性模量 E 与抗压强度

σ 之间的关系符合式(10):

$$E = \frac{\sigma^{1.5}}{4}$$

(10)

将式(10)代入到式(9)可得:

$$K = \frac{U_p}{U_r} = \frac{4E_0(c - ae^{bt})^{0.5}}{\gamma^2 H^2}$$

(11)

由式(11)可知,匹配系数 K 与矿岩的弹性模量及充填体固化强度 $\sigma^{1.5}$ 呈正比,与矿岩的容重及埋深呈反比。 K 值越大,混合骨料胶结充填体吸收矿岩释放能量的能力就越大,对于保持下分层矿体回采的稳定性更有利。当 $K \geq 1$ 时,充填体不会发生能量失稳;当 $K < 1$ 时,充填体会发生能量失稳,与开挖矿体不匹配。因此,可结合矿山的矿体力学参数,定量分析上分层混合骨料胶结充填体作为人工假顶在采场内的合理养护时间。

4 工程实例

二矿区是金川镍矿矿体规模最大,矿石品位最高、储量最高的矿区,其主要含有 1#和 2#矿体。本文以二矿区 1#矿体 1000 m 中段富矿回采为研究实例,矿体埋深 702 m。根据前人的研究结果可得山下矿体力学参数^[21]:容重为 30.5 kN/m³,弹性模量为 50 GPa,泊松比为 0.26。根据混合骨料胶结充填体与开挖矿岩的匹配系数 K ,可得采场内混合骨料胶结充填体固化时间的计算式如下:

$$\frac{4E_0(c - ae^{bt})^{0.5}}{\gamma^2 H^2} \geq 1$$

(12)

结合矿岩的埋深、力学参数,通过式(12)可计算出不同配比参数下,上分层混合骨料胶结充填体作为人工假顶在采场内的合理养护时间,如表 4 所示。

表 4 上分层混合骨料胶结充填体固化时间

Table 4 Curing time of the upper layered mixed aggregate cemented backfill

Mass concentration/%	Curing time of mixed aggregate cemented backfill body/d			
	Waste rock content of 40%	Waste rock content of 50%	Waste rock content of 60%	Waste rock content of 70%
75	23.0	27.8	14.9	—
76	9.1	19.1	13.95	27.2
77	8.2	7.99	7.87	15.5
78	7.89	7.30	6.22	11.86

由表4可知,同一废石掺量下,浆料质量浓度越高,混合骨料胶结充填体在上分层的固化时间就越短,这是因为高浓度的浆料具有较高的黏度,对粗骨料的沉降能够产生较大的阻力,缩短了大小颗粒间的沉降距离,使得浆料内的颗粒间距更为均匀,有助于充填体强度的提升,从而使充填体能够在较短的养护时间内达到矿体回采所需的充填体强度要求。同一质量浓度下,随着废石掺量的增加,充填体的养护时间呈现先降低后增大的趋势。这是因为合理的废石掺量能够形成牢固的骨架结构,使得全尾砂能够发挥最佳的“填充效应”,从而使得充填体强度在较短的养护时间达到矿体回采对充填体强度的需求。而过量的废石掺量意味着全尾砂细颗粒大幅度减少,减少了细颗粒表面自由水的吸附,因此在搅拌过程中,随着粗骨料的增加,吸收拌合用水量在逐渐降低,增大了充填体的实际水胶比(即增加了拌合含水量),使得充填体需要更长的养护时间才能达到矿体回采对充填体强度的需求。

以混合骨料胶结充填体固化强度、在采场内的合理固化时间及浆料坍落度为评判指标对混合骨料充填浆料配比参数进行优选。根据国内诸多矿山的实践经验,结合矿山胶结充填理论,认为当胶结充填浆料坍落扩展度范围在25~28 cm时,均具有较好的流动性,可获得较好的输送效果^[22],二矿区计划仍采用自流输送的方式进行浆料的输送,结合此前充填浆料的坍落扩展度参数,若要达到自流输送要求,混合骨料充填浆料的坍落度应不低于27 cm。由混合骨料胶结充填浆料坍落度参数可知,当废石掺量分别为60%和70%,浆料质量浓度为75%和76%时,浆料坍落度参数均超过27 cm,此时混合骨料充填浆料的流动性可达到自流输送需求。同时由表4可知,当采用废石掺量为70%、质量浓度为75%时,浆料的固化时间要远高于质量浓度为76%的浆料,因此综合浆料的流动性能、固化时间选择采用水泥掺量310 kg/m³,质量浓度为76%、废石与全尾砂质量比为6:4作为矿山充填配比参数,该配比参数下上分层混合骨料胶结充填体固化时间超过14 d后可进行下分层矿体的回采。进行矿山充填后,该配比参数浇筑的混合骨料胶结充填体3、7、

14和28 d的抗压强度分别为2.60、4.80、5.60和6.00 MPa,充填体固化强度达到了金川二矿区充填体强度设计标准(3 d抗压强度 ≥ 1.5 MPa、7 d抗压强度 ≥ 2.5 MPa、28 d抗压强度 ≥ 5 MPa),说明所优选出的配比参数能够为矿山现场配比设计提供指导。

5 结论

1) 废石掺量一定时,混合骨料充填浆料坍落度随质量浓度增加呈线性递减规律,且随废石掺量增加,坍落度表现出的质量浓度敏感性呈逐渐减小;质量浓度一定时,混合骨料充填浆料坍落度随废石掺量增加呈指数函数增长规律,且随质量浓度增加,坍落度表现出的废石掺量敏感性逐渐增强,即高质量浓度下,掺入一定量的粗骨料能显著改善浆体的流动性能。

2) 水泥掺量一定时,质量浓度、废石掺量均为影响混合骨料胶结充填体抗压强度的主要因素;在养护龄期56 d内,不同质量浓度、废石掺量下的混合骨料胶结充填体抗压强度基本遵循指数函数增长规律;微观结构分析表明,水泥掺量、质量浓度一定时,充填体内部微观结构的致密性随废石掺量增大呈现出先提升后降低的现象,进而导致充填体宏观强度随废石掺量增加呈现出先增大后减小的趋势。

3) 引入能量匹配系数 K 定量表征充填体与开挖矿体间的能量关系, K 值越大,充填体吸收的应变能越多,越有利于下分层矿体的回采。当 $K \geq 1$ 时,充填体不会发生能量失稳,此时可定量分析上分层混合骨料胶结充填体作为人工假顶在采场内的合理养护时间。

4) 依据建立的混合骨料胶结充填体与开挖矿体间的能量匹配模型,定量分析了上分层混合骨料胶结充填体作为人工假顶在采场内的合理养护时间。以金川二矿区为工程实例,得出采用水泥掺量为310 kg/m³,质量浓度为76%、废石与全尾砂质量比为6:4的配比参数时,上分层混合骨料胶结充填体固化时间超过14 d后即可进行下分层矿体的回采。

REFERENCES

- [1] 李一帆, 张建明, 邓 飞. 深部采空区尾砂胶结充填体强度特性试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(6): 865–868.
LI Yi-fan, ZHANG Jian-ming, DENG Fei. Experimental study on strength characteristics of tailings cement backfilling at deep-seated mined-out area[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(6): 865–868.
- [2] 于 跃, 郑伟钰, 程 坤. 煤矿高浓度胶结充填浆料管道沿程阻力研究[J]. 煤矿安全, 2017, 48(2): 72–75.
YU Yue, ZHENG Wei-ze, CHENG Kun. Research on pipe flow resistance loss of high concentration filling materials in coal mine[J]. Coal Mine Safety, 2017, 48(2): 72–75.
- [3] 张连富, 吴爱祥, 王洪江. 泵送剂对高含泥膏体流变特性影响及机理[J]. 工程科学学报, 2018, 40(8): 918–924.
ZHANG Lian-fu, WU Ai-xiang, WANG Hong-jiang. Effects and mechanism of pumping agent on rheological properties of highly muddy paste[J]. Chinese Journal of Engineering, 2018, 40(8): 918–924.
- [4] 王少勇, 吴爱祥, 尹升华. 膏体浆料管道输送压力损失的影响因素[J]. 工程科学学报, 2015, 37(1): 7–12.
WANG Shao-yong, WU Ai-xiang, YIN Shen-hua. Influence factors of pressure loss in pipeline transportation of paste slurry[J]. Chinese Journal of Engineering, 2015, 37(1): 7–12.
- [5] 张连富, 吴爱祥, 王洪江, 等. 尾矿膏体屈服应力演化规律[J]. 中国有色金属学报, 2018, 28(8): 1631–1636.
ZHANG Lian-fu, WU Ai-xiang, WANG Hong-jiang, et al. Evolution law of yield stress in paste tailings[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2018, 28(8): 1631–1636.
- [6] 韩 斌, 王贤来, 肖卫国. 基于多元非线性回归的井下采场充填体强度预测及评价[J]. 采矿与安全工程学报, 2012, 29(5): 714–718.
HAN Bing, WANG Xian-lai, XIAO Wei-guo. Estimation and evaluation of backfill strength in underground stope based on multivariate nonlinear regression analysis[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2012, 29(5): 714–718.
- [7] 曹 帅, 宋卫东, 薛改利, 等. 分层尾砂胶结充填体力学特性变化规律及破坏模式[J]. 中国矿业大学学报, 2016, 45(4): 717–722, 728.
CAO Shuai, SONG Wei-dong, XUE Gai-li, et al. Mechanical characteristics variation of stratified cemented tailing backfilling and its failure modes[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2016, 45(4): 717–722, 728.
- [8] 卢宏建, 梁 鹏, 甘德清, 等. 充填浆料流动沉降规律与充填体力学特性研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(S1): 263–270.
LU Hong-jian, LIANG Peng, GAN De-qing, et al. Research on flow sedimentation law of filling slurry and mechanical characteristics of backfill body[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(S1): 263–270.
- [9] 杨 磊, 邱景平, 孙晓刚, 等. 阶段嗣后胶结充填体矿柱强度模型研究与应用[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, 49(9): 2316–2322.
YANG Lei, QIU Jing-ping, SUN Xiao-gang, et al. Research and application on strength model of cemented backfill pillar for stage subsequent filling mining method[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2018, 49(9): 2316–2322.
- [10] 赵国彦, 马 举, 彭 康, 等. 基于响应而法的高寒矿山充填配比优化[J]. 工程科学学报, 2013, 35(5): 559–565.
ZHAO Guo-yan, MA Ju, PENG Kang, et al. Mix ratio optimization of alpine Journal mine backfill based on response surface method[J]. Chinese Journal of Engineering, 2013, 35(5): 559–565.
- [11] 杨志强, 高 谦, 王永前, 等. 不同骨料固结粉胶结充填体强度试验与对比分析[J]. 大连理工大学学报, 2016, 56(5): 466–473.
YANG Zhi-qiang, GAO Qian, WANG Yong-qian, et al. Strength test on consolidation powder cementing filling body and comparison analysis for different aggregates[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2016, 56(5): 466–473.
- [12] 杨 啸, 杨志强, 高 谦, 等. 混合充填骨料胶结充填体强度试验与最优配比决策研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(S2): 635–641.
YANG Xiao, YANG Zhi-qiang, GAO Qian, et al. Cemented filling strength test and optimal proportion decision of mixed filling aggregate[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(S2): 635–641.
- [13] 刘志祥, 李夕兵, 戴塔根, 等. 尾砂胶结充填体损伤模型及与岩体的匹配分析[J]. 岩土力学, 2006, 27(9): 1442–1446.
LIU Zhi-xiang, LI Xi-bing, DAI Ta-gen, et al. On damage model of cemented tailings backfill and its match with rock mass[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(9): 1442–1446.
- [14] LIU Zhi-xiang, LAN Ming, XIAO Si-you, et al. Damage

- failure of cemented backfill and its reasonable match with rock mass[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015, 25(3): 954–959.
- [15] 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 Zi-guo, QIAO Deng-pan, GUO Zhong-lin, et al. Experimental research on mix proportioning 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.
- [16] 徐文彬, 杜建华, 宋卫东, 等. 超细全尾砂材料胶凝成岩机理试验[J]. 岩土力学, 2013, 34(8): 2295–2302.
- XU Wen-bin, DU Jian-hua, SONG Wei-dong, et al. Experiment on the mechanism of consolidating backfill body of extra-fine grain unclassified tailings and cementitious materials[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(8): 2295–2302.
- [17] 贺桂成, 刘生龙, 黄炳香, 等. 废石胶结充填体与砂页岩合理匹配研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2017, 34(2): 371–377.
- HE Gui-cheng, LIU Sheng-long, HUANG Bing-xiang, et al. Reasonable matching for cemented waste rock backfill and sand shale[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2017, 34(2): 371–377.
- [18] ZHOU Zi-long, LI Xi-bing, YE Zhou-yuan, et al. Obtaining Constitutive relationship for rate-dependent rock in SHPB tests[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2010, 43(6):697-706.
- [19] 李长洪, 魏晓明, 张立新, 等. 胶结充填体与矿石的能量匹配关系及固化时间的确定[J]. 采矿与安全工程学报, 2017, 34(6): 1116–1121.
- LI Chang-hong, WEI Xiao-ming, ZHANG Li-xin, et al. Energy matching relationship between cemented backfill body and ore and determination of curing time[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2017, 34(6): 1116–1121.
- [20] LIU Zhi-xiang, LAN Ming, XIAO Si-you, et al. Damage failure of cemented backfill and its reasonable match with rock mass[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015, 25(3): 954–959.
- [21] 刘高, 韩文峰, 李雪峰. 金川矿山围岩动态演化及其力学参数研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(S2): 2588–2594.
- LIU Gao, HAN Wen-feng, LI Xue-feng. Dynamic evolution and mechanical parameters of surrounding rocks in Jinchuan nickel mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(S2): 2588–2594.
- [22] 赵树果, 苏东良, 吴文瑞, 等. 基于 Weibull 分布的充填体单轴压缩损伤模型研究[J]. 中国矿业, 2017, 26(2): 106–111.
- [23] ZHAO Shu-guo, SU Dong-liang, WU Wen-rui, et al. Study on uniaxial compression damage model of backfill based on Weibull distribution[J]. China Mining Magazine, 2017, 26(2): 106–111.

Strength characteristics of mixed aggregate cemented backfill and reasonable matching with excavated ore body

HOU Yong-qiang^{1,2}, YIN Sheng-hua^{1,2}, YANG Shi-xing^{1,2}, ZHNG Ming-zhe^{1,2}, CAO Yong^{1,2}

(1. School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2. Key Laboratory of High-Efficient Mining and Safety of Metal Mines, Ministry of Education, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to study the strength characteristics of mixed aggregate cemented backfill and the reasonable matching with excavated ore bodies, a single factor multi-level experimental design method was used to study the mixing ratio of mixed aggregate cemented backfill. The effects of mass concentration and waste rock content on the slump and solidification strength of mixed aggregate filler were discussed, the solidification strength growth model was established and the effect of waste rock content on the microstructure and properties of mixed aggregate cemented backfill was studied by SEM. Combined with the energy dissipation principle, the energy matching coefficient K was introduced to analyze the reasonable matching between the filling body and the excavated ore body, and the reasonable curing time of the mixed aggregate cemented backfill as the artificial false roof in the stope was quantitatively analyzed. The results show that the slump of filling slurry decreases linearly with the increase of mass concentration, and increases exponentially with the increase of waste rock content. Within 56 d of curing age, the compressive strength of the composite aggregate cemented backfill under different mass concentrations and waste rock contents follows the exponential function growth law. The microscopic test results show that the range of waste rock content can significantly affect the compactness of the microstructure inside the backfilling, which in turn affects the macroscopic mechanical strength of the backfilling. The energy matching coefficient K was introduced to quantitatively characterize the energy relationship between the filling body and the excavated ore body. The variation of the curing time of the mixed aggregate cemented backfill in the stope was obtained under different ratio parameters. Based on the parameters such as filling slump, curing strength and curing time, a set of optimal ratio parameters is selected: the cement content is 310 kg/m³, the mass concentration is 76%, and the waste rock content is 60%.

Key words: filling body; energy matching analysis; curing time; strength growth law; slump; microstructure

Foundation item: Project(201902) supported by the National Key Laboratory of Nickel and Cobalt Resources Comprehensive Utilization, China; Project(2019SDZY05) supported by the Shandong Provincial Major Science and Technology Innovation, China; Project(51734001) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project(FRF-TP-18-003C1) supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities, China

Received date: 2019-11-07; **Accepted date:** 2021-07-14

Corresponding author: YIN Sheng-hua; Tel: +86-13811668481; E-mail: ustxsh@163.com

(编辑 龙怀中)