固结粉充填胶凝材料粉体细度对充填体强度的影响

肖柏林¹, 杨志强¹, 陈得信², 高谦^{1*}

1. 北京科技大学土木与资源工程学院, 金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室, 北京 100083;

2. 金川集团股份有限公司, 金昌 737100

* E-mail: gaoqian@ces.ustb.edu.cn

收稿日期: 2018-04-20; 接受日期: 2018-10-22; 网络版发表日期: 2018-12-14

国家重点研发计划重点专项(编号: 2017YFC0602903)资助项目

摘要 针对利用掺量超过75%水淬渣开发的充填胶凝材料(固结粉), 探讨胶凝材料粉体细度对充填体强度的影响规律. 粉体的比表面积测量结果表明, 比表受温度影响显著, 因此, 固结粉细度需要比表结合采用+45 μm 筛余百分比作为细度指标进行其质量评价; 粉体粉磨实验表明, 最佳粉磨时间为0.5 h, 增加粉磨时间将大幅降低粉磨效率. 针对不同粉体细度进行了固结粉充填体强度试验, 建立了水灰比与其强度的指数函数关系, 表明了粉体细度越细, 材料强度越高, 在此基础上提出了固结粉相对活性指数 η 的概念, 且 η 与粉体细度 δ 呈对数线性关系; 最后在传统采用浓度、胶砂比等工业充填参数的强度模型基础上, 建立了考虑粉体细度影响的充填体强度预测改进模型, 通过验证结果显示, 模型预测误差率在10%以内, 满足充填工业运行的范围.

关键词 高炉水淬渣, 矿渣基充填胶凝材料, 粉体细度, 相对活性指数, 强度模型

1 引言

近年来, 国内越来越多矿山处于深部开采, 不可避免地面临更复杂的地应力问题^[1~3]; 国家对矿山开采地表塌陷控制及环境保护要求日益严格, 对出坑废石及选矿尾砂征收环保税^[4]; 在此大环境下, 三大采矿方法中只有充填法采矿能满足要求, 事实上越来越多矿山正在将采矿方法改为充填法采矿^[5~7].

不考虑充填采矿高成本问题^[8], 充填体强度直接影响采场稳定性、采充顺序及生产效率, 是充填采矿设计的关键技术之一^[9]. 胶结充填体是将一定粒度的

采掘废石、地表砂石料、选矿尾砂等作为骨料, 添加一定量的胶结剂和水, 在地表搅拌站搅拌后通过管道自流或泵送输送到井下采场空区, 经过一定时间后形成具有一定强度的胶结体^[10]. 可以把充填体视为一种低标号的特殊混凝土, 很多充填体强度设计理念及方法都缘于混凝土行业^[11]; 比如强度模型中Bowromi公式表明^[12]混凝土强度是水灰比的一次函数, 可作为混凝土配合比设计的准则; Mitchell&Wong强度模型则考虑了水泥含量、孔隙率以及水灰比3个因素对强度的影响, 并反映了各因素与充填体强度之间的关系; Swan强度模型则是建立了胶结剂体积含量、骨料颗

引用格式: 肖柏林, 杨志强, 陈得信, 等. 固结粉充填胶凝材料粉体细度对充填体强度的影响. 中国科学: 技术科学, 2019, 49: 402–410

Xiao B L, Yang Z Q, Chen D X, et al. Impacts of slag-based-binder fineness on strength in mining backfill (in Chinese). Sci Sin Tech, 2019, 49: 402–410, doi: 10.1360/N092018-00109

粒间的自由距离及骨料表面积与混凝土强度关系^[13]; 充填体强度模型中最具影响的Arioglu强度模型, 建立了单轴抗压强度与水灰比的关系、黏聚力和单轴抗压强度的关系^[14]. 这些模型分别考虑了不同因素对强度的影响, 在不同矿山各有不同应用, 然而建立这些模型均使用水泥作为胶结剂, 水泥是现在大部分充填矿山主要使用的胶结剂, 然而随着选矿工艺技术的提高, 选矿尾砂越来越细是一种主流趋势, 这对矿山充填胶结剂势必带来新的挑战, 开发替代水泥的新型矿用胶凝材料也是未来矿山充填势在必行之路, 这对上述模型的适用性也将带来挑战.

矿山充填骨料具有多样复杂性、含泥量高^[15,16]等特点, 若用传统水泥胶结料需要提高水泥单耗, 成本剧增, 经济上不可行, 往往采用高炉水淬渣(简称矿渣)开发新型胶凝材料(矿渣掺量超过75%, 以下简称矿渣基胶凝材料)替代水泥, 特别适用于含泥量高的矿山骨料^[17-19]; 矿渣基胶凝材料的水化机理与水泥或矿渣水泥显著不同^[20], 经过多个项目实践总结发现, 环境温度、矿渣粉体细度等对矿渣基的充填体强度影响十分显著, 传统的强度模型不再适用. 为探索矿渣基充填胶凝材料的特性及应用规律, 本文详细分析了矿渣粉磨中的粒径细度变化规律, 研究细度对充填体强度影响, 建立矿渣基充填胶凝材料的强度模型, 为工业生产应用提供依据.

2 矿山充填料浆与混凝土的区别

经过多年发展, 矿山充填已形成区别于混凝土的基本概念, 如混凝土常用的水灰比、砂率、体积浓度、灰砂比等概念在矿山中基本不用, 而用水泥单耗(kg/m^3)或胶砂比(严格讲应该叫胶骨比)、固体质量浓度这两个概念足以表示料浆配比. “混凝土”与“充填体”有许多本质区别, 体现在以下几个方面.

(1) 从骨料上看, 混凝土的骨料严格为间断级配的卵石和砂, 粗细两部分组成(以4.75 mm为界), 粗细骨料的比列往往在3:7~4:6之间, 且细骨料对含泥量严格要求, 如C30混凝土的含泥量<3%. 而充填体的骨料相比而言可以说没要求, 可以是河沙集料、矿山掘进废石、戈壁集料、选矿尾砂、冶金固废等, 其特点是级配连续、粗细比例各个矿山变化大, 最重要的是含泥量高, 普遍在20%~30%之间, 甚至有些超细全尾砂的

含泥量高达80%以上.

(2) 从胶结剂上看, 混凝土是以水泥熟料为主要成分的水泥, 即使是最近应用广泛的矿渣水泥, 其主要成分还是熟料, 矿渣掺量基本不超过40%. 而充填体的胶结剂, 由于骨料含泥量较高, 水泥胶结体强度较低, 或者水泥单耗过高导致成本剧增, 一般为以矿渣为主开发的新型胶凝材料, 其矿渣使用量超过75%, 可以不含熟料, 因此与水泥相比具有不同的水化机理.

(3) 在料浆配比及性能上, 混凝土的水灰比一般小于0.3, 固体质量浓度往往高达90%, 塌落度<10 cm. 而充填体出于成本及相比而言超长管道自流或泵送输送, 水灰比在1.2以上, 固体质量浓度根据骨料差异在60%~80%之间, 料浆塌落度一般大于22 cm, 要求具有能自流平不离析的工作特性, 且充填体28 d强度要求基本在1~5 MPa之间, 属于低强度的“混凝土”.

由于这些本质区别, 不应把充填体认为是混凝土, 直接套用混凝土理论, 而应建立矿山充填独有的基础理论. 下面先从矿渣基充填胶凝材料的粉体细度开始研究.

3 不同粉磨时间的粉体细度测试分析

3.1 粉体粒径及成分测试

水泥的粉体细度要求不高, 一般为350~380 m^2/kg , 太细反而会导致混凝土开裂^[21]; 实践表明, 矿渣基充填胶凝材料对粉体细度要求高. 为探索不同细度矿渣对充填体性能影响, 需要制备不同细度的粉体材料, 采用金昌熙金公司球磨工业矿渣基胶凝材料(以下简称固结粉), 应用于金川公司龙首矿, 固结粉中矿渣掺量超过90%, 其余为以熟料和脱硫石膏粉体为主的盐、碱复合激发剂, 矿渣为酒钢渣, 其成分和评价如表1.

在室内用SM-500水泥小磨机进行不同时间粉磨, 然后分别采用FBS-1076型激光粒度分析仪和FBT-9型比表面积分析仪, 进行粒度分析和比表面积测试(材料密度为 $2.84 \times 10^3 \text{ kg}/\text{m}^3$), 结果如表2所示.

3.2 结果分析

3.2.1 温度对比表面积测试影响

首先可以看出外部温度对比表面积的测量影响显著, 如图1所示, 对于高于24℃标准室温, 室温每提高1℃, 比表面积的测量增加10 m^2/kg . 在水泥中, 由于混

表 1 酒钢公司高炉水淬渣化学成分与质量评价

成分	评价
SiO ₂ (%)	38.96
Al ₂ O ₃ (%)	11.50
Fe ₂ O ₃ (%)	0.33
CaO (%)	36.17
MgO (%)	10.14
MnO (%)	0.41
TiO ₂ (%)	0.61
其余 (%)	1.22
活性系数	0.295
碱性系数	0.918
质量系数	1.446

凝土对比表要求不高,可以忽略温度对测量的影响,但矿渣基胶凝材料对细度要求高,需要更精确的指标,因此必须对比表面积的测量建立一个基于温度的校正系数,或者结合其他指标,采用多参数指标对粉体细度进行评价.由于市面上有45 μm负压筛,测量简便,不被温度所影响,本文综合采用+45 μm筛余及比表面积2个指标综合评价粉体细度,如图2所示.

3.2.2 粒径特征值计算

根据不同粒径筛余量,对4种不同粉磨时间的样品进行几个常用粒径特征指标计算,结果如表3和图3所示.可以看出随着粉磨时间增加,下降最大的指标为 d_{90} ,其次为 d_{60} 和 d_{av} ,说明粉磨有效地减少了粗颗粒的范围.

3.2.3 粉磨效率分析

图3显示了不同粉磨时间的粉体各粒径指标,可以看出,粉磨时间从0~0.5 h时,各项指标都大幅下降,粉

体越来越细,粉磨1.5 h时,各指标趋于极限状态,如平均粒径基本稳定在10 μm附近.若定义粉磨效率为粒径下降对时间的导数,进一步地,图4粉磨效率跟时间的关系也表明0.5 h时的粉磨效率最高,如平均粒径的 $\frac{\partial d_{av}}{\partial t}$ 达到最大37.5,随着粉磨时间的增加,粉磨效率显著降低,如1.5 h时的 $\frac{\partial d_{av}}{\partial t}$ 降低为15.

4 粉体细度对胶结体强度影响试验

4.1 试验材料及方案

试验采用金川龙首矿棒磨砂+废石充填骨料,比例为7:3,密度为2670 kg/m³,骨料的粒径组成如表4所示.胶凝材料选用上述不同细度的固结粉,试验方案如表5,该浓度和胶砂比范围内的料浆塌落度(26~28 cm)及其他流动性能满足矿山自流输送要求.固结粉、水和骨料用搅拌机搅拌均匀后采用7.07 cm×7.07 cm×7.07 cm模具制作试件,用HBY-60B型恒温恒湿标准养护箱对试块进行标准养护,用DYE-200型压力试验机对试件进行3, 7, 28 d抗压强度测定.

4.2 强度的影响因素分析

从前面的叙述可以看出,混凝土的强度跟水灰比、胶结剂的掺量以及骨料等因素有关,这里主要从水灰比及细度进行分析.

4.2.1 水灰比对强度的影响

混凝土的经验表明水灰比对试块强度呈线性关系或负幂函数关系,而本例的充填体试块中,把浓度和胶结剂掺量换算成水灰比,得到水灰比跟强度的关系如图5所示;可以看出,充填体的水灰比均大于1.2,且范围较广,水灰比与强度可看成负指数关系:

表 2 固结粉粒径测量结果

固结粉	不同粒径的筛余量 (%)				比表面积 (m ² /kg)	
	30 μm	45 μm	60 μm	80 μm	标准室温24℃	高于标准温度27℃
粉磨0.0 h	24.2	13.1	6.6	1.5	400	435
粉磨0.5 h	11.3	5.3	2.4	0.3	510	540
粉磨1.0 h	11	3.9	1.6	0.2	530	580
粉磨1.5 h	9.2	3	1.1	0.1	570	600

图 1 (网络版彩图)不同室温下的粉磨时间与比表面积的关系

图 3 (网络版彩图)不同粉磨时间的粒径指标

图 2 (网络版彩图)+45 μm筛余及比表面积双指标

图 4 (网络版彩图)粉磨时间与粉磨效率

$$R = a \left(\frac{W}{C} \right)^{-b}, \quad (1)$$

式中, R 为单轴抗压强度, MPa; W/C 为水灰比; a 和 b 为大于零的系数。

如前所述, 矿山常使用质量浓度和胶结剂添加量

(或胶砂比)这两个概念, 在水、胶结剂、骨料确定密度已知的情况下, 水灰比可以与之相互换:

$$\begin{cases} \frac{m_w}{\rho_w} + \frac{m_c}{\rho_c} + \frac{m_a}{\rho_a} = 1, \\ \frac{m_c + m_a}{m_c + m_a + m_w} = \frac{Q}{100}, \end{cases} \quad (2)$$

表 3 固结粉细度分析结果(24°C)

粉磨时间 (h)	固结粉体粒径特征值 (μm)						比表面积 (m²/kg)	粉体细度 (%) (+45 μm筛余)
	d_{10}	d_{30}	d_{50}	d_{60}	d_{90}	d_{av}		
0	1.12	5.14	11.25	16.27	51.04	19.45	400	13.1
0.5	0.93	2.45	8.23	11.60	32.70	13.12	510	5.3
1.0	0.88	1.98	6.75	9.59	31.77	11.71	530	3.9
1.5	0.83	1.67	5.53	8.08	29.10	10.34	570	3.0

表 4 金川充填骨料粒径分布

骨料 粒径区间 (mm)	棒磨砂		废石	
	产率 (%)	筛上累计 (%)	产率 (%)	筛上累计 (%)
+4.75	4.85	4.85	23.99	23.99
4.75~3.2	4.35	9.2	10.31	34.3
3.2~2.36	12.6	21.8	9.51	43.81
2.36~1.18	20.75	42.55	12.12	55.93
1.18~0.6	13.45	56	10.55	66.48
0.6~0.3	19.4	75.4	10.83	77.31
0.3~0.15	15.9	91.3	8.71	86.02
0.15~0.075	5.4	96.7	7.75	93.77
-0.075	3.3	100	6.23	100

表 5 多细度强度试验方案

参数	数值
骨料	棒磨砂-废石
质量浓度 (%)	78, 80, 82
固结粉添加量 (kg/m ³)	290, 310
比表面积 (m ² /kg)	400, 510, 530, 570
+45 μm筛余 (%)	13.1, 5.3, 3.9, 3.0

式中, m_w , m_c , m_a 分别为料浆中水、胶结剂和骨料掺量, kg/m³; 对应于 ρ_w , ρ_c , ρ_a 的密度, kg/m³; Q 为固体质量浓度, %.

料浆配比中胶结剂掺量 m_c 、质量浓度 Q 及密度已知, m_w 和 m_a 未知, 可以解得水灰比:

$$\begin{aligned} \frac{W}{C} &= \frac{m_w}{m_c} \\ &= \frac{(\rho_w \rho_a \rho_c + m_c \rho_w \rho_c - m_c \rho_w \rho_a) \times (100 - Q)}{(100 - Q) m_a \rho_a \rho_c + m_c Q \rho_w \rho_c}. \end{aligned} \quad (3)$$

4.2.2 粉体细度对强度的影响

粉体的细度对充填体强度的影响显著, 图6显示了不同粉体细度与充填体强度的关系. 由此可以看出, 粉体越细或比表面积的增大, 与充填体强度的增长呈线性正相关, 图中趋势线的斜率表征了粉体细度对强度增长的贡献大小, 定义为增长率; 可以看出粉体细度对充填体强度的影响与浓度和胶结剂添加量无关(即不同浓度和胶结剂掺量对应直线的斜率基本不变), 而与期龄有关, 粉体的比表面积每提高10 m²/kg, 对3 d期

图 5 (网络版彩图)水灰比与强度关系

龄充填体试块强度的增长贡献为0.028 MPa, 对7 d期龄试块为0.057 MPa, 对28 d期龄试块为0.122 MPa; 若用+45 μm筛余细度指标 δ 表示, 则细度指标 δ 每降低1%, 对3, 7, 28 d充填体试块强度的增长贡献为0.04, 0.086, 0.196 MPa. 即粉体细度的提高.

原因分析: 增加粉体细度能提高充填体试块的强度, 一方面是细度提高使胶凝材料能充分填充到孔隙中, 细化孔隙和毛细孔, 使充填体更加致密从而强度提高, 另一方面粉体细度增加, 属于矿渣机械活化激发的一种, 即增加了料浆中骨料颗粒周围胶结分子颗粒的表面积, 单位体积内的活性颗粒数量增加, 水化反应加快, 从而充填体的强度得以提高. 为了表征这种活性特性, 定义同种浓度和胶砂比下固结粉和水泥作为胶结剂的充填体试块单轴抗压强度的比为固结粉的相对活性系数 η :

图 6 (网络版彩图)粉体细度与充填体强度关系

$$\eta = \frac{R_{\text{固结粉}}}{R_{42.5\text{水泥}}} \quad (4)$$

式中, $R_{\text{固结粉}}$ 为固结粉作为胶结剂的充填体试块 3, 7, 28 d 强度; $R_{42.5\text{水泥}}$ 为同等条件下(浓度、胶砂比和骨料)以 42.5 水泥(大部分矿山选用)作为胶结剂的充填体试块 3, 7, 28 d 强度; 得到的结果如表 6。

从表 6 可以看出: (1) δ 越小, 即粉体越细, 充填体试块 3 和 7 d 的强度(早期强度)提高得越显著; (2) 当 $\delta < 5\%$, 固结粉胶结体试块强度全部超过 42.5 水泥胶结体试块强度。

图 7 显示了细度 δ 与相对活性指数 η 呈指数函数关系, 且不同期龄试块规律一致; 若取不同细度、不同期

龄活性指数的均值作为指标, 再分别取对数, 得到图 8 所示的结果, 即:

$$\begin{aligned} \ln \eta &= 0.47138 - 0.25338 \ln \delta, \\ \text{即, } \eta &= 0.47138 \delta^{-0.25338}, \\ R^2 &= 0.98. \end{aligned} \quad (5)$$

5 胶结体强度预测模型

由于各个矿山充填的骨料种类粒径、成分等差异较大, 难以建立一个把骨料因素考虑在内的通用强度模型, 只能就某一个矿山或某类充填骨料(如铁矿全尾砂)建立单独的强度模型, 这里尝试建立以金川棒磨

表 6 不同细度的相对活性系数

胶结剂掺量 (kg/m^3)	细度 δ (%)	不同期龄活性指数 η			平均值
		3 d	7 d	28 d	
290	13.1	0.78	0.99	0.78	0.85
	5.3	0.85	1.03	1.19	1.02
	3.9	1.07	1.13	1.21	1.14
	3	1.09	1.41	1.24	1.25
310	13.1	1.04	0.85	0.66	0.85
	5.3	1.04	1.07	0.99	1.03
	3.9	1.09	1.25	1.01	1.12
	3	1.36	1.28	1.06	1.23

图 7 (网络版彩图)不同期龄的细度与相对活性指数

 图 8 (网络版彩图)细度 δ 与相对活性指数 η 的对数关系

砂-废石为骨料、固结粉为胶结剂的强度模型。从上面的分析可知, 充填体的强度与水泥比、粉体细度、骨料等因素有关, 且这些因素相互独立, 因此可假设强度模型为

$$R = k \cdot \eta \cdot \left(\frac{W}{C}\right)^b, \quad (6)$$

式中, R 为单轴抗压强度, MPa; k 和 b 为系数, 其余的同上。

该模型综合考虑了浓度、胶砂比、粉体细度等因素, 代入式(3)和(5), 得

$$R = k \cdot 0.47138 \delta^{-0.25338} \times \left[\frac{(\rho_w \rho_a \rho_c + m \rho_w \rho_c - m \rho_w \rho_a) \times (100 - Q)}{(100 - Q) m \rho_a \rho_c + m Q \rho_w \rho_c} \right]^b. \quad (7)$$

在OriginPro中自定义函数, 利用试验数据对式(7)进行拟合, 直至结果收敛, 得到某固结粉胶结充填体3,

7, 28 d强度计算公式如式(8)。得到的7和28 d强度拟合公式相关系数 R^2 大于0.8, 说明拟合结果准确; 而3 d的强度模型误差稍大, 是由于试验数据中3 d强度结果受试验误差影响较大的原因。若对回归公式进行 F 统计量检验: $F > F_{0.05}(2, 22) = 3.443$, 说明该回归模型具有较高的可靠性。

$$\begin{cases} R_{3d} = 10.30457 \cdot \delta^{-0.25338} \cdot \left(\frac{W}{C}\right)^{-3.4774}, \\ R^2 = 0.64, F = 349.15, \\ R_{7d} = 11.82452 \cdot \delta^{-0.25338} \cdot \left(\frac{W}{C}\right)^{-2.46443}, \\ R^2 = 0.90, F = 2488.33, \\ R_{28d} = 13.575 \cdot \delta^{-0.25338} \cdot \left(\frac{W}{C}\right)^{-1.77476}, \\ R^2 = 0.92, F = 3343.95. \end{cases} \quad (8)$$

将计算值与实验值相减得到所有数据组的误差, 若以3 d强度误差为 x 轴, 以7 d强度误差为 y 轴, 以28 d强度为 z 轴, 则误差数据是三维坐标里的散点, 如图9中球体所示。图中坐标平面内的圆点为误差散点在两两误差平面的投影, 若以 ± 0.4 MPa为误差界限(相对误差 $< 10\%$), 得到容许误差范围(图中阴影区), 可见7~28 d平面内大多数点都落在允许误差范围内; 在3~7 d和3~28 d平面内由于3 d误差较大导致误差范围外的点增多, 但总体精度能满足工程实际需要, 因此模型是可靠的。

图 9 (网络版彩图)三维误差散点图

6 结论

通过试验探讨矿渣粉体细度对矿渣基充填胶凝材料强度影响规律, 得到以下结论.

(1) 矿山充填有行业通用的基本术语及概念, 区别于混凝土, 相比之下, 充填料浆具有大水灰比、更低的浓度、骨料复杂多变且含泥量超高等特点, 混凝土的诸多强度数学模型并不适用于充填料浆.

(2) 通过对工业矿渣基充填胶凝材料进行不同时间研磨及粒径测试表明, 比表面积的测量受温度影响较大, 应结合+45 μm 筛余百分比作为细度指标评价粉体细度; 矿渣最佳粉磨时间为0.5 h, 粉体细度各项指标

大幅降低, 效率最高, 当时间超过0.5 h粉磨效率逐渐降低.

(3) 通过矿渣基充填胶凝材料强度试验, 得到了水灰比与强度的函数关系, 并建立水灰比与质量浓度及胶砂比的换算关系; 讨论了不同粉体细度对充填体强度的影响规律, 得到相对活性系数 η 与+45 μm 筛余百分比 δ 呈对数线性关系.

(4) 采用矿山常用的质量浓度、胶砂比并考虑了粉体细度的影响, 建立了矿山充填体强度模型, 并对模型进行检验验证, 强度模型预测误差在10%以内, 具有良好可靠性.

参考文献

- 李夕兵, 周健, 王少锋, 等. 深部固体资源开采评述与探索. 中国有色金属学报, 2017, 27: 1236–1262
- Ranjith P G, Zhao J, Ju M, et al. Opportunities and challenges in deep mining: A brief review. *Engineering*, 2017, 3: 546–551
- 李新平, 汪斌, 周桂龙. 我国大陆实测深部地应力分布规律研究. 岩石力学与工程学报, 2012, 31: 2875–2880
- 黄祖绍. 创建绿色环保矿山、实现资源综合利用的探索与实践. 中国矿业, 2015, 24(s2): 76–80
- 王新民, 赵建文, 张钦礼, 等. 露天转地下最佳开采模式. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43: 1434–1439
- Ben-Awua E, Richter O, Elkington T, et al. Strategic mining options optimization: Open pit mining, underground mining or both. *Int J Min Sci Tech*, 2016, 26: 1065–1071
- 李海英, 任凤玉, 周胜利, 等. 海南铁矿露天转地下三维探采结合方法. 金属矿山, 2016, 45: 24–27
- 杨志强, 王永前, 高谦, 等. 金川镍矿废弃物在充填采矿中利用现状与展望. 矿产综合利用, 2017, 3: 22–28
- 刘志祥, 周士霖. 充填体强度设计知识库模型. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2012, 27: 7–12
- 杨志强, 高谦, 王永前, 等. 金川全尾砂-棒磨砂混合充填料胶砂强度与料浆流变特性研究. 岩石力学与工程学报, 2014, 33: 3985–3991
- 刘超, 韩斌, 孙伟, 等. 高寒地区废石破碎胶结充填体强度特性试验研究与工业应用. 岩石力学与工程学报, 2015, 34: 139–147
- 史才军, 王德辉, 安晓鹏, 等. 基于多种性能要求的混凝土组成设计方法. 硅酸盐学报, 2018, 46: 230–238
- 李彦坤, 胡晓波, 陈清己, 等. 球模型包裹法设计透水混凝土配合比. 混凝土, 2008, 9: 29–32
- Bharatkumar B H, Narayanan R, Raghuprasad B K, et al. Mix proportioning of high performance concrete. *Cement Concrete Compos*, 2001, 23: 71–80
- Chen Q, Zhang Q, Fourie A, et al. Utilization of phosphogypsum and phosphate tailings for cemented paste backfill. *J Environ Manage*, 2017, 201: 19–27
- 杨志强, 高谦, 王永前, 等. 废石尾砂混合料浆流变特性及充填采场流动性试验. 厦门大学学报(自然科学版), 2017, 56: 294–299
- 马伟东, 古德生, 王劫. 用于充填采矿的高性能水淬渣胶凝材料. 有色金属工程, 2006, 58: 86–88
- Cihangir F, Ercikdi B, Kesimal A, et al. Utilisation of alkali-activated blast furnace slag in paste backfill of high-sulphide mill tailings: Effect of binder type and dosage. *Miner Eng*, 2012, 30: 33–43
- 魏微, 杨志强, 高谦. 全尾砂新型胶凝材料的胶结作用. 建筑材料学报, 2013, 16: 881–887
- 张永娟, 张雄. 矿渣水泥活性研究. 同济大学学报(自然科学版), 2005, 33: 208–211
- 王冲, 张洪波, 杨长辉, 等. 水泥细度对水泥水化及混凝土早期开裂影响. 建筑材料学报, 2013, 16: 853–857

Impacts of slag-based-binder fineness on strength in mining backfill

XIAO BoLin¹, YANG ZhiQiang¹, CHEN DeXin² & GAO Qian¹

¹ Key Laboratory of High Efficient Mining and Safety of Metal Mine (Ministry of Education), School of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

² Jinchuan Group Co. LTD, Jinchang 737100, China

For the slag-gypsum binder (SGB) applied in mining backfill, which the quantity percentage of slag could be exceed 75%, this research studied the influencing rules of the SGB fineness on backfilling body strength. Firstly, tests on different milling duration of the SGB were carried out to study the SGB particle characteristics. It shows that surface area measurement is significantly affected by temperature, therefore, a new index δ which indicates cumulative particle percentage larger than 45 μm was used to evaluate the SGB fineness. And the best milling duration is 0.5 h, overtime milling contributes to a low efficiency drastically. Secondly, it carried out strength tests on the backfilling body with different SGB fineness δ , established an exponential function between strength and water-cement ratio. To illustrate the result of “the finer SGB, the higher strength”, a concept of relative activity index (RAI) η was presented, and the result shows that δ and η forms an inverse log-linear relationship. Finally, a modified strength predicting model which considers the impact of slurry concentration, cement ratio and SGB fineness was established, and the verification tests show that the predicting error is below 10%, which is completely within the industrial adaptation.

blast furnace slag, slag-gypsum binder (SGB), slag fineness, activity index, strength model

doi: [10.1360/N092018-00109](https://doi.org/10.1360/N092018-00109)