

碎石水泥浆胶结充填料自淋混合 与配合参数^①

周爱民

(长沙矿山研究院, 长沙 410012)

摘 要 为解决碎石胶结充填料制备工艺复杂与输送难度大等主要技术难题, 研究了碎石水泥浆自淋混合新技术; 同时研究了碎石水泥浆胶结充填料的最佳用水量, 以及水泥用量和掺砂量对碎石胶结充填体强度的影响。研究结果表明最佳用水量与水泥用量和碎石的吸水能力成正比关系; 当水泥单耗为 50~ 100 kg/m³ 时, 充填体单轴抗压强度与水泥用量呈线性相关; 当碎石中 < 5 mm 的细颗粒含量达 23% 时, 掺砂后充填体的强度增幅不到 5%。

关键词 胶结充填 充填料 混合 配合 充填体强度

中图法分类号 TD853. 343

碎石水泥浆胶结充填技术解决了传统工艺中碎石胶结充填料制备复杂和输送难度大等技术难题, 而且降低了成本, 简化了充填系统。70 年代奥地利的布莱堡铅锌矿已开始采用碎石水泥浆胶结充填技术^[1], 80 年代又有联邦德国的德赖斯拉和瓦尔法赫重晶石矿^[2, 3]、加拿大的基德克里克矿^[4, 5]和波拉里斯铅锌矿^[6]采用了这一技术, 我国的丰山铜矿于 90 年代采用了以自然级配的碎石集料作为充填骨料的碎石水泥浆胶结充填技术^[7]。这些矿山均实现了粗骨料和水泥浆分流输送, 解决了高浓度碎石胶结充填料的输送难题, 水泥耗量低。为了推广应用该技术, 研究其混合特性和配合参数是必不可少的。1989 年 Yu T R 结合基德克里克矿的实际应用, 研究了充填体强度与水泥用量之间的关系^[8], 但该矿是采用满足一定粒级要求的配合集料作充填骨料, 然而在矿山应用前景最大的是廉价的自然级配碎石集料。因此, 对于自然级配碎石集料的自淋混合特性及其配合参数均值得进一步研究。本文结合丰山铜矿的自然级配碎石集料, 研究碎石水泥浆自

淋混合的特性, 充填料的最佳用水量, 以及水泥用量和掺砂量对碎石胶结充填体强度的影响, 进而提出碎石胶结充填料的配合模型。

1 碎石水泥浆自淋混合试验

碎石水泥浆胶结充填的关键技术是通过水泥浆自淋混合工艺制备充填混合料。采用自淋混合工艺后, 碎石料和水泥浆可以分流输送, 而水泥浆管输性能好, 碎石料则可通过多种工艺进行输送。因此, 能方便地将碎石和水泥浆输送到井下作业点, 不但降低了充填料的制备成本, 而且大大简化了充填系统, 可以实现大规模、低成本碎石胶结充填。为了探讨自淋混合的特性, 采用丰山铜矿的掘进废石剔除大块后的自然级配集料(图 1 之曲线 2), 分别进行了溜槽自淋混合试验和直接自淋混合试验。

1.1 溜槽自淋混合

溜槽自淋混合试验通过如图 2 的自溜模型完成。该模型主要由 3 部分组成: 溜槽、碎石

① 收稿日期: 1997- 02- 20; 修回日期: 1998- 02- 16 周爱民, 男, 40 岁, 教授级高工

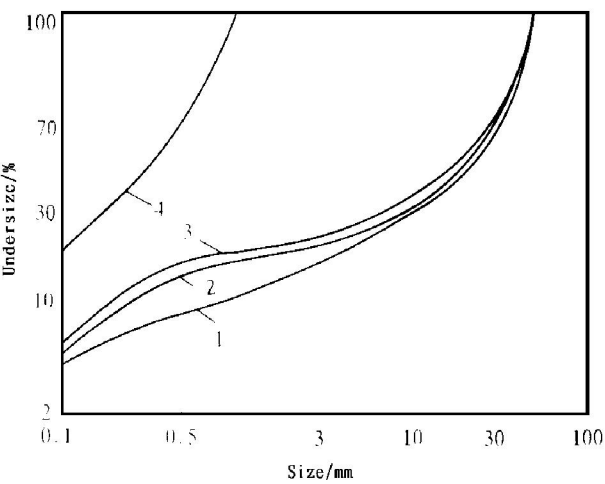


图 1 试验集料粒度分布曲线

Fig. 1 Size distribution for experimental aggregate

- 1—Crushed waste rock;
- 2—Waste rock from tunnelling;
- 3—Classified tailings mixture;
- 4—Classified tailings

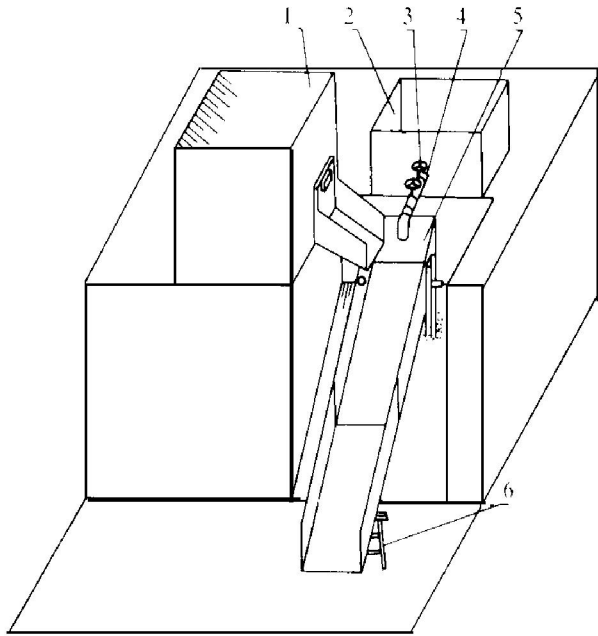


图 2 充填料自溜混合模拟试验模型

Fig. 2 Simulating test model for mixing filling materials by gravity flowing

- 1—Crushed rock bin; 2—Cement slurry tank;
- 3—Valve; 4— $d\ 7.62\text{ cm}$ water pipe;
- 5—Chute; 6—Wood support

仓和水泥浆池。溜槽为木结构平底明槽，内宽 400 mm，由长度为 3 m 和 2 m 的两段组成，分别可进行 3 m 溜距和 5 m 溜距实验。碎石料仓

底板为 43° 的斜面，水泥浆池为以排浆口为顶点的半圆锥形。

溜槽自淋混合模拟实验分 2 个阶段完成。第 1 阶段的实验目的是在不同的溜距和自溜条件下观察混合效果，其溜距分别为 3 m 和 5 m，自溜角分别为 38° 、 40.5° 和 43° ，共进行了 6 组 12 次实验。第 2 阶段在第 1 阶段实验结果的基础上，按最佳参数进一步进行 2 个水泥含量水平和 3 个龄期水平的单轴抗压强度试验。

实验结果表明，自溜混合效果与溜距的关系不明显；但自溜角对混合效果有一定的影响，当溜角偏小时溜槽底板有残留料浆，当溜角偏大则在自溜过程中存在分级现象；就总的效果来说，溜槽自淋混合可获得混合均匀的充填料，其试块抗压强度指标(表 1)满足工艺要求。

表 1 充填料试块 28 d 单轴抗压强度

Table 1 The 28 d uniaxial compressive strength for fillmass specimen

Mixing mode	Cement consumption / (kg•m ⁻³)	Water consumption / (kg•m ⁻³)	Maximum size / mm	< 5mm fines content / %	R_{28} / MPa
Chute self pouring	100	180	40	24.8	5.42
	75	150			3.39
Direct self pouring	88.8				3.30

1.2 直接自淋混合

直接自淋混合试验是结合丰山铜矿碎石水泥浆胶结充填工业试验进行的，其混合工艺示意图见图 3。碎石集料呈自然状态堆存于采场充填井中，在充填井的下部、即充填水平，呈自然安息角坍塌。水泥浆在地表制备后再经 $d\ 5.08\text{ cm}$ 管借助自重输送到井下混合点，直接浇淋于碎石料堆上。当铲运机将浇淋了水泥浆的充填混合料铲走后，存留在充填井中的碎石集料则随之自溜下来，形成连续的自淋混合工艺。进行了 3 种不同级配集料的混合试验，其结果表明：(1) 当碎石集料中 $< 5\text{ mm}$ 细粒级含量为 20% ~ 25% 时，水泥浆有一定的渗透能力，但渗透深度不大，不过浇淋了水泥浆后其

流动性能变好, 因而形成的混合料便向下坍落, 上部集料相继进入水泥浆淋着点, 混合效果好; (2) 当碎石集料中 $< 5\text{ mm}$ 细粒级含量偏少, 其混合料的流动性差, 坍落能力弱, 但水泥浆的渗透性好, 可达到水泥浆与碎石料混合均匀的目的; (3) $< 5\text{ mm}$ 粒级含量大于 30% 或含泥量大于 8% ~ 10% 时, 其自淋混合效果差, 须借助铲运机翻倒 1~2 次方可满足要求。因此, 当集料中细粒级含量、尤其是含泥量满足要求时, 直接自淋混合获得的充填料质量基本可达到机械搅拌或人工拌制的混合效果。通过对自淋混合料取样所进行的试块单轴抗压强度试验表明, 抗压强度值(表 1)满足工艺要求。可见水泥浆直接自淋混合能形成合格的胶结充填料, 并且对集料的级配变化有较强的适应能力。

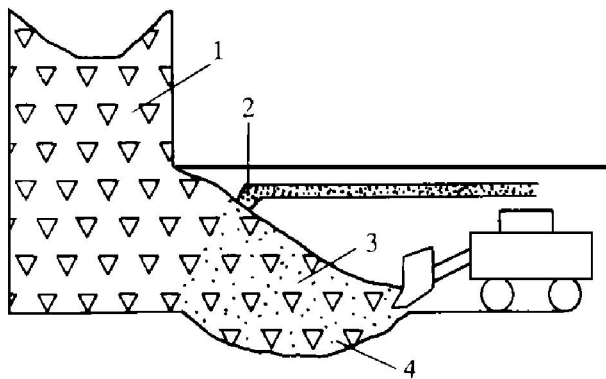


图 3 充填料自淋混合示意图

Fig. 3 Schematic diagram for filling materials mixing by self pouring

- 1—Filling aggregate;
2—Cement slurry; 3—Filling mixture;
4—Bottom tank for cement slurry storage

2 最佳用水量

由于胶结充填料的水泥用量一般不会达到饱和, 即在水灰比不变的情况下增加水泥用量时, 其强度会提高, 因此采用每立方米充填体用水量指标来表征水对强度的影响更为适宜。在工业应用中最重要的则是需要确定可使充填

体获得最大强度值的用水量, 即最佳用水量。

2.1 最佳用水量计算模型

对于输送性能有一定要求的碎石胶结充填料, 水的作用不仅仅是将水泥水化, 而且必须使充填料获得一定的坍落度。于是, 其用水量往往大于获得最大强度值所需用水量。碎石水泥浆胶结充填对输送性能无任何要求, 甚至其坍落度越小倒越有利于充填管理。因此, 用水量的唯一目的是获得最大的胶结强度。

由于碎石集料具有一定的吸附水能力, 显然, 当充填体强度值达到最大时的用水量, 为水泥水化水量和集料的吸附水量之和, 其计算模型可表为

$$W = K_c C + K_g G \quad (1)$$

式中 W —使充填料获得最高强度值的单位用水量, kg/m^3 ; K_c —水泥水化系数; C —水泥用量, kg/m^3 ; K_g —集料吸附水系数; G —集料用量, kg/m^3 。

关于水泥水化系数 K_c , 据国标 GB—177—85 水泥胶砂强度检验方法取 K_c 为 0.44, 也可通过实验测定。而集料的吸附水系数则与集料的物理特性相关, 一般地, 集料的比表面积越大, 其吸附水量越大, 需要通过实验才能确定, 如丰山铜矿 $< 40\text{ mm}$ 自然级配碎石集料的吸附水系数为 0.07。

在丰山条件下的最佳用水量计算公式为

$$W = 0.44C + 0.07G \quad (2)$$

2.2 用水量试验

为检验公式(2), 采用丰山铜矿的碎石集料进行了 3 组水泥用量条件下不同用水量的充填料试块单轴抗压强度试验, 其试验结果(图 4)中, 除第 3 组因水泥用量太少而对试块进行了修补, 因而有些失真外, 第 1, 2 两组的试验值与式(2)的计算结果基本吻合。

3 水泥用量与集料含砂量对强度的影响

水泥是充填料的胶结剂, 其作用是显然

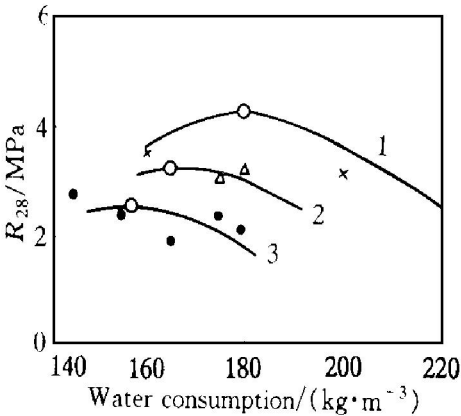


图 4 碎石胶结充填料单轴抗压强度与用水量关系

Fig. 4 Uniaxial compressive strength of cemented rockfill vs water consumption

- 1, × —Cement consumption 100 kg/m³;
2, Δ —Cement consumption 75 kg/m³;
3, ● —Cement consumption 50 kg/m³;
○—Optimal water consumption

的。集料作为一种分散相，其粒级配合对充填体的强度影响亦很大。但矿山充填因受成本的制约最简单经济，要求理想配合是不现实的，宜采用最简单经济的自然级配集料。因此，自然级配碎石集料中的含砂量是否满足要求，也是本节所探讨的内容。

3.1 强度试验

利用丰山铜矿废石经破碎后的自然级配碎石集料(图 1 之曲线 1)，其中< 5 mm 粒级含量占 22.7%，在最佳用水量条件下进行了碎石胶结充填料试块单轴抗压强度关于水泥用量和掺砂率双因素正交试验。所谓掺砂率是指在自然级配基础上再掺入一部分< 5 mm 粒级的细砂。本试验中掺和的细砂为选矿尾砂(粒级分布见图 1 之曲线 4)，其试验结果见表 2。

3.2 强度公式

设充填体强度的回归模型为

$$R = b_0 + b_1C + b_2P + b_3CP + b_4C^2 + b_5P^2 \tag{3}$$

式中 R —单轴抗压强度, MPa; b_i —回归常数; C —单位水泥用量, kg/m³; P —掺砂率, %。

表 2 水泥含量与掺砂率正交试验结果
Table 2 Horizontal orthogonal test results for cement consumption and fine sand or tailings addition

No	Cement consumption / (kg·m ⁻³)	Fines addition / %	Uniaxial compressive strength/ MPa		
			3 d	7 d	28 d
1	56	2.2	1.095	2.051	2.870
2	56	15.8	1.130	2.310	2.903
3	94	2.2	1.677	2.657	3.596
4	94	15.8	1.637	2.013	3.653
5	50	9	1.217	2.117	2.773
6	100	9	1.947	3.080	3.913
7	75	0	1.387	2.395	3.226
8	75	18	1.357	2.247	3.274
9	75	9	1.487	2.510	3.362
10	75	9	1.430	2.593	3.351
11	75	9	1.473	2.479	3.367
12	75	9	1.481	2.501	3.356
13	75	9	1.502	2.513	3.390

根据表 2 的试验数据进行回归分析后，分别获得不同龄期条件下的经验公式：

$$\left. \begin{aligned} R_3 &= 1.2729 - 0.0089C + 0.0001C^2 + 0.0311P - 0.0017P^2; \\ R_7 &= 2.3081 - 0.0153C + 0.0002C^2 + 0.0317P - 0.0018P^2; \\ R_{28} &= 1.8249 + 0.0210C + 0.0171P - 0.0009P^2; \\ \text{at } 50 \leq C \leq 100, 0 \leq P \leq 18 \end{aligned} \right\} \tag{4}$$

在自然级配条件下，即当 $P = 0$ 时，其经验公式为：

$$\left. \begin{aligned} R_3 &= 1.2729 - 0.0089C + 0.0001C^2; \\ R_7 &= 2.3081 - 0.0153C + 0.0002C^2; \\ R_{28} &= 1.8249 + 0.0210C; \\ 50 \leq C \leq 100 \end{aligned} \right\} \tag{5}$$

由式(4)可知，在自然级配的含砂率为 22.7% 的条件下，掺砂虽能使强度有所提高，但其增值很小，且 28 天的后期增值更小；水泥用量与掺砂率对充填体强度的影响是相互独立的。

上述两式还表明,在最佳用水量条件下,水泥用量是影响充填体强度的主要因素;前期强度与水泥用量成2次方关系,后期强度与水泥用量只成线性关系。

4 丰山铜矿碎石水泥浆胶结充填

丰山铜矿南缘矿带通过采矿方法技术改造采用了分段充填采矿法,并采用了碎石水泥浆胶结充填技术。

充填系统:该矿碎石水泥浆充填系统由地面破碎站、地面制浆站和井下充填材料转运系统3部分组成。地面破碎站主要负责碎石的加工并将其送至主充填井。主要包括容积为20 m³的废石原料仓、2段破碎机和带式输送机。地面制浆站包括散装水泥仓和高浓度搅拌机。水泥仓设计容积为200 m³,通过螺旋给料机向搅拌桶输送水泥。井下充填材料转运系统主要包括主充填井、4台胶带输送机、4个采场充填井和充填联络道、以及水泥浆输送管线。主充填井直径3.0 m,深97 m,在其下部的-50 m水平安装有振动给料机向皮带下料。垂直段输浆管管径为37.62 cm,从-50 m水平开始为 ϕ 5.08 cm管。

充填材料:采用地表破碎的<80 mm的自然级配碎石或井下掘进废石作为充填集料。但因掘进废石级配效果一般不佳,且常常夹杂有清道泥质物料,故只是在充填分段采场的上部用其作为充填集料。用水泥作为胶结剂,在地表制备成重量浓度为56%左右的水泥浆,借助自重输送到井下。

采场充填:采用水泥浆直接自淋混合工艺和斗容为2 m³的柴油铲运机进行采场充填,铲运机从混合点铲装充填混合料后,从充填水平卸入采空区。当铲运机完成铲、运、卸充填料3个动作时,可使充填料获得再次混合。尤其是当充填料卸入采场过程中,由于自重冲击作

用,具有较强的混合效果。充填集料的粗颗粒明显偏多时,充入采场后有粗颗粒滚动现象,不利于充填体的整体质量。级配合理的充填混合料卸入采场后,在自重作用下产生滑动,形成均质充填体。

部分充填进路要求充填接顶时,采用新型推卸式铲运机充填接顶,其接顶量可达进路断面的85%左右。

5 结束语

碎石水泥浆胶结充填技术的研究成果已直接应用于丰山铜矿的分段充填采矿法工业生产中。该矿的实际应用体现了高质量、低成本和大规模的特点:当水泥用量为75~100 kg/m³时,28 d的试块单轴抗压强度达3~4 MPa;实际水泥消耗为103 kg/m³,充填能力大于50 m³/h。显然,该技术克服了传统的碎石胶结充填工艺所存在的主要缺点,同时又保留了其抗压性能好的优点,使碎石胶结充填工艺具备了大范围推广应用的可能性。

REFERENCES

- 1 Hribernigg H. Erzmetall, 1979, 32(2): 86- 89.
- 2 Harnischmacher K and Nelles P L. Erzmetall, 1985, 38(9): 411- 418.
- 3 Gaul T H and Hoppe E. Erzmetall, 1987, 40(5): 225- 231.
- 4 Farsangi P and Hara A. CIM Bulletin, 1993, 86 (973): 68- 74.
- 5 Farsangi P, Hayward A and Hassani F. CIM Bulletin, 1996, 89(1001): 129- 134.
- 6 Dismuke S and Diment T. CIM Bulletin, 1996, 89 (1005): 91- 97.
- 7 Zhou Aimin(周爱民) and Liao Quanjia(廖全佳). Metal Mine(金属矿山), 1997, (9): 3- 8.
- 8 Yu T R. Youse Kuangshan(有色矿山), 1992, (3): 15- 21.

FILLING MATERIALS MIXING BY GRAVITY FLOWING AND THEIR BATCHING PARAMETERS FOR CEMENTED WASTE ROCK FILL

Zhou Aimin

Changsha Institute of Mining Research, Changsha 410012, P. R. China

ABSTRACT The cemented waste rock fill involves complicated and troublesome operations for the preparation and transportation of filling materials. In order to solve these problems, an innovative technology was developed to mix the crushed waste rocks with cement slurry by way of gravity flowing. Meanwhile, the optimal water consumption for cemented waste rock fill, and the effects of cement consumption and fine sand or tailings addition on the strength of waste rock fillbody were studied. It has been shown that the optimal water consumption is directly proportional to the absorbing capacity of crushed waste rocks; at 50~100 kg/m³ cement consumption, the correlation of uniaxial compressive strength of fillbody with cement consumption shows linear; at 23% particles(<5 mm) containing in crushed waste rocks, the increase in fillbody strength after adding sand is less than 5%.

Key words cemented filling filling materials mixing batching fillmass strength

(编辑 何学锋)