

# 基于均匀设计实验的膏体配比优化

艾纯明<sup>1</sup>, 吴爱祥<sup>1</sup>, 王洪江<sup>1</sup>, 刘斯忠<sup>2</sup>

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

2. 江西省矿检安全科技有限公司, 南昌 330000

**摘要** 某铅锌矿使用膏体充填中出现了缓凝现象, 添加促凝剂后效果良好。为优化添加促凝剂条件下的膏体物料配比, 开展了均匀设计实验。考察了膏体质量分数、砂灰比对泌水率、流动度、充填倍线、膏体强度的影响。实验结果表明, 膏体的泌水率、流动度和充填倍线主要受质量分数影响, 且均与浓度成负相关。砂灰比对流动度的影响很小, 但却是膏体强度的主要影响因素, 砂灰比越小, 膏体的强度越大。综合考察泌水率、流动度、充填倍线、膏体强度 4 种指标对应的配比范围, 得出推荐配比为质量分数 75%~76%、砂灰比 7:1~8:1。

**关键词** 均匀设计; 配比优化; 膏体充填

膏体充填技术具有不分层、不离析、不沉淀的特点<sup>[1]</sup>, 用于矿山井下充填水泥耗量低、充填体接顶性能和整体性能良好<sup>[2]</sup>。膏体充填可最大限度地减少固体废弃物的排放, 使矿山产生的尾砂得到完全回收利用成为可能<sup>[3]</sup>, 不仅大幅降低了充填采空区的费用, 还解决了环境污染问题<sup>[4]</sup>, 保证了矿山的可持续发展。目前, 膏体充填已成为国内外矿山关注的热点<sup>[5-7]</sup>。

云南某铅锌矿矿体赋存条件复杂, 矿体埋藏深, 矿区矿体总体属中等稳固, 采矿方法采用上向水平分层充填法进行回采<sup>[8]</sup>。矿体被采出后, 利用膏体充填处理空区。矿山目前年充填量达 15 万 m<sup>3</sup>, 充填流量达 40~60 m<sup>3</sup>/h。由于尾矿内锌含量高, 导致膏体充填至井下出现缓凝现象<sup>[9]</sup>, 严重影响了井下的正常生产。通过大量探索实验, 最终确定添加硫化物可有效解决膏体凝结时间长的问题, 膏体初凝时间由 60~90 h 缩减至 15 h 以内。在确定添加促凝剂后, 由于物料组成发生了变化, 需要对膏体的物料配比进行优化。本文从膏体输送和充填强度要求出发, 通过均匀设计实验, 探索在添加促凝剂的条件下适合膏体充填的最佳物料组成与配比。

## 1 试验材料和仪器

试验材料主要有昭通水泥、全尾砂、促凝剂。实验仪器主要有 NLD-3 型水泥胶砂流动度测定仪; 用于测定膏体的流动度; 三联砂浆试模和恒温恒湿养护箱; 用于将搅拌均匀的膏体制成模块, 进行标准养护后测定膏体的抗压强度; 药物

天平; 用于计量物料重量, 精度分别为 0.01 g 和 0.1 g。R/S 型四叶桨式旋转流变仪; 测出膏体的屈服应力和塑性黏度, 从而计算出膏体输送的充填倍线。

## 2 试验原理

### 2.1 泌水率

泌水率反映了料浆的析水性能, 实际上也是膏体的保水性能。膏体在输送过程中需要在管壁附近形成一个润滑层以减小沿程阻力, 该润滑层以膏体中自由水为主, 表现为一层水膜。为保证膏体正常输送, 需要有一定的泌水率。泌水率的计算公式为

$$P = \frac{m_0}{m} \times 100\% \quad (1)$$

式中,  $P$  为泌水率, %;  $m_0$  为泌出清水质量, g;  $m$  为膏体中总水量, g。

根据膏体定义<sup>[10]</sup>, 泌水率一般为 1.67%~5%。由于该矿采用自流输送, 因此泌水率在 5% 左右为佳。

### 2.2 流动度

流动度表示流体流动性的一种量度。根据现场经验, 当流动性指标大于 180 mm 时, 即可满足输送要求。

### 2.3 充填倍线

#### 2.3.1 膏体流变模型

目前, 国内外研究证实, 管道输送膏体料浆时的雷诺数远低于从层流过渡到紊流的雷诺数, 即浆体处于层流状态。膏体的流变模型宜采用 Hershel-Bulkley (H-B) 模型, 如式(2)

收稿日期: 2015-05-18; 修回日期: 2015-10-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(51374034); “十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAB08B02)

作者简介: 艾纯明, 博士, 研究方向为矿山安全开采, 电子信箱: a3aizi@163.com; 王洪江(通信作者), 教授, 研究方向为金属矿山膏体充填技术, 电子信箱: wanghj1988@126.com

引用格式: 艾纯明, 吴爱祥, 王洪江, 等. 基于均匀设计实验的膏体配比优化[J]. 科技导报, 2016, 34(2): 210-214; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2016.2.035

所示。

$$\tau = \eta\gamma + \tau_0 + K\gamma^n \quad (2)$$

式中,  $\tau$ 为剪切应力, Pa;  $\eta$ 为表观黏度, Pa·s;  $\tau_0$ 为动态屈服应力, Pa;  $K$ 为稠度系数, Pa·s<sup>*n*</sup>;  $n$ 为流态性能指数;  $\gamma$ 为剪切速率, s<sup>-1</sup>。

### 2.3.2 计算充填倍线

充填倍线指自流输送时料浆重力产生的势能所能克服管道阻力损失的能力。充填倍线直接关系到管道输送的状态,是管路输送中的一个重要参数。如果充填倍线过小,管道出口剩余压力大,管道会发生振动,易造成管道磨损,且引起安全隐患。如果倍线太大,膏体在管道中流动不畅,容易发生堵管现象,存在较大风险。为保证顺利实现管道自流输送,其几何充填管路倍线  $N$  应小于最大允许充填倍线  $N_{max}$ 。

充填倍线的计算方法如式(3)所示。

$$N = \frac{L+H}{H} \quad (3)$$

式中,  $N$ 为充填倍线;  $H$ 为垂直管高度或垂直料浆高度, m;  $L$ 为水平管道长度, m。

根据充填理论及伯努利方程可得:

$$\rho_j \cdot g \cdot H = h_w \quad (4)$$

式中,  $h_w$ 为浆体管道输送能量损失;  $\rho_j$ 为料浆密度, kg/m<sup>3</sup>。

$$h_w = \lambda \cdot i(H+L) \quad (5)$$

$$i = \frac{16}{3}\tau_0 + 4K\left(\frac{8V}{D}\right)^n / D \quad (6)$$

式中,  $\lambda$ 为管道输送的摩擦阻力系数, 1.05~1.15;  $g$ 为重力加速度,  $g=9.8 \text{ m/s}^2$ ;  $i$ 为水力坡度;  $V$ 为管道料浆平均流速, m/s;  $D$ 为管道内径, m。

联立式(2)~式(6),得:

$$N + \frac{\rho_j \cdot g \cdot D}{4\lambda} \cdot \frac{1}{\frac{4}{3}\tau_0 + K\left(\frac{8V}{D}\right)^n} \quad (7)$$

膏体自流输送的流速按下式计算。

$$Q + 3600 \times \frac{\pi}{4} D^2 \cdot V \quad (8)$$

即

$$V = \frac{Q}{900\pi \cdot D^2} \quad (9)$$

式中,  $Q$ 为膏体自流输送流量, m<sup>3</sup>/h。

现场实际充填流量为 50 m<sup>3</sup>/h, 管径为 150 mm, 计算得到流速为 0.79 m/s。

### 2.4 膏体强度

每组膏体考查了 14 d 和 28 d 两个养护时间, 每个龄期做 3 块 7.07 cm×7.07 cm×7.07 cm 的立方体试块。试块放在标准恒温恒湿养护箱中养护, 养护条件为: 温度 20℃, 湿度 >90%。测量了膏体两个龄期的单轴抗压强度, 每个龄期测试 3 个试块的强度, 取平均值。

在回采上一分层矿石的过程中, 铲运机通常于膏体充填约 14 d 后作业, 因此膏体 14 d 强度是考核的重要指标。前期理论分析的结论为: 充填体胶结面层 1.0 m 以内, 充填体的强

度应在 0.38~0.98 MPa; 在爆破动载效应下, 充填体强度应不小于 1.2 MPa。因此, 为确保充填体的安全稳定, 充填体强度应大于 1.2 MPa。

### 3 试验结果与讨论

根据前期探索性实验, 将促凝剂添加量定为 0.5%。结合现场充填技术方案, 设定试验膏体的质量分数为 73%~77%, 砂灰比(尾砂与胶凝材料的质量比)为 4:1~12:1, 通过二因素五水平均匀设计方法<sup>[11]</sup>, 寻求最佳物料配比, 试验方案见表 1。

表 1 膏体试验方案

Table 1 Paste experiment scheme

编号	质量分数/%	砂灰比	泌水率/%	流动度/cm	充填倍线	强度/MPa	
						14 d	28 d
1	73	6:1	9.3	30.0	13.65	1.02	2.63
2	74	10:1	8.3	25.5	11.72	0.48	0.88
3	75	4:1	5.7	22.2	6.58	2.24	4.49
4	76	8:1	4.8	20.5	5.91	0.98	1.63
5	77	12:1	4.1	19.0	4.56	0.45	1.05

#### 3.1 流变参数

保证固体物料及水来源一致, 根据表 1 配置 5 种不同配比的膏体, 通过流变仪测定得到流变数据, 绘制成剪切速率-剪切应力曲线, 如图 1 所示。

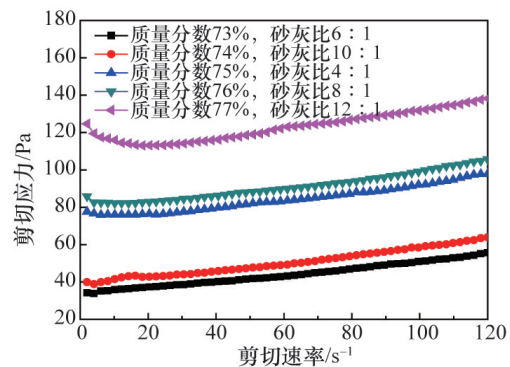


图 1 剪切速率-剪切应力曲线

Fig. 1 Shear rate-shear stress curves

采用 H-B 流变模型进行回归分析, 得到膏体不同浓度及物料配比条件下的流变参数, 见表 2。

根据表 2 中的膏体流变参数, 计算得出不同膏体配比的充填倍线, 结果如表 1 所示。同时, 测得 5 种不同配比膏体的其他参数, 结果见表 1。

表2 不同物料配比条件下流变参数  
Table 2 Rheological parameters under different mix proportions

质量分数/%	砂灰比	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$\tau_0/\text{Pa}$	$K/(\text{Pa}\cdot\text{s}^n)$	$n$	复相关系数
73	6:1	1858	34.7472	0.0533	1.2416	0.998
74	10:1	1849	40.3969	0.0380	1.3397	0.996
75	4:1	1917	75.6644	0.0114	1.5813	0.994
76	8:1	1872	82.4027	0.0066	1.7050	0.993
77	12:1	2000	114.6508	0.0028	1.8921	0.936

### 3.2 泌水率

根据表1中试验结果,应用DPS(data processing system)软件对膏体的泌水率进行二次多项式逐步回归分析,得到料浆的泌水率与膏体浓度、砂灰比的关系,回归结果如式(10)所示(相关系数 $R=0.9999$ )。

$$y_1 = 136.6716 - 1.7558x_1 - 1.4026x_2 + 0.02105x_1x_2 \quad (10)$$

式中, $y_1$ 为泌水率,%; $x_1$ 为质量分数,%; $x_2$ 为砂灰比。

根据式(10)得到泌水率与砂灰比、质量分数之间的关系,如图2所示。

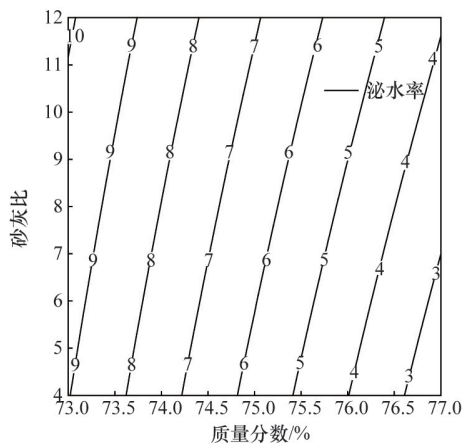


图2 泌水率的等值线

Fig. 2 Contours of bleeding rate

由图2可知,膏体泌水率主要受质量分数的影响,且与质量分数成负相关,质量分数越高,泌水率越小。在同一质量分数条件下,砂灰比越大,泌水率越大,说明膏体内水泥越少,膏体的保水性越差。膏体的泌水率在5%为最佳值,对应膏体最佳输送质量分数为75.5%~76.0%,此时砂灰比在6:1~9:1范围内,符合膏体自流输送要求。

### 3.3 流动度

根据表1中试验结果,对膏体的流动度进行回归分析,得到料浆的流动度与膏体质量分数、砂灰比的关系,回归结果如式(11)( $R=0.9991$ ):

$$y_2 = 3378.6538 - 86.8272x_1 + 0.5610x_1^2 - 0.001552x_2^2 \quad (11)$$

式中, $y_2$ 为流动度,cm。

对主要影响因素进行定量分析,得到流动度与砂灰比、膏体质量分数之间的关系,如图3所示。

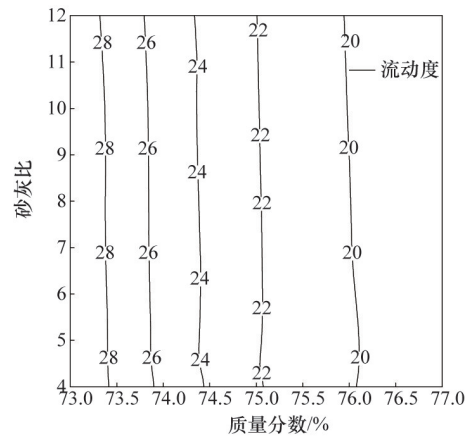


图3 膏体流动度的等值线

Fig. 3 Contours of paste fluidity

由图3可以看出,膏体流动度主要与质量分数相关,砂灰比对流动度影响较小。膏体的质量分数越大,流动度越小。根据现场经验,流动度为20~23 cm时为最佳值,因此,75%~76%为料浆最佳质量分数值,在此质量分数范围内,砂灰比可任意取值。

### 3.4 充填倍线

根据2因素5水平均匀设计试验结果,对充填倍线进行回归分析,得到充填倍线与膏体质量分数、砂灰比的关系,回归结果如式(12)( $R=0.9986$ ):

$$y_3 = 1011.0684 - 24.0247x_1 + 0.1415x_1^2 + 0.004702x_1x_2 \quad (12)$$

式中, $y_3$ 为充填倍线。

对影响充填倍线的2个因素进行定量分析,得到充填倍线与砂灰比、质量分数之间的关系曲线,如图4所示。

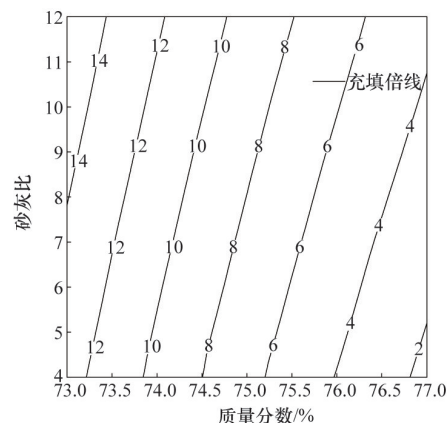


图4 充填倍线的等值线

Fig. 4 Contours of backfill gradient

从图4可以看出,充填倍线与质量分数呈负相关,与砂灰比呈正相关,质量分数是影响充填倍线的主要因素。根据前

期研究报告,最大充填倍线宜控制在5左右,结合图4可知其对应最佳膏体质量分数为76%,砂灰比宜大于5:1;当质量分数低于76%时,浆体允许的最大充填倍线较大,均能够满足输送要求。

### 3.5 14 d强度

根据表1中试验结果,对膏体的14 d单轴抗压强度进行回归分析,得到膏体充填试块14 d强度与膏体质量分数、砂灰比之间的关系,回归结果如式(13)( $R=0.9873$ ):

$$y_4 = -5.4 + 0.1281x_1 - 0.6011x_2 + 0.02269x_2^2 \quad (13)$$

式中, $y_4$ 为14 d强度,MPa。

根据对式(13)进行定量分析,得到14 d抗压强度与膏体质量分数之间的关系,如图5所示。

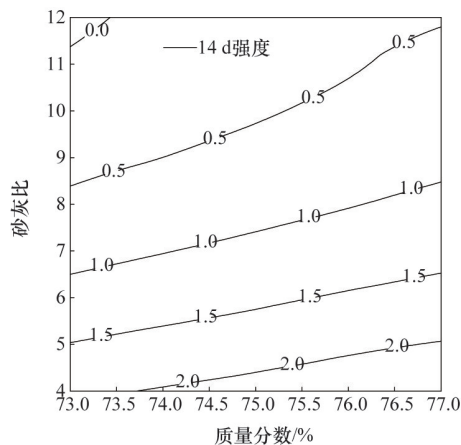


图5 14 d抗压强度的等值线

Fig. 5 Contours of 14-day compressive strength

由图5可知,同一质量分数条件下,随着砂灰比的增大,充填体强度呈递减趋势,且减大幅度逐渐变大,说明水泥含量对于膏体强度的影响很大。在满足强度要求( $\geq 1.2$  MPa)情况下,1)当砂灰比为7:1时,质量分数应保证不小于76%;2)当砂灰比为6:1时,质量分数宜控制在74%以上;3)当砂灰比大于5:1时,实验范围内的质量分数均符合要求。

### 3.6 28 d强度

对2因素5水平均匀设计的试验结果进行回归分析,得到膏体试块28 d强度与质量分数、砂灰比之间的关系,回归结果如式(14)( $R=0.9999$ ):

$$y_5 = 7.2175 - 1.5835x_2 + 4.4 \times 10^{-4}x_1^2 + 0.07094x_2^2 \quad (14)$$

式中: $y_5$ 为28 d强度,MPa。

对主要影响因素进行定性分析,得到了28 d抗压强度与砂灰比、质量分数之间的关系,如图6所示。

从图6可以看出,膏体28 d强度主要受砂灰比影响,质量分数对其作用很小。根据14 d强度要求提出的配比,28 d强度均大于1.2 MPa,验证了前期提出的配比方案在开采后期的适用性。

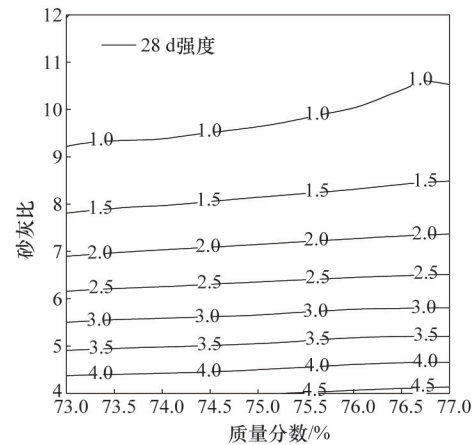


图6 28 d抗压强度的等值线

Fig. 6 Contours of 28-day compressive strength

## 4 结论

1) 膏体的泌水率主要受质量分数影响,根据膏体定义及自流输送要求,当料浆质量分数小于等于76%时,灰砂比在12:1~4:1区间内均符合要求。

2) 质量分数是影响流动度的主要因素,根据现场的要求,75%~76%为最佳质量分数值。

3) 充填倍线主要受料浆质量分数影响,适合输送的料浆最佳质量分数为76%,此时砂灰比宜大于5:1,当质量分数小于76%,试验范围内的砂灰比均能满足输送要求。

4) 砂灰比是影响膏体强度的主要因素,根据现场对充填体强度的要求,砂灰比为7:1时,料浆质量分数应保证大于等于76%;砂灰比为6:1时,料浆质量分数宜控制在74%以上;砂灰比大于5:1时,试验范围内的质量分数均符合要求。

综上所述,根据现场对膏体各性能指标的要求,在安全合理的前提下,尽量降低生产成本,建议膏体最佳质量分数为75%~76%,最佳砂灰比为7:1~8:1。

## 参考文献(References)

- [1] Henriquez J, Simms P. Dynamic imaging and modelling of multilayer deposition of gold paste tailings[J]. Minerals Engineering, 2009, 22(2): 128-139.
- [2] 常庆粮,周华强,柏建彪. 膏体充填开采覆岩稳定性研究与实践[J]. 采矿与安全工程学报, 2011, 28(2): 279-282.  
Chang Qingliang, Zhou Huaqiang, Bai Jianbiao, et al. Stability study and practice of overlying strata with paste backfilling[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2011, 28(2): 279-282.
- [3] 翟永刚,吴爱祥,王洪江. 全尾砂膏体充填临界质量分数[J]. 北京科技大学学报, 2011, 33(7): 795-799.  
Zhai Yonggang, Wu Aixiang, Wang Hongjiang, et al. Threshold mass fraction of unclassified-tailings paste for backfill mining[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2011, 33(7): 795-799.
- [4] Fall M, Célestin J, Sen H. Potential use of densified polymer-pastefill mixture as waste containment barrier materials[J]. Waste Management,

- 2010, 30(12): 2570-2578.
- [5] Sheng-hua Y, Ai-xiang W, Kai-jian H. The effect of solid components on the rheological and mechanical properties of cemented paste backfill [J]. Minerals Engineering, 2012, 35: 61-66.
- [6] Nasir O, Fall M. Coupling binder hydration, temperature and compressive strength development of underground cemented paste backfill at early ages[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2010, 25 (1): 9-20.
- [7] Reid C, Bécaert V, Aubertin M. Life cycle assessment of mine tailings management in Canada[J]. Journal of Cleaner Production, 2009, 17(4): 471-479.
- [8] 李公成, 王洪江, 吴爱祥, 等. 基于倾斜管实验的膏体自流输送规律 [J]. 中国有色金属学报, 2014, 24(12): 3162-3164.  
Li Gongcheng, Wang Hongjiang, Wu Aixiang, et al. Gravity transport law of paste based on inclined pipe experiment[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2014, 24(12): 3162-3164.
- [9] 尹建东, 宋军平. 硫化物促凝机理及其在膏体充填中的应用[J]. 现代矿业, 2015(1): 183-185.  
Yin Jiandong, Song Junping. Facilitate setting mechanism of sulfide and its application in paste backfill[J]. Modern Mining, 2015(1): 183-185.
- [10] 王洪江, 王勇, 吴爱祥. 从饱和率和泌水率角度探讨膏体新定义[J]. 武汉理工大学学报, 2011, 33(6): 85-89.  
Wang Hongjiang, Wang Yong, Wu Aixiang, et al. Research of paste new definition from the viewpoint of saturation ratio and bleeding rate [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2011, 33(6): 85-89.
- [11] 方开泰. 均匀设计与均匀设计表[M]. 北京: 科学出版社, 1994.  
Fang Kaitai. Uniform design and uniform design table[M]. Beijing: Science Press, 1994.

## Optimization of mix proportion of paste based on uniform design

AI Chunming<sup>1</sup>, WU Aixiang<sup>1</sup>, WANG Hongjiang<sup>1</sup>, LIU Sizhong<sup>2</sup>

1. Key Laboratory of High-efficient Mining and Safety of Metal Mines, Ministry of Education; School of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China
2. Jiangxi Mining Safety Technology Co., Ltd., Nanchang 330000, China

**Abstract** The retarding phenomenon appeared in the paste filling of a lead-zinc mine and it was ameliorated after adding coagulants. To optimize the paste material ratio under addition of coagulants, we carried out a uniform design experiment. The effects of paste concentration and sand-cement ratio on bleeding rate, fluidity, backfill gradient and paste strength were investigated. The results show that the paste bleeding rate, fluidity and backfill gradient were mainly influenced by concentration, and they were negatively correlated with the concentration. The sand-cement ratio had a small impact on fluidity but a major impact on paste concentration. The smaller the sand-cement ratio was, the larger the intensity of paste was. Based on the ratio ranges corresponding to the four indices of bleeding rate, fluidity, backfill gradient, and paste strength, the recommended ratio is 75% to 76% and the sand-cement ratio is 7:1 to 8:1.

**Keywords** uniform design; optimization of mix proportion; paste backfill

(编辑 田恬)