

文章编号: 1673-3363-(2014)02-0304-06

超细水泥注浆溶液配比优化及扩散规律研究

吴爱祥, 于少峰, 韩斌, 王贻明, 黄明清, 王勇

(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)

摘要 某铜矿节理裂隙发育, 矿体围岩极其破碎, 需大量加固支护, 优选超细水泥注浆工艺, 采用正交设计试验方案, 针对不同水灰比(W/C)及水泥浆/水玻璃体积比(C/S)开展了配合比优化室内试验和理论研究, 提出满足注浆强度要求的最佳水灰比(W/C)、水泥浆/水玻璃体积比(C/S), 并基于推荐注浆溶液配合比进行现场注浆试验, 确定了注浆压力及扩散半径等参数, 建成了注浆工艺系统。现场工业应用表明: 按照推荐注浆材料配比及工艺施工, 炮孔成孔率提高 25%, 采场顶板允许暴露面积增大了 110 m², 采场中矿石滞留量减少了约 10%, 矿石回收率提高了 23.3%, 实现了加固矿体, 提高炮孔成孔率, 增大矿石回收率的目标。

关键词 超细水泥注浆; 水灰比; 配合比优化; 水玻璃; 注浆工艺系统

中图分类号 TD 353

文献标志码 A

Optimization of mix-proportion and diffusing rule of super-fine cement grouting slurry

WU Aixiang, YU Shaofeng, HAN Bin, WANG Yiming, HUANG Mingqing, WANG Yong

(School of Civil and Environmental Engineering, Key Laboratory of Educational Ministry for High Efficient Mining and Safety in Metal Mine, University of Science & Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract The joint fissure of some copper mine is developed, and its surrounding rock and ore body are broken, which needs a great amount of reinforcement. The superfine cement grouting technology is selected, and then according to different ratio of water-cement (W/C) and volume ratio of cement slurry/sodium silicate (C/S), indoor mix optimization test and theoretical research is launched by using orthogonal designing test. Such parameters as the best W/C and C/S were put forward to meet the required strength of grouting pressure, and according to the recommended mix-proportion, test is conducted on the spot. Grouting pressure and diffusion radius are confirmed and in view of the above, the grouting system is built. Industrial application shows that into-hole rate is increased by 25%, with exposed area of the stope roof increased by 110 m², the stope ore retention volume reduced by about 10%, and ore recovery ratio increased by 23.3% according to recommended grouting material proportion and grouting system. Goals of reinforcing ore body, improving blast holes rate and increasing ore recovery ratio are realized.

Key words superfine cement grouting; water-cement ratio; mix optimization; sodium silicate; grouting system

收稿日期: 2013-01-29

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50934002); 教育部长江学者和创新团队发展计划项目(IRT0950); 国家自然科学基金项目(51074013); 国家“十二五”科技支撑计划项目(2012BAB08B02)

作者简介: 吴爱祥(1963-), 男, 湖北省仙桃市人, 博士, 教授, 博士生导师, 从事采矿与岩石力学方面的研究。

通信作者: 韩斌

E-mail: hanb66@126.com

Tel: 13241806882

注浆是把注浆溶液注入到岩体裂隙中，浆液通过填充、渗透、挤密等方式与岩体胶结，改善工程岩体的力学性能，以提高岩体稳定性和整体性，从而达到加固矿岩目的。在使用浆材得当的前提下，能够充分保护和发挥围岩体的自承载能力^[1]。目前国内外注浆技术主要应用在堵水、堵漏及加固破碎带方面，鲜有用于矿体开采中。

某铜矿 4[#]矿体极为破碎。矿体赋存于黑山组底部有利构造部位的碳泥质白云岩夹层中，厚 21~27 m，平均厚度 24 m。矿石含泥量较高，炮孔成孔率低于 70%，矿体及围岩节理、裂隙极为发育。可以采用注浆技术将浆液注入岩体裂隙中，使矿体及围岩加固为一个整体，以达到提高炮孔成孔率，增大矿石回收率，以及提高回采安全系数的目的。为满足该矿注浆预加固矿体需求，优选超细水泥注浆工艺，采用正交设计试验方案，开展了水灰比及水泥浆/水玻璃体积比优化室内实验和理论研究，通过对注浆后矿块强度进行分析，提出了满足注浆强度要求的最佳水灰比(W/C)及水泥浆/水玻璃体积比(C/S)，并由此确定了注浆压力及扩散半径等参数，建成了注浆工艺系统。现场工业应用表明，按照推荐注浆材料配比及工艺施工，注浆岩体强度提高 25%，炮孔成孔率提高 22%，矿体及围岩稳固性提高，增强了采矿作业的安全性。

1 超细水泥注浆材料配合比确定

1.1 试验方案

超细水泥具有强度高、耐久性好、无毒、材料来源广等优点。由于粒径较小，其可注入渗透系数低于 10⁻² cm/s 的中细砂质地层和宽度小于 0.2 mm 的裂隙中；水玻璃是一种添加剂，能够缩短浆液凝固时间。水灰比(W/C)为所配置注浆浆液中水和超细水泥的重量比，其影响着浆液的流变性能、凝聚结构及其硬化后的密实度，是决定注浆体强度、耐久性和其他一系列物理力学性能的主要参数，是注浆岩体强度达到设计要求的关键。针对该铜矿矿体及围岩节理、裂隙多而发育等特点，为确定合理的水灰比(W/C)及水泥浆/水玻璃体积比(C/S)，在实验室进行了注浆岩体强度试验^[2-8]。

为优选适用于该铜矿的超细水泥注浆参数，以水泥浆/水玻璃体积比(C/S)及水灰比(W/C)为因素，采用 L₂₅(5⁶)正交设计开展了注浆岩体强度试验，其中超细水泥选用管学茂教授发明的 MCP 超细水泥基注浆材料，具微膨胀性、凝结时间及黏度可调、

渗透性好、结石强度高、无毒等优点，其粒度： $D_{50}=4.1\text{ }\mu\text{m}$ ， $D_{75}=8.0\text{ }\mu\text{m}$ ， $D_{84}=9.1\text{ }\mu\text{m}$ ， $D_{95}=14.8\text{ }\mu\text{m}$ 。超细水泥材料配比优化试验水平选取见表 1。

表 1 L₂₅(5⁶)因素水平表
Table 1 L₂₅(5⁶) table of factors and levels

水平	因素	
	水灰比(W/C)	水泥浆/水玻璃体积比(C/S)
1	0.6	1.4
2	0.8	1.2
3	1	1
4	1.2	0.8
5	1.4	0.6

根据表 1 所述因素水平值，按照正交设计 L₂₅(5⁶)表，确定具体试验方案如表 2。

表 2 正交试验方案
Table 2 Schemes of orthogonal test

水平	W/C	C/S	水平	W/C	C/S	水平	W/C	C/S
1	0.6	1.4	11	1	1.4	21	1.4	1.4
2	0.6	1.2	12	1	1.2	22	1.4	1.2
3	0.6	1	13	1	1	23	1.4	1
4	0.6	0.8	14	1	0.8	24	1.4	0.8
5	0.6	0.6	15	1	0.6	25	1.4	0.6
6	0.8	1.4	16	1.2	1.4			
7	0.8	1.2	17	1.2	1.2			
8	0.8	1	18	1.2	1			
9	0.8	0.8	19	1.2	0.8			
10	0.8	0.6	20	1.2	0.6			

1.2 试验步骤及技术要求

1) 根据上述正交试验方案，在 4[#]矿体试验采场内随机选取了 25 个点，凿取岩块并制成标准试件(Φ80 mm×160 mm)，以 WES-100 液压万能试验机测其单轴抗压强度(UCS)。

2) 利用矿山现有 YGZ-90 型导轨式凿岩机按照预设 25 个注浆材料配比水平钻注浆孔，并利用 HFV-5D 型注浆机进行注浆。

3) 分别测定 25 个注浆孔处指标为 3，7 d 的注浆岩块(岩石切割为 Φ80 mm×160 mm 的标准试件)单轴抗压强度，各龄期须测 5 个试块，取其平均值并记录在表中。

1.3 试验结果

各设计方案注浆岩块强度值见表 3。

表 3 注浆试块单轴抗压强度试验结果
Table 3 Test results of backfill strength

水平	注浆前 注浆孔处 岩块 UCS/MPa	注浆孔处 注浆岩块 UCS/MPa		水平	注浆前 注浆孔处岩 块 UCS/MPa	注浆孔处 注浆岩块 UCS/MPa	
		3 d	7 d			3 d	7 d
1	18.6	19.1	19.9	14	17.3	18.1	19.0
2	14.0	16.9	19.8	15	8.6	13.6	14.3
3	19.8	20.7	21.4	16	18.5	19.1	20.0
4	18.0	19.5	19.6	17	9.3	17.2	13.9
5	17.9	18.3	19.7	18	17.6	18	18.7
6	17.8	19.2	20.1	19	18.3	19.2	19.3
7	16.9	19	19.6	20	18.4	18.9	19.3
8	19.8	21.2	23.6	21	19.9	20.2	20.9
9	15.6	18.4	20.3	22	17	17.5	17.8
10	17.4	19.8	21.8	23	19.8	20.3	20.7
11	19.2	22.5	23.4	24	17.4	18.1	18.2
12	15.9	16.3	17.6	25	19.5	19.9	20.3
13	20.0	21.5	22.8				

1.4 影响注浆岩块强度因素及规律分析

经分析可得, 注浆岩块强度与水灰比(W/C)及水泥浆/水玻璃体积比(C/S)之间的关系如图 1, 2。

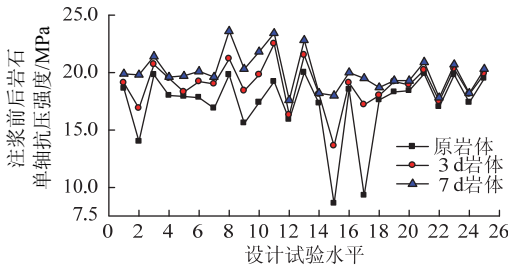


图 1 W/C 与注浆岩块强度关系
Fig.1 Relationship between W/C and strength of grouting rock mass

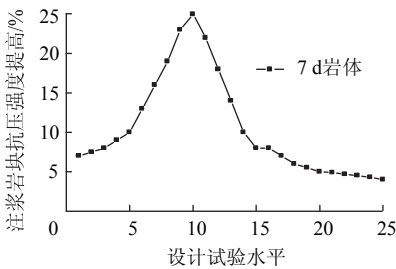


图 2 C/S 与注浆岩块强度关系
Fig.2 Relationship between C/S and strength of grouting rock mass

分析可知: 1) 注浆能够明显提高原岩体强度, 在水灰比(W/C)及水泥浆/水玻璃体积比(C/S)变化的情况下, 注浆岩块强度亦随之而改变: 3 d 岩体强度即显著提高, 7 d 强度提高 4%~6%; 2) 由图 2 可知, 随着水灰比(W/C)增大及水泥浆/水玻璃体

积(C/S)减小: 10 水平以左((W/C)×(C/S)=0.8×0.6)岩体强度显著成指数提高, 并在 10 水平处达到最大值, 提高 25%; 10 水平以右岩体强度提升比例明显放缓, 并在 15%处趋向平缓, 达到最低值约 5%。

2 超细水泥浆液扩散规律

2.1 浆液扩散半径影响因素

“刘嘉才公式”以计算多裂隙岩体浆液扩散半径准确而闻名, 这里以“刘嘉才公式”计算该铜矿裂隙岩体中浆液扩散半径: 假设两裂隙面相互平行, 浆液从注浆管内流出后向裂隙内充填, 平行于裂隙面做径向流动。浆液的最终扩散半径为:

$$R = 2.21 \sqrt{\frac{0.093(p_0 - p_e)Td^2r_0^{0.21}}{\mu}} + r_0 \quad (1)$$

式中: R 为浆液扩散半径, cm; p_0 为注浆孔内的注浆压力, MPa; p_e 为裂隙内地下水的压力, MPa; r_0 为注浆孔半径, cm; μ 为浆液的黏度, MPa·s; d 为裂隙宽度, cm; T 为注浆时间, s。

该铜矿加固采用超细水泥进行注浆, 浆液 W/C 为 0.8, C/S 为 0.6, 其黏度为 1.0 MPa·s; 静水压力为 300 kPa, 注浆孔半径为 5 cm, 裂隙宽度约 0.2 cm。将已知数据代入式(1)中, 此时浆液的扩散半径为:

$$R = 2.21 \sqrt{0.13(p_0 - 0.3)Td^2 + 5} \quad (2)$$

由式(2)可以看出, 浆液扩散半径 R 由注浆孔内的注浆压力 p_0 、注浆时间 T 及裂隙宽度 d 共同决定。为验证其关系, 在现场展开了注浆试验:

1) 将注浆压力 p_0 分别为 2, 4 MPa, 岩体裂隙宽度 d 为 0.1, 0.25, 0.5 cm 时, 测量的浆液扩散半径 R 与注浆时间 T 统计如表 4。

表 4 浆液扩散半径 R 与注浆时间 T 的关系
Table 4 Relationship between R and T

序号	注浆压力为 2 MPa 时 注浆时间/s	不同裂隙宽度下 浆液扩散半径/cm			注浆压力为 4 MPa 时 注浆时间/s	不同裂隙宽度下 浆液扩散半径/cm		
		0.1	0.25	0.5		0.1	0.25	0.5
1	600	20	140	270	600	40	192	280
2	1 200	29	200	360	1 200	50	208	360
3	2 000	39	250	420	2 000	62	260	450
4	2 200	44	265	445	2 200	65	275	483
5	2 600	49	274	472	2 600	68	285	500
6	2 800	52	288	491	2 800	73	309	528
7	3 200	55	297	512	3 200	76	318	540
8	3 500	58	308	528	3 500	79	320	560
9	3 800	60	319	531	3 800	80	339	568
10	4 000	62	325	537	4 000	81	340	570

经 Origin 软件分析, 得其关系如图 3。

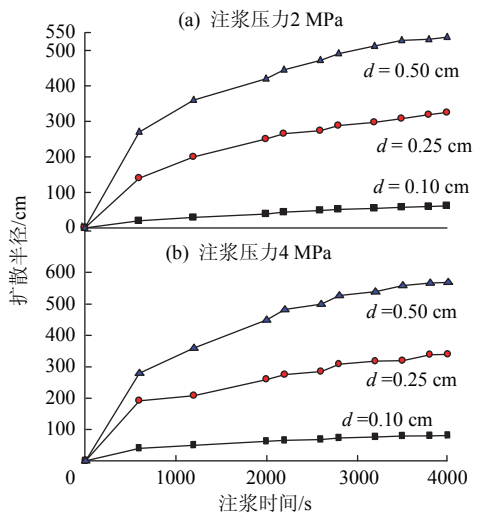


图 3 浆液扩散半径曲线
Fig.3 Slurry diffusing curve

由图 3 可以看出：① 在注浆压力 p_0 固定为 2 MPa 或 4 MPa 不变的情况下，浆液的扩散半径 R 随着注浆时间 T 增加而增大；② 在注浆时间 T 固定为 1 800 s 或 3 600 s 不变的情况下，浆液的扩散半径 R 随着裂隙宽度 d 的增大而增大，随着注浆压力 p_0 的提高而增大；③ 当裂隙宽度 d 为 0.1 cm 时，随着注浆时间 T 增加，浆液的扩散半径 R 增幅极小；④ 在裂隙宽度 d 为 0.2 cm、注浆压力 p_0 为 4 MPa 的情况下，浆液扩散半径 R 可以达到约 350 cm，需要 4 000 s。

2) 在注浆时间 T 分别为 1 800，3600 s 及裂隙宽度 d 为 0.1，0.25，0.5 cm 时，将测得的浆液扩散半径 R 与注浆压力 p_0 统计如表 5。

经 Origin 软件分析，得其关系如图 4。

表 5 浆液扩散半径 R 与注浆压力 p_0 关系
Table 5 Relationship between R and p_0

序号	注浆时间为 1 800 s 时 注浆压力 p_0 /MPa	不同裂隙宽度下浆液扩散半径/cm			注浆时间为 3 600 s 时 注浆压力 p_0 /MPa	不同裂隙宽度下浆液扩散半径/cm		
		0.1	0.25	0.5		0.1	0.25	0.5
1	0.7	12	92	120	0.7	15	110	210
2	1.2	18	125	190	1.2	26	160	290
3	1.7	26	149	230	1.7	31	195	320
4	2.2	37	165	265	2.2	37	210	360
5	2.8	43	180	301	2.8	43	230	410
6	3	48	192	325	3	46	250	415
7	3.2	59	215	340	3.2	49	270	430
8	3.4	68	226	352	3.4	51	280	442
9	3.6	79	235	362	3.6	54	285	452
10	3.8	85	247	371	3.8	55	295	461
11	4	93	258	379	4	56	302	470

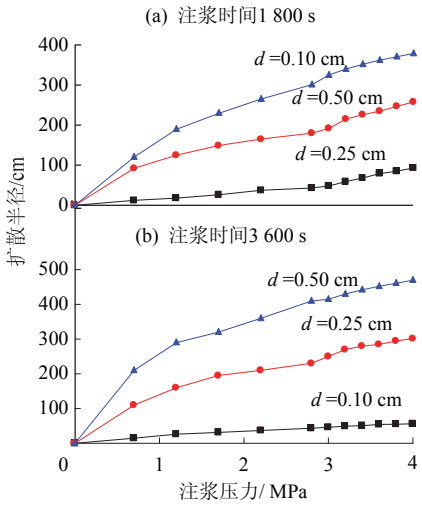


图 4 浆液扩散半径曲线
Fig.4 Slurry diffusing curve

由图 4 可以看出：① 注浆时间 T 相同时，浆液的扩散半径 R 随着注浆压力 p_0 的提高而增大；② 在注浆压力 p_0 保持不变的情况下，浆液的扩散半径 R 随着裂隙宽度 d 减小而减小；③ 当裂隙宽度 d 过小时，提高注浆压力 p_0 ，浆液的扩散半径 R 增幅极小；④ 在裂隙宽度 d 为 0.2 cm、注浆时间 T 为 3 600 s 的情况下，浆液扩散半径 R 达到约 300 cm，注浆压力 p_0 需达到 4 MPa。

2.2 推荐的注浆参数

根据上述超细水泥材料配合比试验和注浆压力及时间与浆液扩散半径关系验证实验结果，为使注浆岩体强度提升最高、注浆压力充分、注浆时间最合理，最终确定超细水泥注浆参数如表 6。

表 6 超细水泥注浆参数
Table 6 Parameters of superfine cement grouting

序号	项目	数量	序号	项目	数量
1	注浆压力/MPa	3~4	5	注浆孔底距/m	6~7
2	注浆时间 T/s	3 600	6	孔深/m	9~16
3	单孔注浆量/m ³	1.5~2.7	7	水灰比(W/C)	0.8
4	扩散半径/m	3~4	8	水泥浆/水玻璃体积比(C/S)	0.6

3 超细水泥注浆设计

3.1 注浆工程布置

选定 4[#]矿体 3 采为试验采场, 其为一倒梯形岩体, 如图 3, 矿体厚 24 m, 节理裂隙发育, 断层切割常见, 裂隙多为宽度<0.2 mm 的张开裂隙, 并聚焦成裂隙群, 矿岩极为软弱破碎; 此外, 矿层渗水及涌水很小, 为浆液扩散提供了较好的条件。采用中深孔分段凿岩阶段空场法开采矿体, 分段高 15 m; 根据推荐的注浆参数, 对整个矿体进行注浆^[9-14], 先采矿房, 后采矿柱。注浆工程布置如图 5。

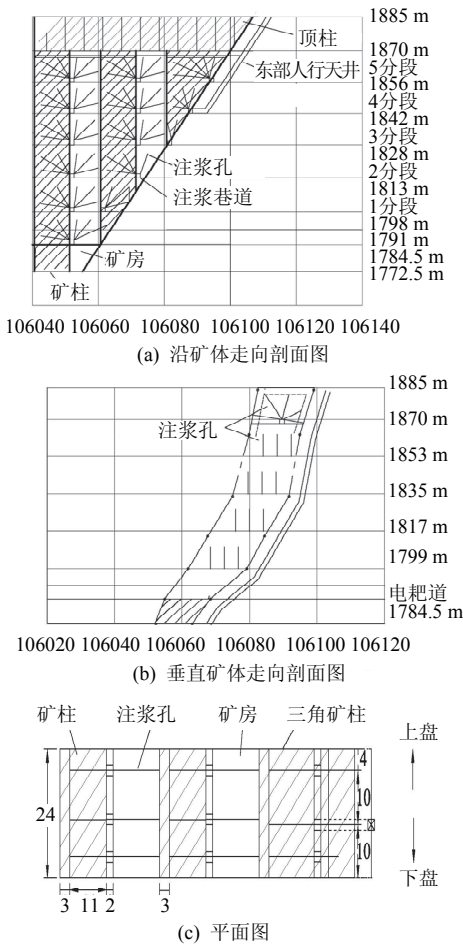


图 5 注浆工程布置图

Fig.5 Grouting engineering layout

3.2 注浆施工工艺

1) 注浆孔深度最深设计为 16 m, 在钻孔内安设注浆管, 距孔口 2 m 处设置封孔器, 然后进行注浆施工。注浆方式采用全孔一次性注浆, 以简化工序、提高劳动生产效率。

2) 注浆施工中, 由于浆液存在重力作用, 当地层存在较大的空隙时, 浆液在重力作用下会向下沉积, 从而影响下部注浆的顺利进行, 因此, 在试验采场注浆施工中, 采取从下分段到上分段的施工顺序。这样注浆就可以对顶板起到挤压作用, 使得顶板岩体完整性更强, 对于增大矿房暴露面积十分有利。

3) 分段内施工时, 由于作业人员、钻孔及注浆设备都从下盘壁柱人行井、分段联络道内进入下盘随采井, 从施工便利性角度考虑, 分段内的注浆顺序为从下盘至上盘。

4) 同一硐室的施工顺序为从下到上, 即先注近水平孔, 再注倾斜孔, 最后注急倾斜孔。施工顺序主要是考虑首先通过近水平孔的浆液扩散作用, 使上下相邻分段胶结成一个承压共同体。

4 超细水泥注浆效果

2011 年 7 月完成了 4[#]矿体 3 采第 1 阶段注浆, 注浆沿走向加固矿体 60 m, 共使用超细水泥 40 t。试验期间对巷道 5 个断面实验点进行了位移、底板底鼓和沉降测量, 数据显示, 注浆前破碎矿体的位移速度快、有矿块冒落; 注浆结束后位移变缓、基本看不到矿块冒落。从矿体掘进来看, 注浆效果好, 炮眼成孔率由之前的 70%提高到 95%, 矿体孔隙注浆密实, 圆满完成了加固支护破碎岩体这一任务; 注浆加固后, 爆破矿石含泥量降低、流动性增加, 之前上盘由于欠挖欠爆而造成永久损失的矿体得到了回采, 采场放矿能力大大提高; 同时, 由于矿岩稳固性极大提高, 采场顶板允许暴露面积从 240 m²增大至 350 m², 保证了凿岩、爆破及出矿等作业的安全性。与矿山原有方案相比, 注浆后矿石完整性提高, 采下矿石在采场的滞留量减少了约 10%, 采用新方案矿石回收率从 55%提高到了 78.3%。

5 结 论

1) 注浆能够明显提高原岩体强度, 在水灰比及水泥浆/水玻璃体积比变化的情况下, 注浆岩块强度亦随之而改变: 3 d 岩体强度即显著提高, 7 d 强度

提高 7%~25%;在水灰比×水泥浆/水玻璃体积比=0.8×0.6 的情况下,注浆岩体抗压强度增量达到最大值,为 25%。

2) 在注浆压力为 3~4 MPa,水灰比×水泥浆/水玻璃体积比=0.8×0.6,孔深为 9~16 m,注浆时间为 1 800~3 600 s 的情况下,浆液扩散半径达到 3 m,单孔注浆量需要 1.5~2.7 m³,能满足设计要求。

3) 从现场注浆效果来看:注浆加固后,炮眼成孔率由之前的 70%提高到 95%,矿体孔隙注浆密实,爆破矿石含泥量降低,采场放矿能力大大提高;与矿山原有方案相比,注浆后矿石完整性提高,采场顶板允许暴露面积从 240 m²增大至 350 m²,采下矿石在采场的滞留量减少了约 10%,采用新方案矿石回收率从 55%提高到了 78.3%。

参考文献:

- [1] 李学华,杨宏敏,刘汉喜,等.动压软岩巷道锚注加固机理与应用研究[J].采矿与安全工程学报,2006,23(2): 159-163.
LI Xuehua, YANG Hongmin, LIU Hanxi, et al. Research on bolt-grouting reinforcement technology in dynamic pressure and soft rock roadway[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2006, 23(2): 159-163.
- [2] YANG Ping, PENG Zhenbin, TANG Yiqun, et al. Penetration grouting reinforcement of sandy gravel[J]. Journal of Central South University of Technology, 2008, 15(2): 280-284.
- [3] 魏树群,张吉雄,张文海,等.高应力硐室群锚注联合支护技术[J].采矿与安全工程学报,2008,25(3): 281-285.
WEI Shuqun, ZHANG Jixiong, ZHANG Wenhai, et al. Bolt grouting combined support technology for large-scale cavern group with high ground pressure[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2008, 25(3): 281-285.
- [4] BABAK Nikbakhtan, MORTEZA Osanloo. Effect of grout pressure and grout flow on soil physical and mechanical properties in jet grouting operations[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2009, 46: 498-505.
- [5] GAO Yongtao, SUN Jianbo, WU Shunchuan, et al. Cut slope reinforcement technique in open-pit mines[J]. Mineral, 2004, 11(4): 289-292.
- [6] ZHANG Gailing, ZHANG Kaiyu, GAO Yue, et al. Comparative experimental investigation of chemical grouting into a fracture with flowing and static water[J]. Mining Science and Technology, 2011, 21(2): 201-205.
- [7] LEE Inmo, LEE Jaesung, NAM Seokwoo. Effect of seepage force on tunnel face stability reinforced with multi-step pipe grouting[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2004, 19: 551-565.
- [8] ZHANG Nong. Study on strata control by delay grouting in soft rock roadway[J]. Journal of Coal Science & Engineering, 2003, 9(1): 51-56.
- [9] CHEN Yonggui, YE Weimin, ZHANG Keneng, et al. Strength of copolymer grouting material based on orthogonal experiment[J]. Journal of Central South University of Technology, 2009, 16(1): 143-148.
- [10] 王连国,李明远,王学知.深部高应力极软岩巷道锚注支护技术研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(16): 2889-2893.
WANG Lianguo, LI Mingyuan, WANG Xuezhi. Study on mechanisms and technology for bolting and grouting in special soft rock roadways under high stress[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2889-2893.
- [11] DUAN Hongfei, JIANG Zhenquan, ZHU Shuyun, et al. New composite grouting materials: Modified urea-formaldehyde resin with cement[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2012, 22: 195-200.
- [12] GUAN Xuemao, WANG Yuli, YANG Lei. Research on rheological properties of micro-fine grouting cement[J]. Journal of Coal Science & Engineering, 2003, 9(1): 67-72.
- [13] LI Guofu, DAI Tieding, LV Fangli, et al. Research and application on new type grouting material and control technology[C]//2011 International Symposium on Water Resource and Environmental Protection, 2011: 2624-2627.
- [14] 刘长武,陆士良.水泥注浆加固对工程岩体的作用与影响[J].中国矿业大学学报,2000,29(5): 455-458.
LIU Changwu, LU Shiliang. Reinforcement effect of cement grouting on engineering rock mass[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2000, 29(5): 455-458.