

# 矿井采空区水泥-煤矸石充填体结构模型研究

宁建国, 刘学生, 史新帅, 王 俊

(山东科技大学 矿山灾害与预防控制国家重点实验室, 山东 青岛 266590)

**摘 要:** 鉴于以水泥为主要胶结成分的充填材料费用较高, 不利于大面积充填开采, 为实现利用固体废弃物代替水泥配制高效的矿井采空区充填材料, 以水泥、煤矸石作为充填材料主要成分, 通过实验室试验得出充填体抗压强度与水泥掺量关系, 并利用电子扫描电镜对充填体微观结构进行观测, 分析了不同水泥掺量时充填体抗压强度增长规律, 构建了水泥-煤矸石充填体结构模型。研究结果表明: 水泥-煤矸石充填体结构由矸石颗粒的胶结和孔隙填充 2 部分构成, 矸石颗粒的胶结与孔隙填充对充填体抗压强度提高有很大作用。

**关键词:** 充填体; 采空区充填; 水泥-煤矸石; 固体废弃物充填

中图分类号: TD353

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2015)12-0023-05

## Study on cement-coal refuse backfill structure model of mining goaf in underground mine

Ning Jianguo, Liu Xuesheng, Shi Xinshuai, Wang Jun

(National Key Lab of Mine Disaster and Prevention Control, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

**Abstract:** Due to the high cost of the present cement as the main cementation composition of the backfill material, the cement was not suitable the backfill mining with a larger area. In order to realize the solid waste to replace the cement based high efficient backfill material in the mining goaf, based on the cement and coal refuse as the main composition of the backfill material, a relationship between the compressive strength of the backfill and the cement volume mixed was obtained from the lab experiments. A scanning electron microscopy was applied to the observation on the micro structure of the backfill. The compressive strength increased law of the backfill with different cement volume mixed was analyzed. A structure model of the cement-coal refuse backfill was established. The study results showed that the cement-coal refuse backfill structure was consisted of the coal refuse particle cementation and the pore backfill and the coal refuse particle cementation and the pore backfill could play a high role to improve the compressive strength of the backfill.

**Key words:** backfill; goaf backfill; cement-coal refuse; solid waste backfill

## 0 引 言

充填采矿法在确保矿井生产安全的前提下同时具有环境保护和提高煤炭资源采出率的优点, 已越来越得到采矿界的重视<sup>[1-6]</sup>。目前充填采矿法主要有: 矸石回填<sup>[7]</sup>、胶结充填<sup>[8-9]</sup>、高水材料充填<sup>[10-12]</sup>、水砂充填<sup>[13-14]</sup>等。对于胶结充填而言, 水泥是目前矿山使用最广的胶结料<sup>[8-9]</sup>, 一般情况下,

在地面将水泥、破碎后的矸石及添加剂按一定比例混合, 通过地下管道将水泥-矸石等充填浆体输送到工作面采空区处, 利用工作面后方挡板或巷帮将充填材料浆体保留在采空区内, 待充填浆体硬化后支撑采空区顶板, 实现矿井充填开采<sup>[6-7]</sup>。但井下大范围采空区充填需要消耗数以万计的水泥, 昂贵的充填成本给矿山造成巨大的经济压力。因此, 在不降低充填体强度的情况下, 寻求水泥代用品配制

收稿日期: 2015-01-12; 责任编辑: 杨正凯 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2015.12.005

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51574154, 51344009); 山东省优秀中青年科学家科研奖励基金资助项目(BS2012NJ007); 矿山灾害预防控制省部共建国家重点实验室培育基地开放课题基金资助项目(MDPC2013KF12)

作者简介: 宁建国(1975—), 山东宁阳人, 副教授, 博士。通信作者: 刘学生, 博士研究生, Tel: 0532-86057330, E-mail: xuesheng1134@163.com

引用格式: 宁建国, 刘学生, 史新帅, 等. 矿井采空区水泥-煤矸石充填体结构模型研究[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(12): 23-27.

Ning Jianguo, Liu Xuesheng, Shi Xinshuai, et al. Study on cement-coal refuse backfill structure model of mining goaf in underground mine[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(12): 23-27.

充填材料成为胶结充填技术应用和发展的关键因素之一。周华强等<sup>[16]</sup>提出了固体废物膏体充填采矿法,当前已有很多学者利用固体废弃物制作了矿井充填材料,只有根据材料学中材料的组成、结构和功能三者关系,掌握了充填体结构才能根据其所要求的功能确定其材料组分及配比<sup>[16-20]</sup>。因此,要利用固体废弃物代替水泥配置矿井充填材料应先清楚了解以水泥为胶结料的充填体结构。基于此,笔者以水泥、煤矸石为主要充填材料,通过充填体抗压强度与水泥掺量关系试验并利用电子扫描电镜对充填体微观结构观测,分析不同水泥掺量时充填体抗压强度增长规律,构建水泥-煤矸石充填体结构模型,以期利用工业废弃物替代水泥配制矿井充填材料提供新思路。

## 1 水泥-煤矸石充填体抗压强度与水泥掺量关系试验

### 1.1 试验材料

试验材料包括 42.5 普通硅酸盐水泥、自来水以及同煤集团姜家湾煤矿煤矸石,标准尺寸(圆柱形,直径×高=50 mm×100 mm)的煤矸石单轴抗压强度为 56.3 MPa。

用破碎机将煤矸石破碎成直径小于 5 cm 的碎块,用标准筛筛分出各粒径组颗粒,再人工配置成 3 种颗粒粒径不同的煤矸石试验样品,分别称之为样品 1、样品 2、样品 3,煤矸石试验样品物理性质指标见表 1,煤矸石试验样品颗粒粒径级配分布曲线如图 1 所示。

表 1 煤矸石试验样品物理性质指标

Table 1 Physical characteristics of the coal gangue samples

试验样品	密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	孔隙率/%	比表面积/ ( $\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ )
样品 1	2.77	37.52	1 052.34
样品 2	2.49	42.36	852.12
样品 3	2.01	50.14	689.36

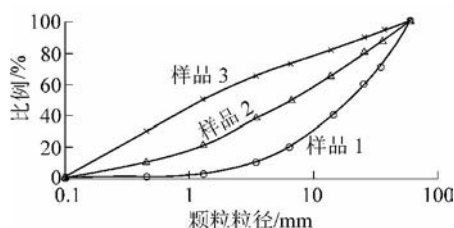


图 1 煤矸石试验样品颗粒粒径级配分布曲线

Fig. 1 Particle size distribution curves of coal gangue

### 1.2 试验方法

在煤矸石样品 1、2、3 中均分别掺加 5%、8%、10%、12%、16%、18%、20%、22%、24%、26%、28%、30%、32%、34%、36%、38%、40% 的水泥(占煤矸石质量百分比,用  $a_w$  表示),水灰比为 0.5:1.0。为了与现场充填方式相符,试样制备过程如下:①称量煤矸石样品;②按照试验配比称量水泥和水,放入 SJ-160 型静浆搅拌机搅拌锅内,立即开动机器,低速搅拌 30 s;③将搅拌好的水泥浆液与煤矸石样品搅拌 60 s;④将伴有水泥浆液的煤矸石样品分 3 次装入 150 cm×150 cm×150 cm 试模中。

试件成型 1 d 后拆模,将其送入养护箱内进行标准养护,于 30 d 龄期测定试块的无侧限抗压强度。

### 1.3 试验结果

在煤矸石样品 1、2、3 中逐渐增加水泥掺量,掺入水泥后形成的充填体编号记为 S1、S2、S3。充填体 S1、S2、S3 无侧限抗压强度  $q_u$  与水泥掺量  $a_w$  关系曲线如图 2 所示,由图 2 可见,充填体无侧限抗压强度随水泥掺量的增加而增大,但在不同水泥掺量范围,充填体抗压强度增长规律不同。

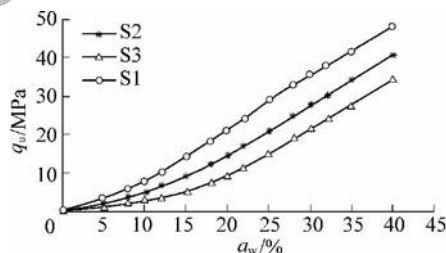


图 2 水泥掺量与充填体抗压强度关系曲线

Fig. 2 Relationship between the cement-backfill strength of and cement contents

水泥掺量增量为  $\Delta a_w$  时充填体抗压强度增量为  $\Delta q_{u \mu_w}$ , 则

$$\Delta q_{u \mu_w} = \frac{q_{u \mu_w} + \Delta a_w - q_{u \mu_w + \Delta a_w}}{\Delta a_w}$$

式中:  $q_{u \mu_w}$  为水泥掺量等于  $a_w$  时的充填体抗压强度, MPa;  $q_{u \mu_w + \Delta a_w}$  为水泥掺量等于  $a_w + \Delta a_w$  时充填体抗压强度, MPa。

水泥掺量与充填体抗压强度增长率关系如图 3 所示,由图 3 可知,随水泥掺量增加充填体抗压强度增量呈不同增长规律,在所试验的范围内,大致可分为 3 个区间,在第 1 区间内,区间界点设为 I,随水泥掺量逐渐增加,充填体抗压强度增量也增加,在图

3 中呈近线性增长, 充填体 S1、S2、S3 在第 1 区间界点 I 所对应的水泥掺量为 15%、12%、10%; 在第 2 区间内, 区间界点设为 II, 随水泥掺量逐渐增加, 充填体抗压强度增量先降低后呈近线性增加, 充填体 S1、S2、S3 在第 2 区间界点 II 所对应的水泥掺量分别为 25%、25%、28%, 由第 1 区间界点到达第 2 区间界点, 充填体 S1、S2、S3 中水泥掺量差值分别为 10%、13%、18%; 在第 3 区间内, 随水泥掺量逐渐增加, 充填体抗压强度增量先降低后基本保持不变。

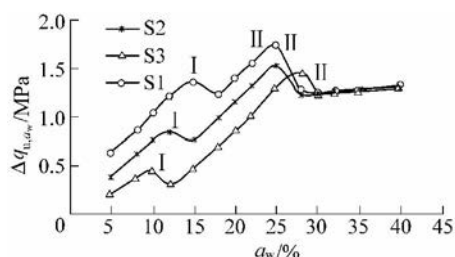


图 3 水泥掺量与充填体抗压强度增长率关系曲线

Fig. 3 Relationship between the strength increments of backfill and cement contents

## 2 充填体微观结构观测

选取上述水泥掺量分别为 8%、12%、20%、25%、30% 的充填体 S2 进行微观结构观测, 其中水泥掺量 12% 和 25% 分别为图 3 中充填体 S<sub>2</sub> 在第 1 区间界点和第 2 区间界点所对应的水泥掺量。

充填体 S2 微观结构(水泥掺量为 8%) 如图 4 所示, 从整体上来看矽石颗粒之间连接比较松散(图 4a), 矽石颗粒表面被一薄层纤维状胶凝水化物覆盖, 各矽石颗粒之间在搭接处通过少量的胶凝水

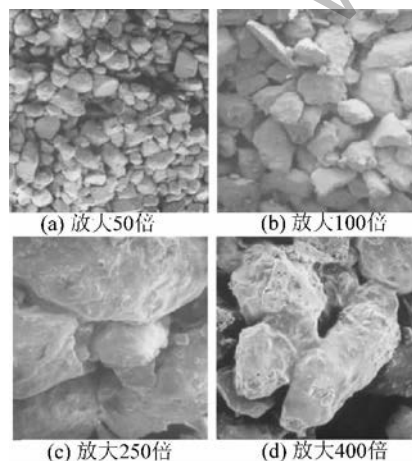


图 4 充填体 S2 微观结构(水泥掺量为 8%)

Fig. 4 Microscopic structure of backfill (cement contents of 8%)

化物连接, 但充填体中均存在尚未完全被胶结在一起的矽石颗粒, 且充填体孔隙中未有水化物出现(图 4b—图 4d)。

充填体 S2 微观结构(水泥掺量为 12%) 如图 5 所示, 与水泥掺量 8% 时相比, 充填体中矽石颗粒之间连接紧密, 矽石颗粒间的胶结能力进一步加强(图 5a), 矽石颗粒表面已基本被纤维状胶凝水化物充分包裹, 但此时矽石颗粒之间孔隙仍未见胶凝性水化物, 如图 5b 所示, 包裹纤维状胶凝水化物的矽石颗粒呈堆积体系, 且矽石颗粒通过表面纤维状胶凝水化物胶结为一体(图 5c、图 5d)。

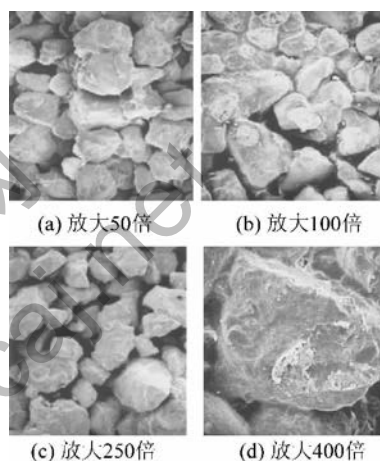


图 5 充填体 S2 微观结构(水泥掺量为 12%)

Fig. 5 Microscopic structure of backfill (cement contents of 12%)

充填体 S2 微观结构(水泥掺量为 20%) 如图 6 所示, 当水泥掺量增加至 20% 时, 充填体 S2 中矽石颗粒不仅被胶凝性水化物包裹, 而且在矽石颗粒之间孔隙中已有少量胶凝性(或晶型)水化物的填充。

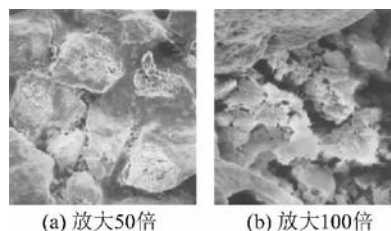


图 6 充填体 S2 微观结构(水泥掺量为 20%)

Fig. 6 Microscopic structure of backfill (cement contents of 20%)

在水泥掺量为 25% 时, 充填体中矽石颗粒之间孔隙已被胶凝性水化物充分填充, 充填体比较致密(图 7), 说明在水泥掺量为 25% 时水泥浆液既能充分包裹矽石颗粒, 同时又能够填满矽石颗粒之间孔隙。

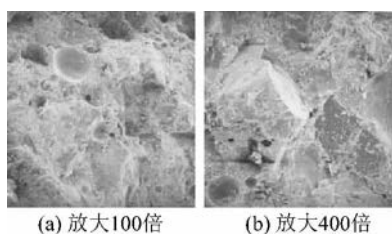


图 7 充填体 S2 微观结构(水泥掺量为 25%)

Fig. 7 Microscopic structure of backfill  
(cement contents of 25%)

水泥掺量为 30% 时,虽然充填体中矽石颗粒之间孔隙仍被胶凝性水化物填充,但与水泥掺量为 25% 时相比,充填体中矽石颗粒之间胶凝性水化物厚度有所增加(图 8)。

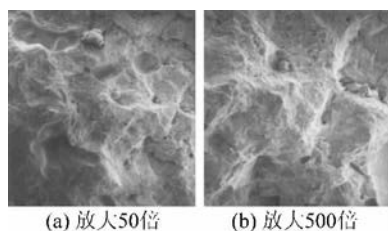


图 8 充填体 S2 微观结构(水泥掺量为 30%)

Fig. 8 Microscopic structure of backfill  
(cement contents of 30%)

### 3 矿井水泥-煤矽石充填体结构模型

通过电子扫描显微镜对不同水泥掺量的充填体 S2 微观结构进行观测,可知图 3 曲线中水泥掺量达到第 1 区间界点 I 时水泥水化物基本可以完全包裹充填体中矽石颗粒,水泥掺量达到在第 2 区间界点 II 时水泥水化物基本可以充满矽石颗粒之间孔隙。

水泥-煤矽石充填体结构模型如图 9 所示,水泥-煤矽石充填体一般是以一定的方式将水泥浆液与破碎煤矽石骨料(假设为圆形)搅拌均匀,经凝结硬化而成。当水泥掺量达到某一程度时(如图 3 中区间界点 I 所对应的水泥掺量),破碎煤矽石与水泥浆液搅拌后,水泥浆液能够在矽石颗粒表面形成浆膜包裹矽石颗粒,水泥水化硬化后将松散的矽石颗粒胶结为一体,水泥水化生成的胶凝性物质主要用于胶结矽石颗粒,使充填体形成一定的强度(图 9a)。充填体抗压强度取决于矽石颗粒胶结数量与胶结程度,在此区间内充填体抗压强度增量与水泥掺量基本呈线性相关(图 3)。除此,不同矽石颗粒粒径分布范围及各粒径组质量百分比不同,因此胶结矽石颗粒所需水泥掺量也不同,随矽石颗粒比

表面积增加(矽石样 3 < 矽石样 2 < 矽石样 1) 相应的充填体 S3、S2、S1 中矽石颗粒达到完全胶结时所对应的水泥掺量也增加(充填体 S1 > 充填体 S2 > 充填体 S3)(图 3)。

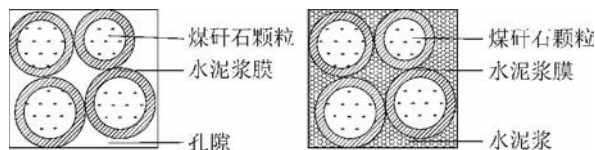


图 9 水泥-煤矽石充填体结构模型

Fig. 9 Backfill structural formation of cement-coal refuse

1—煤矽石颗粒; 2—水泥浆膜; 3—孔隙; 4—填充孔隙的水泥浆

当水泥掺量大于矽石颗粒完全胶结所对应的水泥量后,进一步掺加的水泥水化后生成的胶凝性水化物主要用于填充矽石颗粒之间孔隙。最初用于填充孔隙的胶凝性水化物较少,并没有引起质的变化,此时充填体抗压强度增量较小,甚至有所降低;当水泥掺量达到一定时,水泥浆大量填充矽石颗粒孔隙,水泥水化生成的胶凝性水化物填充于孔隙,使得充填体强度增长较快,如图 3 中第 2 区间;此区间充填体抗压强度增长速率取决于充填体孔隙填充率,矽石样孔隙率越大(矽石样 1 < 矽石样 2 < 矽石样 3),用于填充充填体孔隙的水泥量也增加(充填体 S1 < 充填体 S2 < 充填体 S3),如图 3 所示。只有当水泥浆液充分包裹煤矽石颗粒,同时又能充填满矽石颗粒之间的孔隙时(图 3 中区间界点 II 所对应的水泥掺量),才能得到密实的充填体结构(图 9b),此时充填体 S1、S2、S3 中用于孔隙填充的水泥掺量分别为 10%、13%、18%。

上述水泥-煤矽石充填体结构模型较好的解释了不同水泥掺量时,充填体抗压强度增长规律及水泥在充填体结构形成过程中所起的不同作用。对于第 3 区间内充填体抗压强度增量先降低后增加主要是由于多余的水泥置换了充填体中矽石颗粒而引起,一般在矿井充填体中水泥掺量应小于该区间所对应的值。

### 4 结 论

1) 提出了水泥-煤矽石充填体结构模型,水泥-煤矽石充填体结构形成来源于水泥水化物对矽石颗粒的胶结和孔隙填充。

2) 不同水泥掺量时水泥在充填体结构形成过程中所起的作用不同,水泥充填体抗压强度增长规

律也不同。当充填体中水泥掺量较少时,水泥水化物主要用于胶结矸石颗粒,充填体抗压强度与水泥掺量呈线性相关;当充填体中水泥掺量大于矸石颗粒胶结所对应的水泥量之后,进一步增加的水泥水化后生成物将填充矸石颗粒间孔隙,水泥掺量达到一定程度时充填体抗压强度与孔隙水泥水化物填充程度也基本呈线性相关。

3) 在使用固体废弃物替代水泥配制矿井充填材料时,可以考虑使用水化能生成胶凝性水化物的废弃物替代用于包裹矸石颗粒的水泥量,使用水化后可生成膨胀性水化物或胶凝性水化物的废弃物替代填充矸石颗粒间孔隙的水泥量,对于有待进一步进行研究。

#### 参考文献:

- [1] 钱鸣高,许家林,缪协兴. 煤矿绿色开采技术[J]. 中国矿业大学学报 2003 32(4): 343-348.  
Qian Minggao, Xu Jialin, Miao Xiexing. Green technique in coal mining[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2003 32(4): 343-348.
- [2] 缪协兴,钱鸣高. 中国煤炭资源绿色开采研究现状与展望[J]. 采矿与安全工程学报 2009 26(1): 1-14.  
Miao Xiexing, Qian Minggao. Research on green mining of coal resources in China: current status and future prospects[J]. Journal of Mining and Safety Engineering 2009 26(1): 1-14.
- [3] 张吉雄,缪协兴,郭广礼. 矸石(固体废物)直接充填采煤技术发展现状[J]. 采矿与安全工程学报 2009 26(4): 395-401.  
Zhang Jixiong, Miao Xiexing, Guo Guangli. Development status of backfilling technology using raw waste in coal mining[J]. Journal of Mining and Safety Engineering 2009 26(4): 395-401.
- [4] 谭云亮,宁建国,顾士坦,等. 矿山压力与岩层控制[M]. 修订本. 北京: 煤炭工业出版社 2011.
- [6] Ning Jianguo, Wang Jun, Liu Xuesheng *et al.* Soft - strong supporting mechanism of gob - side entry retaining in deep coal seams threatened by rockburst[J]. International Journal of Mining Science Technology 2014 24: 805-815.
- [7] 宁建国,刘学生,钱坤,等. 薄煤层坚硬顶板沿空留巷防漏风柔性支护技术[J]. 煤炭科学技术 2014 42(2): 6-8 93.  
Ning Jianguo, Liu Xuesheng, Qian Kun *et al.* Technology of flexible supporting for air leakage prevention in thin coal seam gob - side entry retaining with hard roof[J]. Coal Science and Technology 2014 42(2): 6-8 93.
- [8] 缪协兴,张吉雄,郭广礼,等. 综合机械化固体充填采煤方法与技术研究[J]. 煤炭学报 2010 35(1): 1-6.  
Miao Xiexing, Zhang Jixiong, Guo Guangli *et al.* study on waste - filling method and technology in fully mechanized coal mining[J]. Journal of China Coal Society 2010 35(1): 1-6.
- [9] 孙希奎. 置换条带开采中充填体强度分析[J]. 煤炭科学技术, 2011 39(5): 33-36.  
Sun Xikui. Analysis on Backfill material strength of replacement for belt coal pillar mining[J]. Coal Science and Technology 2011 39(5): 33-36.
- [10] 王新民,肖卫国,张钦. 深井矿山充填理论与技术[M]. 长沙: 中南大学出版社 2005.
- [11] 孙恒虎. 高水速凝材料及其应用[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1994.
- [12] 刘树江,石建新,王苇,等. 高水膨胀材料充填采煤试验研究[J]. 煤炭科学技术 2011 39(6): 21-25.  
Liu Shuijiang, Shi Jianxin, Wang Wei *et al.* Experiment study on backfill mining with high water swelling material[J]. Coal Science and Technology 2011 39(6): 21-25.
- [13] 冯光明,丁玉,朱红菊,等. 矿用超高水充填材料及其结构的实验研究[J]. 中国矿业大学学报 2010 39(6): 813-819.  
Feng Guangming, Ding Yu, Zhu Hongju *et al.* Experimental research on a super high - water packing material for mining and its micromorphology[J]. Journal of China University of Mining and Technology 2010 39(6): 813-819.
- [14] 闫少宏,张华兴. 我国目前煤矿充填开采技术现状[J]. 煤矿开采 2008 13(3): 1-3.  
Yan Shaohong, Zhang Huaxing. Statue - quo of filling mining technology in coal mines of China[J]. Coal Mining Technology, 2008 13(3): 1-3.
- [15] 田斌. 高水固化材料与尾砂用于胶结充填[J]. 化工矿物与加工 1999(2): 15-16.  
Tian Bin. High percentage of water rapid solidifying material and tailings for cementing filling[J]. Industrial Material and Processing 1999(2): 15-16.
- [16] 周华强,侯朝炯,孙希奎,等. 固体废弃物膏体充填不迁村采煤[J]. 中国矿业大学学报 2004 33(2): 154-158.  
Zhou Huaqiang, Hou Chaojiong, Sun Xikui *et al.* Solid waste paste filling for none - village - relocation coal mining[J]. Journal of China University of Mining and Technology 2004 33(2): 154-158.
- [17] 崔增娣,孙恒虎. 煤矸石凝石似膏体充填材料的制备及其性能[J]. 煤炭学报 2010 35(6): 896-899.  
Cui Zengdi, Sun Henghu. The preparation and properties of coal gangue based sialite paste - like backfilling material[J]. Journal of China Coal Society 2010 35(6): 896-899.
- [18] 黄伟,马芹永. 喷射补偿收缩混凝土中胶凝材料微观结构分析[J]. 煤炭科学技术 2011 39(3): 22-24.  
Huang Wei, Ma Qinyong. Analysis on microstructure of gelled material in shrinkage - compensating shotcrete[J]. Coal Science and Technology 2011 39(3): 22-24.
- [19] 袁润章. 胶凝材料学[M]. 2 版. 武汉: 武汉理工大学出版社, 1996.
- [20] 宁建国,马鹏飞,刘学生,等. 坚硬顶板沿空留巷巷旁“让-抗”支护机理[J]. 采矿与安全工程学报 2013 30(3): 369-374.  
Ning Jianguo, Ma Pengfei, Liu Xuesheng *et al.* Supporting mechanism of “yielding - supporting” beside roadway maintained along the goaf under hard rocks[J]. Journal of Mining and Safety Engineering 2013 30(3): 369-374.