

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2014.05.016

## 巷旁泵送煤矸石胶结充填材料的应用

邹德均<sup>1,2</sup>, 曹树刚<sup>1</sup>, 王 勇<sup>1</sup>, 李国栋<sup>1</sup>

(1. 重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044; 2. 重庆工程职业技术学院, 重庆 400037)

**摘 要:**为了充分发挥煤矸石在煤矿井下巷旁支护过程中的作用,开展了某矿井煤矸石相关物理性质测试试验,研究了不同水灰比、外加剂对煤矸石胶结充填材料的坍落度、单轴抗压强度及初凝时间的影响。试验研究表明,水:水泥:粗骨料:细骨料:外加剂=1:2:5.6:1.6:0.02 为现场沿空留巷巷旁泵送充填最佳配合比。在该配合比条件下,煤矸石胶结充填材料的坍落度、28 d 单轴抗压强度及初凝时间分别为 210 mm、20.8 MPa、224 min,能较好地满足现场支护要求,并发现该配合比条件下的胶结充填材料实际初凝时间较室内提前约 50 min。

**关键词:**煤矸石;胶结充填材料;巷旁支护;配比试验

**中图分类号:**X936;X752

**文献标志码:**A

**文章编号:**1000-582X(2014)05-111-06

## Application of the pumping coal gangue cemented filling materials in roadside

ZOU Dejun<sup>1,2</sup>, CAO Shugang<sup>1</sup>, WANG Yong<sup>1</sup>, LI Guodong<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Chongqing Institute of Engineering, Chongqing 400037, China)

**Abstract:** To take full advantage of gangue for roadside supporting in coal mines, physical properties of coal gangue are tested. The collapsed slump, uniaxial compression strength and initial setting time of gangue binder backfill material with different water-cement ratios and admixture contents are researched. Experimental studies show that the best ratio of water, cement, coarse aggregate, fine aggregate and admixtures is 1:2:5.6:1.6:0.02 for site pumping of roadside packing support. The collapsed slump, 28 d uniaxial compression strength and initial setting time of gangue binder backfill material are 210 mm, 20.8 MPa, 224 min respectively under such ratio. It could satisfy the requirement of site supporting, and the initial setting time of binder backfill material under such ratio is about 50 min shorter in site than indoor.

**Key words:** coal gangue; cemented filling materials; roadside supporting; proportioning test

据统计,中国煤矸石产量约为原煤总产量的 15%~20%,已积存达 70 亿吨,占地约 70 km<sup>2</sup>,而且以每年排放量 1.5 亿吨的速度增长<sup>[1]</sup>。近年来,随着科学技术的不断提高,煤矸石的综合利用也得到较大的发展。目前有关煤矸石的利用主要涉及到水泥生产<sup>[1-7]</sup>、煤化工<sup>[8-13]</sup>、道路交通建设<sup>[14-15]</sup>以及其他相关领域<sup>[16-17]</sup>。虽然煤矸石应用领域比较广泛,但综合利用率不足 30%,导致煤矿生产成本增加,占用大量的土地,而且对周边地质环境造成极大的危害。随着矿山绿色开采和无煤柱开采理念的不断深入,煤矸石充填带护巷在无煤

**收稿日期:**2013-12-15

**基金项目:**国家自然科学基金项目(51074197);中央高校基本科研业务费资助(CDJXS11241181)

**作者简介:**邹德均(1980-),重庆大学博士研究生,主要从事矿山压力与顶板控制方面的研究工作。

曹树刚(联系人),男,重庆大学教授,博士生导师,(E-mail)caosg@cqu.edu.cn。

柱开采过程中也得到广泛应用<sup>[18-20]</sup>。但随着开采深度、开采工艺及地质条件的变化,单一采用煤矸石充填带条件下护巷成功的可能性大大地降低。为了提高井下煤矸石的综合利用率、增大煤矸石在井下的适用范围以及减轻工人筑矸时的劳动强度,笔者以四川省威鑫煤业煤矸石为依托,开展了“三软”煤层(指煤层顶板、底板和煤层松软)条件下的沿空留巷泵送煤矸石胶结充填材料试验研究,探讨了不同水灰比、外加剂对煤矸石胶结充填材料的坍落度、单轴抗压强度及初凝时间的影响,并确定煤矸石胶结充填材料最佳配合比。

## 1 原材料选择

### 1.1 煤矸石

作为骨料的煤矸石来至四川省威鑫煤业矸石山,其相关性能的测试结果见表 1、2。

表 1 煤矸石测试性能参数

堆积密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )		紧密密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )		表观密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )		含水量/%	
1 768		1 990		2 730		0.17	
空隙率/%	含泥量/%	针片状含量/%	石子压碎指标/%	吸水率/%			
31.20	8.11	9.78	11.53	1.54			

### 1.2 水泥

水泥选用当地生产的 32.5R 硅酸盐水泥,容重 150~2 00  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

### 1.3 外加剂

外加剂采用四川省某公司产品,使用后可显著改善拌合物的和易性,大幅提高坍落度,减少水的用量,具有合适的黏塑性。

### 1.4 水

水为矿井工业用水。

表 2 煤矸石粒径分布

粒径/mm	占总量百分比/%
$\geq 40.0$	7.34
31.5~40.0	3.37
25.0~31.5	3.70
20.0~25.0	9.31
16.0~20.0	4.68
10.0~16.0	16.53
5.0~10.0	19.27
2.5~5.0	13.68
$\leq 2.5$	21.92

## 2 试验方法

### 2.1 设计方法及思路

煤矸石胶结充填材料按《普通混凝土配合比设计规程 JGJ-55-2000》进行设计。其设计方法及思路见图 1。

### 2.2 坍落度测试

坍落度是衡量煤矸石胶结充填材料流动性的重要指标,由专用的坍落度桶进行测试。泵送材料一般要求坍落度为 180~220 mm,远距离泵送为 200~220 mm。

### 2.3 初凝时间测试

用 5 mm 方孔筛从煤矸石胶结充填材料中筛出砂浆,然后利用贯入阻力仪来确定坍落度不为零的煤矸石胶结充填材料的凝结时间。根据充填工艺过程,泵送材料一般要求初凝时间在 3~6 h。

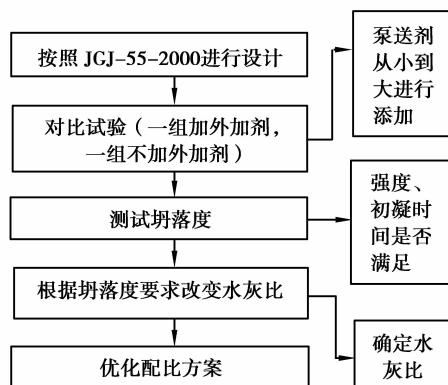


图 1 煤矸石胶结充填材料设计方法及思路图

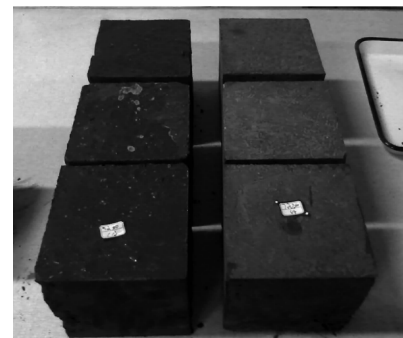


图 2 边长 150 mm 标准试件

## 2.4 抗压强度

抗压强度试验参照《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》中水泥混凝土立方体抗压强度试验方法进行试验。抗压强度采用边长为 150 mm 立方体试件,见图 2,24 h 脱模,并养护至规定的时间再进行抗压强度试验。

## 3 煤矸石胶结充填材料性能

结合前述煤矸石胶结充填材料的设计方法及思路,参照 C20 混凝土强度的设计,整理出有效的配比,结果见表 3。

表 3 煤矸石胶结充填材料有效配比

序号	水灰比	水/g	水泥/g	粗骨料/g	细骨料/g
1-1	0.55	225	409	1 288	378
1-2	0.55	225	409	1 288	378
1-3	0.55	225	409	1 288	378
1-4	0.55	225	409	1 288	378
2-1	0.50	225	450	1 257	368
2-2	0.50	225	450	1 257	368
2-3	0.50	225	450	1 257	368
2-4	0.50	225	450	1 257	368
3-1	0.45	225	500	1 218	357
3-2	0.45	225	500	1 218	357
3-3	0.45	225	500	1 218	357
3-4	0.45	225	500	1 218	357

### 3.1 水灰比影响

水灰比影响充填材料的坍落度。在泵送过程中,泵送材料过干,不采用外加剂易造成堵管;泵送材料过稀,骨料在管道内易离析,同样造成堵管。因此,在泵送骨料的过程中,坍落度须满足泵送的要求。不同水灰比的坍落度及抗压强度测试结果见表 4。

由表 4 可知,随着水灰比的减少,坍落度明显减低,

而单轴抗压强度却增加,当水灰比为 0.45 时,测试不出坍落度,直接拌合的煤矸石胶结充填材料不能满足泵送要求。研究表明,在减少水的用量时,可提高煤矸石胶结充填材料的强度。

### 3.2 外加剂影响

研究了改变水灰比的条件下,不同外加剂对坍落度和 3 d 单轴抗压强度的影响,外加剂的用量控制在为水泥用量 1% 以下。实验结果见表 5。

表 4 不同水灰比的坍落度及抗压强度测试

序号	3 d 抗压强度/MPa	3 d 最大位移量/mm	坍落度/mm
1-1	6.6	2.39	65
2-1	7.4	2.13	40
3-1	7.7	1.87	—

表 5 不同外加剂对坍落度和抗压强度测试(3 d)

序号	外加剂用量	占水泥百分比/%	坍落度/mm	抗压强度/MPa	最大位移/mm
1-2	2.2	0.5	150	4.8	3.87
1-3	3.5	0.8	175	5.5	2.86
1-4	4.4	1.0	185	6.2	1.37
2-2	2.3	0.5	75	5.4	3.05
2-3	3.6	0.8	180	6.3	2.41
2-4	4.5	1.0	210	7.6	1.59
3-2	2.5	0.5	90	7.2	2.52
3-3	4.0	0.8	200	8.8	2.11
3-4	5.0	1.0	220	10.2	1.82

由表 5 可知,由于外加剂具有减水功能,在水灰比一定的情况下,随外加剂参量的增加,坍落度与单轴抗压强度也增加;随着水灰比的减少,外加剂参量为 0.5% 时,坍落度变化区间较大,但单轴抗压强度呈增加趋势;当外加剂参量从 0.8% 增加到 1.0% 时,坍落度增大效果显著,单轴抗压强度也明显增加;当外加剂参量一定时(0.8%~1.0%),水灰比越小,坍落度越大,单轴抗压强度也随之增加。结合试验综合考虑,确定外加剂参量选用水泥参量的 1.0% 时,配置的煤矸石胶结充填材料为大流动性煤矸石胶结充填材料。

### 3.3 初凝时间影响

在不同配比条件下,煤矸石胶结充填材料的初凝时间的测试结果见表 6。

由表 6 可知,水灰比相同时,随着外加剂的增加,初凝时间也增加;当水灰比一定时,在不添加外加剂的情况下,随水灰比的减小,初凝时间减少。试验结果表明,减少了水的用量,有利于提高煤矸石胶结充填材料的初凝时间。

### 3.4 单轴抗压强度测试

单轴抗压强度采用 150 mm×150 mm×150 mm 的标准试件进行测试,见图 2。根据表 4 确定泵送剂参量为 1.0% 时配置标准试件,采用编号 1-4、2-4 及 3-4 三组配比进行煤矸石胶结充填材料的单轴抗压强度试验。试验结果见表 7 和图 3。

表 6 不同水灰比及外加剂参量下的煤矸石胶结充填材料初凝时间测试

序号	初凝时间/min
1-1	186
1-2	202
1-3	231
1-4	248
2-1	153
2-2	184
2-3	199
2-4	224
3-1	130
3-2	151
3-3	187
3-4	205

表 7 单轴抗压强度试验结果

序号	初凝时间/min	1 d		3 d		7 d		28 d	
		抗压强度/MPa	最大应变(e-2)	抗压强度/MPa	最大应变(e-2)	抗压强度/MPa	最大应变(e-2)	抗压强度/MPa	最大应变(e-2)
1-4	248	0.33	3.68	6.2	1.37	7.8	1.21	16.6	1.33
2-4	224	0.41	3.55	7.6	1.59	13.7	1.50	20.8	1.31
3-4	205	0.56	4.43	10.2	1.82	20.5	1.59	29.5	1.52

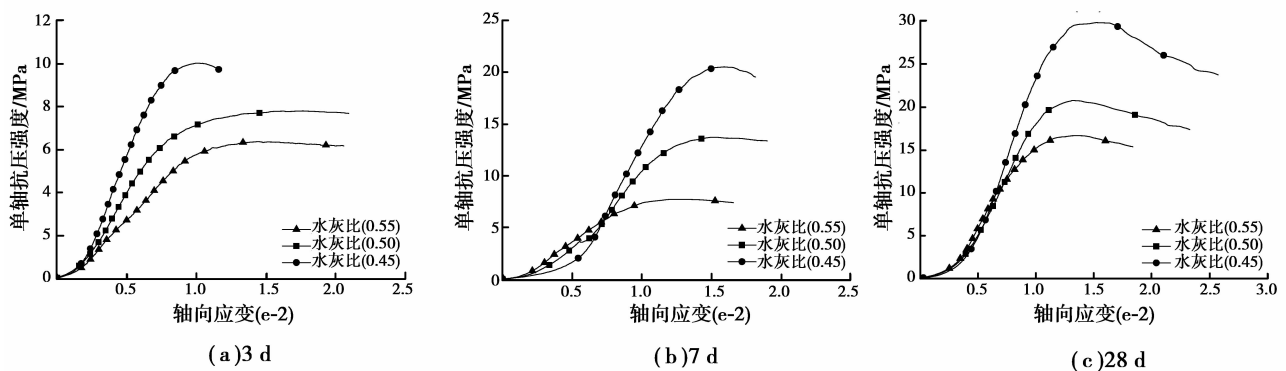


图 3 单轴抗压强度应力-应变曲线

根据表7和图3可知,水灰比为0.55时,1d的单轴抗压强度不足0.5MPa,28d的单轴抗压强度为16.6MPa,此强度不能满足井下巷旁充填设计要求。从3d和7d的应力-应变曲线变化趋势分析,水灰比为0.55组配比材料为弹-粘性体,说明7d内煤矸石胶结充填材料具有较强的延性变形,采用这种材料进行巷旁充填时,支护体内部变形量大,易造成后期支护强度不够;水灰比为0.50时,7d的单轴抗压强度达13.7MPa,28d的单轴抗压强度为20.8MPa,3d的应力-应变曲线表现为弹-粘性体,若在3d内承压易使内部发生较大的延性变形,造成后期强度不够,7d和28d的应力-应变曲线表现为塑-弹-塑性体,在这个期间受压后,煤矸石胶结充填材料延性变形小,同时,28d的单轴抗压强度满足巷旁充填设计要求;水灰比为0.45时,7d抗单轴压强度达20.5MPa,28d单轴抗压强度达29.5MPa,3、7、28d的应力-应变曲线均表现为塑-弹-塑性体,虽能满足设计要求,但采用该组配比支护材料后,会使软弱顶板造成剪应力集中,产生剪破坏。

### 3.5 综合分析

煤矸石胶结充填材料既要满足设计强度要求,又要符合“三软”煤层的特性。综合上述实验研究结果,选择水灰比为0.50,外加剂参量为1%的配比作现场试验,即水:水泥:粗骨料:细骨料:外加剂=1:2:5.6:1.6:0.02。虽3d内造成煤矸石胶结充填材料内部发生延性变形,不宜承重,但在现场施工过程中,可通过采用其它的加强支护措施减少煤矸石胶结充填材在3d内的受压。

## 4 工程实践

对研制好的煤矸石胶结充填材料在威鑫煤业N11902运输平巷进行了探索性的泵送煤矸石胶结充填材料巷旁支护实践。充填工艺为地面配料—井下搅拌—管道输送—注入充填袋;设备选用HBMG-30/21-110S型煤矿用混凝土泵;以煤矸石胶结充填料为充填材料;充填区域采用特制的透水不透浆的柔性模袋为充填体固型;初凝时间的测试方法与室内测试方法相同。

该矿井煤岩性质为“三软”煤层。在充填了3个柔性模袋后,因设备出现故障造成堵管,加上对现场巷旁支护不及时,造成从工作面后方至柔性模袋之间顶板冒顶,故未对现场试验矿压数据进行收集。但现场实施效果表明,见图4,现场实施效果表明,选择的煤矸石胶结充填材料强度满足设计要求,能较好地控制巷道一侧的顶板。因在长距离管道输送过程中,充填材料与输送管道之间以及充填材料内部之间的摩擦,产生的热能缩短了煤矸石胶结充填材料的初凝时间,较室内提前约50min。



图4 柔性模板泵送煤矸石胶结充填材料现场试验效果

## 5 结论

针对煤矿“三软”煤层沿空留巷巷旁泵送材料充填的工程需求,通过实验室试验和工程实践,得到如下的研究结论:

- 1) 煤矿“三软”煤层沿空留巷最佳的泵送煤矸石胶结充填材料的配比为水:水泥:粗骨料:细骨料:泵送剂=1:2:5.6:1.6:0.02。
- 2) 现场探索性的泵送煤矸石胶结充填材料试验结果表明,工程应用期间的初凝时间较室内提前约50min。

### 参考文献:

- [1] 裘国华,徐扬,施正伦,等.煤矸石代替黏土生产水泥可行性分析[J].浙江大学学报:工学版,2010,44(5):1003-1008.  
QIU Guohua, XU Yang, SHI Zhenglun, et al. Feasibility analysis on utilization of coal gangue as clay for cement[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2010, 44(5): 1003-1008.
- [2] Chen J J, Thomas J J, Taylor H F W, et al. Solubility and structure of calcium silicate hydrate[J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34 (9): 1499-1519.
- [3] Rothstein D, Thomas J J, Christensen B J, et al. Solubility behavior of Ca-, S-, Al-, and Si-bearing solid phases in

- Portland cement pore solutions as a function of hydration time[J]. *Cement and concrete Research*, 2002, 32(8): 1663-1671.
- [4] LI Dongxu, SONG Xuyan. The mechanical properties and hydration characteristics of cement pastes containing added-calcium coal gangue[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2008, 23(2): 254-258. 8
- [5] Chen Y M, Zhou S X, Zhang W S. Effect of coal gangue with different kaolin contents on compressive strength and pore size of blended cement paste[J]. *Journal of Wuhan University of Technology: Materials Science Edition*, 2008, 23(1): 12-15.
- [6] 周梅,李志国,吴英强,等. 石灰-粉煤灰-水泥稳定煤矸石混合料的研究[J]. *建筑材料学报*, 2010, 13(2): 213-217.  
ZHOU Mei, LI Zhiguo, WU Yingqiang, et al. Experimental research on lime-fly ash cement stabilized coal gangue mixture[J]. *Journal of Building Materials*, 2010, 13(2): 213-217.
- [7] Luo G P, Wu S L, Zhang G J, et al. Effects of compound silicate gangue on formation of complex calcium ferrite during sintering process[J]. *Journal of Iron and Steel Research International*, 2013, 20(3): 18-23.
- [8] Mochalov S P, Kalashnikov S N, Mochalov P S, et al. Mathematical modeling of heat transfer processes of coal waste combustion in a chamber of automated energy generating complex[J]. *Journal of Thermal Science*, 2013, 22(2): 174-179.
- [9] Querol X, Izquierdo M, Vlonfort E, et al. Environmental characterization of burnt coal gangue banks at Yangquan, Shanxi Province, China[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2008, 75(2): 93-104.
- [10] 王炯,张力,蒲舸. 劣质混煤的热解与燃烧特性[J]. *重庆大学学报*, 2010, 33(2): 83-86.  
WANG Jiong, ZHANG Li, PU Ge. Characteristics of pyrolysis and combustion of low quality mixing coal[J]. *Journal of Chongqing University*, 2010, 33(2): 83-86.
- [11] 时鹏辉. 利用煤矸石制取钛白粉的试验研究[J]. *电力环境保护*, 2008, 24(5): 56-57.  
SHI Penghui. Experimental study of making titanium from coal gangue[J]. *Electric Power Environmental Protection*, 2008, 24(5): 56-57.
- [12] 王湖坤,王敏,王代芝. 煤矸石与硫铁矿烧渣制复合混凝剂及其应用[J]. *武汉理工大学学报*, 2009, 31(24): 24-27, 33.  
WANG Hukun, WANG Min, WANG Daizhi. Research on preparation and application of complex coagulant from coal gangue and pyrite cinder[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2009, 31(24): 24-27, 33.
- [13] 宋素莉,舒新前,李钢,等. 利用煤矸石制备轻质多孔材料的研究现状与展望[J]. *矿产综合利用*, 2008, 2(2): 23-27.  
SONG Suli, SHU Xinqian, LI Gang, et al. Current situation and prospect of manufacturing porous materials using coal gangue[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2008, 2(2): 23-27.
- [14] 周梅,汪振双,崔正龙. 阜新煤矸石用作路基材料的研究分析[J]. *建筑节能*, 2007, 35(2): 34-36.  
ZHOU Mei, WANG Zhenshuang, CUI Zhenglong. The analysis on the roadbed materials using coal gangue in fuxin[J]. *Construction Conserves Energy*, 2007, 35(2): 34-36.
- [15] 李伟,程培峰,李国栋. 煤矸石沥青混合料路面性能的试验[J]. *东北林业大学学报*, 2009, 37(6): 54-55, 58.  
LI Wei, CHENG Peifeng, LI Guodong. Experiment on road performance of asphalt mixture of coal gangue[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2009, 37(6): 54-55, 58.
- [16] 关博文,刘开平,赵秀峰,等. 煤矸石资源化再利用研究[J]. *煤炭转化*, 2008, 31(1): 89-92, 96.  
GUAN Bowen, LIU Kaiping, ZHAO Xiufeng, et al. Study on comprehensive utilization of coal gangue[J]. *Coal Conversion*, 2008, 31(1): 89-92, 96.
- [17] Wang T, Wang Y, Wang, T. Research on potential fertilization of coal gangue in the Weibei coalfield, China[J]. *Acta Geologica Sinica: English Edition*, 2008, 82(3): 717-721.
- [18] 缪协兴,张吉雄. 矸石充填采煤中的矿压显现规律分析[J]. *采矿与安全工程学报*, 2007, 24(4): 379-382.  
MIAO Xiexing, ZHANG Jixiong. Analysis of strata behavior in the process of coal mining by gangue backfilling[J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2007, 24(4): 379-382.
- [19] 王新民,卢央泽,张钦礼. 煤矸石似膏体胶结充填采场数值模拟优化研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2008, 4(2): 346-350.  
WANG Xinmin, LU Yangze, ZHANG Qinli. Simulating and optimizing the configuration parameter of stope in Plaster-Like filling[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2008, 4(2): 346-350.
- [20] 王新民,姚建,张钦礼,等. 煤矸石作为胶结充填骨料性能的实验研究[J]. *矿业快报*, 2006, 25(3): 20-23, 63.  
WANG Xinmin, YAO Jian, ZHANG Qinli, et al. Experimental study of performance of coal gangue as cementing filling aggregate[J]. *Express Information of Mining Industry*, 2006, 25(3): 20-23, 63.