采动岩体工程分类及力学参数估算方法研究

刘　小　平[1,2]

（1. 中国煤炭科工集团西安研究院有限公司，陕西 西安　710077；2. 西安理工大学 岩土工程研究所，陕西 西安　710048）

摘　要：为解决采动岩体数值计算中力学参数问题，基于覆岩三带理论及工程实践，提出了以现场可直接测量的采动岩体完整性指数、三带发育高度为分类指标的采动岩体工程分类法，建立了岩体纵波波速与地质质量指标的关系，推导了 Hoke-Brown 准则中关键参数的计算公式，实现了采动岩体力学性质的定量评价，总结了采动岩体力学参数取值的一般规律。工程实践表明，该分类方法及力学参数估算方法简便实用，符合工程实际。

关键词：采动岩体；岩体工程分类；Hoke-Brown 准则；纵波波速

中图分类号：TD313　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0253-2336(2014)01-0146-05

Research on Engineering Classification and Mechanical Parameters Estimation Method for Mining Rockmass

LIU Xiao-ping[1,2]

(1. *Xi'an Research Institute Co., Ltd., China Coal Technology and Engineering Group, Xi'an*　710077, *China*;
2. *Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an*　710048, *China*)

Abstract: In order to solve the mining rock mechanics parameters selection problem, based on the three-zone theory and engineering practice, the paper proposed a classification method for mining rockmass using integrity index and height of three-zone, which could be measured directly, established relationships with the longitudinal wave velocity and geological strength index for rockmass, derived the pricing formula of key parameter in Hoek-Brown criterion, realized quantitative evaluation on mechanical properties of mining rockmass. Ultimately, the author summarized the general rule of parameters selection of mining rockmass. The engineering application showed that this method of classification and mechanical paramete estimation was simple, practical and fitted engineering reality.

Key words: mining rockmass; rockmass engineering classification; Hoek-Brown criterion; longitudinal wave velocity

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

0　引　　言

近年来，煤炭资源持续高强度开采，在我国中西部形成了大规模的采空区。然而，随着矿业工程及小城镇建设的快速发展，使老矿区土地资源日益紧缺，公路、铁路、机场、南水北调、西气东输等重大基础工程及城镇不得不建在采空区上方。因此，采空区上方建(构)筑地基的变形规律、破坏特征及稳定性控制这一新的工程地质问题，被广大地质、采矿、结构等不同专业的工程技术人员所关注。传统固体力学研究大多限制在连续变形范围内，材料或结构破裂意味着废弃，因而也就无任何研究价值。但是，采空区上方的建(构)筑物地基为采动岩体，它们并不因采煤过程中破裂而废弃，而是对工程产生影响的开始[1]。工程荷载作用下，采动岩体失稳及再稳定形态，是采空区建筑地基变形控制的关键。众多学者，针对采空区地表与建(构)筑物地基不均匀沉降问题已做了大量深入的研究。从研究方法上可归为 3 类：基于概率积分法的解析法、相似材料模拟试验和数值模拟。邓喀中等[2]基于概率积分法研究了采空区地表残余变形量预测方法，但未涉及采动岩体移动、破裂及压密机理。文献[3-5]利用室内

收稿日期：2013-08-20；**责任编辑**：杨正凯　　**DOI**：10.13199/j.cnki.cst.2014.01.034

基金项目：中国煤炭科工集团西安研究院技术创新资助项目(2013XAYCX025)

作者简介：刘小平(1983—)，男，陕西商洛人，博士研究生。Tel：13572132231，E-mail：liuxiaoping@cctegxian.com

引用格式：刘小平.采动岩体工程分类及力学参数估算方法研究[J].煤炭科学技术，2014，42(1)：146-150.

LIU Xiao-ping. Research on Engineering Classification and Mechanical Parameters Estimation Method for Mining Rockmass[J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(1): 146-150.

相似材料模拟及现场可视化探测等技术,研究了采动岩体内裂隙的分布状态、分形规律以及采动岩体的残余碎胀性空间分布特征,但未能与采动岩体计算中所需的力学参数结合起来。文献[6-11]采用数值计算方法研究了高速公路路基、桥梁、隧道的采动响应特征、采空区二次活化、采空区与地基相互作用机制,但在模拟采动岩体时没有考虑采动影响或仅对原岩(未采动前)的强度及变形参数进行了简单的折减,未考虑三带内采动裂隙对岩体强度及变形的弱化。在研究岩体工程稳定性中,数值计算方法得到了成功应用。但是,解决采空区建(构)筑物地基稳定性问题时,采动岩体力学参数难以确定,制约数值计算在此方面的研究,目前尚未解决。基于此,笔者针对采动岩体赋存的地质环境特征,建立采动岩体工程分类标准,将能真实反映采动裂隙分布的覆岩三带理论与 Hoke-Brown 准则结合起来,提出一种适宜于采动岩体力学参数的确定方法,为采空区建(构)筑物地基变形数值计算提供可靠的力学参数。

1　采动岩体结构与工程分类

1.1　采动岩体结构

采动岩体结构是指岩体中采动破裂面与采动结构体的排列组合特征。采动岩体结构包括 2 个要素或称结构单元,即采动破裂面和采动结构体。采动岩体结构如图 1 所示,结构面 cc'、dd' 为煤系地层中的沉积层面,结构面 aa' 及 bb' 为原生小型构造(节理)面,由结构面 aa'、bb'、cc' 及 dd' 切割出原生结构体(1234)。若该岩体受采矿活动影响,产生破裂面 ee',结构面 aa'、cc' 及 dd' 也发生拉张、错动或滑移,则形成由破裂面 ee'、"复活"的原生结构面 aa'、cc' 及 dd' 构成的采动破裂结构体(1564)。工程活动中,采动破裂面及结构体对岩体稳定性的控制作用更为显著。

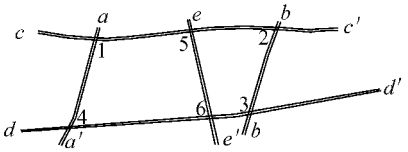

图 1　采动岩体结构示意

煤炭采出后,上覆岩层在重力作用下不断发生断裂、垮落,直至地表发生沉陷变形。根据岩层破裂程度的不同,自下而上划分为三带,即垮落带、裂隙带、弯曲下沉带。由文献[5]可视化探测结果可知:①垮落带内岩层的张开错动十分明显,破碎岩块掉落,采动破裂面纵横分布;②裂隙带内岩层采动破裂面以高角度乃至与岩层层面垂直的裂隙为主,越向下靠近垮落带,裂隙越发育;③弯曲下沉带内岩层裂隙均为原生裂隙,无显著的采动破裂面。因此,采动岩体结构与三带发育特征具有良好的一致性。

1.2　工程分类

采动岩体工程分类既是采空区建(构)筑物地基稳定性研究的基础,也是岩体工程地质条件定量化的一个重要途径。对于采动岩体井下条件复杂,且埋藏深,不具备进行现场原位试验的条件,只能采用间接指标作为分类标准。采动岩体的结构类型与覆岩移动三带的空间分布、岩体完整性紧密相关,因此,以煤层上覆岩体的三带发育范围和完整性指数为主,建立采动岩体的工程分类标准(表 1)是一种合乎逻辑的分类方法,易与操作、符合实际、工程应用便捷。

表 1　采动岩体工程分类

岩体结构类型	描述	完整性指数	三带发育高度
层状结构	主要结构面为层面,使得岩体呈层状结构特点,坚硬岩层和软弱岩层通常交互沉积,变形破坏时硬岩起控制作用,软岩随硬岩运动	>0.75	弯曲下沉带;采场外侧采动影响范围以外的地层
块体结构	坚硬岩层被有规律的几组结构面、裂隙切割成较大的结构体,块体间相互咬合、挤压	0.75~0.35	裂隙带中、上部
碎裂结构	岩层被节理、劈理、裂隙等不规则结构面分隔,非均质各向异性	0.35~0.15	裂隙带下部
散体结构	岩体被多组结构面切割,呈碎块,各向异性体	<0.15	垮落带

2　采动岩体力学参数

2.1　Hoke-Brown 准则

2002 年 E. Hoek 提出了新广义 Hoek-Brown 经验强度准则[12]:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c (m_b \sigma_3/\sigma_1 + s)^{\alpha} \tag{1}$$

$$m_b = m_i \exp[(GSI - 100)/(28 - 14D)]$$

$$s = \exp[(GSI - 100)/(9 - 3D)]$$

$$\alpha = 1/2 + (e^{-GSI/15} - e^{-20/3})/6$$

其中:σ_1、σ_3 分别为岩体屈服时的最大和最小主应

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

力，MPa；σ_c为完整岩石试件的单轴抗压强度，MPa；m_i为完整岩石的霍克-布朗常数；α 为无量纲参数；s 为与岩体质量有关的参数；GSI 为岩体地质强度指标；D 为表征岩体的受扰动程度的修正变量系数。式(1)与广义 Hoek-Brown 岩体强度准则相比，新增了 1 个修正变量系数 $D(D=0\sim1)$，取决于外界因素对岩体的扰动程度。参数 m_b、s 是反映岩体强度及完整性的 2 个重要参数。在采动岩体中应用时，与广泛应用的 Mohr-Coulomb 强度准则相比，新广义 Hoek-Brown 经验强度准则具有如下优点：①综合考虑岩块强度、结构面(原生结构面或采动破裂面)、岩体结构等多种因素；②能反映岩体低应力区、拉应力区及最小主应力对岩体强度的影响；③能反映岩体破坏时的非线性强度。

2.2　波速测试技术估算经验参数

1)修正变量系数 D。采空区上方进行工程建设前，必须划定地面建设工程保护煤柱的禁采范围，采动岩体不存在工程开挖、爆破等施工扰动，因此修正变量系数 D 取值为 0。

2)纵波波速与地质质量指标 GSI 的关系。新广义 Hoek-Brown 经验强度准则 GSI 取值表中，缺乏对结构面表面特征描述的可量测典型参数，同时也缺乏结构面间距的限定或级别，使得 GSI 取值主观性影响过大。波速测试技术是近 30 年来发展的一种新技术，通过声波穿透介质后声波波速和衰减系数，反映材料的物理力学特征、结构特征等。采动岩体，具有结构性空间分异性大，垮落带及裂隙带埋藏深，钻孔取心极困难。因此，采用声波测试技术间接获得采动岩体结构、裂隙、岩体强度等地质信息具有简便、快捷、经济和无破损的优点。巴顿发现纵波波速 V_p与岩体质量指标 Q 之间呈线性关系：

$$Q = 10^{(V_p-3\,500)/1\,000} \tag{2}$$

Bieniawski 在大量实测统计的基础上，给出了岩体质量指标 Q 与岩体地质力学指标 RMR_{76}间的统计关系式：

$$RMR_{76} = 9\lg Q + 44 \tag{3}$$

E. Hoke 给出 GSI 和 RMR_{76}两种岩体分类指数之间的换算式：

$$GSI = RMR_{76} \tag{4}$$

将式(2)和式(3)代入式(4)可得到纵波波速 V_p与 GSI 之间的关系式：

$$GSI = 9(V_p - 3\,500)/1\,000 + 44 \tag{5}$$

3)采动岩体的经验参数 m_b、s、α。将式(5)及 $D=0$ 代入式(1)中，可得到基于波速测试的采动岩体新广义 Hoek-Brown 经验强度准则参数 m_b、s、α 表达式：

$$m_b = m_i\exp[(9V_p - 87\,500)/2\,800] \tag{6}$$

$$s = \exp[(9V_p - 87\,500)/9\,000] \tag{7}$$

$$\alpha = 1/2 + [e^{-(9V_p+12\,500)/1\,500} - e^{-20/3}]/6 \tag{8}$$

根据据式(6)—式(8)绘制经验参数 m_b、s、α 与纵波波速 V_p之间关系曲线，如图 2 所示。

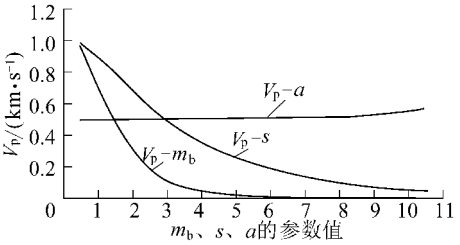

图 2　经验参数 m_b、s、α 与 V_p之间关系曲线

2.3　采动岩体力学参数

1)采动裂隙岩体力学测试。采空区建(构)筑物工程建设之前，必须对下部采空塌陷区进行工程勘察，主要查明地下采空区塌陷密实程度、采动岩体三带发育特征、剩余空洞体积等。工程勘察采用钻探与物探相结合的方法。为了确定采动岩体的力学参数，据此开展单孔或跨孔波速测试工作，获得不同层位采动岩体纵波波速 V_p；对不同层位、不同埋深 H 的钻孔岩心进行物理力学试验，主要测试重度 γ、岩块纵波波速 V_{cp}、岩块单轴抗压强度 σ_c等。

2)采动岩体力学参数确定。令 $\sigma_3=0$，可得到岩体抗压强度 σ_{cm}为

$$\sigma_{cm} = \sigma_c s^{\alpha} \tag{9}$$

当 $\sigma_1=\sigma_3$，且与岩体抗拉强度 σ_{tm}相等时，可得

$$\sigma_{tm} = -s\sigma_c/m_b \tag{10}$$

2002 年 E. Hoek 对岩体变形模量 E_{tm}估算公式进行修正得[12]

$$E_{tm} = (1 - D/2)\sqrt{\sigma_{ci}/100} \times 10^{[(GSI-10)/40]} \quad (\sigma_{ci} \leqslant 100\ \text{MPa}) \tag{11}$$

$$E_{tm} = (1 - D/2) \times 10^{[(GSI-10)/40]} \quad (\sigma_{ci} > 100\ \text{MPa}) \tag{12}$$

式中，σ_{ci}为某个完整岩石试件的单轴抗压强度。

将式(5)分别代入式(11)、式(12)可得：

$$E_{tm}=\sigma_{ci} \times 10^{[9(V_p-3\,500)/40\,000-3/20]} \quad (\sigma_{ci} \leqslant 100\ \text{MPa})$$

$$E_{tm} = 10^{[9(V_p-3\,500)/40\,000-3/20]} \quad (\sigma_{ci} > 100\ \text{MPa})$$

目前大多数岩土工程软件都是依据 Mohr-Coulomb 强度准则编写的，岩体抗剪强度是通过黏聚力

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

c 和内摩擦角 φ 表征。2002 年 E. Hoek 提出了岩体黏聚力 c 和岩体内摩擦角 φ 的计算式,见文献[13]。

3　工程应用

1)工程概况。试验地点位于西南山区,总体属中低山斜坡、槽谷地貌,海拔+1 518—+1 640 m。试验位于大弯子背斜南西翼,背斜轴向北西-南东,向南东倾伏,岩层产状 190°~250°∠20°~55°,场地内无大断裂,出露地层为二叠系上统龙潭组($P_3$1)的泥岩、泥质砂岩、粉砂岩、煤层及第四系(Q_4)洪冲积物。5 号、6 号和 17 号煤层为可采,每层厚度 1.0~1.8 m,层间距 10~15 m,埋深 130~210 m,采用长壁采煤法开采,全部垮落式顶板管理方法。

2)采动岩体测试。采用纵波波速测试的方法,对 4 个采空区勘察钻孔进行了测试,并对煤(岩)块进行了纵波波速测试。根据表 1 对 CKQ4-1 钻孔纵波波速测试成果进行分级(层)解释,并对采动岩体进行了工程分类。由矿井地质条件可知煤层开采覆岩三带发育高度,其中垮落带发育高度为 10~13 m,裂隙带发育高度为 36~55 m。CKQ4-1 钻孔波速测试结果见表 2,采动岩体结构具有较好的空间分异特征,岩体纵波能够反映出采动岩体的结构特征;此外,岩体结构与三带发育高度具有较好的一致性。

表 2　CKQ4-1 钻孔波速测试结果

埋深/m	岩层	岩体结构	三带发育	纵波波速/(m·s^{-1})		完整性指数
				岩块	岩体	
6.4	杂填土	—	弯曲下沉带	—	—	—
11.3	粉砂岩	层状	弯曲下沉带	3 890	3 501	0.81
26.8	泥岩	层状	弯曲下沉带	3 140	2 809	0.80
32.6	泥质砂岩	块状	裂缝带	3 500	2 548	0.53
45.7	中砂岩	碎裂	裂缝带	4 160	2 279	0.30
60.1	泥岩	碎裂	裂缝带	3 140	1 632	0.27
69.8	细砂岩	散体	垮落带	3 920	392	0.01
71.3	5 号煤层	散体	垮落带	1 950	632	0.11
81.2	泥岩	散体	垮落带	3 140	1 003	0.10
82.7	6 号煤层	散体	垮落带	1 950	647	0.11
96.7	中砂岩	散体	垮落带	4 160	1 348	0.11
98.1	17 号煤层	散体	垮落带	1 950	585	0.09

注:煤层均已采。

3)采动岩体力学参数。基于式(9)至式(12),以采动岩体埋深 H、岩块单轴抗压强度 σ_c 及采动岩体纵波波速 V_p 为计算参数,计算出采动岩体的力学参数见表 3。

表 3　采动岩体力学参数

序号	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	变形模量/GPa	内摩擦角/(°)	黏聚力/MPa
1	—	—	—	—	—
2	2.792	0.027	3.027	54.88	0.123
3	0.905	0.006	1.292	40.19	0.096
4	2.110	0.013	1.771	44.77	0.148
5	3.175	0.017	1.947	44.92	0.205
6	0.638	0.003	0.673	29.83	0.121
7	0.429	0.001	0.399	24.97	0.102
8	0.410	0.001	0.372	24.37	0.009
9	0.537	0.002	0.486	25.73	0.126
10	0.412	0.001	0.374	23.47	0.110
11	2.529	0.009	1.202	36.13	0.262
12	0.404	0.001	0.363	22.21	0.120

4)结果分析。由表 3 可知:①弯曲下沉带岩体力学参数。该岩体呈较完整的层状结构,受采动影响轻微,其岩体参数与原岩参数相同。计算结果与完整岩块进行对比,抗压强度为岩块抗压强度的 14.4%~15.3%,抗拉强度为岩块抗拉强度的 1.4%~1.7%,变形模量为岩块变形模量的 74.7%~100.0%,内摩擦角为岩块内摩擦角的 120%~148%,黏聚力为岩块黏聚力的 0.3%。②裂隙带岩体力学参数。该岩体被采动破裂面切割为块裂层状结构,受采动影响显著,其岩体参数与原岩相比劣化程度明显。计算结果与完整岩块进行对比,抗压强度为岩块抗压强度的 10.2%~12.6%,抗拉强度为岩块抗拉强度的 0.6%~0.7%,变形模量为岩块变形模量的 38.8%~64.7%,内摩擦角为岩块内摩擦角的 89.2%~123.0%,黏聚力为岩块黏聚力的 0.4%~0.5%。③垮落带岩体力学参数。该岩体呈散体或碎裂结构,采动作用下岩体完全破碎。计算结果与完整岩块进行对比,抗压强度为岩块抗压强度的 2.2%~9.4%,抗拉强度为岩块抗拉强度的 0.1%~0.5%,变形模量为岩块变形模量的 23.9%~46.7%,内摩擦角为岩块内摩擦角的 67.0%~95.1%,黏聚力为岩块黏聚力的 0~0.7%。

结合文献[15]对采动岩体正、反验模拟分析结论与上述分析结果,认为采动岩体与同层位岩块的力学性质具有一定的规律性:采动岩体抗压强度约为岩块的 1/10;抗拉强度一般不考虑(可取 0);变

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

形模量变化较大,约为岩块的 0.25~1.00(采动岩体越破碎,变形模量劣化程度越明显);由于黏聚力近似为 0,因此,弯曲下沉带的内摩擦角有一定程度的增加,裂隙带将逐步降低到岩块的 3/5,垮落带将有所提高。

4 结　　论

1)依据传统岩体结构理论,结合采矿活动对覆岩的破坏扰动特征,提出"采动岩体结构"概念及采动岩体工程分类标准,拓宽了岩体结构理论的应用范围。

2)通过对前人研究工作的总结,建立了岩体纵波波速与地质质量指标 *GSI* 的关系,推导了基于纵波波速的 Hoke-Brown 准则中关键参数(m_b、s、α 及 D 值)计算式,实现采动岩体力学性质的定量评价。

3)以贵州黔桂天能焦化有限责任公司 130 万 t/a循环经济型煤焦化扩建工程采空区建(构)筑物地基勘察为例,对采动岩体进行工程分类,划分岩体结构类型,以纵波波速为主要输入条件,获得了不同层位采动岩体的力学参数。总结了一般条件下采动岩体力学参数与同层位岩块力学参数的关系,为采空区建(构)筑地基变形计算提供技术保障。

参考文献:

[1] 缪协兴.采动岩体流变与控制技术[J].力学与实践,2001,23(3):7-11.

[2] 邓喀中,谭志祥,张宏贞,等.长壁老采空区残余沉降计算方法研究[J].煤炭学报,2012,37(10):1601-1605.

[3] 王国艳,于广明,于永江,等.采动岩体裂隙分维演化规律分析[J].采矿与安全工程学报,2012,29(6):859-862.

[4] 张永波,靳钟铭,刘秀应.采动岩体裂隙分形相关规律的实验研究[J].岩石力学与工程学报,2004,23(20):3426-3429.

[5] 张玉军,张华兴,陈佩佩.覆岩及采动岩体裂隙场分布特征的可视化探测[J].煤炭学报,2008,33(11):1216-1219.

[6] 童立元,邱　钰,刘松玉等.高速公路与下伏煤矿采空区相互作用规律探讨[J].岩石力学与工程学报,2010,29(11):2271-2276.

[7] 王生俊,贾学民,韩文峰,等.高速公路下伏采空区剩余沉降量 FLAC^{3D}计算方法[J].岩石力学与工程学报,2005,24(19):3545-3550.

[8] 李新强,高延法,张庆松.开采沉陷动态数值仿真研究[J].岩石力学与工程学报,2004,23(4):86-90.

[9] 王树仁,张海清,慎乃齐,等.下伏采空区桥隧工程变形及受力响应特征分析[J].岩石力学与工程学报,2009,28(6):1144-1151.

[10] 汪吉林,吴圣林,丁陈建,等.复杂地貌多煤层采空区的稳定性评价[J].煤炭学报,2009,34(4),467-470.

[11] 李晓红,靳晓光,卢义玉,等.西山坪隧道穿煤及采空区围岩变形特性与数值模拟研究[J].岩石力学与工程学报,2002,21(5):667-670.

[12] Hoek E,Carranza-Torres C,Corkum B.Hock-Brown Failure Criterin-2002 Edition[C]//Proceedings of the North American Rock Mechanics Symposium.Toronto:[s.n.],2002:267-273.

[13] 宋建波,张倬元,于远忠,等.岩体经验强度准则及其在地质工程中的应用[M].北京:地质出版社,2002.

[14] 刘小平.贵州黔桂天能焦化有限责任公司 130 万吨/年循环经济型煤焦化扩建工程采空区工程地质勘察报告(详勘)[R].西安:中国煤炭科工集团西安研究院,2011.

[15] 郭广礼.老采空区上方建筑地基稳定性及处理措施研究[D].徐州:中国矿业大学,1999.

(上接第 145 页)

参考文献:

[1] 郭志超,丁庆军,田　焜.盾构隧道新型水玻璃注浆材料的研究[J].施工技术,2008,37(10):25.

[2] 申文萍,马芹永,李伏虎.粉煤灰膨胀剂对喷射混凝土力学性能影响试验[J].煤炭科学技术,2012,40(4):42-44.

[3] 王海军,申见红.水泥—水玻璃双液浆在井矿堵水施工中的应用[J].山西建筑,2009,35(10):111-112.

[4] 郭振兴,李　刚,赵　帅,等.新阳煤矿矸石粉煤灰充填开采技术[J].煤炭科学技术,2013,41(S1):43-45.

[5] 杨建利,杜美利,白　彬,等.粉煤灰制备聚硅酸铝铁絮凝剂及对煤泥水的处理[J].煤炭科学技术,2013,41(7):123-125.

[6] 张旭芝,符飞跃,王星华.软流塑淤泥质地层劈裂注浆加固试验研究[J].地下空间,2003,23(4):405-406.

[7] 赵成江,徐　恕,金增芳.注浆法在公路饱和黄土隧道塌陷区的应用[J].筑路机械与施工机械化,2008,25(12):70-71.

[8] 李国胜,刘炯天,曹亦俊,等.粉煤灰中难浮未燃炭的柱式浮选脱除试验研究[J].煤炭学报,2013,38(2):308-313.

[9] 赵洪水,宋大各,李　菁.水玻璃对水泥—粉煤灰浆液注浆性能的影响试验研究[J].科技创新导报,2012(22):21-22.

[10] 王清秋.煤矿采空区水泥粉煤灰充填材料试验研究[J].西部探矿工程,2012(8):114-117.

[11] 邹友平,张华兴,张刚艳,等.粉煤灰水泥注浆材料主要性能试验研究[J].煤矿开采,2012,17(4):15-16.

[12] 张义顺,吴　杰,郭乾坤,等.钢渣双液注浆材料的研究[J].河南理工大学学报,2011,30(6):347-349.

[13] 冯国瑞,任亚峰,张绪言,等.塔山矿充填开采的粉煤灰活性激发实验研究[J].煤炭学报,2011,36(5):732-737.

[14] 张明亮.粉煤灰对煤矸石酸性重金属淋滤液的修复作用[J].煤炭学报,2011,36(4):654-658.

[15] 宋雪飞,袁东锋,高岗荣,等.水泥-粉煤灰-水玻璃速凝浆液配比优化设计探讨[J].河南理工大学学报,2011,30(S1):235-236.

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net