

青年博士学术专栏

煤矿采空区充填高浓度胶结材料流变特性试验研究

朱世彬, 王晓东, 许刚刚, 武博强, 袁克阔

(中国煤炭科工集团西安研究院有限公司, 陕西 西安 710000)

摘要:为保证高浓度胶结材料顺利输送到采空区,并控制其堆积效果,选取水泥和粉煤灰为胶结材料,风积砂为骨料,对不同胶结材料配比下高浓度充填浆液流变特性的影响规律进行研究。结果表明:浆液浓度 82%,胶骨比 1:5 时,浆液的剪切应力、黏度和触变性随粉煤灰占比增大而减小。浆液浓度 82%,胶结材料中水泥和粉煤灰比 1:3 时,浆液的剪切应力和黏度均较小,触变性随浆体中骨料占比的减小而减小。胶骨比 1:3,胶结材料中水泥和粉煤灰比 1:3 时,浆液的剪切应力、黏度和触变性随浆体浓度减小而减小。流动性好且触变性小的浆液材料有利于高浓度充填浆液泵送,即所选浆液需浓度和胶骨比相对较小,粉煤灰含量相对较大,此时浆液的剪切应力和黏度均较小,浆液的流动性较好,触变性较差。

关键词:采空区充填;高浓度胶结材料;流变特性;采空区治理

中图分类号:TD823 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-2336(2017)11-0069-05

Experimental study on rheological properties of high concentration cementing materials in coal mine goaf filling

ZHU Shibin, WANG Xiaodong, XU Ganggang, WU Boqiang, YUAN Kekuo

(Xi'an Research Institute, China Coal Technology & Engineering Group Corp, Xi'an 710000, China)

Abstract: In order to ensure the smooth transportation of high concentration filling slurry and the effect of accumulation in goaf, this paper makes a preliminary study of the effects of cement and fly ash as cementitious materials and aeolian sand as aggregates on the rheological properties of high concentration filling slurry under a series of samples with different gelling materials ratio. Test results show that, when the concentration and proportion of cemented material and aggregate are constant, the shear stress, viscosity and thixotropy of the slurry decrease with the proportion of fly ash increases. When the concentration and the content of cement and fly ash in the cementitious material are constant, the shear stress, viscosity and thixotropy of the slurry decrease with the proportion of aggregate decreases. When the proportion of cemented material and aggregate and the content of cement and fly ash in the cementitious material are constant, the shear stress, viscosity and thixotropy of the slurry decrease with the concentration of slurry decreases. Good fluidity and good thixotropy of the slurry material is conducive to slurry pumping. That is, the concentration of selected slurry and the proportion of cemented material and aggregate should be relatively small, and fly ash content in slurry should be relatively large. At this point, shear stress and viscosity of the slurry are small. The fluidity of the slurry is better, and thixotropy of the slurry is poor.

Key words: goaf lack filling; high concentration cementing materials; rheological properties; goaf treatment

0 引言

我国煤矿资源丰富,作为我国优势资源和主要

能源结构^[1-2],20世纪70年代,煤炭开采监管与控制混乱,民采、群采猖獗,一度出现见矿就挖的局面^[3],煤矿井下矿体千疮百孔,采空区分布杂乱无

收稿日期:2017-09-02;责任编辑:赵 瑞 DOI:10.13199/j.cnki.cst.2017.11.012

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51404295);陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2016JM5056;2015JQ5185);中国煤炭科工集团西安研究院有限公司科技创新基金资助项目(2017XAYZD04)

作者简介:朱世彬(1987—),女,安徽五河人,助理研究员,博士。Tel:029-85576504,E-mail:zhushibin@cctegxian.com

引用格式:朱世彬,王晓东,许刚刚,等.煤矿采空区充填高浓度胶结材料流变特性试验研究[J].煤炭科学技术,2017,45(11):69-73,100.

ZHU Shibin, WANG Xiaodong, XU Ganggang, et al. Experimental study on rheological properties of high concentration cementing materials in coal mine goaf filling[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(11): 69-73, 100.

章,采空区上部地表稳定性极差,时常发生冒落现象^[4]。随着监管力度加强和采煤技术水平的提升,采煤方法变成房柱法^[5-6]、全面法和留矿法等空场类方法,当采空区未及时处理,某个矿柱风化破坏,荷载分布重新排布,触发多米诺骨牌效应,采空区顶板将突然失稳破坏,其破坏规模巨大,安全问题更加凸显^[7-8]。随着现代化进程加快,对煤矿资源的需求越来越大,采空区也日渐变大,采空区引起的环境地质问题突出,如地表塌陷、冲击地压、水土流失、道路开裂、房屋倒塌等,给生产生活带来极大的安全隐患^[9]。

通常采空区是煤矿开采后遗留下来的空洞区,主要分为垮落带、导水裂隙带和弯曲带。目前,关于采空区治理手段主要有^[10-11]:①采用注浆充填、水力充填和风力充填等对采空区进行全部充填,进而支撑覆岩;②注浆柱、井下砌墩柱对采空区覆岩进行局部支撑,减小采空区空间跨度,防止顶板垮落;③对覆压断裂带和弯曲带岩土体离层和裂缝进行注浆加固,强化采空区围岩结构;④老采空区强制放顶,加速老采空区覆岩沉降。当前向采空区内部进行注浆充填已成为治理采空区的主要技术手段,即利用采集到的或者经过加工的细砂作为骨料,加入一定量的胶结材料,加水,混合搅拌均匀,再通过钻孔等通道输送至采空区位置,浆体进入采空区脱去多余的水分,形成充填体,支撑采空区顶板,进而防止地表冒落或减少地表变形。

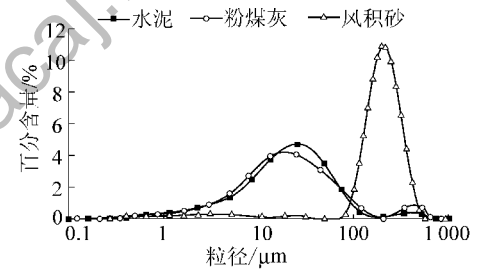
目前,采空区充填多为浓度较稀的注浆全充填方式,但随着城市化、工业化、现代化进程的快速推进,工业民用建筑和公路铁路等生命线工程不可避免地穿越采空区时,煤矿采空区上覆土地需要激活^[12],采空区治理后的地表稳定性和变形问题凸显,采空区治理技术亟需更新并完善。为实现采空区治理后结构的稳定和经费的节约,一些学者提出采用高浓度充填治理技术^[13-14],即向水泥浆液中掺加费用较低的其他材料,制备高浓度浆液,减少水泥用量,降低充填成本,利用高浓度浆液中含砂率高、浓度高、流动、可塑等特点,控制浆液在采空区的堆积形态充填治理采空区。高浓度浆体与一般稀浆不同,其具有黏度大、屈服力强、输送阻力大的特点,泵送过程较为复杂,因此,高浓度胶结材料充填技术对浆液流动堆积控制要求较高。然而目前不同胶结材料对比对高浓度充填浆液的流动堆积规律的影响尚不明确。故笔者利用美国 RST-CC 浆式流变仪,

以水泥、粉煤灰为胶结材料,以砂为骨料,研究不同浓度不同胶结材料配比条件下,高浓度充填浆液的流变性能,为高浓度浆液充填治理采空区过程中浆液输送和充填工艺提供理论依据。

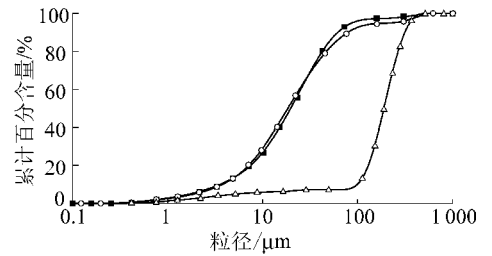
1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验材料中水泥为 PO425 普通硅酸盐水泥,粉煤灰为中联电厂所产的一级粉煤灰,风积砂为陕西省榆林市榆阳区天然风积砂,其颗粒级配曲线如图 1 所示。由图 1 可见,水泥和粉煤灰的颗粒大小和分布规律相近,水泥和粉煤灰颗粒直径多分布在 1~70 μm ,其中含量最多的粒径均在 20 μm 左右;而风积砂颗粒直径多分布在 100~250 μm ,其含量最多的颗粒粒径在 200 μm 左右。明显风积砂的颗粒级配明显优于水泥和粉煤灰,风积砂颗粒分布更均匀,且其颗粒粒径较粉煤灰和水泥大近 10 倍,可以起到胶结材料中骨架支撑作用。



(a) 某粒径对应百分含量



(a) 小于某粒径百分含量

图 1 试验材料颗粒级配曲线

Fig. 1 Particle gradation curves of test materials

1.2 试样方法

试验制备前将风积砂风干,作为骨料。PO425 水泥和一级粉煤灰作为胶结材料。本试验所涉及的胶骨比为胶结材料和骨料的质量比。根据骨料中砂的质量确定胶结材料的总质量,根据胶结材料中水泥粉煤灰配比,依次确定水泥和粉煤灰质量。本试验所涉及的浓度指所有风干固体质量与掺水后所得浆料的质量的比值。设置参数如下:高浓度充填浆

液浓度为82%、84%和86%,胶骨比1:3、1:4和1:5,水泥粉煤灰比1:0、3:1、1:1、1:3。用砂浆搅拌机将浆液搅拌均匀,立即倒入流变仪的装样装置中。

流变特性试验采用美国RST-CC桨式流变仪。通过RHEO3000软件设置,采用稳态剪切,设计剪切速率由0线性增加至 40 s^{-1} ,再线形减小至0,测试时间为120 s,实时监测并输出剪切应力随剪切速率变化关系。

1.3 试验原理

RST流变仪通过一个带光编码器的高精密动态驱动系统确定转子绝对位置,控制剪切率或者剪切应力,测量施加在测量元件上的转矩、预先设定剪切应力、测量元件的角偏转或剪切变形等。流变特性测试一般满足Bingham模型,具体公式如下:

$$\tau = \tau_0 + \mu_p \gamma \quad (1)$$

式中: τ 为剪切应力,Pa; τ_0 为动态屈服应力,Pa; μ_p 为表观黏度,Pa·s; γ 为剪切速率, s^{-1} 。

2 试验结果及分析

2.1 胶结材料配比对流变特性影响

质量浓度为82%,胶骨比为1:5不同水泥粉煤灰比浆体剪切应力曲线如图2所示。

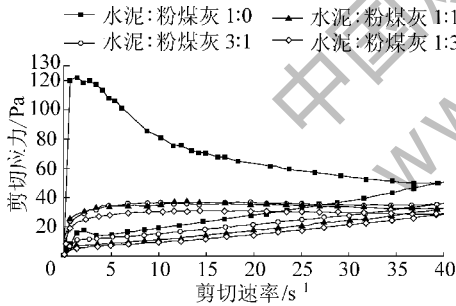


图2 质量浓度为82%,胶骨比为1:5不同水泥粉煤灰比浆体剪切应力曲线

Fig. 2 Shear stress curves of different cement-fly ash ratio under mass concentration of 82% and the cemented material and aggregate proportion of 1:5 in slurry

由图2可知,质量浓度为82%,胶骨比为1:5时,不同水泥粉煤灰配比条件下,高浓度充填浆液的剪切速率与剪应力在剪切速度 $2\sim 40\text{ s}^{-1}$ 均服从宾汉模型关系,且无论在剪切速率增加阶段,还是在剪切速率减小阶段,同一剪切速率下随着粉煤灰参加比例的增加,所需剪切应力减小。在剪切速度 $0\sim 40\text{ s}^{-1}$ 的递增过程和 $40\sim 0\text{ s}^{-1}$ 的递减过程,图2曲线均出现一个应力滞后环,或叫触变环,即流动剪切速率

增加时浆液内部结构破坏速率大于结构重建,剪切应力和表观黏度降低;而当剪切作用减弱时结构的重建速率大于结构破坏,剪应力及黏度又逐渐恢复,但由于恢复需要一定的时间,即存在滞后性,因此剪切速率上升时对应的剪切应力均大于下降时的剪切应力。触变环面积大小可以判断材料触变性的强弱^[15],胶结材料中粉煤灰所占比例越小,应力滞后环面积越大,触变性越大。

质量浓度为82%,胶骨比为1:5时,不同水泥粉煤灰配比条件下,高浓度充填浆液的黏度随着剪切速率的增加急剧降低,最终趋于平稳,如图3所示。同一剪切速率下,浆液的表观黏度随着粉煤灰参加比例的增加而降低。

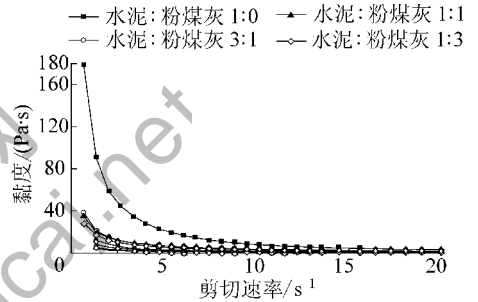


图3 质量浓度为82%,胶骨比为1:5不同水泥粉煤灰比浆体黏度曲线

Fig. 3 Viscosity curves of different cement-fly ash ratio under mass concentration of 82% and cemented material and aggregate proportion of 1:5 in slurry

这是因为,水泥、粉煤灰和砂的形态效应直接影响高浓度充填浆液的流变性质。水泥和粉煤灰混合后,粉煤灰充填于水泥颗粒之间,使之“解絮”扩散,改善了和易性。本试验所用粉煤灰为一级粉煤灰,其颗粒多为珠状颗粒,在高浓度充填浆液中可起到滚珠作用,降低浆液内部的内摩擦力,提高流动性。同时,试验中的粉煤灰的需水量小于水泥,因而可提高浆液流动性。另外,水泥和粉煤灰的密度相差很大,一般普通硅酸盐水泥的密度为 $3.0\sim 3.15\text{ t/m}^3$,而粉煤灰的松散干密度在 $0.6\sim 1.0\text{ t/m}^3$ 范围内,其压实密度为 $1.3\sim 1.6\text{ t/m}^3$,水泥和粉煤灰占胶结材料中的质量比变化后,水泥和粉煤灰的堆积体积变化更加显著,高浓度充填浆液胶结材料中粉煤灰体积大幅增加,进而提高了对砂骨料的润滑作用,提高浆液的流动性,降低浆液的黏度。

2.2 胶骨比对流变特性影响

质量浓度为82%,水泥粉煤灰比为1:3不同胶骨比浆体剪切应力曲线如图4所示。由图4可知,

质量浓度为82%,水泥粉煤灰比为1:3,不同胶骨比下的浆液剪切应力均较小,几乎均小于35 Pa,浆液的流动性均较好。这是因为胶结材料中占支配地位的粉煤灰起到了滚珠作用,降低了浆液内部的内摩擦力,提高了浆液的流动性能。在剪切速度 $0\sim 40\text{ s}^{-1}$ 的递增过程和 $40\sim 0\text{ s}^{-1}$ 的递减过程,曲线均出现一个触变环,固体骨料所占比例越大,应力滞后环面积越大,触变性越大。这是由于砂骨料的密度和粒径远大于胶结材料的密度和粒径,胶骨比越大,高浓度充填浆液中细颗粒和超细颗粒含量越小,虽然所需的破坏表面电场作用形成的絮团状或网状结构的剪切力减少,但砂骨料的黏聚力大幅增加,浆液内部结构强度增加,因此,固体骨料所占比例越大,浆液触变性越大。

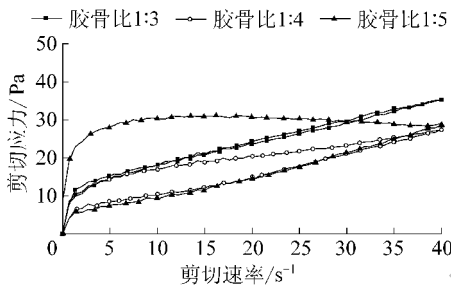


图4 质量浓度为82%,水泥粉煤灰比为1:3不同胶骨比浆体剪切应力曲线

Fig. 4 Shear stress curves of different cemented material and aggregate proportion under mass concentration of 82% and cement-fly ash ratio of 1:3 in slurry

质量浓度为82%,水泥粉煤灰比为1:3不同胶骨比浆体黏度曲线如图5所示,由图5可知,质量浓度为82%,水泥粉煤灰比1:3时,浆液的表观黏度均较低,几乎均小于 $30\text{ Pa}\cdot\text{s}$,且随着剪切速率的增加急剧降低,在剪切速率为 $15\sim 40\text{ s}^{-1}$ 趋于平稳。这

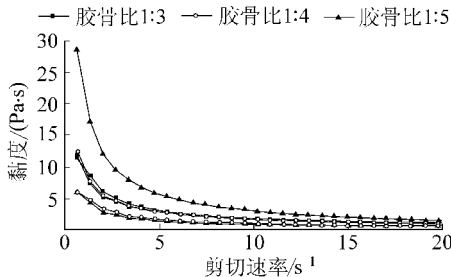


图5 质量浓度为82%,水泥粉煤灰比为1:3时不同胶骨比浆体黏度曲线

Fig. 5 Viscosity curves of different cemented material and aggregate proportion under mass concentration of 82% and cement-fly ash ratio of 1:3 in slurry

是因为浆液从静止向动态转变过程要同时克服自身惯性和分子间的摩擦阻力,胶结材料中粉煤灰的大比例掺入降低了浆液内部内摩擦力,因此,浆液的表观黏度均较低,且初始黏度值最大,随后急速降低,直至平稳。与图4相对应,图5中的剪切速率-表观黏度曲线也均出现了一个触变环,固体骨料所占比例越大,应力滞后环面积越大,触变性越大。

2.3 浆液浓度对流变特性影响

胶骨比1:3,水泥粉煤灰比为1:3下不同浓度的浆体剪切应力曲线如图6所示,由图6可见,胶骨比1:3,水泥粉煤灰比为1:3,剪切速率一定时,剪切应力随着浆液浓度的增加而增大。剪切速度 $0\sim 40\text{ s}^{-1}$ 的递增过程和 $40\sim 0\text{ s}^{-1}$ 的递减过程,浆液浓度82%的剪切速率-剪切应力曲线几乎重合,几乎无触变性,而浆液浓度84%和86%的剪切速率-剪切应力曲线均出现触变环,且浆体的浓度越大,应力滞后环面积越大,触变性越大。

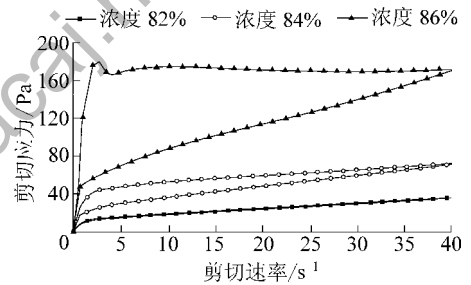


图6 胶骨比1:3,水泥粉煤灰比为1:3下不同浓度的浆体剪切应力曲线

Fig. 6 Shear stress curves of different mass concentration under cemented material and aggregate proportion of 1:3 and cement-fly ash ratio of 1:3 in slurry

胶骨比1:3,水泥粉煤灰比为1:3不同浓度浆体黏度曲线如图7所示。

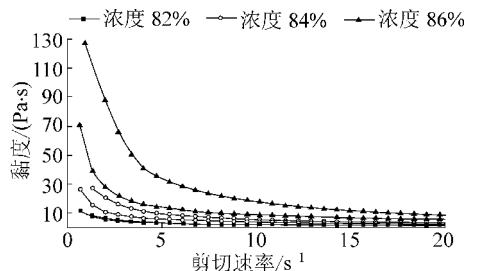


图7 胶骨比1:3,水泥粉煤灰比为1:3下不同浓度的浆体黏度曲线

Fig. 7 Viscosity curve of different mass concentration under cemented material and aggregate proportion of 1:3 and cement-fly ash ratio of 1:3 in slurry

由图7可知,胶骨比1:3,水泥粉煤灰比为1:3,不同浓度的充填浆液的黏度随着剪切速率的增加急剧降低,随后趋于平稳,且浓度越小趋于平稳时对应的黏度越小。同一剪切速率下,浆液的表观黏度随着浆液浓度的增加而增大。这是由于高浓度充填浆液浓度越大,含水率越小,浆液中包裹颗粒的水化膜越薄^[16],所需抗剪强度越大,达到相同剪切速率所需的剪切应力越大,黏度越大。同样,图7中浆液浓度82%剪切速率增加和剪切速率下降阶段的剪切速率-表观黏度曲线几乎重合,浆液浓度84%和86%的剪切速率-表观黏度曲线也均出现触变环,浆液浓度越大,应力滞后环面积越大,触变性越大。

3 高浓度充填浆液可泵性分析

高浓度充填浆液的可泵性取决于泵压作用下高浓度充填浆液的流变特性,即浆液剪切应力和浆液黏度。当剪切应力和黏度均较小时,浆液的流动性较好;剪切应力和黏度均适中时,浆液的可塑性较好;剪切应力和黏度均较大时,浆液的稳定性较好。由试验结果可见,浓度和胶骨比一定时,粉煤灰占比越大,浆液的流动性越好;浆液浓度和胶结材料中水泥和粉煤灰含量一定时,胶骨比越小,浆液的流动性越好;胶骨比和胶结材料中水泥和粉煤灰含量一定时,浓度越小,浆液的流动性越好。

浆液触变性是影响泵送过程的主要因素之一。浆液触变性大,则浆液在泵送突然中止到再次启动过程,需要消耗更大的泵送压力来克服浆液静止过程中已形成的胶凝絮状结构;反之,浆液在泵送突然中止到再次启动过程所需的泵送压力将大幅减小。由试验结果可见,浓度和胶骨比一定时,粉煤灰占比越大,浆液的触变性越小;浆液浓度和胶结材料中水泥和粉煤灰含量一定时,胶骨比越小,浆液的触变性越小;胶骨比和胶结材料中水泥和粉煤灰含量一定时,浓度越小,浆液的触变性越小。

4 结 论

1)浆液浓度82%,胶骨比1:5时,浆液的剪切应力、黏度和触变性随粉煤灰占比增大而减小。

2)浆液浓度82%,胶结材料中水泥和粉煤灰比1:3时,浆液的剪切应力和黏度均较小,其中,剪切应力几乎均小于35Pa,黏度几乎均小于30 Pa·s。触变性随浆体中骨料占比的减小而减小。

3)胶骨比1:3,胶结材料中水泥和粉煤灰比1:3时,浆液的剪切应力、黏度和触变性随浆体浓度减小而减小。

4)高浓度充填浆液泵送时需要流动性好且触变性小的浆液材料,即浆液浓度和胶骨比相对较小,粉煤灰含量相对较大时,浆液的剪切应力和黏度均较小,浆液的流动性较好,触变性较差。

参考文献 (References):

- [1] 江泽民.对中国能源问题的思考[J].上海交通大学学报,2008,42(3):345-359.
JIANG Zemin.Reflections on energy issues in China[J].Journal of Shanghai Jiaotong University,2008,42(3):345-359.
- [2] 滕吉文,张雪梅,杨 辉.中国主体能源:煤炭的第二深度空间勘探、开发和高效利用[J].地球物理学进展,2008,23(4):972-992.
TENG Jiwen,ZHANG Xuemei,YANG Hui.Exploration and exploitation in second deep space of crust interior and high efficient utilization of the major energy: coal resource in China[J].Progress in Geophysics,2008,23(4):972-992.
- [3] 王绍光.煤矿安全生产监管:中国治理模式的转变[J].比较,2004(13):122-123.
WANG Shaoguang.Safety supervision of coal mine: transformation of China's governance model [J].Comparative Studies,2004(13):122-123.
- [4] 赵铁林,解兴智.浅埋坚硬顶煤冒落结构及合理放煤工艺分析[J].煤炭科学技术,2016,44(S1):10-13.
ZHAO Tielin,XIE Xingzhi.Analysis on hard top-coal blocks caving structure with shallow bury and reasonable caving technology [J].Coal Science and Technology,2016,44(S1):10-13.
- [5] 于 健,王永申.房柱式采煤法采空区危害及其对策[J].水力采煤与管道运输,2009(2):18-19.
YU Jian,WANG Yongshen.Harm and countermeasures of goaf after room-and-pillar mining [J].Hydraulic Coal Mining & Pipeline Transportation,2009(2):18-19.
- [6] 王东升.房柱式和巷柱式采煤方法顶板冒落规律的探讨[J].矿业安全与环保,2003,30(S1):182-183.
WANG Dongsheng.Discussion on the law of roof fall on coal-pillar after room-and-pillar mining and roadway coal mining [J].Mining Safety and Environmental Protection,2003,30(S1):182-183.
- [7] 付武斌,邓喀中,张立亚.房柱式采空区煤柱稳定性分析[J].煤矿安全,2011,42(1):136-139.
FU Wubin,DENG Kazhong,ZHANG Liya.Stability analysis of coal-pillar after room-and-pillar mining [J].Coal Mine Safety,2011,42(1):136-139.
- [8] 刘义新.房柱式采空区遗留煤柱稳定性综合评价研究[J].煤矿开采,2013,18(3):78-80.

(下转第100页)

- 柱留设研究[J].煤炭工程,2016,48(6):8-11.
- FENG Limin, TANG Shijie, CAO Xuchu. Study on safety coal and rock pillar design for 11020 mining face in Zhaogu No.2 coal mine [J]. Coal Engineering, 2016, 48(6): 8-11.
- [14] 许延春,曹旭初,李江华,等.赵固一矿基岩风化带阻隔水特征试验研究[J].煤炭科学技术,2016,44(1):178-182.
- XU Yanchun, CAO Xuchu, LI Jianghua, *et al.* Experiment study on water resistance and isolation features of base rock weathering zone in Zhaogu No.1 Mine [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(1): 178-182.
- [15] 贾明魁,赵固一矿高压水工作面底板突水性评价[J].煤炭科学技术,2011,39(11):18-22.
- JIA Mingkui. Evaluation on high pressurized water inrush occurred from floor of coal mining face in Zhaogu No.1 mine [J]. Coal Science and Technology, 2011, 39(11): 18-22.
- [16] 钱鸣高,石平五.矿山压力与岩层控制[M].徐州:中国矿业大学出版社,2003.
- [17] 黄庆享.厚沙土层在顶板关键层上的载荷传递因子研究[J].岩土工程学报,2005,27(6):672-676.
- HUANG Qingxiang. Studies on load-transmitting factor of thick sandy soil layer on key roof stratum in shallow seam mining [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(6): 672-676.
- [18] 黄庆享,蔚保宁,张文忠.浅埋煤层黏土隔水层下行裂隙弥合研究[J].采矿与安全工程学报,2010,27(1):35-39.
- HUANG Qingxiang, WEI Baoning, ZHANG Wenzhong. Study of downward crack closing of clay aquiclude in shallowly buried coal seam [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2010, 27(1): 35-39.
- [19] 许延春,李江华,李卫民,等.赵固二矿露头区砂砾含水层下安全煤岩柱留设研究[J].煤矿开采,2014,19(3):47-50.
- XU Yanchun, LI Jianghua, LI Weimin, *et al.* Safety coal and rock pillar design for mining under gravel aquifer in outcrop area of Zhaogu 2nd mine [J]. Coal Mining Technology, 2014, 19(3): 47-50.
- [20] 普罗托基雅可诺夫 M M.地下结构的计算与设计[M].北京:高等教育出版社,1957.

(上接第73页)

- LIU Yixin. Comprehensive evaluation of stability of residual coal-pillar after room-and-pillar mining [J]. Coal mining Technology, 2013, 18(3): 78-80.
- [9] 张耀平.矿山空区诱发的岩移特征及覆盖层冒落效应研究[D].长沙:中南大学,2010.
- [10] 丁党鹏.煤矿采空区覆岩稳定性评价及治理方案研究;以神木县沙沟岭煤矿采空区为例[D].西安:长安大学,2010.
- [11] 童立元,刘松玉,邱钰,等.高速公路下伏采空区问题国内外研究现状及进展[J].岩石力学与工程学报,2004,23(7):1198-1202.
- TONG Liyuan, LIU Songyu, QIU Yu, *et al.* Current research state of problems associated with mined-out regions under expressway and future development [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(7): 1198-1202.
- [12] 王正帅,邓喀中.老采空区地表残余变形分析与建筑地基稳定性评价[J].煤炭科学技术,2015,43(10):133-137,102.
- WANG Zhengshuai, DENG Kazhong. Analysis of surface residual deformation and stability evaluation of buildings foundation in old goaf [J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(10): 133-137, 102.
- [13] 邓喀中,谭志祥,张宏贞.长壁开采老采空区带状注浆设计方法[J].煤炭学报,2008,33(2):153-156.
- DENG Kazhong, TAN Zhixiang, ZHANG Hongzhen. Design method of strip grouting for old long wall mining goaf [J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(2): 153-156.
- [14] 钱鸣高,缪协兴,许家林.资源与环境协调(绿色)开采[J].煤炭学报,2007,32(1):1-7.
- QIAN Minggao, MIAO Xiexing, XU Jialin. Green mining of coal resources harmonizing with environment [J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(1): 1-7.
- [15] BARNES H A. Thixotropy—a review [J]. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 1997, 70(1): 1-33.
- [16] WONG H H C, KWAN A K H. Rheology of cement paste: role of excess water to solid surface area ratio [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2008, 20(2): 189-197.