

采场覆岩应力及垮高的柱宽效应三维相似模拟研究

张向阳, 谢广祥

(安徽理工大学能源与安全学院 煤矿安全高效开采省部级共建教育部重点实验室, 安徽 淮南 232001)

[摘 要] 基于采场应力分布的动态性特点, 以谢桥矿 1151 (3) 综放工作面地质和开采条件为背景, 采用实验室相似材料模拟方法, 研究不同煤柱宽度条件下采场覆岩应力分布和垮落特征。研究表明, 不同煤柱宽度上覆岩层应力分布及垮落高度有所不同。随煤柱宽度的增大, 倾向方向工作面前方应力峰值区由原来的煤体上方逐渐向煤柱上方转移, 且峰值逐渐增大, 工作面后方煤柱承载上覆岩层主要荷载和压力, 且随煤柱宽度增大应力峰值也增大。工作面上覆岩层垮落形成由高应力束组成的应力壳, 应力壳对上覆岩体的荷载和压力起主要支撑和传递作用, 随着煤柱宽度的增大, 应力壳的高度逐渐减小, 在煤柱及煤体内形成的壳基也逐渐发生变化和转移, 壳基在煤柱内从无到有, 壳基的应力集中程度也逐渐增强, 煤柱内单位体积的岩块承载的荷载和压力也从小到大, 再由大变小。

[关键词] 采场覆岩; 应力分布; 垮落高度; 煤柱宽度; 相似模拟

[中图分类号] TD323 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1006-6225 (2010) 03-0014-04

3D Analog Simulation of Pillar Width Effect of Stress and Caving Height of Overlying Strata

ZHANG Xiang-yang XIE Guang-xiang

(Key Laboratory for Safety & High-efficiency Mining of Education Ministry

Energy & Safety School Anhui University of Science & Technology Huainan 232001, China)

Abstract Based on dynamic characteristic of stress distribution of mining field and geological and mining conditions of 1151 (3) Full-mechanized Caving Mining Face in Xieqiao Colliery, this paper applied analog simulation to researching stress distribution and caving characteristics of overlying strata under different pillar widths. Results showed that stress distribution and caving height were different for different pillar widths. With pillar width increased, stress peak zone of mining face migrated from above coal body to above pillar and stress peak increased gradually. Pillar behind mining face bear the main load of overlying strata and its pressure peak increased with pillar width increased. Overlying strata caving formed stress shell grouped by high stress bundles. Stress shell played a role of bearing load of overlying strata and transferring pressure. With pillar width increased, height of stress shell gradually decreased and shell basement which formed in coal pillar and coal body changed and migrated. Stress shell basement formed in pillar and stress concentration degree gradually strengthened. Loading and pressure in unit volumetric coal was from small to large, then from large to small.

Key words overlying strata of mining field; stress distribution; caving height; pillar width; analog simulation

近年来, 学者具体研究分析了采高对工作面及围岩应力壳的影响规律、开采速率和煤柱宽度对综放工作面围岩应力分布规律和变形破坏的影响及综放采场围岩支撑压力分布及动力灾害的层厚效应等^[1-6]。对煤柱宽度的研究主要是煤柱内应力分布、变形破坏及自身稳定性方面的研究^[7-10]。影响采场结构的煤柱宽度参数及煤柱的受力状态、破坏失稳规律同样对上覆岩层应力变化及破坏起着决定性的作用^[11], 而对存在于工作面上覆岩层的宏观应力场变化特征与煤柱宽度的相互作用关系研究

相对较少。本文主要运用实验室三维相似模拟研究煤柱宽度变化引起的采场上覆岩层应力分布规律及垮落特征。

1 矿井地质条件

本次相似模拟试验是依据谢桥矿 1151 (3) 综放面地质概况为工程背景。谢桥矿 1151 (3) 综放面为该矿东一 C 组采区东翼五阶段, 地面标高为 20.4~25.8m, 工作面标高 -588~-662m, 平均煤厚为 5.4m, 煤层倾角 12~15°, 平均 13°。该面

[收稿日期] 2010-02-28

[基金项目] “十一五”国家科技支撑计划资助项目 (2006BAK03B06); 中国矿业大学煤炭资源与安全开采国家重点实验室开放基金资助项目 (08KF03); 安徽理工大学青年科学研究基金项目 (QN200803); 安徽省高等学校优秀青年人才基金资助项目 (2010SQRL044ZD)。

[作者简介] 张向阳 (1980-), 男, 河南睢县人, 助教, 在读博士, 从事矿山压力与控制及煤矿动力灾害方面的教学和研究工作。

煤层结构稳定，但普遍发育二层炭质泥岩或泥岩夹矸。开采煤层基本顶为粉、细砂岩，厚度约为 6.2m；直接顶为泥岩或砂质泥岩和 13—2 煤，厚度约为 3.26m；直接底为泥岩，厚度约为 1.5m；老底为粉砂岩，厚度约为 2.8m。

2 模型设计

试验模拟相同地质条件下在煤厚（5.4m）一定时，不同煤柱宽度情况下的工作面覆岩应力分布及垮落特征。根据煤柱宽度（3m、5m、7m、10m、15m 和 20m）不同，共设计 6 个模型。

2.1 模型基本条件

(1) 模型边界 考虑三维试验台的实际尺寸，本次试验的 6 个模型中，工作面走向推进长度均为 60m，倾向根据煤柱宽度的不同，下工作面长度均为 50m，上工作面分别为 47m、45m、43m、40m、35m 和 30m。工作面切眼和终采线距模型边界均为 20m 的距离。

(2) 相似条件 依据相似原则，模型几何相似比为 $C_l = 1/100$ ；取密度相似比为 $C_\gamma = 1/1.67$ ；应力相似比 $C_\sigma = C_\gamma C_l = 1/1.67 \times 1/100 = 1/167$ ；时间相似比 $C_t = \sqrt{C_l} = 1/10$ ，为了模拟时间的方便，取时间相似比为 $C_t = 1/12$ ；外力相似比 $C_F = C_\gamma C_l^3 = 1/1.67 \times (1/100)^3 = 0.6 \times 10^{-6}$ 。模型先从左至右开采上工作面，再从左至右开采下工作面，推进速度为 60mm/2h，相当于实际一天推进 6m。

2.2 测点布置及加载测试系统

试验主要监测工作面推进过程中煤柱和上覆岩层应力分布变化特点。因此，在上工作面底板布置 6 个应力测点，煤柱内布置 8 个测点，煤层及覆岩共布置 6 层 118 个测点，形成立体分布状态。具体测点位置如图 1 及图 2 所示。

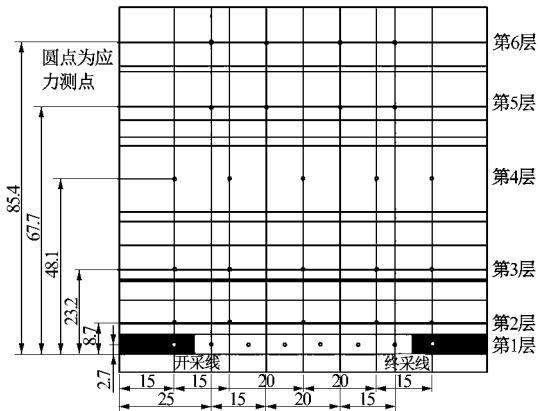


图 1 模型剖面应力测点布置

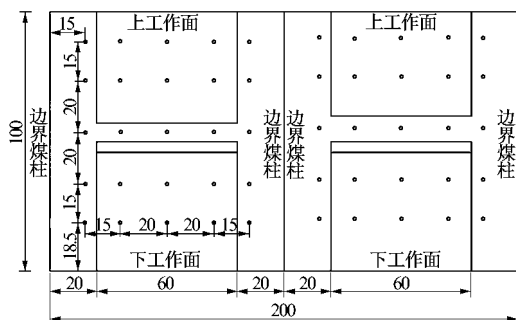


图 2 模型内部应力测点布置

根据煤层采出后覆岩垮落及裂隙发育高度经验数据，设计模型高度为 1000mm，对于模型上未能模拟的上覆岩层重量，需要用加载的方法来模拟，经计算整个模型共需要补偿的载荷为 $P_m = q_{m1}BL + q_{m2}L = 69.024\text{kN}$ 。液压加载装置由一个液压泵站连接 6 个液压千斤顶，并均匀分布在模型岩层上方，提供上覆岩层的压力。

煤岩体、煤柱应力采用 BX120—50AA 电阻应变计测试，应变计数据信息测试使用 YE2539 高速静态应变测试数据采集处理系统。

3 模拟结果分析

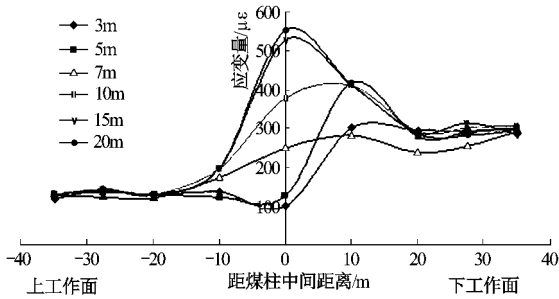
3.1 工作面覆岩应力分布特征

通过对采集到的数据整理分析，可以得到上、下工作面推进过程中，不同煤柱宽度的围岩应力场变化特点。

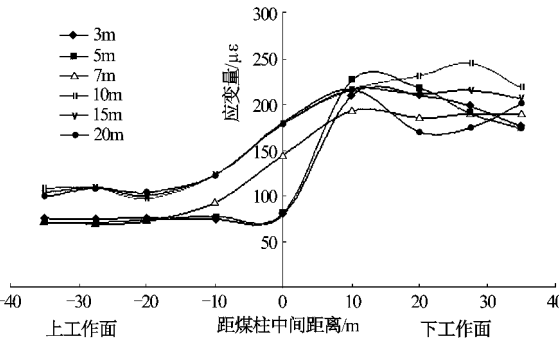
3.1.1 下工作面推进中不同位置，上覆岩层不同层位倾向垂直应力分布特点

(1) 工作面前方 10m 由图 3 可知，距离煤层底板不同距离，随着煤柱宽度的增大，覆岩应力在倾斜方向分布特点有明显差别。距离煤层底板 23.2m 覆岩应力分布存在应力峰值区，且随煤柱宽度增大峰值区从下工作面的煤体上方逐渐向煤柱上方转移，峰值也逐渐增大，表现为 3m、5m 煤柱应力集中区主要分布在下工作面煤体及直接顶板中；7m、10m 煤柱应力集中区逐渐向煤柱上方转移，由煤柱和下工作面煤体共同承担上覆岩层荷载；15m、20m 宽度煤柱，应力集中区几乎全部在煤柱上，由煤柱主要承担上覆岩层荷载；随着离煤层底板距离增大，覆岩应力峰值区逐渐缓和，且位置由下工作面上方向煤柱上方转移。

(2) 工作面后方 35m 由图 4 可知，距离煤层底板不同距离，随着煤柱宽度的增大，工作面后方 35m 上覆岩层应力在倾斜方向分布也有明显不

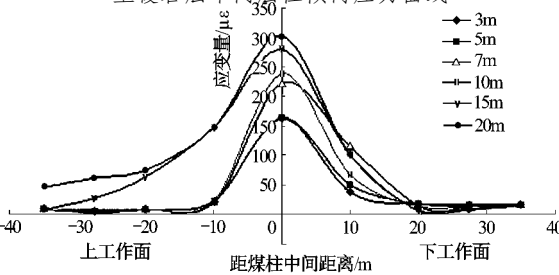


(a) 距煤层底板 23.2m

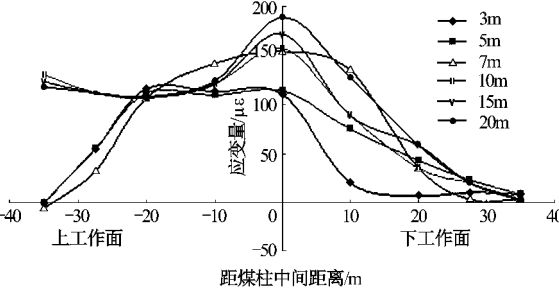


(b) 距煤层底板 48.1m

图 3 下工作面推进过程中, 前方 10m 上覆岩层不同层位倾向应力曲线



(a) 距煤层底板 23.2m



(b) 距煤层底板 48.1m

图 4 下工作面推进过程中, 后方 35m 上覆岩层不同层位倾向应力曲线

同。距离煤层底板 23.2m 覆岩应力分布存在应力峰值区比较明显, 且随煤柱宽度增大峰值也逐渐增大, 随着距离煤层底板距离增大, 覆岩应力峰值区在煤柱上方并逐渐趋于缓和。

3.1.2 上、下工作面回采后, 不同高度覆岩走向垂直应力分布特点

(1) 上工作面覆岩沿走向应力分布变化规律
随着煤柱宽度的增大, 距煤层底板不同高度的上工作面覆岩垂直应力逐渐发生变化, 在煤柱宽度较小 (3m, 5m, 7m) 时, 工作面走向中部煤层底板上方 8.7~48.1m 范围内, 应力很低, 且煤柱宽度不同, 不同层位低应力区范围也不同, 表现为煤柱宽度小, 低压区范围大, 煤柱宽度大, 低压区范围小; 当煤柱宽度为 10m, 15m 时, 工作面煤层底板上方 8.7~23.2m 范围内, 应力很低, 而煤层底板上方 48.1m 处覆岩应力略有升高, 当煤柱宽度为 20m 时, 上覆岩层距煤层底板 8.7m 范围内全部垮落, 23.2m 范围内出现裂隙但未垮落, 有一定的承载能力。

(2) 下工作面覆岩沿走向应力分布变化规律
距离下工作面煤层底板 23.2m 范围内的上覆岩层处于应力降低区。随着煤柱宽度增大, 在煤壁前方的应力峰值逐渐降低。距下工作面采空区煤层底板 35m 范围内上覆岩层中部已垮落, 处于应力降低区。随着煤柱宽度的增大, 在采空区上方、煤壁前方及切眼上方距煤层底板 48.1m 的上覆岩层应力较高; 距离煤层底板 67.7m 的上覆岩层走向中部 10~15m 范围之间应力较高。

综上可知, 不同煤柱宽度表现为壳顶范围的大小不同, 随着煤柱宽度增大, 采空区上方岩层形成的应力壳的高度逐渐减小, 表现为在同一高度的上覆岩层壳顶处应力升高区范围随煤柱宽度增大而逐渐减小。

3.2 不同煤柱宽度情况下, 上覆岩层垮落特征

根据不同煤柱宽度情况下模型开采后上、下工作面上覆岩层垮落及移动变形情况, 如图 5、图 6 所示。进行观察实测得出不同煤柱宽度情况下, 上覆岩层垮落高度的曲线如图 7 所示。由图可知, 随着煤柱宽度的增大, 在上工作面和下工作面的上覆岩层垮落高度逐渐减小, 随着煤层的开采形成的宏观应力壳高度逐渐减小。上工作面上覆岩层垮落高度表现为 3m, 5m 煤柱时, 上覆岩层垮落高度相当; 7m, 10m 煤柱情况下垮落高度相当, 15m, 20m 煤柱情况下垮落高度相当。

3m, 5m 煤柱宽度时, 下工作面上方岩层垮落高度为采高的 10 倍左右; 煤柱宽度从 7m 增大到 20m 时, 上覆岩层垮落高度逐渐减小。

综上分析可知, 工作面上覆岩层垮落形成由高应力束组成的应力壳, 随着煤柱宽度的增大, 应力壳高度逐渐减小, 在煤柱内及上方形成的壳基也逐渐发生变化和转移, 壳基在煤柱内从无到有, 应力

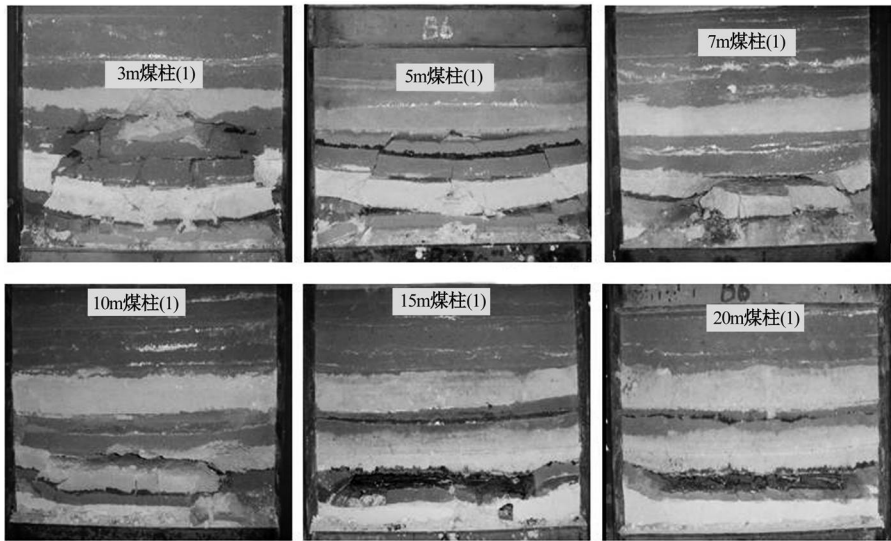


图 5 不同煤柱宽度情况下，上工作面顶板垮落移动变形情况

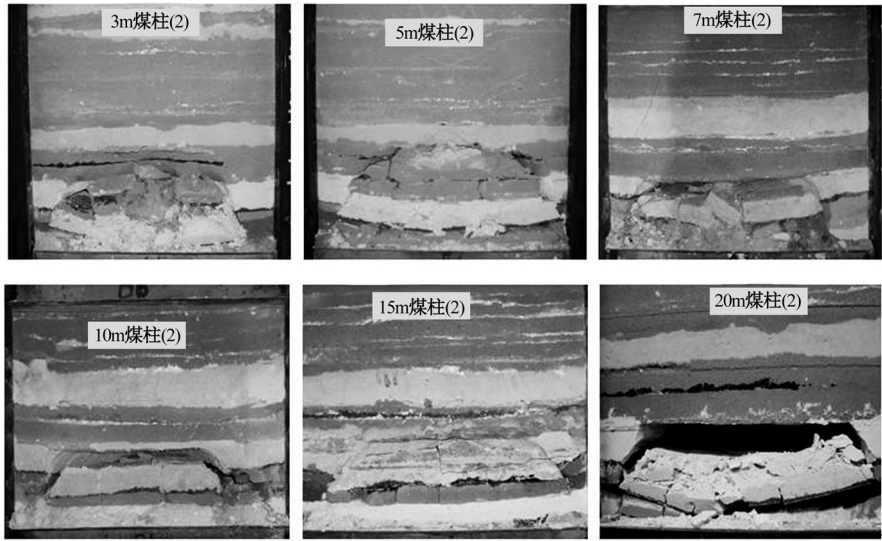


图 6 不同煤柱宽度情况下，下工作面顶板垮落移动变形情况

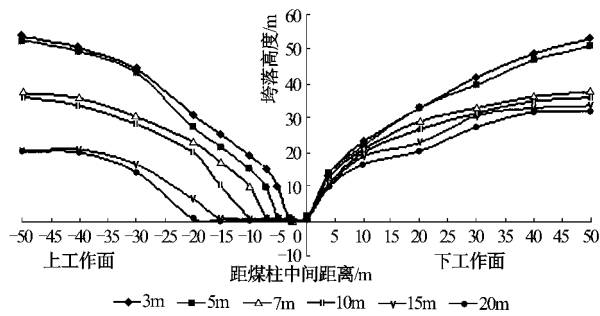


图 7 不同煤柱宽度，上覆岩层垮落高度曲线

集中程度也逐渐增强，煤柱内单位体积的荷载也从小到大，再由大变小。

4 结论

- (1) 下工作面开采过程中，工作面前后煤柱上覆岩层的承载体发生了转移，由煤体逐渐转移到煤柱承担，煤柱自身强度和尺寸的大小决定煤柱上覆岩层应力集中程度及范围的大小。
 - (2) 随煤柱宽度增大，应力集中区由下工作面煤体与直接顶板逐渐向煤柱上方转移，上覆岩层荷载由下工作面煤体承担，演变为下工作面煤体和煤柱共同承担，直到煤柱主要承担上覆岩层荷载。
 - (3) 工作面上覆岩层垮落形成由高应力束组成的应力拱，应力拱对上覆岩体的荷载和压力起主要支撑和传递作用，随着煤柱宽度的增大，应力拱
- (下转 114 页)

表 2 井工开采工作面及采区采出率要求

赋存条件			工作面采 采区采	
煤层厚度 /m	煤层倾角 / (°)	顶底板分级	出率 %	出率 %
h≤1.5	α≤35	I、II	≥97	≥90
		III、IV	≥95	≥88
	α>35	I、II	≥94	≥87
		III、IV	≥92	≥85
1.5m<h≤4	α≤35	I、II	≥92	≥85
		III、IV	≥90	≥83
	α>35	I、II	≥89	≥82
		III、IV	≥87	≥80
h>4	α≤35	I、II	≥87	≥80
		III、IV	≥85	≥78
	α>35	I、II	≥84	≥77
		III、IV	≥82	≥75

表 3 井工开采矿井采出率要求

赋存条件				矿井采出率 %
煤层厚度 /m	煤层倾角 / (°)	顶底板分级	地质构造分析	
h≤1.5	α≤35	I、II	简单构造、中等构造	≥85
			复杂、极复杂构造	≥80
		III、IV	简单构造、中等构造	≥83
			复杂、极复杂构造	≥78
	α>35	I、II	简单构造、中等构造	≥82
			复杂、极复杂构造	≥77
1.5<h≤4	α≤35	III、IV	简单构造、中等构造	≥80
			复杂、极复杂构造	≥75
		I、II	简单构造、中等构造	≥80
			复杂、极复杂构造	≥75
	α>35	III、IV	简单构造、中等构造	≥78
			复杂、极复杂构造	≥73
h>4	α≤35	I、II	简单构造、中等构造	≥76
			复杂、极复杂构造	≥71
		III、IV	简单构造、中等构造	≥75
			复杂、极复杂构造	≥70
	α>35	I、II	简单构造、中等构造	≥75
			复杂、极复杂构造	≥70
	α≤35	III、IV	简单构造、中等构造	≥73
			复杂、极复杂构造	≥68
		I、II	简单构造、中等构造	≥72
			复杂、极复杂构造	≥67
	α>35	III、IV	简单构造、中等构造	≥70
			复杂、极复杂构造	≥65

4 结论

(1) 在煤炭开采过程中，各环节都会产生煤炭损失，降低煤炭资源采出率。因此，只有在详细考查各种煤炭损失的基础上，才能正确分析煤炭采出率的影响因素。

(2) 煤炭企业内部影响煤炭采出率因素分为 3 类：煤层赋存及地质因素、采煤方法的因素、管理

因素。其中，煤层赋存及地质条件是核心影响因素，应据其制定更为具体的煤炭采出率标准。

[参考文献]

[1] 中国煤炭工业年鉴编辑部·中国煤炭工业年鉴 2007 [M]·北京：煤炭工业出版社，2008。
[2] 崔民选·2007 中国能源发展报告 [M]·北京：社会科学文献出版社，2007。
[3] 徐永圻·采矿学 [M]·徐州：中国矿业大学出版社，2003。
[4] 成家钰·煤矿作业规程编制指南 [M]·北京：煤炭工业出版社，2005。
[5] GB50215—2005，煤炭工业矿井设计规范 [S]。
[6] 煤炭工业部·矿井地质规程 [M]·北京：煤炭工业出版社，1984。
[7] 煤炭工业部·生产矿井储量管理规程 [M]·北京：煤炭工业出版社，1983。
[8] 煤炭工业部·生产矿井煤炭资源回采率暂行管理办法 [S]·1998。
[9] 汪云甲·关于矿产资源开发管理中几个问题的研究 [J]·自然资源学报，1998，13 (2)。

[责任编辑：施红霞]

(上接 17 页)
的高度逐渐发生变化和转移，煤柱内单位体积的荷载也从小到大，再由大变小。

[参考文献]

[1] 谢广祥·综放面及其围岩宏观应力壳力学特征研究 [J]·煤炭学报，2005，30 (3)：309—313。
[2] 谢广祥，杨科，刘全明·综放面倾向煤柱支承压力分布规律研究 [J]·岩石力学与工程学报，2006，25 (3)。
[3] 谢广祥，杨科，常聚才·煤柱宽度对综放面围岩应力分布规律影响 [J]·北京科技大学学报，2006，28 (11)。
[4] 谢广祥·采高对工作面及围岩应力壳的力学特征影响 [J]·煤炭学报，2006，31 (1)：6—10。
[5] 谢广祥，常聚才，华心祝·开采速度对综放面围岩力学特征影响研究 [J]·岩土工程学报，2007，29 (7)：963—967。
[6] 谢广祥，杨科，常聚才，等·综放采场围岩支承压力分布及动力灾害的层厚效应 [J]·煤炭学报，2006，31 (6)。
[7] 王连国，缪协兴·煤柱失稳的突变学特征研究 [J]·中国矿业大学学报，2007，36 (1)：7—11。
[8] 王金安，韦文兵，冯锦艳·综放沿空异形煤柱留巷系统力学场演化规律 [J]·北京科技大学学报，2006，28 (4)。
[9] 王永秀，齐庆新，陈兵，等·煤柱应力分布规律的数值模拟分析 [J]·煤炭科学技术，2004，32 (10)：59—62。
[10] 刘爱国，苗田，王云方，等·综放工作面回采巷道煤柱应力分析与参数优化 [J]·煤炭科学技术，2002，30 (1)。
[11] 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。

[责任编辑：李宏艳]