

岩石的风化损伤属性与缩小防护煤柱 开采机制研究

宣以琼^{1,2}, 武强¹, 杨本水^{2,3}

(1. 中国矿业大学(北京校区) 资源与安全工程学院, 北京 100083; 2. 安徽建筑工业学院 土木工程系, 安徽 合肥 230022;
3. 安徽理工大学 资源开发与管理工程系, 安徽 淮南 232001)

摘要: 以大量试验数据、现场测试资料和大规模缩小防护煤柱开采工程实践为依据, 研究隐伏煤田基岩风化带的分布特点。结果表明: 岩石风化损伤后具有强度降低, 塑变能力增强; 多趋泥化, 裂隙易于弥合, 再生隔水能力显著增强, 亲水能力强等变异特征以及工程地质特性。重点论述风化带内煤层开采具有移动快、变形大、回缩快和下沉大等覆岩破坏移动演化新特征, 获得以泥质岩类为主的风化带岩层受开采扰动的影 响, 具有阻隔底水下渗和抑制导水裂隙带继续发展的双重作用和煤岩柱厚度与风化程度是影响导水裂隙带发育高度的主导因素等新的认识。同时, 阐述了缩小防护煤柱开采的机制, 系统地提出了采空区滞后控水、煤水分流、加大开采高度、物探预测和地质弱面预先加固等一系列确保安全的关键技术保障措施。对类似矿井浅部资源的回收与安全开采具有理论意义和应用价值。

关键词: 岩石力学; 风化损伤; 覆岩破坏; 演化特征; 资源回收

中图分类号: TD 823.8; TD 163

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2005)11-1911-06

STUDY ON THE WEATHERED DAMAGE ATTRIBUTES OF ROCK AND THE LAW OF REDUCTION FOR COAL COLUMN PROTECTION

XUAN Yi-qiong^{1,2}, WU Qiang¹, YANG Ben-shui^{2,3}

(1. School of Resources and Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China;
2. Department of Civil Engineering, Anhui Institute of Architecture and Industry, Hefei 230022, China;
3. Department of Resources Exploration and Management Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: Based on a large number of experimental data, in-situ observations and mining engineering practice on a large-scale reduction for coal column protection in weathered zone, the distributed characteristics of the weathered zone of bedrock in covered coal field are studied. The weathered rocks have a series of variational characteristics such as the decreased intension, increased plasticity deformation, muddy tendency, easily combined fractures, greatly boosted water resistance, and strong hydrophilicity and so on. The characteristics of engineering geology, which mainly cover the new movement evolution characteristics of overburden damage mining in weathered zone such as fast movement, large deformation, quick contraction and compression, and great subsidence, are studied with some new understandings, such as the rocks in weathered zone mainly composed of

收稿日期: 2004-02-27; **修回日期:** 2004-05-10

基金项目: 教育部重大科研资助项目(2004-295); 安徽省教育厅自然科学基金资助项目(2005kj004, 2005kj007)

作者简介: 宣以琼(1965-), 女, 1986年毕业于安徽理工大学煤田地质与勘探专业, 现为博士研究生、高级工程师, 主要从事工程地质、岩土工程、矿井防治水等方面的教学与研究工作。E-mail: bshyang@aust.edu.cn.

argillaceous rocks that have the dual functions of water blockage and water flowing prevention in fractured zone from development with mining influence. The thickness and the weathered degree of coal column are the main factors affecting the height development of flowing fractured zone and so on. The mining mechanism of reduction for the coal column protection is studied. A series of new measures of key techniques are proposed to guarantee extraction safe for the first time such as lagged controlling water in exhausted workings , distribution of coal and water ,the height increase of extraction ,geophysical prediction ,and pre-reinforcement of geological fractures and so on. It has important theoretical application for the reclamation and safe mining in shallow resources of similar coal mines.

Key words : rock mechanics ; weathered damage ; overburden damage ; evaluation character ; resources recycle

1 引言

传统的采矿理论认为：厚含水松散层下，风氧化带内煤层由于距新地层底部含水层近，受沉积水环境和风化损伤的共同影响，煤层顶板岩层裂隙发育，岩体孔隙率高和强度衰减速度快，自稳性能与承载能力差，难以管理。自开采以后，垮落带和导水裂隙带会波及到底部弱至中等含水层，易发生突水溃砂事故，危及矿井安全生产。因而，国家在制定煤矿安全规程时，将其列为开采的禁区，风化带内煤炭储量均被列为表外储量。据统计黄淮海地区就有约 50 亿 t 煤炭资源被列为表外储量。由于这些资源具有埋藏浅，勘探程度高，生产系统齐全，开采成本低等突出优点，刘天泉院士在河北邢台、山东柴里进行了大量的科学试验，1982 年率先提出了著名的“上三带”理论^[1]。2002 年杨本水提出“泥质风化岩层具有阻隔水和抑制裂高发展双重特性”等观点^[2,3]。随后，部分衰老矿井也小范围、零星地进行了风氧化带内煤层开采的实践，均取得了许多有益的成果和良好的效益^[4-10]。但由于对风氧化带内煤层开采的机制认识不深，也发生过淹井、埋面、埋架、伤人等重大安全事故，给国家和企业造成重大经济损失。因此，开展此方面的研究具有重大的理论意义和现实意义。

2 岩石的风化变异特征与工程地质特性

2.1 全隐伏煤田风化带的分布特点与变异特征

根据皖北矿区百善、任楼、刘桥三矿 600 多个钻孔柱状资料统计表明：风化带垂向分带明显，可分为强风化带、弱风化带和微风化带，其分带依据

及变异特征见表 1。

表 1 皖北矿区基岩风化带分布依据及基本特征
Table 1 Distributed basis and basic characteristics for the weathered zone of bedrock in Wanbei coal fields

类别	颜色	矿物成分	结构	测井曲线	其他
强风化带	砂岩为土黄、褐黄色、棕色等，泥岩为土色、黄褐色、灰绿色等	砂岩、泥岩中均有高岭石、蒙脱石、伊利石，砂岩中有石英	破碎、裂隙发育，但多为铁锰质及其他次生粘土矿物充填	一般 ρ_s 曲线峰值较低， γ 曲线较高，而 μ_z 曲线则平坦，与泥质含量较高有关	层理不清，常有铁锈浸染，冲洗液消耗少，植物碎片发育
弱风化带	砂岩为灰色、灰白色等，泥岩为深灰、黄绿色等	砂岩以石英为主，含少量长石、伊利石等，泥岩以粘土为主	较破碎，风化裂隙充填物少，保存较好。	一般 ρ_s 曲线峰值较高， γ 曲线较低，而 μ_z 曲线出现正负异常	层理常显现，铁锈零星浸染，冲洗液消耗较大，偶见植物碎片
微风化带	灰、灰白色等，与原岩基本相同	基本保持原岩矿物成分，暗色矿物较多	岩石完整，基本保持原先裂隙，略有侵蚀	与正常砂岩测井曲线相同	层理清晰，少见铁锈等浸染物，砂岩中冲洗液消耗量大

2.2 风化损伤岩体的工程地质特性

百善、任楼、刘桥三矿缩小防护煤柱开采实践表明：风化带内的泥岩、砂质泥岩、粉砂岩、中砂岩，在风化营力和底含水侵蚀的共同作用下，岩石的工程地质特性产生了劣化和质变，主要表现为：

(1) 岩石强度降低，塑变能力增强

由弹性岩石，渐变为柔塑性岩石百余组岩石力学试验结果显示，随着岩体风化程度的提高，其抗压强度降幅增大，强风化岩石强度仅为未风化的 6% ~ 50%^[3-5]。岩体的孔隙率和饱和干燥吸水率增大见表 2，其抗变形破坏能力增强，塑性增大，自身承载能力降低。

(2) 岩石多趋泥化，裂隙易于弥合，再生隔水能力显著增强

十余次崩解泥化试验说明，泥岩质风化岩层受水侵蚀后，多迅速崩解、泥化，泥化速率在 30 min

表 2 岩石干燥饱和吸水率

Table 2 Absorption of rock under dry and saturated states

岩石名称	个数 / 个	新鲜		微风化		中等风化		强风化	
		Wg-b / %	个数 / 个	Wg-b / %	个数 / 个	Wg-b / %	个数 / 个	Wg-b / %	个数 / 个
泥岩	32	6~8	3	5~10	5	9~23	11	40~52	13
砂质泥岩	8	5~7	1	10	1	24	3	25~32	3
粉砂岩	3			6~10	1	9~12	1	25	1
细砂岩	11	1~6	1	6	2	9~11	3	23	5
中砂岩	14	3~4	1	6	1	9~11	4	18	8
合计	68	1~8	6	10		22		23~52	30
崩裂类型		不变		开裂		碎裂		泥化	

内由未风化的 0.45% ~ 5.39% 增大到强风化的 58% ~ 77%，采动影响的泥化、崩解速率比未受采动影响的平均提高 3 倍以上，见表 3。

表 3 强风化段泥岩崩解速率

Table 3 Collapsing velocity of mudstone in strong weathered sections

取样钻孔	基岩面下深度/m	崩解速率/%		
		60 s	120 s	180 s
采后 C ₁₃	0.50	12.01	22.63	34.10
	1.00	10.94	21.75	30.18
	1.80	10.18	25.39	38.21
	3.03	17.32	31.96	42.96
	3.80	16.24	28.20	39.32
采前 B ₁₁₆	0.90	4.15	7.73	12.06
	2.80	4.05	9.05	14.41
	3.50	3.71	6.09	3.47
	6.00	1.89	2.81	3.62
	8.40	2.45	5.15	6.90

风化岩层中的粘土矿物特别是长石的泥土化，水份极易进入岩石内部，其膨胀率都在 50% 以上，一旦遭遇底含水层向下溃水，会迅速崩解、泥化，阻碍水渗流，使采动中产生导水裂隙弥合，减弱其储水、导水能力，形成阻碍松散层底含水向下渗透的良好再生隔水屏障。

(3) 粘土矿物成分含量高，亲水能力强

百善矿 43 组和任楼矿 57 组岩矿鉴定和 X 光衍射分析表明：顶板强风化岩层中的中细砂岩和粉砂岩多为泥质胶结，砂岩和泥岩中的粘土矿物蒙脱石、高岭石和伊利石含量大于 65%；风化岩石中的长石

几乎全部高岭土化，见表 4。而蒙脱石又以钠蒙脱石为主，所以，岩层的亲水能力强，软化系数低。

表 4 百善煤矿岩石矿物组分与微观结构特征

Table 4 Mineral compositions and microcosmic-structural characteristics of the rock in Baishan coal mine

编号	岩石类型及位置	矿物组份与含量			
		碎屑矿物		粘土种类	
		矿物种类	含量 / %	矿物种类	含量 / %
1	泥岩(6526 面采空区)	石英	10	蒙脱石 高岭石 伊利石	90
2	泥岩(6813 面顶板)	石英	20	蒙脱石 高岭石 伊利石	80
3	泥岩(6813 面采空区)	石英	15	蒙脱石 高岭石 伊利石	85
4	细砂岩(6526 面顶板)	石英	25	蒙脱石 高岭石 伊利石	75
5	中砂岩(6526 顶板)	石英	30	蒙脱石 高岭石 伊利石	70
6	细砂岩(6813 面顶板)	石英	30	蒙脱石 高岭石 伊利石	70
7	细砂岩(6813 面顶板)	石英	35	蒙脱石 高岭石 伊利石	65

(4) 风干失水后，强度逐渐增高

百善矿 6813, 649 和 6526, 6525 工作面构造部位强风化岩体的测试结果(用点荷载仪和回弹仪共同测定)，如表 5 所示。由此表可看出：随着时间的推移，风化岩体的失水，其强度逐渐提高。因此，风氧化带内开采工作面为便于顶板管理与控制，其待采时间应适当延长。

表 5 风化岩体抗压强度随时间变化特征

Table 5 Variation characteristics of the weathered rock compressive strength vs. time

时间/d	抗压强度/MPa		
	泥岩	粉砂岩	砂岩
1	3.8	3.6	2.2
2	4.2	3.9	3.9
3	6.3	4.7	4.9
4	7.4	6.5	6.6
5	8.3	8.6	8.9
6	8.9	9.2	9.8
7	9.4	10.1	10.6
15	14.9	15.3	16.8
28	16.8	18.7	21.4

3 覆岩破坏移动演化规律与缩小防护煤柱开采的机制

由于防护煤柱缩小,岩体的力学强度显著降低。此时,上覆岩层均属于软弱和极软弱覆岩类型^[6],工作面矿压显现和“两带”(冒落带和导水裂隙带)发育高度与动态演化特征均与岩性相同而未受风化影响时有明显的差异。

3.1 覆岩破坏移动演化规律

(1) 覆岩破坏高度大幅度降低,采动裂隙导水和透砂能力明显减弱

观测结果表明:在覆岩结构、性质等条件类同情况下,缩小防护煤柱开采的风氧化带内工作面的冒高和裂高与顶板岩层未风化的工作面相比,分别减少 65%~67%和 57%~66%;同时垮落裂缝的发育程度和连通、导水性随之减弱,不具透砂、透泥和大量透水能力。百善煤矿在风氧化带内开采的 664, 649 和 6813 工作面其垮落带高度仅为采高的 0.55~0.82 倍。缩小防护煤柱开采后,由于顶板软弱岩层的抗裂能力强,特别是当裂缝带发展到强风化带以上的泥岩和砂质泥岩时,由于其抗裂能力更强,裂缝不易产生,如表 6 所示。

表 6 观测工作面冒落带、导水裂隙带发展高度实测值
Table 6 Measured results of height development downfallen zone and water-conducted fissure zone in burst working face

工作面	采厚 /m	煤岩柱厚度 /m	实测冒落带高度		实测导水裂隙带高度	
			高度/m	冒采比	高度/m	裂采比
6527	2.5	12.6	2.43	0.98	10.22	4.09
	2.5	12.6	2.64	1.06	11.39	4.56
6515	2.5	12.6	2.62	1.05	10.89	4.36
	2.8	34.2	7.78	2.78	14.24	5.09
662	3.0	34.2	8.15	2.72	16.47	5.49
	2.6	34.2	6.09	2.34	11.19	4.30
663	3.0	23.6	2.42	0.81	12.35	4.12
	3.1	23.6	8.80	2.84	14.64	4.72
649	3.0	23.6	4.80	1.60	11.66	3.89
	3.1	17.3	1.87	0.60	9.12	2.94
6813	3.0	17.3	1.66	0.55	10.75	3.46
6813	3.0	17.7	3.11	1.00	14.06	4.69
	3.0	17.7	3.24	1.08	13.49	4.49

注:(1) 冒采比为冒落带高度与采厚的比值;(2) 裂采比为导水裂隙带高度与采厚的比值。

(2) 上覆岩层移动速度快,变形量大,回缩压密快,地表下沉量大

实测资料表明:缩小防护煤柱开采的工作面,上覆岩层破坏移动速度极快,变形量较大,下沉大,如图 1 所示。采后被压密、弥合也快,且冒落带内岩层块度较小,岩层与岩层之间的开裂程度大幅度降低,连通性较差。“两带”高度观测钻孔的冲洗液消耗量,并非都是连片的漏失段,也并非呈现由下而上漏水量由大到小的递减趋势。有时是连片漏水段,也有许多不连续段;有时是下段漏水量大,上段小的正常状态,也有反之。

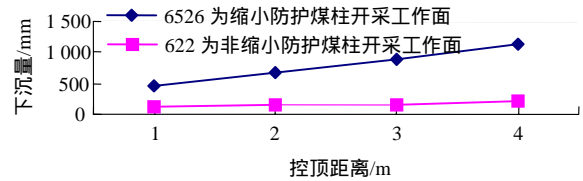


图 1 观测工作面顶板下沉动态曲线

Fig.1 Dynamic subsidence curves of the strata in observed working faces

(3) 煤岩柱厚度与风化程度是影响导水裂隙带发育高度的主要因素

由表 6 和观测资料可知:影响导水裂隙带发育高度的最主要因素是煤岩柱厚度,即煤岩柱高度越小,垮落带和导水裂隙带高度发育越低;同时,与风化程度也有密切关系,强风化岩层,垮落带和导水裂隙带高度发育较小。

3.2 缩小防护煤柱开采的机制

主采煤层之上 20 m 左右高度范围内,泥岩、砂质泥岩、粉砂岩和泥质胶结的砂岩,一般占 80% 以上,坚硬、较坚硬砂岩总厚度较小,单层厚度一般不超过 2~4 m。在此条件下,在基岩风氧化带开采时,因风化岩层岩石强度普遍降低,塑性普遍增强,抑制岩层破坏向上发展,使冒落裂缝高度大大降低;风化岩层受水浸迅速崩解、膨胀泥化,原生和采动裂隙易破压密、弥合,使渗透水性减弱,隔水能力大大增强,并在强风化段形成良好的阻隔水屏障。

概括地说,在煤层上覆岩层以泥质类岩层为主的情况下,基岩风氧化带岩层,强度降低,塑性增强,易于崩解、泥化,经开采扰动并二次胶结后,具有抑制冒落裂缝向上发展和阻隔水的双重作用,从而使留设小尺寸防砂、防塌煤柱,进入风氧化带开采的工作面,实现无溃水和大量涌水的安全回采,成为可能。这就是缩小防护煤柱安全开采的机制。

4 缩小防护煤柱开采的技术保障措施

采取必要的技术保障措施, 切实防止顶板岩层非均衡破坏、局部抽冒和向采场大量泄水是非常必要的。

4.1 采空区滞后控水

在设计试采工作面时, 先采条件简单的弱风化带内煤层, 后采条件复杂的强风化带煤层, 先采煤岩柱厚的工作面, 后采煤岩柱薄的工作面(即实行上行式开采)。利用开采沉陷影响范围, 采用采空区滞后控水, 控水开采期间各工作面采空区涌水变化见图 2, 3。由图可知, 煤岩柱高度为 18.6 m 时, 涌水量为 24.7 m³/h; 而煤岩柱高度为 11.6 m 时, 涌水量却为 15.2 m³/h, 表明采用采空区滞后控水取得了满意的效果。

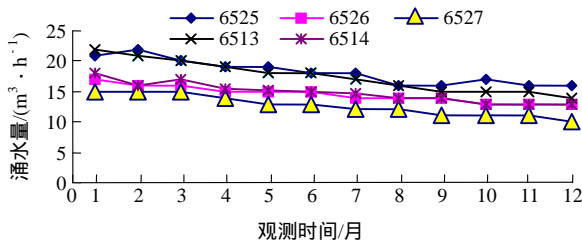


图 2 65 采区采空区控水各工作面涌水量动态变化曲线

Fig.2 Dynamic variation curves of gush for each working face of controlling in water 65 working section

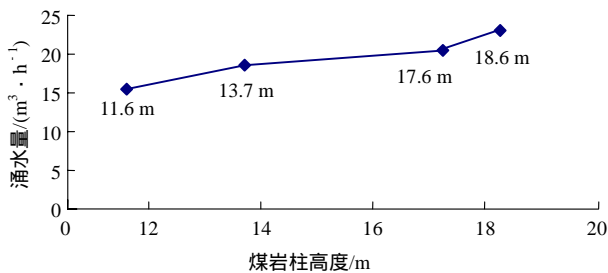


图 3 65 采区煤岩柱高度与采区涌水量关系动态变化曲线

Fig.3 Dynamic variation curve of the relation between the height of coal column and the water inflow in 65 working section

4.2 煤水分流

将机巷布置在上, 风巷布置在下, 实行煤水分流的方法, 加快推进速度, 这也是试验研究的主要特征之一。

4.3 采用“护-让”结合, 加大困难部位开采厚度

根据风氧化带内煤层顶板变异特征(无老顶, 无承载能力)和顶板变形移动演化规律(下沉大、变形

大且快), 优化分析后, 决定提高工作面支护设备的性能, 选用强初撑, 高阻力的支架, 从而加大开采高度综采工作面开采高度控制在 2.8 m, 炮采工作面开采高度控制在 2.5 m, 突破现有规程规范控制采高的限制。

4.4 物探预测, 地质弱面预先加固

在工作面形成以后, 采用无线电坑透仪进行 CT 透视, 发现地质弱面的部位, 如图 4 所示。采用预先注浆加固, 或预先备足加固抢险材料, 防止局部冒顶, 发生突水溃砂事故。

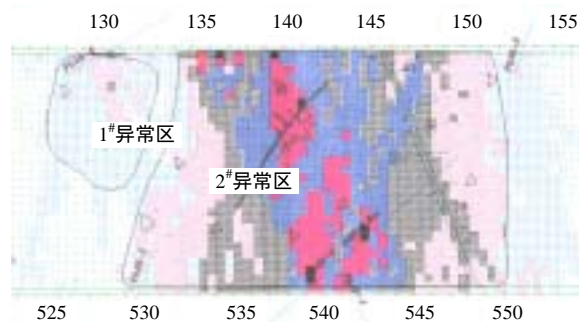


图 4 工作面地质弱面物探预测图

Fig.4 Geophysical predicted diagram of the geological fractures in the working face

5 结 语

(1) 三矿在接受新生界沉积前, 煤系基岩经历了漫长的风化、剥蚀作用, 且风化作用强、范围广、深度大, 被保护的风化层具有明显的垂向上分带性、平面上延续性及不均匀性 3 个特点;

(2) 岩石风化损伤后, 具有胶结性能差, 结构松散, 岩体和岩石抗压强度低, 孔隙率高, 塑性大, 裂隙、节理发育, 泥化程度高, 亲水能力强, 易崩解和遇水膨胀等典型变异特性;

(3) 三矿在漫长的沉积过程中形成的一层稳定均一的风化带, 从客观上为大面积实现缩小防护煤柱开采提供了主要的外在客观条件;

(4) 受强烈风化作用的基岩风化带, 岩石内凝聚力进展性减弱和微观组分的严重变异, 而形成的风化损伤属性, 为实现缩小防护煤柱开采提供内在条件, 此带岩石的特定属性具有移动快、变形大、压密快的特点, 一经开采扰动并二次胶结后形成的再生隔水能力较原岩的隔水能力更强, 尤其是强化风化段岩石具有阻碍上覆底含水垂直下渗和抑制弥合采动裂缝高度发展的双重作用;

(5) 实践表明: 实行采空区滞后控水, 煤水分

流, 加大开采高度, 物探预测、地质弱面预先加固是行之有效的技术保障措施;

(6) 试验研究结果表明, 百善、刘桥、任楼三矿已从原定防水煤柱中多回收 800 余万 t 煤炭, 累计增创直接经济效益 20.0 亿元, 经济效益和社会效益都非常明显。

参考文献(References):

- [1] 煤炭科学研究院北京开采所. 煤矿覆岩破坏移动规律及其应用[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1983.(Beijing Mining Research Institute, China Coal Research Institute. Application and Law of Destruction and Movement of the Overburden in the Colliery[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1983.(in Chinese))
- [2] 杨本水. 中等含水层下留设防砂煤柱开采的试验研究[J]. 煤炭学报, 2002, 27(4): 342-346.(Yang Benshui. Examination and study of retaining sands resisting coal column under the moderate water-bearing layer[J]. Journal of China Coal Society, 2002, 27(4): 342-346.(in Chinese))
- [3] 杨本水. 风氧化带内煤层安全开采关键技术的试验研究[J]. 煤炭学报, 2003, 28(6): 608-612.(Yang Benshui. The testing study of the key technology safely mining coal seam in weathered zone[J]. Journal of China Coal Society, 2003, 28(6): 608-612.(in Chinese))
- [4] 张智慧. 缓倾斜厚煤层风氧化带的开采研究[J]. 山东煤炭科技, 1999, 8(1): 58-59.(Zhang Zhihui. Study of mining in weathered zone of gently inclined thick coal seam[J]. Shandong Coal Science and Technology, 1999, 8(1): 58-59.(in Chinese))
- [5] 郭金胜. 风氧化带工作面开采管理方法[J]. 山东煤炭科技, 2000, 9(1): 5-6.(Guo Jinsheng. The mining management methods of working face in weathered zone[J]. Shandong Coal Science and Technology, 2000, 9(1): 5-6.(in Chinese))
- [6] 宣以琼. 厚含水松散层下综放面提高上限的可行性研究[J]. 安徽理工大学学报, 2000, 20(1): 42-45.(Xuan Yiqiong. The possibility study of increasing the upper limit in combined working face under the thick loose layer containing water[J]. Journal of Anhui University of Science and Technology, 2000, 20(1): 42-45.(in Chinese))
- [7] 宣以琼. 任楼煤矿覆岩破坏移动规律的综合试验[J]. 矿山压力与顶板管理, 2003, 20(3): 77-80.(Xuan Yiqiong. The integrated test of the overburden damage movement law in Renlou coal mine[J]. Ground Pressure and Strata Control, 2003, 20(3): 77-80.(in Chinese))
- [8] 康永华. 巨厚含水砂层下顶水综放开采试验[J]. 煤炭科学技术, 1998, 26(9): 35-38.(Kang Yonghua. The test of longwall top coal caving under water bodies without water drainage under the high thick sands layer bearing water[J]. Coal Science and Technology, 1998, 26(9): 35-38.(in Chinese))
- [9] 康永华. 覆岩破坏移动规律的综合研究技术体系[J]. 煤炭科学技术, 1997, 25(10): 24-28.(Kang Yonghua. The technical system of comprehensive research of the overburden damage movement law[J]. Coal Science and Technology, 1997, 25(10): 24-28.(in Chinese))
- [10] 国家煤炭工业局. 建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规程[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2000.(State Bureau of Coal Industry. Retaining Coal Column of the Building, Water Body, the Railway and the Main Mine Tunnel and Exploitation Rules of the Coal Pressed[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2000.(in Chinese))
- [11] 王永红, 沈文. 中国煤矿水患预防及治理[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1996.(Wang Yonghong, Shen Wen. The Cure and Administration of the Floods Prevention of the Coal in China[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1996.(in Chinese))