

<http://www.geojournals.cn/georev/ch/index.aspx>

地下开采中优势面控灾机理分析

倪宏革 罗国煜

南京大学地球科学系, 210093

内容提要 煤矿地下开采事故屡见不鲜。迄今为止,尚没有一种完善的理论能对灾害事故发生展布机理作出很好的解释。本文据诸多实例论述了优势面控水、控稳的两类机制,并建立了相应的优势指标和评价准则,为地下开采灾害控制研究提出了一种新的思路和分析方法。

关键词 优势面 灾害 控水机制 控稳机制 优势指标

煤矿地下开采过程中灾害事故屡见不鲜。矿井突水、顶板失稳、冲击地压、煤及瓦斯突出、地表不连续塌陷等,造成人员伤亡、建筑物破坏、环境恶化。

大量的生产实践表明,煤系地层构造是灾害控制的关键(柴登榜,1992;曹运新等,1993)。据优势面理论来看,在众多构造中,对灾害起决定性控制作用的当属优势断裂,弄清优势断裂的控灾机理,就能避免或控制许多开采事故的发生、发展。

优势面分析原理与方法是罗国煜等在几十年水文工程地质实践基础上建立起来的(罗国煜等,1986,1994;阎长虹等,1999)。所谓优势面是指对区域稳定性和岩体稳定性起控制作用的结构面以及对气液介质具控制作用的结构面,它以形成时间新、活动性强、破碎带软弱、富水为特征。优势面控制地壳及岩体变形的边界,优势面的组合构成岩体变形的破坏模式和气液介质的网络通道,这种破坏模式和网络通道的确定就得出水文地质工程地质的物理模型,据此可建立相应的数学模型,使地质问题的研究评价向定量化方向发展。

本文运用优势面控水和控稳这两类机制对煤矿地下开采突水和地表岩层移动两方面事故的发生机理进行剖析,并建立了相应的优势指标和评价准则,从而将优势面分析原理与方法应用于煤矿生产防灾减灾研究领域中去。

1 地下开采中优势面的控水机制

据有关资料,国内外矿山开采中发生的突水事故有90%与断裂有关(董玉良,1989;王明玉等,1995)。据统计,焦作矿区28次重大突水事故中,与断层有关的21次。大量的突水事故都与地质结构面有关,然而地质结构面是一个纷繁复杂的系统,从何入手呢?答案是寻找矿区富水优势断裂,这类断裂具有时间、性质、规模、岩性优势,它既是矿井突水之水源,同时由于其性质软弱,不易胶结,易受采动影响而滑动,容易沟通富水层,常常又是矿井突水之通道。富水优势断裂是个相对的概念,它可通过4类优势指标值综合确定。

1.1 时间优势指标

优势面理论把场区断裂按形成年代分为“老”、“新”、“活”三类,所谓“老”断裂是指燕山期

(J—K)及燕山期以前所产生的,且近期无明显再活动的断裂;“新”断裂是喜马拉雅期(E—Q)形成和活动的断裂构造;“活”断裂是影响到全新世(Q₄)的断裂构造(罗国煜等,1992)。断裂形成越新,断裂的切割性与连通性越好,充填物少、断裂带胶结差、富水性强,反之亦然。

肖楠森等(1984)认为中国东部的新构造断裂方向为 N20°E、N70°W,其形成时间新、胶结不好,导水、富水。凡新构造断裂发育的地段通常都能找出一定数量的基岩裂隙水(罗国煜等,1991)。作者掌握的煤矿突水资料也反映了上述规律。

曹丁涛(1991)对兖州矿区涌水情况的统计发现,NNE、WNW 向的新构造裂隙富水性好(见表 1)。这些裂隙具有以下特点:① 裂隙大多经历了先压扭、后张扭或先张扭、后压扭的反复作用。② 裂隙充填物较少或没有充填物,如东滩和北宿矿见到的裂隙,宽 0.4~10 cm,均无充填物。③ 裂隙连通性好,表现为所揭露裂隙的涌水量大且持续时间长,如东滩西风井侏罗系砂岩中的裂隙,涌水量 55.4 m³/h,掘进工作面采用了多种治水措施,但涌水持续一年尚无减少趋势。④ 裂隙倾角多陡立,有利于地下水垂直入渗。其结果使裂隙经冲刷和溶蚀而张开度变大。即使是压扭性裂隙,经过一段时间的入渗改造,也可以发展为张开度较好的裂隙。另外,淄博、枣庄、峰峰矿区某些大型突水也均与 NNE、WNW 向的两组活动性断裂有关^①。

表 1 兖州矿区新构造裂隙涌水实例(据曹丁涛,1991)

Table 1 Examples of ground water outflow from neotectonic fractures in
Yanzhou coal mine field(after Cao Dingtao,1991)

矿名	涌水地点	岩性	裂隙状况			涌水量 (m ³ /h)	工程影响
			走向	宽度(cm)	条/m		
南屯	6301-1 面	砂岩	0°~5°	未测	未测	117	无法正常生产
	6302-1 面	砂岩	0°~5°	未测	未测	141.6	无法正常生产
	7301-1 面	砂岩	0°~5°	未测	未测	132	无法正常生产
	7301-1 面	砂岩	0°~5°	未测	未测	114.7	无法正常生产
鲍店	2301 运输顺槽	砂岩	0°~15°	0.1~0.2	8~9	25	淹巷,停工
	2303 运输顺槽	砂岩	0°~10°	0.2	13~14	30	淹迎头,停掘
	1303 运输顺槽	砂岩	270°~290°	0.3	14	38	无法正常施工
东滩	西风井(145.7~268.5m)	砂岩	0°~5°	0.8~3	未测	376(推测)	
	西风井(474.8~485.4m)	砂岩	0°~5°	0.8~3	未测	55.4	延误工期半年
	主暗斜井	石灰岩	280°~290°	0.2~0.4	4~5	24	淹迎头,停掘
北宿	副暗斜井	石灰岩	275°~290°	0.3~0.4	3~4	27	淹迎头,停掘
	517 探巷	石灰岩	280°~290°	未测	未测	未测	淹迎头,停掘
	518 底部车场	石灰岩	270°~290°	未测	未测	未测	淹迎头,停掘
	5705 下巷	石灰岩	285°~290°	10(最大)	2	未测	淹迎头,停掘
	北副巷	石灰岩	0°~10°	0.4~1	5~6	54	停掘
杨村	北副巷	石灰岩	0°~10°	0.5~1	5~6	67	停掘
	北副巷	石灰岩	0°~15°	1~3	3~4	91	停掘
	南总回风巷	石灰岩	0°~5°	0.5~1.5	4~5	82	停掘

根据上述认识,我们以华北石炭二叠纪煤系地层为例,按断裂形成时间给出相应的时间优势指标值,如表 2。

① 山东矿业学院特采所,1991. 改革采煤方法和开采工艺预防突水灾害的研究(“七五”国家科技攻关项目,编号 75-11-02)研究报告。

表2 时间优势指标评价

Table 2 Evaluation on index of fault age

断层形成年代	印支期	燕山早期	燕山中晚期	喜马拉雅期(Q ₂ 以前)	喜马拉雅期(Q ₂ 以来)
断层面胶结状况	很好	好	一般	差	很差
优势指标值 I ₁	0.1	0.3	0.5	0.8	1.0

1.2 性质优势指标

总的来说,张性和张扭性断裂是在低围压条件下产生的,因而断裂面张裂程度较大,其破碎带中的破碎物多为大小不等的棱角状岩块组成的角砾岩,糜棱岩较少,疏松多孔隙,透水性和含水性较强。据镇江市供水勘察资料(刘光亚,1979),凡位于镇江市二级张扭性断裂带附近的钻孔,出水量都较大。扭性断裂面大多倾向陡立,且低序次的张性断裂发育较多,易于接受周围地层水的补给。压性和压扭性断层,一般是在较高的围岩条件下形成,其破碎带物质多为压碎岩、糜棱岩(易风化成断层泥)、构造透镜体及强烈片理化和糜棱岩化的粉碎物质,并常伴有不同程度的动力变质现象。因此,其破碎带本身的透水性和含水性很小,或隔水、不含水。但规模较大的压性和压扭性断层,两盘为脆性或可溶性岩石时,其影响带裂隙可能较发育,仍具备含水条件。因此,判断这类断层是否富水,还要进一步研究其两盘的岩性情况。

据以上认识,我们给出断裂的性质优势指标值,如表3。

1.3 储水空间优势指标

罗国煜等(1991)认为断裂只有其长度、深度达一定规模时,方可具有地下水运动和储集的空间,才可能储水(肖楠森等,1984)。

储水空间是三维概念,与断裂带的延展长度、切割深度、破碎带宽度密切相关。日本学者绪方正虞等(1981)统计了断裂长度与宽度、切割深度之间的关系,发现三者之间具有良好的相关性。因此为简便起见,我们只需选用断裂带宽度作为评价断裂储水空间的因子,确立相应的优势指标值如表4示。

1.4 岩性优势指标

断层两侧的岩石性质直接决定着断层充填物的岩性及结构,并控制着断层带的宽度、破碎程度及裂隙的发育程度,从而影响着断层带的导水性和富水性(郑世书等,1979)。

断层两侧为脆性或可溶性岩石时,如中粗砂岩、石灰岩等,断层带破碎严重,裂隙发育,易导水、富水;两侧为软弱塑性岩层时,如泥、页岩,断层带破碎较少,充填好,导水性弱或不导水,也不含水。如峰峰矿务局薛村矿东翼的F₁₂、F₁₀、F₉等断层,张扭性,宽度均达几十米,由于在塑性地层中,充填物是粘泥,巷道过这些断层时,均无水;断层两侧一软一硬时,断层带一般充填较好,导水性较弱,坚硬岩层一侧,往往裂隙较发育,含水性较强(表5)。

1.5 优势指标的综合量化评价与工程对策

根据对4类优势指标的量化分析,结合大量的生产实践经验,

表3 断裂性质优势

指标评价

Table 3 Evaluation on index of fracture mechanical of property

断裂性质	优势指标值 I ₂
张性	1.0
张扭	0.8
扭性	0.6
压扭	0.4
压性	0.2

注:两条断裂交汇处,I₂取为两条断裂优势指标值之和。

表4 断裂储水空间优势指标评价

Table 4 Evaluation on index of fracture reservoir space

断裂带宽度(m)	优势指标值 I ₃
>100	1
100~60	0.8
60~30	0.65
30~15	0.55
<15	0.1

表5 断层两侧岩性优势指标评价

Table 5 Evaluation on index of rock properties of bothsides of the fault

两侧岩性	优势指标值 I ₄
脆性或可溶岩	1
一硬一软	0.6
软塑性岩	0.1

断层的富水程度可用 I_f 表达式进行量化评价:

$$I_f = 1.3I_1 + 1.2I_2 + 0.8I_3 + 1.0I_4$$

由 I_f 的估算值, 可将断裂的富水程度分为 4 类, 其相应的工程对策如表 6。

表 6 断裂的富水优势分级及相应的工程对策

Table 6 Classification of water-rich faults and their engineering countermeasure

富水优势级别	I_f	危害程度及工程对策
I	>4	采掘工程受水害严重威胁; 留足防水煤柱, 边采掘边监测断裂及其地下水的活动性
II	$4 \sim 2.5$	采掘工程受水害威胁; 超前探水, 疏放降压与施工监测并举
III	$2.5 \sim 1$	采掘工程受水害影响; 探放、疏放降压开采
IV	<1	采掘工程一般不受水害影响; 无需专门探测、监测

2 地下开采中优势面的控稳机制

优势面的控稳机制体现在其对附近围岩中开采应力传递、岩层移动变形和地表沉陷的展布具明显控制作用, 进而控制灾害的发展程度。

2.1 优势控稳断裂的特征

通过对淮南、抚顺、阜新、鹤壁、枣庄、辽源等矿区岩移破坏规律研究, 我们发现部分采区地表岩移范围和幅度常常受附近断裂控制。如淮南大通矿东二采区, 采到 330 m 水平后, 位于该采区底板方向 F_1 断层露头处的铁路站房、站线先后出现较严重的破坏(图 1)。再如淮南九龙岗东五采区, 当井下工作面开采后, 断层露头处地表很快出现台阶状破坏, 形成以断层面为界的槽形盆地, 槽边变形非常剧烈, 槽底变形较小。槽边以外变形甚微, 对建筑物无危害(图 2)。

类似上述易受采动影响的断裂, 我们称之为优势控稳断裂。它们往往具有断裂带胶结程度差, 结构面较风化, 导水富水, 有一定的规模效应(落差、断裂宽度较大)等特征, 从形成时间来看, 多为喜马拉雅期(E—Q)以来的新断裂, 甚至有 Q_4 以来的活断裂。这类断裂控制着岩层移动的传递, 常是岩体变形的边界(罗国煜等, 1992), 地下开采时易受影响而“复活”滑移, 使断层露头处地表变形加剧, 大大超过其正常值, 位于断层露头一侧附近的地表变形变得缓和, 小于其正常值。利用优势控稳断裂特点, 可指导地面建筑物的合理布置, 如在断层露头位置禁止修建新的建筑物, 开采前, 该位置原有建筑物应尽量拆除。而在断层另一盘地表变形缓和区, 可对

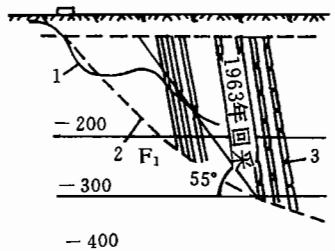


图 1 大通矿东二采区剖面示意图

Fig. 1 Sketch of the second eastern working area of Datong coal mine

1—下沉曲线; 2— F_1 断层; 3—采空区

1—Subsidence curve; 2—fault F_1 ; 3—gob

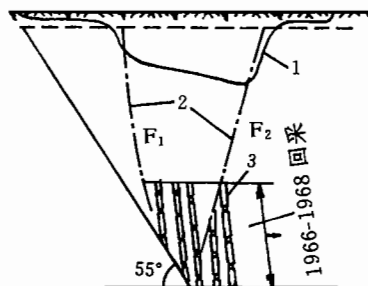


图 2 九龙岗矿东五采区剖面示意图

Fig. 2 Sketch of the fifth eastern working area of Jiulonggang coal mine

1—下沉曲线; 2—断层面; 3—采空区

1—Subsidence curve; 2—fault surface; 3—gob

原有建筑物进行加固,也可盖新的建筑物。

相反,另一些断裂这种“控稳”优势性表现不明显,这些断裂的结构面胶结较好,富水性差,形成年代早,其失稳与否更要取决于开采条件以及断裂面与岩移方向的空间位置关系。

2.2 影响采动断裂稳定性指标的确定

通过多个矿区大量采动断裂稳定的评价研究,我们筛选出能反映采动断裂稳定性的 7 项优势指标:① 断裂宽度(a):断裂规模指标,反映充填物厚度大小;② 断裂带地下水渗水压力指标(b):地下水能软化岩石,并加剧风化,结构面中水压能降低其抗剪强度;③ 断面粘聚力(c):反映断裂胶结程度指标,表示其抵抗采动拉张、剪切能力;④ 产状优势指标(d):用断裂倾向倾角与开采方向及移动角关系来表示。当断裂倾向与开采方向相反且其倾角小于岩层移动角时最易滑动;⑤ 围岩湿抗压强度(e):取断裂开采盘断裂上下落差范围内围岩的加权平均值,表示围岩坚硬软弱程度。坚硬围岩易集聚开采应力,易造成断裂面滑移;软弱围岩易产生塑性变形化解应力,不易沿断裂面滑移;⑥ 断面摩擦系数(f):为断裂破碎带内充填物内摩擦角的正切值,反映其抗滑能力;⑦ 开采距离与规模指标(g):用 x/l 表示(何国清等,1991), x 为断层露头至假定无断裂时地表沉陷盆地最大下沉点的水平距离; l 为假定无断裂时开采地表下沉盆地半长, l 反映开采规模大小。

根据矿区采动断裂岩移规律研究的诸多实践经验和多因子多水平数值模拟并参阅部分资料(王思敬等,1984;孙广中,1988;何国清等,1991;罗国煜等,1992),我们建立采动断裂稳定性影响因子边界值(表 7)。

表 7 采动断裂稳定性影响因子边界值

Table 7 Boundary value of influential factor about minging fault stability

影响因子 \ 稳定程度	极稳定 I	稳定 II	次稳定 III	不稳定 IV	极不稳定 V
断裂宽度 a(m)	0.02	0.06	0.2	0.6	2
断裂带渗水压力 b(MPa)	0	0.1	0.2	0.4	0.5
断面粘聚力 c(MPa)	0.15	0.10	0.04	0.02	0.005
产状指标 d	断裂面倾向与开采方向一致 90	断裂面倾向与开采方向垂直 75	断裂面倾向与开采方向斜交 60	断面倾向与开采方向相反,断层倾角大于岩移角 45	断面倾向与开采方向相反,断层倾角小于岩移角 30
围岩湿抗压强度 e(MPa)	15	35	70	120	180
断面摩擦系数 f	0.8	0.6	0.4	0.25	0.15
开采距离与规模指标 g	0.9	0.7	0.5	0.3	0

实例 辽源矿务局西安矿井筒穿过两个可采煤层。同时有两个近似平行于煤层走向的断层通过井筒,No.1 逆断层落差 20 m,如图 3,在深度 215 m 处通过井筒,No.2 正断层落差 12 m,在深度 370 m 处通过主井筒。工业广场原留保护煤柱使用移动角参数 $r=75^\circ$, $\beta=63^\circ$,No.1 和 No.2 采动断裂影响因子参数见表 8。

通过建立模糊矩阵 R,确定权矩阵,再进行综合评判,最后得到 No.1 断裂稳定程度贴近度为 0(I 类),0.072

表 8 采动断裂影响因子值

Table 8 Value of influential factor about ming fault

因子值		a	b	c	d	e	f	g
采动断裂	No.1	1.2	0.1	0.01	30	95	0.28	0.32
	No.2	0.8	0.08	0.032	90	88	0.31	0.82

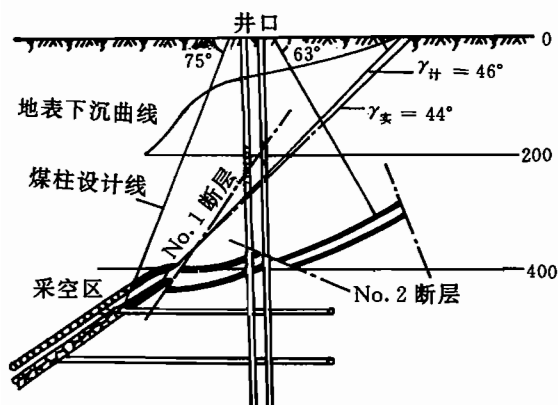


图3 断层对井筒及地表的影响示意图

Fig. 3 Sketch of influence of faults on shaft and surface

完好无损。可见预测结果是较正确的。

运用上述方法对淮北刘桥一矿、皖北百善矿共4个工作面侧上方断裂进行稳定性评价,也显示预测结果与实际吻合。

2.3 优势控稳断裂的屏蔽效应

地下开采中,优势控稳断裂常常是应力和位移传递的“屏障”,结果造成断裂带内应力、位移变化显著增大,断裂带和开采工作面之间围岩应力更加集中,破坏程度加剧,而断层另一侧受开采影响变小。断裂带宽度越大,胶结越差,这种屏蔽效应越明显。

实证一 枣庄煤矿4113工作面中通过横五断层,断层落差20~30 m,为新构造断裂,断层倾向与开采方向一致。当工作面推进到断层附近时,断层露头处很快出现台阶状裂缝,台阶落差达0.2 m,位于台阶处的房屋遭到严重破坏,而断层右侧的建筑物却完好无损(图4)。

实证二 盐城矿务局南庄矿2030工作面平行于韩1断层开采,如图5,韩1断层,正断层,走向NE,倾向NW,倾角60°~70°,落差250 m,延伸数公里,断层破碎带宽20~30 m,断层带中有少量的灰岩、砂岩细角砾,并为泥质胶结。

该矿对此断层进行了数次探测、抽水及连通试验,均表明不导水。为了安全起见,仍留设了60 m宽的断层防水煤柱(超过有关规程规定的3倍),1991年4月开始回采该工作面,在初次来压和周期来压时,涌水量有所增大。周期来压时,采区总涌水量为1.3 m³/min。6月20日,2030工作面采完时,顶板尚未垮落,采空区下部顶板淋水如雨。以后,涌水量一直稳定在1.7 m³/min左右。10月29日,南三采区涌水量突然增至30 m³/min。数小时后,达到47 m³/min。这次突水造成全矿停产多日。事后推断,此次大型滞后突水是奥陶纪岩溶水穿过韩1断层涌入南三采区造成。

突水机理分析:① 开挖空间附近宽度较大的断层破碎带,形成围岩应力应变重分布的“屏障”,造成断层带内应力位移变形梯度增大,产生张性裂隙,沟通了奥陶纪灰岩含水层,使断层变为富水;② 断层与开采底板之间围岩剪应力集中,剪切变形加剧,使岩体中不连续面的错动大为增强,造成防水煤岩柱隔水失效,导致涌水由缓慢至急剧增大,形成大型滞后突水。

(Ⅱ类),0.136(Ⅲ类),0.522(Ⅳ类),0.270(Ⅳ类),0.270(Ⅴ类)。按照最大隶属度归属原则,No.1采动断裂稳定程度为不稳定(0.522),偏向极不稳定状态(0.270)。

同理求得No.2断裂结果矩阵为[0.242, 0.456, 0.142, 0.103, 0.057],显然其稳定程度为稳定(0.456),偏向极稳定状态(0.242)。

实际开采结果显示No.1断层与井筒交接处出现严重破坏(图3),此段井筒沿断面产生了明显滑动,其水平移动最大值达659 mm,最大水平移动速度达13.6 mm/月,由于No.1采动断裂的影响,移动角由原75°减至44°,使地表移动范围明显扩大。相反,在370 m深处No.2断裂却丝毫未动,该处井筒完

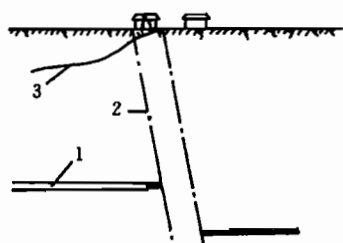


图 4 枣庄矿 4113 工作面剖面示意图

Fig. 4 Sketch of 4113 workface of

Zaozhuang coal mine

1—采空区;2—断层面;3—沉曲线

1—Gob;2—fault surface;3—subsidence curve

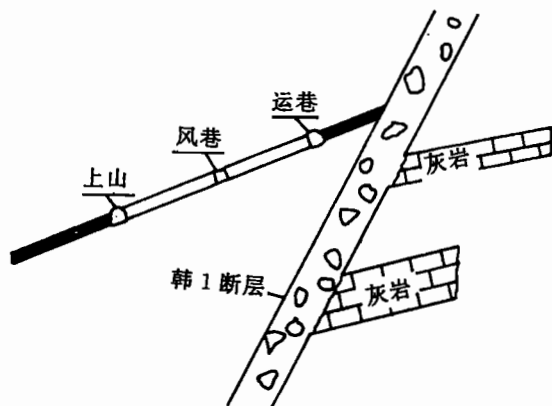


图 5 南庄矿发生突水的 2030 面地质结构示意图

Fig. 5 A sketch map showing the geological structure of the water-irrupted 2030 mining face in Nanzhuang

3 结束语

优势面理论作为解决工程地质或岩土工程问题的一种新思路,其在区域稳定性、边坡稳定性、地下工程围岩稳定评价、裂隙水探寻、氨污染预测及防治等领域具良好的效用,笔者相信,其在煤矿地下开采控灾防灾方面也必将大有作为。

参 考 文 献

- 曹丁涛. 1991. 兖州矿区新构造裂隙特点及涌水防治. 煤田地质与勘探, (1): 46~47.
- 曹运新, 彭立世, 侯泉林. 1993. 顺煤层断层的基本特征及其地质意义. 地质论评, 39(6): 522~528.
- 柴登榜. 1992. 对发展生产力和矿井地质的认识. 全国矿井水文工程地质学术交流会论文集. 北京: 地震出版社.
- 董玉良. 1989. 我国北方二叠纪煤田充水特征及主要水文地质问题研究. 中国地质科学院水文地质工程地质研究所刊, 5: 95~113.
- 何国清等. 1991. 矿山开采沉降学. 徐州: 中国矿业大学出版社, 106~109.
- 刘光亚. 1979. 基岩地下水. 北京: 地质出版社, 94~96.
- 罗国煜, 吴浩. 1991. 工程勘察中的新构造—优势面分析原理. 北京: 地质出版社.
- 罗国煜, 吴恒. 1986. 岩坡稳定系统工程分析的初步探讨. 地质论评, 32(2): 165~173.
- 罗国煜, 王培清. 1992. 岩坡优势面分析理论与方法. 北京: 地质出版社.
- 罗国煜, 阎长虹. 1994. 岩块系统分析与可靠性评价. 地质学报, 68(2): 185~196.
- 孙广忠. 1988. 岩体结构力学. 北京: 科学出版社.
- 王明玉, 张宝柱. 1995. 华北型煤田矿井突水灾害的防治. 地质论评, 41(6): 553~558.
- 王思敬等. 1984. 地下工程岩体稳定分析. 北京: 科学出版社.
- 肖楠森, 罗国煜. 1984. 新构造分析及其在水文地质工作中的应用. 南京大学出版社.
- 绪方正虞等. 1981. 断裂与分数维. 应用地质(日), 129(4): 249~255.
- 阎长虹, 罗国煜, 陈兆乾, 徐迎伍, 刘建方, 张连胜, 刘怀濮. 1999. 黄河悬河研究及其专家系统研制. 地质论评, 45(2): 218~224.
- 郑世书等. 1979. 矿井地质及矿井水文地质. 北京: 煤炭工业出版社.

作 者 简 介

倪宏革, 男, 1967 年生. 1996 年至 1999 年于南京大学水文地质工程地质专业攻读博士学位. 现就职于长沙铁道学院岩土工程研究所, 从事教学与科研工作. 通讯地址: 410075, 长沙铁道学院土建院岩土工程研究所.

A Study of the Mechanism of Hazards Controlled by Preferred Plane in Underground Mining

Ni Hongge Luo Guoyu

Department of Earth Science, Nanjing University, Nanjing, 210093

Abstract

Accidents during underground mining of coal are nothing new. There has not been a perfect theory yet to satisfactorily explain the mechanism of hazard occurrence and development. In this paper, a good many examples are quoted to discuss the mechanism of rockmass stability and water transportation controlled by preferred plane. Furthermore, the corresponding superior indexes and evaluation criterion have been set up. All these demonstrate a new thinking and analysis method about the study of hazard control during underground mining.

Key words: preferred plane; hazard; mechanism of water transportation controlled; mechanism of rockmass stability; superior indexes
