



矿井冲击与突出耦合灾害 预测及防治技术

◎ 主 编 高忠红



中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

矿井冲击与突出耦合灾害 预测及防治技术

主 编 高忠红

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

随着煤矿井下开采深度和开采规模的日益扩大,高瓦斯、高地应力煤层冲击地压与突出耦合发生的概率越来越大,本书以平煤八矿为工程背景,通过实验室研究、数值模拟分析等手段,采用综合预测方法进行了预测,提出了切实可行的防治方案,为冲击地压与突出耦合灾害预测与防治提供了借鉴。

图书在版编目(CIP)数据

矿井冲击与突出耦合灾害预测及防治技术/高忠红

主编. —徐州:中国矿业大学出版社, 2014. 3

ISBN 978 - 7 - 5646 - 2251 - 0

I. ①矿… II. ①高… III. ①煤矿—冲击地压—预测
②煤矿—冲击地压—防治③煤突出—耦合—突出预测④煤突
出—耦合—防治 IV. ①TD324②TD713

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 023729 号

书 名 矿井冲击与突出耦合灾害预测及防治技术

主 编 高忠红

责任编辑 李 敬

出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司

(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)

营销热线 (0516)83885307 83884995

出版服务 (0516)83885767 83884920

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com

印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司

开 本 880×1230 1/32 印张 6.25 字数 174 千字

版次印次 2014 年 3 月第 1 版 2014 年 3 月第 1 次印刷

定 价 23.50 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

随着矿井开采深度和开采规模的日益扩大,冲击地压、煤与瓦斯突出的危害日趋严重,高瓦斯、高地应力煤层冲击地压与突出耦合发生机理和预测防治技术的研究成为亟待解决的重要课题。

本文首先对国内外冲击地压、煤与瓦斯突出的机理和预测技术进行了大量调查研究,冲击地压、煤与瓦斯突出发生机理虽各不相同,但可互为诱发因素,且都具有动力特征。

第2章揭示了冲击地压和煤与瓦斯突出发生的可能性与开采深度、煤层厚度、地质构造、工作面推进速度、护巷煤柱、瓦斯压力、煤体结构和顶底板岩层性质的关系。

第3章提出 σ_{9-10} —12160 孤岛面可能的三种灾害诱发形式为固体能量诱发型、气体能量诱发型和复合能量引起的煤岩动力灾害。根据对工作面应力场分布规律的分析,运用尖点突变理论建立了孤岛面冲击与突出耦合的力学模型,通过对该模型的分析,得出灾害发生后释放的能量的大小与煤层厚度、煤层弹性模量、顶板刚度、弹性区刚度、煤层弹塑性区宽度的大小有关。

第4章进行了冲击倾向性试验研究,根据试验结果得出 σ_{9-10} 煤样及与顶板组合煤岩样为弱冲击倾向。通过试验数据分析得出组合煤岩样中顶板岩样厚度越厚,则其冲击倾向性就越强的结论。

第5章应用FLAC数值模拟软件对孤岛区段沿倾向的支承应力场和机巷、风巷区域应力分布规律进行了数值模拟。根据对风巷掘进的数值模拟可以看出:在实体煤一侧,风巷里段由于距离高位抽排巷较近,发生冲击地压与突出的可能性较小;而风巷外段由于距离高位抽排巷较远,发生冲击地压与突出的可能性较大。根据对机巷

掘进的数值模拟可以看出:在有戊₉₋₁₀—12180抽排巷的机巷外段冲击地压与突出的危险性较小;在无抽排巷赋存的机巷里段,由于没有卸压作用,冲击地压与突出的危险性较大。

第6章对戊₉₋₁₀—12160孤岛区域在回采过程中冲击地压、煤与瓦斯突出及二者耦合的危险性进行区域预测。文中应用关联测度预测模型和熵函数预测模型对孤岛区域进行了分区预测,得出了冲击地压发生的可能性A区最大,煤与瓦斯突出或冲击地压与突出耦合型复合灾害B区可能性最大;危险等级预测结果为A、B、C、D四个区危险等级都属于有威胁,且B区威胁最大,其次依次为D区、C区和A区。

第7章提出了围岩变形观测法、矿压观测法、电磁辐射监测法、钻屑量和瓦斯涌出初速度相结合的综合预测法。根据井下观测数据进行了图表分析,用SPSS数据分析软件的回归分析方法,在确定钻屑量临界值取5.3 kg/m时,瓦斯涌出初速度临界值为4.2 L/min,电磁辐射幅值的临界值为92 mV,脉冲数的临界指标值为1 526。

第8章通过井下现场应用,优化了瓦斯抽采、煤层注水、松动爆破的基本参数,形成了针对性的防冲减突技术方案,对类似条件下冲击矿压与突出防治的合理参数选取,指导下组煤冲击矿压与突出防治的技术方案制定,具有重要的指导意义。

本书是作者攻读博士学位期间的主要研究成果,本书依托的科研工作是在何富连导师的密切关注下完成的,同时在编写过程中得到了爱妻任秀芬的大力支持,在此表示衷心感谢!由于水平有限,加之时间仓促,书中难免存在错误和不妥之处,恳请读者批评指正。

编者

2013年10月

目 录

1	绪论	1
1.1	问题的提出	1
1.2	冲击与突出复合型矿井灾害研究的意义	2
1.3	冲击地压与突出机理研究现状	4
1.4	冲击地压与突出预测技术研究现状	13
1.5	存在的问题及不足	19
1.6	研究的内容、方法、思路以及创新点	20
2	影响冲击与突出耦合因素分析	23
2.1	开采深度	23
2.2	煤层厚度	27
2.3	地质构造	28
2.4	工作面推进速度	30
2.5	护巷煤柱	31
2.6	瓦斯压力	32
2.7	煤体结构和顶底板岩层的性质	33
3	冲击地压与突出耦合机理研究	36
3.1	冲击地压与突出概述	36
3.2	冲击地压与突出耦合现象及结论	37

3.3	孤岛区域应力场分布规律与灾害诱发形式分析·····	39
3.4	孤岛面冲击与突出耦合模型及机理分析·····	45
4	孤岛区域煤岩冲击倾向性试验研究·····	53
4.1	冲击倾向性原理·····	53
4.2	煤岩的冲击倾向试验·····	56
4.3	煤岩冲击倾向性确定·····	59
5	巷道掘进冲击与突出危险性预测的数值模拟研究·····	73
5.1	数值模拟的意义与FLAC软件简介·····	73
5.2	矿井及戊 ₉₋₁₀ —12160 孤岛区域概况·····	74
5.3	模型的建立和模拟内容·····	91
5.4	数值模拟过程及结论·····	96
6	孤岛区域冲击与突出危险性分区预测研究·····	106
6.1	概述·····	106
6.2	直觉模糊集的关联测度预测模型·····	107
6.3	熵函数预测模型·····	109
6.4	戊 ₉₋₁₀ —12160 孤岛开采区域冲击与突出危险性预测 ·····	112
7	孤岛区域冲击与突出危险的现场综合预测研究·····	121
7.1	围岩变形和矿压观测预测·····	121
7.2	电磁辐射法监测·····	129
7.3	钻屑量、瓦斯涌出初速度监测·····	140
7.4	预测指标临界值的确定·····	147
7.5	预测临界指标的现场应用情况·····	156

8 冲击与突出防治方案	158
8.1 瓦斯抽采方案研究	158
8.2 工作面浅孔注水方案研究	170
8.3 工作面松动爆破方案研究	175
参考文献	180

1 绪 论

本章分析了当前煤炭生产形势和深部开采矿井遇到的主要难题,详细总结和归纳了国内外冲击地压、煤与瓦斯突出机理及预测技术研究现状以及不足之处,按照中国平煤神马集团横向科研课题“孤岛高危大采高综采面冲击与突出危险性耦合及其防治技术研究”和国家自然科学基金的要求,提出了本文研究的内容、方法、思路和技术路线。

1.1 问题的提出

随着煤矿井下开采深度和开采规模的日益扩大,冲击地压、煤与瓦斯突出的危害也日趋严重,已成为矿山开采中亟待解决的重大课题。许多采矿国家都投入巨资成立专门的研究机构,对冲击地压、煤与瓦斯突出发生机理和形成过程以及预测预报技术进行了大量研究。在理论方面,形成了一系列的原理和假说,如关于冲击地压的强度理论、能量理论、冲击倾向性理论、失稳破坏性理论等,关于煤与瓦斯突出的单因素假说、综合假说和流变假说等。在预测预报方面,利用各种数学方法进行区域灾害预测,利用钻屑法、瓦斯涌出初速度法等进行局部预测。随着监测技术的发展与进步,采用先进的数据采集系统来获取大量监测数据(如地音、电磁辐射、微震等),为冲击地压和突出的预测和防治提供了一种新的途径。

但是,现有的冲击地压与突出机理、预测预报方法,绝大多数是针对其中之一而进行的研究,没有将二者结合起来进行考虑,特别是在进入深部开采后,许多矿井同时具有冲击地压与突出倾向,二者相

互作用和诱发,可产生复合型灾害,对采矿安全构成重大威胁,如表 1-1^[1]所列。因此,高瓦斯、高地应力煤层冲击地压与突出耦合发生机理和预测预报技术的研究成为亟待解决的重要课题。

表 1-1 1978~2003 年老虎台矿冲击地压与突出统计

开采深度(水平) /m	煤与瓦斯突出次数 /次	伴随冲击地压次数 /次	伴随冲击地压比例 /%
-580	2	0	0
-680	3	0	0
-730	5	1	20
-780	6	2	33.3
-830	4	3	75

1.2 冲击与突出复合型矿井灾害研究的意义

煤炭一直是我国的主要能源。20 世纪 50 年代煤炭在能源消费结构中所占比例大于 90%,60 年代以后,煤炭在能源消费结构中的比例逐年下降,但预测到 2050 年仍将占 50%以上,因此,未来的几十年内以煤炭为主体的能源结构仍不会改变。随着国民经济的发展和人民生活水平的提高,我国对煤炭的需求越来越大,2000 年我国煤炭产量已经突破 10 亿 t,2002 年达到了 13.9 亿 t,2006 年达到 23.3 亿 t,目前煤炭的年产量以 2 亿 t/a 的速度递增。经济的快速增长对煤炭工业的安全、健康和跨越式发展提出了新的要求,但是,我国 95%的煤矿是井工开采,煤层赋存条件复杂多变,重大动力灾害如煤与瓦斯突出、冲击地压等事故频繁发生^[2]。

煤与瓦斯突出一直是我国煤矿开采的主要威胁。2001~2008 年全国各类煤矿发生煤与瓦斯突出 191 起,占瓦斯事故总起数的 12.78%;煤与瓦斯突出死亡人数达 966 人,占瓦斯事故死亡总人数

的 11.18%。2004 年 10 月 20 日,河南郑州煤业集团大平煤矿发生一起特大型煤与瓦斯突出事故,造成 148 人死亡,32 人受伤;2007 年 11 月 8 日,贵州省毕节地区纳雍县群力煤矿发生一起煤与瓦斯突出事故,造成 35 人死亡,7 人受伤。另外,我国许多矿井转入深部开采后,冲击地压灾害也日益凸显。据统计,1999 年 17 处大中型煤矿就发生 1 377 次冲击地压,最大强度达到里氏 4 级。2004 年 6 月 27 日,北京木城涧煤矿发生一起冲击地压事故,造成 1 人死亡,8 人受伤;山东省新汶矿业集团公司华丰煤矿自 1992 年以来共发生较严重的冲击地压 104 次,累计造成 41 人重伤,4 人死亡;辽宁省抚顺矿务局老虎台煤矿,2002 年发生各类冲击地压 6 127 次,其中强度大于 3 级的 21 次,平均每天发生冲击地压 17 次,严重威胁煤矿安全生产^[3]。

近几年,随着开采规模的不断加大,我国许多大中型矿井转入深部开采。而深部由于其特殊的开采条件导致以冲击地压、煤与瓦斯突出为代表的复合型矿井灾害逐渐增多,事故造成的损失也比单一灾害造成的损失大。2003 年,淮北矿务局芦岭煤矿因顶板冲击引起采空区瓦斯喷出导致瓦斯爆炸,造成 86 名矿工死亡;2005 年,辽宁阜新孙家湾煤矿发生“2·14”冲击地压—瓦斯爆炸事故,冲击矿震震级达 ML2.5,造成 214 名矿工死亡。总之,以冲击地压、煤与瓦斯突出为主的复合型矿井灾害直接妨碍了煤矿正常生产,阻滞了煤炭工业的持续、健康、稳定发展。加强冲击地压与突出灾害的防治是确保煤炭能源稳定、可靠供应,促进国民经济全面、健康发展的重要保证。

本书主要以平煤集团八矿戊₉₋₁₀—12160 孤岛区域为工程背景,研究处于深部的高瓦斯、高地应力煤层开采过程中冲击地压与突出耦合发生的条件与机理,揭示其耦合发生的规律,从而找出适合我国目前开采条件下的高瓦斯、高地应力煤层冲击地压与突出预测技术,达到有效防治冲击地压、突出及其耦合型矿井灾害的目的,保证井下煤炭安全生产。

1.3 冲击地压与突出机理研究现状

1.3.1 国内外冲击地压机理研究现状

冲击地压发生机理十分复杂,各国学者在大量现场观测和实验室试验基础上,利用数学、力学和统计分析等理论工具,提出了许多重要的理论,如强度理论、刚度理论、能量理论、冲击倾向性理论、“三准则”理论、变形系统失稳理论、突变理论、分形理论、“三因素”理论、扩容理论、煤柱冲击地压时间效应理论、动态失稳理论、冲击地压和突出的统一失稳理论等。

(1) 强度理论

早期的强度理论主要是从受载作用下煤体的强度方面考虑的,即煤体受载后,其载荷超过煤体的强度极限时就会发生破坏。近代强度理论的破坏准则最具有代表性的是 20 世纪 70 年代 Brauner 提出的煤岩夹持理论,认为较坚硬的顶底板夹持煤体,煤体在高压夹持下将发生破坏,从而引发矿震、冲击地压等煤岩动力灾害,得出极限应力的计算方法,即:

$$P_K = (\sigma_c + \tau_0 \cot \theta) \left[\exp \left(2 \frac{h}{H} \tan \theta \right) - 1 \right] + \sigma_c \quad (1-1)$$

式中 P_K ——极限应力;

τ_0 ——煤炭—围岩交界处的黏结力;

σ_c ——煤体的单轴抗压强度;

h ——待测点与煤壁之间的距离;

H ——工作面采高;

θ ——煤体与围岩交界处的摩擦角。

Hock 和 Brown 于 1980 年提出了经验型的强度准则,我国学者李玉生、侯发亮等进一步完善了该理论,提出了三轴状态下的计算方法:

$$P_K = \sigma_0 \exp \left[K \tan \theta \left(\frac{2h}{H} - 1 \right) \right] \quad (1-2)$$

式中 σ_0 ——0.5 h 处的煤体残余强度；

K ——三轴残余强度系数。

(2) 刚度理论

20 世纪 60 年代,根据刚性试验机的试验原理,Cook 和 Hodgei 提出了刚度理论。70 年代,布莱克在利用有限元等数学工具的基础上进一步充实了该理论,并将刚度理论用于分析美国爱达荷加利纳矿区的冲击地压问题,得出了冲击矿压发生的条件是矿体的刚度必须大于围岩载荷的刚度。80 年代,Petukhov 在考虑刚度条件下建立了冲击地压机理模型,通过分析后认为煤体破坏的原因是必须满足柔性加载条件,后来又通过试验得出煤体加载达到峰值后的载荷—变形曲线下降段的刚度就是矿山结构的刚度。

(3) 能量理论

能量理论是 Cook 等人根据冲击矿压发生时产生剧烈震动、巷道遭到破坏以及煤岩大量抛出等动力现象需要大量能量的事实提出的,认为矿体和围岩组成的平衡系统一旦被打破,煤岩体储存的弹性能量将被释放出来,且释放的能量大于消耗的能量将引发冲击矿压灾害。他们还研究了各种开挖形式下的能量释放率,并分析了其与岩爆次数的关系。此后,布霍依诺、佩图霍夫^[5]、瓦夫里罗等学者对该理论做了大量研究。豪斯给出了冲击地压的能量平衡方程式。20 世纪 70 年代,Brauner 结合时间因素,提出矿体的刚度大于矿山负荷系的刚度是发生冲击地压的条件,得出如下判别式:

$$\left\{ \left[\eta \left(\frac{dW_E}{dt} \right) + \lambda \left(\frac{dW_S}{dt} \right) \right] / \left(\frac{dW_D}{dt} \right) \right\} > 1 \quad (1-3)$$

式中 W_E ——围岩储蓄的能量；

W_S ——矿体储蓄的能量；

W_D ——消耗的能量；

η ——围岩释放能量的有效系数；

λ ——矿体释放能量的有效系数。

(4) 冲击倾向性理论

Bieniawski 等^[6]通过大量试验和现场调查,得出冲击地压的发生不仅与外部条件有关,而且还与煤岩的物理性质有关。我国学者根据大量观测和试验,把弹性能指数 W_{ET} 、冲击能指数 K_E 和动态破坏时间 D_t 作为评判煤岩冲击倾向性的三项指标,原国家煤炭工业局颁发的《冲击地压预测和防治试行规范》、《岩石冲击倾向性分类及指数的测定方法》和《煤层冲击倾向性分类及指数的测定方法》对此作出了较详细的规定。同时,该理论在试验方法、数据处理及综合评判等方面取得了一定的进展。王淑坤、鲜学福等学者采用模糊数学综合评价、神经网络、灰色系统理论等数学方法对煤岩体的冲击倾向性进行了综合评价。另外,顶板冲击倾向性研究也受到越来越多学者的关注,有的学者提出了顶板弯曲能量指数^[7],如式(1-4)所示,判别标准采用表 1-2 指标。有的学者建立了顶板断裂下沉的力学模型。

表 1-2 顶板岩石冲击地压危险指标

类别	I	II	III
冲击倾向	无冲击倾向	中等冲击倾向	强烈冲击倾向
分级指数	$D \leq 10$	$10 < D < 100$	$D \geq 100$

单层顶板弯曲能量指数:

$$D' = 0.02[\sigma]^{5/2} \cdot h^2/E \cdot P_0^{1/2} \quad (1-4)$$

式中 D' ——顶板能量指数;

$[\sigma]$ ——岩石的抗弯强度;

h ——岩梁厚度;

E ——弹性模量;

P_0 ——深度应力。

复合顶板的弯曲能量指数:

$$D = \sum D_i' \quad (1-5)$$

式中 D_i ——30 m 范围内 i 顶板岩层的顶板能量指数。

(5) “三准则”理论

该理论是我国学者李玉生在总结了强度理论、能量理论和冲击倾向理论之后提出来的。其基本观点是将上述三种理论结合起来,并且认为强度准则是煤岩体的破坏准则,而能量准则和冲击倾向准则是煤岩体突然破坏准则,只有当三个准则同时满足时,才能发生冲击地压,其表达式如下:

强度准则:

$$\frac{\sum_{i=1}^n \sigma_i}{R} \geq 1 \quad (1-6)$$

能量准则公式见式(1-3)。

冲击准则:

$$\frac{K}{K'} \geq 1 \quad (1-7)$$

式中 σ_i ——自重应力、构造应力、附加应力、煤体与围岩交界处的应力和其他应力;

R ——单向抗压强度,MPa;

K ——煤体(围岩)的冲击倾向指标;

K' ——试验(实测)确定的冲击倾向度界限值。

(6) 煤岩系统稳定性理论

煤岩系统稳定性理论的研究最早始于 Neville Cook 对冲击地压机理的研究。Salamon 等根据试验得出了煤岩进入峰值强度后的应变软化特性。Drucker 等提出了以材料稳定性作为煤岩系统破坏及冲击地压发生的准则,并对冲击地压进行了数值模拟。Lippmann 在刚性试验机加载试验的基础上,将冲击地压处理为弹塑性极限静力平衡的失稳现象,提出了冲击地压的“初等”理论^[8]。我国学者章梦涛根据煤(岩)变形破坏的机理,进一步提出了冲击地压的失稳理论,并得到了初步的应用。根据 Dirichlet 判别式,即系统稳定与否

取决于变形系统的势能或称自由能驻值的性质,假定系统势能为 F ,系统势能的一次变分为 δF ,二次变分为 $\delta^2 F$,则当 $\delta F=0, \delta^2 F<0$ 时,系统势能有极大值,不稳定,故将其作为煤岩体失稳的准则。

随着断裂力学、系统稳定性理论的发展,Vardoulakis 通过试验得出近自由表面的裂纹一旦扩展,煤岩体将失稳的结论;Bazant 分析裂纹扩展的能量耗散和尺度效应,初步对冲击地压的能量进行了估算;齐庆新等人^[9]在“煤—岩”、“煤—煤”摩擦滑动的试验基础之上提出了冲击地压的黏滑失稳机理;周瑞忠、李广平、张晓春等采用损伤力学和断裂力学方法建立了煤岩失稳破坏模型。

(7) 突变理论

煤岩体的突变理论起源于 Thom 的突变论。该理论主要从建立煤岩体的尖点突变模型出发,对影响煤岩体的顶底板压力、刚度和煤岩的损伤扩展耗散能量进行分析,揭示了煤岩动力灾害诱发的机理。潘一山等^[10]建立了煤岩失稳的尖点突变模型,总结出了煤岩发生动力破坏的条件。徐曾和等^[11]通过建立尖点突变模型,解释了厚层坚硬顶板引发冲击地压机理,论述了煤岩动力灾害发生前的征兆,进而总结出了岩爆等灾害预测预报方法。

(8) 分形理论

分形理论来源于法国数学家曼德尔布罗特 1973 年提出的分维几何学思想,谢和平^[12,13]将分形几何学引入冲击地压的研究。该理论认为在冲击地压发生前,微震活动均匀地分布在高应力区,这时分形维数值较高,而临近冲击地压发生时,微震活动集聚,其分形维数值较低,也即分形维数值随岩石微断裂的增多而减小,最低的分形维数值则出现在临近冲击地压发生时。李廷芥等^[14]用单轴压缩试验得出岩石破坏过程中裂纹分形维数的测量结果,并根据这一结果对岩石岩爆过程的机理进行了研究。

(9) “三因素”理论

齐庆新等提出了“三因素”理论,认为冲击地压发生是煤岩体的内在因素、力源因素和结构因素共同作用的结果。即具有冲击倾向性的

煤岩体在高应力作用下储存了大量的变形能,在外在动力扰动下使软弱结构面或易于引起突变滑动的层状界面首先破坏,继而引发煤岩动力灾害。窦林名在此基础上进一步提出了强度弱化减冲理论^[15]。

(10) 其他理论

潘立友在研究冲击地压的预测预报时提出了冲击地压的扩容理论。当前一些学者也提出了时间效应理论和冲击地压与突出的统一失稳理论等。近年来,现代数学中的分叉理论和混沌动力学也开始用于冲击矿压的研究,这些理论既反映出矿震、岩爆、冲击地压等煤岩动力灾害发生前对初始条件的依赖性,同时也具有在表现形式上的随机性和无序性,因此很好地吻合灾害随机性、非线性的特点。

1.3.2 国内外煤与瓦斯突出机理研究现状

国内外学者对煤与瓦斯突出的研究得出了一些比较有代表性的假说和机理,归纳起来主要有瓦斯主导作用说、地应力主导作用说、综合作用假说^[16-18]、固流耦合失稳理论、“球壳失稳”理论、流变假说和黏滑机理等。

(1) 瓦斯主导作用说

苏联贝可夫、沙留金和英国的威廉姆认为煤层内存在储存有大量高压瓦斯的“瓦斯包”,一旦采掘活动接近这些“瓦斯包”时,煤体在高压瓦斯作用下发生突出。德国的鲁夫等提出的“粉煤带说”认为,地应力和地质构造会将煤破碎成粉状,由于强度低,在采掘等外力扰动下粉煤即使在较低的瓦斯压力作用下也将发生突出。苏联的克里切夫斯基等人提出的“煤孔隙结构不均匀说”认为煤体结构导致其透气性变化分布不均,在这些变化较大区域瓦斯压力较大,当采掘活动接近这些区域时,在高压瓦斯作用下有可能发生突出。苏联的尼柯林等提出的“瓦斯膨胀应力假说”认为煤层中存在瓦斯含量增高带,在这些增高区域煤体膨胀和煤层应力增高,同时该处煤层处在高的应力状态下,煤体透气性非常低,当巷道掘进时,瞬时应力急剧降低而引发突出。德国的克歇尔等提出了“瓦斯解吸说”,该假说认为在