

大同矿区“三硬”煤层 冲击地压发生机理研究

王旭宏 著

太原理工大学阳泉学院学术著作出版基金资助

编号: YXYZ 2013001

大同矿区“三硬”煤层冲击 地压发生机理研究

王旭宏 著

煤炭工业出版社

·北京·

图书在版编目 (CIP) 数据

大同矿区“三硬”煤层冲击地压发生机理研究/王旭宏
著. --北京:煤炭工业出版社, 2013

ISBN 978 - 7 - 5020 - 4340 - 7

I. ①大… II. ①王… III. ①矿山压力—冲击地压—
发生机制—研究—大同市 IV. ①TD324

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 231561 号

煤炭工业出版社 出版
(北京市朝阳区芍药居 35 号 100029)

网址: www.cciph.com.cn
北京房山宏伟印刷厂 印刷
新华书店北京发行所 发行

*

开本 850mm × 1168mm^{1/32} 印张 5^{3/4}

字数 141 千字 印数 1—1 000

2013 年 10 月第 1 版 2013 年 10 月第 1 次印刷

社内编号 7168 定价 18.00 元

版权所有 违者必究

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,本社负责调换

前 言

冲击地压是井下围岩（煤或岩石）突然破坏，引起剧烈震动并伴有大量煤（岩）块抛出的一种矿压显现形式，是一种严重威胁煤矿安全生产的动力灾害。冲击地压具有突发性、瞬时震动性和巨大破坏性等显现特征。由于冲击地压的巨大危害性，其研究意义不言而喻。

冲击地压是一种特殊的矿压显现形式，由于其形成机理复杂，影响因素众多，显现形式多样，造成后果严重，长期以来一直受到国内外岩石力学理论与工程领域的广泛重视，也是煤矿井工开采领域研究的热点及难点问题之一。目前，冲击地压的研究主要集中在3个方面：冲击地压发生机理，冲击地压危险性评价、监测与预测预报技术，以及冲击地压防治。长期的实践表明，要对冲击地压进行有效的预防和治理，首先要对冲击地压产生机理存在清晰的认识，只有掌握了事物的本质，才能摸清事物的发展变化规律，才能针对不利因素采取准确、有效的措施。

大同矿区顶、底板及煤层都坚硬，是我国典型的“三硬”煤层条件的矿区。目前，冲击地压已成为困扰大同矿区安全、高效生产的瓶颈之一，而对这种条件下冲击地压发生机理的研究却鲜见报道。为了保证矿井的安全生产，保护矿井工作人员的生命安全，迫切需要对“三硬”煤层条件下冲击地压发生的机理进行研究，采取正确的预测预报措施，制定相应的监测、控制措施，减少危害性冲击地压的发生，降低冲击地压的危害程度。

本书在总结已有研究成果的基础之上，结合大同矿区的实际情况，开展了现场调研、冲击地压影响因素分析、冲击倾向性测定与研究、地应力测定与分析、数值模拟等相关工作，系统研究

了“三硬”煤层条件下冲击地压发生的机理，为“三硬”煤层条件下冲击地压现象的控制与防治提供理论基础。主要内容包括：

(1) 大同矿区煤层和顶、底板冲击倾向性鉴定及研究。对大同矿区忻州窑矿、同家梁矿、煤峪口矿的煤层及顶、底板进行了物理力学性质测定和冲击倾向性判定，并对现行的冲击倾向性鉴定指标进行了研究，提出了新的冲击倾向性判定指数——剩余能量释放速度指数。

(2) 地应力测量及其对冲击地压影响的研究。采用空心包体应变计的方法现场测量地应力。测定结果表明，大同矿区水平构造应力较大，水平构造应力占主导地位。通过数值模拟，分析了构造应力对产生冲击地压的影响规律，为巷道合理的开拓布置提供了理论依据。

(3) 大同矿区冲击地压的显现特征及影响因素研究。大同矿区冲击地压除了具有冲击地压的一般特征（突发性、多样性、复杂性、破坏性）外，还带有鲜明的大同特色，即三硬、冲击地压显现地点埋深较浅、下分层开采发生冲击大于上分层开采。根据大同矿区冲击地压显现特征，将大同矿区冲击地压分为两帮煤层冲击、底板冲击、两帮及底板冲击、小块状弹射4种基本类型。冲击地压的影响因素主要包括自然地质条件、开采技术条件两大方面。

(4) 采准巷道两帮冲击发生机理的研究。引起大同矿区采准巷道两帮冲击的主要原因是采煤方法、煤体应力和支护强度及采动影响。在“三硬”条件下，随着采空区面积的不断扩大，在巷道周围的煤柱上形成很高的支承压力，造成对煤层的夹持作用，顶板的震动与反弹使煤壁与顶板之间形成离层。通过建立数学力学模型与应用数值模拟，研究了煤壁整体推出型冲击地压发生机理，找出了冲击发生的条件和规律。

(5) 采准巷道底板冲击发生机理的研究。用关键层理论分

析了坚硬底板冲击现象,找出了其影响因素。通过数值模拟分析,认为随着巷道宽度的增加,水平拉应力最大值向底板深部发展,将引起底板中的关键层突然断裂,最终导致冲击地压的发生,为防治底板冲击奠定了理论基础。

(6) 冲击地压综合防治措施的研究。根据大同矿区“三硬”煤层冲击地压规律既有冲击地压发生的一般规律,又有其特殊性的特点,要采用一般防治措施和特殊防治措施相结合的综合防治措施。一般防治措施包括有冲击倾向性煤层开采设计原则、合理煤柱尺寸的确定、煤层注水和卸压措施等。特殊防治措施有坚硬顶板处理技术、防治巷道两帮冲击的措施等。

本书的研究内容得到了山西省高校科技研究开发项目基金的资助,研究过程中大同煤业集团技术中心、生产部、煤峪口矿、同家梁矿和忻州窑矿都给予了大量的技术支持和帮助,在此,谨向有关部门及人员表示衷心感谢。

本书是在作者的博士论文以及近年来的研究工作基础上完成的。期间得到了导师康立勋教授以及杨双锁教授、翟英达教授等的悉心指导。值此书出版之际,谨向导师及各位专家学者致以崇高的敬意和诚挚的感谢。写作中参阅了大量的文献资料,谨向有关作者表示由衷的谢意。

本书由“太原理工大学阳泉学院学术著作出版基金”资助出版,在此深表感谢。

受诸多因素的影响,书中不当之处在所难免,敬请读者不吝指正。

作者

2018年9月

目 次

1 绪论	1
1.1 冲击地压的危害及特点	1
1.2 冲击地压的分类	2
1.3 国内外冲击地压概述	3
1.4 国内外冲击地压研究现状	5
2 煤岩层冲击倾向性试验鉴定与研究	18
2.1 试验内容	18
2.2 试验方法	18
2.3 试验结果及分析	22
2.4 关于冲击倾向性鉴定方法的研究	29
3 地应力测量及其对冲击地压的影响	36
3.1 地应力测量的步骤和基本原理	36
3.2 现场地应力解除试验及应变测量结果	42
3.3 温度标定试验及其结果	48
3.4 围压率定试验及其结果	49
3.5 地应力计算结果	53
3.6 地质构造应力分析	55
3.7 地应力对冲击地压的影响	59
4 大同矿区冲击地压的显现规律及影响因素	77
4.1 大同矿区冲击地压的显现特征及规律	77

4.2	冲击地压的类型	79
4.3	大同矿区冲击地压的影响因素分析	81
5	大同矿区冲击地压的机理	90
5.1	采准巷道两帮冲击现象的分析	90
5.2	煤壁与顶板之间形成离层现象的分析	92
5.3	煤壁整体向外推移机理的研究	94
5.4	底板冲击机理的研究	133
5.5	大同矿区冲击地压机理	144
6	大同矿区冲击地压防治技术	145
6.1	大同矿区冲击地压一般防治措施	145
6.2	大同矿区冲击地压特殊防治措施	153
7	主要结论	164
	参考文献	166

1 绪 论

冲击地压是煤矿重大动力灾害之一。大同矿区顶、底板及煤层都坚硬，是我国典型的“三硬”煤层条件的矿区。目前，冲击地压已成为困扰大同矿区安全、高效生产的瓶颈之一。本书在总结已有研究成果的基础上，结合大同矿区的实际情况，系统研究了“三硬”煤层条件下冲击地压发生的机理，为“三硬”煤层条件下冲击地压现象的控制与防治提供理论基础。

1.1 冲击地压的危害及特点

冲击地压是井下围岩（煤或岩石）突然破坏，引起剧烈震动并伴有大量煤（岩）块抛出的一种矿压显现形式，是一种严重威胁煤矿安全生产的动力灾害。冲击产生的动力将煤岩抛向巷道，同时发出强烈声响，造成煤岩体震动和煤岩体破坏、支架与设备损坏、人员伤亡、部分巷道垮落破坏等，同时还会引起或诱发其他矿井灾害，尤其是瓦斯与煤尘爆炸、火灾、水灾等，干扰通风系统，严重时造成地面震动，建筑物破坏。因此，冲击地压是煤矿重大动力灾害之一。

冲击地压具有突发性、瞬时震动性、巨大的破坏性、复杂性等显现特征。

(1) 突发性。冲击地压一般没有明显的宏观前兆而突然发生，很难事先准确确定发生的时间、地点、强度。

(2) 瞬时震动性。冲击地压发生的过程急剧而短暂，像爆炸一样瞬间产生巨大的声响和强烈的震动，一般震动时间不超过几十秒。

(3) 巨大的破坏性。冲击地压发生时，顶板可能有瞬间明

显下沉,但一般不冒落,有时底板突然开裂鼓起,甚至接顶,通常有大量煤块,甚至上百立方米的煤体突然破碎并从煤壁抛出,堵塞巷道,破坏支架,常常造成惨重的人员伤亡和巨大的生产损失。

(4) 复杂性。在自然地质条件上,除褐煤外的各煤种,采深为 200 ~ 1000 m,地质构造从简单到复杂,煤层厚度从薄层到特厚层,倾角从水平到急斜,顶板包括砂岩、灰岩、油母页岩等,都发生过冲击地压;在采煤方法和采煤工艺等技术条件方面,不论水采、炮采、普采或是综采,采空区处理采用全部垮落法或是水力充填法,是长壁、短壁、房柱式开采或是柱式开采,都发生过冲击地压,只是无煤柱长壁开采法冲击次数较少。

1.2 冲击地压的分类

冲击地压可根据原岩(煤)体的应力状态、冲击的显现强度、震级强度和抛出的煤量、发生的地点和位置进行分类。

1.2.1 根据原岩(煤)体的应力状态分类

(1) 重力应力型冲击地压:主要受重力作用,没有或只有极小构造应力影响的条件下引起的冲击地压,如枣庄、抚顺、开滦等矿区发生的冲击地压。

(2) 构造应力型冲击地压:主要受构造应力(构造应力远远超过岩层自重应力)的作用引起的冲击地压,如北票矿务局和天池煤矿等发生的冲击地压。

(3) 中间型或重力~构造型冲击地压:主要受重力和构造应力的共同作用引起的冲击地压。

1.2.2 根据冲击的显现强度分类

(1) 弹射:一些单个碎块从处于高应力状态下的煤或岩体上射落,并伴有强烈声响,属于微冲击现象。

(2) 矿震:是煤、岩内部的冲击地压,即深部的煤或岩体发生破坏,煤、岩并不向已采空间抛出,只有片帮或塌落现象,

但煤或岩体产生明显震动,伴有巨大声响,有时产生煤尘。较弱的矿震称为微震,也称为煤炮。

(3) 弱冲击:煤或岩石向已采空间抛出,但破坏性不是很大,对支架、机器、设备基本上没有损坏;围岩产生震动,一般震级在 2.2 级以下,伴有很大声响;产生煤尘,在瓦斯煤层中可能有大量瓦斯涌出。

(4) 强冲击:部分煤或岩石急剧破碎,向已采空间抛出,出现支架折损、设备移动、围岩震动,震级在 2.3 级以上,伴有巨大声响,形成大量煤尘和产生冲击波。

1.2.3 根据震级强度和抛出的煤量分类

(1) 轻微冲击:抛出煤量在 10 t 以下,震级在 1 级以下的冲击地压。

(2) 中等冲击:抛出煤量为 10 ~ 50 t,震级在 1 ~ 2 级的冲击地压。

(3) 强烈冲击:抛出煤量在 50 t 以上,震级在 2 级以上的冲击地压。

一般面波震级 $M_s = 1$ 时,矿区附近部分居民有震感; $M_s = 2$ 时,对井上、下有不同程度的破坏; $M_s > 2$ 时,地面建筑物将出现明显的裂缝。

1.2.4 根据发生的地点和位置分类

(1) 煤体冲击:发生在煤体内,根据冲击深度、强度又分为表面、浅部、深部冲击。

(2) 围岩冲击:发生在顶底板岩层内,根据位置又分为顶板、底板冲击。

1.3 国内外冲击地压概述

冲击地压在 1738 年首次发生于英国南史塔福煤田。200 多年来,其危害几乎遍布世界各个采矿国家。中国、德国、南非、苏联、波兰、捷克、加拿大、日本、美国等 20 多个国家和地区

的煤矿均受到冲击地压的威胁,世界主要产煤国家记录到的煤岩冲击灾害已有3万多起。例如,澳大利亚早在1917年Kalgoorlie区域就曾发生过冲击灾害,美国最早记录的冲击地压发生在1930年爱达荷州Coeur d' Alene矿。长期以来,冲击地压问题引起了世界各国政府和学者的高度重视,自1915年南非成立矿山冲击委员会以来,捷克、俄罗斯、波兰、德国、美国等相继成立了研究冲击地压的专门机构,对冲击地压发生机理、预测预报、防治等进行了专业研究,并取得了一系列的研究成果。

我国自1933年抚顺胜利矿发生首次冲击地压以来,徐州、北京、大同、义马、平顶山、兖州、枣庄、新汶、开滦、华亭、抚顺、北票、阜新、七台河、鹤岗等矿区都相继发生过冲击地压。1949年以前,我国发生冲击地压的矿井只有2个,20世纪50年代增加为7个,60年代为12个,70年代为21个,近年来随着开采深度的增加以及开采规模的扩大,全国冲击地压矿井数和总的冲击次数呈逐渐增大的趋势。原来没有发生过冲击地压的矿井,现在也开始发生;原来发生过冲击地压的矿井,现在发生的强度越来越大,发生的次数也越来越多。我国自20世纪60年代开始研究冲击地压,近年来冲击地压灾害的防治也被列入国家科技攻关项目,对其重点进行了研究,并在冲击地压发生机理、预测预报、防治方面取得了一定成绩,有效地控制了煤矿动力灾害的发生。

大同矿区顶、底板及煤层都较为坚硬,是我国典型的“三硬”煤层条件的矿区。大同煤矿集团公司本部有16对矿井,从20世纪60年代就有冲击地压事故的记载;80年代发生趋于频繁、严重,曾造成上千米巷道破坏,并有人伤亡;90年代比较稳定,偶有发生,但未造成大的破坏;进入21世纪,时有发生,并有日趋严重之势,主要发生在煤峪口矿、同家梁矿、四老沟矿、忻州窑矿,尤其是忻州窑矿,曾造成多个工作面停采,严重影响了矿山的安全生产,威胁了矿井工作人员的生命安全。目

前, 冲击地压已成为困扰大同矿区安全、高效生产的瓶颈之一。

1.4 国内外冲击地压研究现状

目前, 国内外岩石力学和采矿工程界对于冲击地压问题的研究, 主要集中在 3 个方向上: 一是冲击地压发生机理的研究; 二是冲击地压危险性评价、监测与预测预报的研究; 三是冲击地压防治措施的研究。

1.4.1 冲击地压发生机理的研究

冲击地压发生机理十分复杂, 各国学者在对冲击地压现场调查及实验室研究的基础上, 从不同角度相继提出了一系列的重要理论, 概括起来主要有强度理论、刚度理论、能量理论、冲击倾向性理论、“三准则”机理模型、失稳理论、突变理论、分形理论、“三因素”理论等。

1. 强度理论

强度理论认为: 井巷和采场周围产生应力集中, 当应力达到煤岩体的强度极限时, 煤岩体就会突然发生破裂, 形成冲击地压。近代冲击地压的强度理论主要着眼于“矿体—围岩”这一力学系统的极限平衡条件, 具有代表性的是煤体夹持理论, 但该理论与实际结果还存在一定的差距。在研究岩爆问题时, 通过对大量工程实例的分析研究, 还提出了岩爆的拉伸断裂机理和剪切破裂判据。祝捷、姜耀东等在 Lippmann 煤层平动突出模型的基础上, 应用 Hoek - Brown 强度准则作为屈服判据, 研究了水平煤层从巷道两帮突出过程中的应力分布规律, 为冲击地压的预测预报提供了理论依据。

强度理论具有简单、直观、便于应用的特点。井巷和采场周围煤岩体经常出现局部应力超过其强度极限的现象, 但即使是具有强烈冲击倾向性的煤层在多数情况下都能平稳进入强度后变形阶段, 只在少数情况下才发生突然破裂形成冲击地压, 并且强度理论只能判断煤岩体是否破裂, 不能回答破裂的形式是静态破裂

还是动态破裂。它是冲击地压发生的必要条件，而不是充分条件。

2. 刚度理论

刚度理论是 Cook 等人根据刚性压力机理论提出来的。20 世纪 70 年代，布莱克将此理论完善并用于美国的加利纳矿的冲击地压问题。该理论认为，矿山结构（矿体）的刚度大于矿山负荷系统（围岩）的刚度是产生冲击地压的必要条件，经过 Salaman 和 Brady 等发展到分析计算多个矿柱的冲击地压问题。

刚度理论用于判别煤柱稳定性具有简单、直观的特点，但这一理论只在矿柱冲击情况下较适用，在巷道或采场等其他冲击情况下较难应用。如何确定矿山结构刚度是否达到负载系统峰值强度后的刚度是一个难题，它不能由试验确定，目前的数值模拟结果还存在偏差。另外，刚度理论没有正确反映煤体本身在煤体 - 围岩系统中不但能积聚能量，而且还可以释放能量这一基本事实。此外，矿山结构的刚度在概念上并不十分明确，而且矿山结构达到峰值强度后的刚度难于确定。

3. 能量理论

能量理论认为，当矿体 - 围岩系统在其力学平衡状态破坏时所释放的能量大于所消耗的能量时，便发生冲击地压。佩图霍夫认为，冲击能量由被破坏的煤（岩）积蓄的能量和邻接于煤柱或煤（岩）边缘的弹性变形的能量组成，即从外部流入的能量赋予冲击地压以动力，并对产生冲击地压的能量结构进行了分析。剩余能量理论认为，剩余能的存在是围岩动力失稳的力学原因，该理论于 20 世纪 70 年代由美国人提出，其后得到进一步的发展和应用。张当俊等通过对不同采煤方法影响冲击地压发生频率的研究认为，放顶煤开采使煤岩体变形膨胀提前释放围岩内的弹性能，所以在厚煤层开采过程中采用放顶煤开采，可以使冲击地压发生的频率降低或消失。李新元等提出了基于覆岩均布应力和增量应力作用的坚硬顶板初次断裂力学结构模型，首次推导得

出弹性基础梁的能量分布计算公式,分析工作面前方坚硬顶板断裂前后的能量积聚和能量释放分布规律。孙振武等提出了用有限元法分析计算处于弹塑性变形状态受力煤岩体的弹性比能分布的理论与方法,以及产生冲击地压的弹性能判据。周光文等通过FLAC^{3D}数值计算,分析了采场支承压力的分布、岩层结构的运动、弹性应变能的积聚、释放特征和围岩位移、速度的突出特征,初步提出用采场能量密度因子来预测煤岩冲击地压的发生。潘俊锋等通过研究认为,支承压力集中程度仍然超过塑性区煤体强度极限,采空区以暂时稳定梁或者其他形式积聚了大量的弹性能量的瞬间释放是综放工作面冲击地压时有发生的原因。武玉梁等提出了煤岩体发生冲击效应的区域能量方程,从能量的观点对煤岩的力学性质进行了多方面的探究,建立了煤岩损伤本构方程。

能量理论从能量耗散的角度解释冲击地压的成因,是冲击地压机理研究中的一大进步。但试验却证明:当煤岩件中的最大主应力超过其单轴抗压强度时,其存储的弹性应变能就能使其本身破碎,甚至形成冲击。因此,不需要在冲击煤岩体外去寻找其他的能量源进行分析,只分析发生冲击的煤岩体本身所耗散的弹性应变能即可。该理论并没有说明矿体-围岩系统平衡状态的性质及其破裂条件,特别是围岩释放能量的条件,因此缺乏必要的判据。

4. 冲击倾向性理论

Bieniawski 等通过室内煤的应力应变试验结果,同时结合现场调查发现,相同地质和开采条件下,煤层是否发生冲击地压有很大差异,他们认为是煤岩固有力学性质差异造成的,将煤岩的这种固有性质称为冲击倾向性,并提出了弹性能指数、冲击能指数两个冲击倾向指标。冲击倾向性是煤岩介质产生冲击破裂的固有能力或属性,是冲击地压发生的必要条件。我国学者在这方面做了大量的工作,在试验方法、数据处理、综合评判等研究中取

得了一些进展。2000 年,国家煤炭工业局发布了《煤层冲击倾向性分类及指数的测定方法》、《岩石冲击倾向性分类及指数的测定方法》。冲击倾向理论的另一重要方面是顶板冲击倾向性研究,包括顶板弯曲能指标、长壁开采条件下顶板断裂引起的煤层冲击等。姜耀东等研究了煤体细观结构参数与冲击倾向性的内在关系,以及冲击倾向性煤体内裂纹扩展、分叉、贯通过程。

用一组冲击倾向性指标来评价煤岩体本身的冲击危险具有实际意义。然而,冲击地压的发生与采掘和地质环境等有关,而且实际的煤岩物理力学性质随地质开采条件的不同而有很大的差异,实验室的测定结果往往不能代表各种环境下的煤岩性质,这也给冲击倾向理论的应用带来局限性。

5. “三准则”机理模型

我国学者李玉生等在总结强度理论、能量理论、冲击倾向性理论的基础上,考虑到冲击地压发生的充分必要条件,将不同的判据有机地组合到一起,提出了冲击地压的“三准则”机理模型。

$$\text{强度准则: } \frac{\sigma(f_1 \cdot f_2 \cdot f_3 \cdot f_4 \cdot f_5)}{\sigma^*} \geq 1 \quad (1-1)$$

$$\text{能量准则: } \frac{\alpha \left(\frac{dW_E}{dt} \right) + \beta \left(\frac{dW_S}{dt} \right)}{\frac{dW_D}{dt}} \geq 1 \quad (1-2)$$

$$\text{冲击倾向性准则: } \frac{K_E}{K_E^*} \geq 1 \quad (1-3)$$

式中 f_1 ——采掘活动造成的附加应力, MPa;

f_2 ——地质构造应力, MPa;

f_3 ——岩层自重应力, MPa;

f_4 ——岩体内的其他应力, MPa;

f_5 ——煤体围岩交界处的应力, MPa;

W_E ——围岩系统储存的变形能, J;

α ——围岩系统能量释放有效系数;

W_S ——煤体储存的变形能, J;

β ——煤体能量释放有效系数;

W_D ——消耗于煤体与围岩交界处和煤体破坏阻力的能量, J;

K_E ——煤体或围岩冲击倾向度指标;

K_E^* ——冲击倾向指标的临界值;

σ^* ——煤体围岩系统的极限强度值, MPa;

σ ——煤体围岩系统的强度值, MPa;

t ——煤体围岩系统从达到极限强度到完全破坏的时间, s。

该理论认为, 强度准则是煤体的破裂准则, 而能量准则、冲击倾向性准则是突然破裂准则。3 个准则若同时满足, 才是发生冲击地压的充分必要条件。该理论没有给出 3 个准则的具体形式, 且需要确定的参数太多, 使用起来不方便。

6. 失稳理论

Neville Cook 在 20 世纪 60 年代将稳定性理论应用于冲击地压问题的研究。1979 年, Salamon、Petukhov 等发现煤岩进入峰值强度后, 进一步增加应变, 相对应的应力反而下降, 出现应变软化; 根据按经典塑性力学的 Drucker 准则, 提出了以材料稳定性作为煤岩失稳及冲击地压的发生准则。1983 年, Zubelewicz 等将冲击地压视为动力非稳定问题, 并采用 Drucker 准则作为失稳判据, 对冲击地压进行了数值模拟。1987 年, Lippmann 提出了考虑煤层与顶、底板之间发生层间相对滑动的冲击地压失稳模型。随后, Lippmann 在一系列的研究工作中把煤层上、下岩层简化为刚性体或弹性体, 假设一个扰动作用于受载荷的煤层, 使煤层与顶板岩层产生相对滑动, 并向巷道产生一个微小位移, 当载荷达到临界值时, 静力学解不存在, 这一扰动就可能引起冲击地压, 从而形成将冲击地压处理为弹塑性极限静力平衡失稳现象的“初等理论”。但 Lippmann 的研究是针对煤矿中较少见的薄