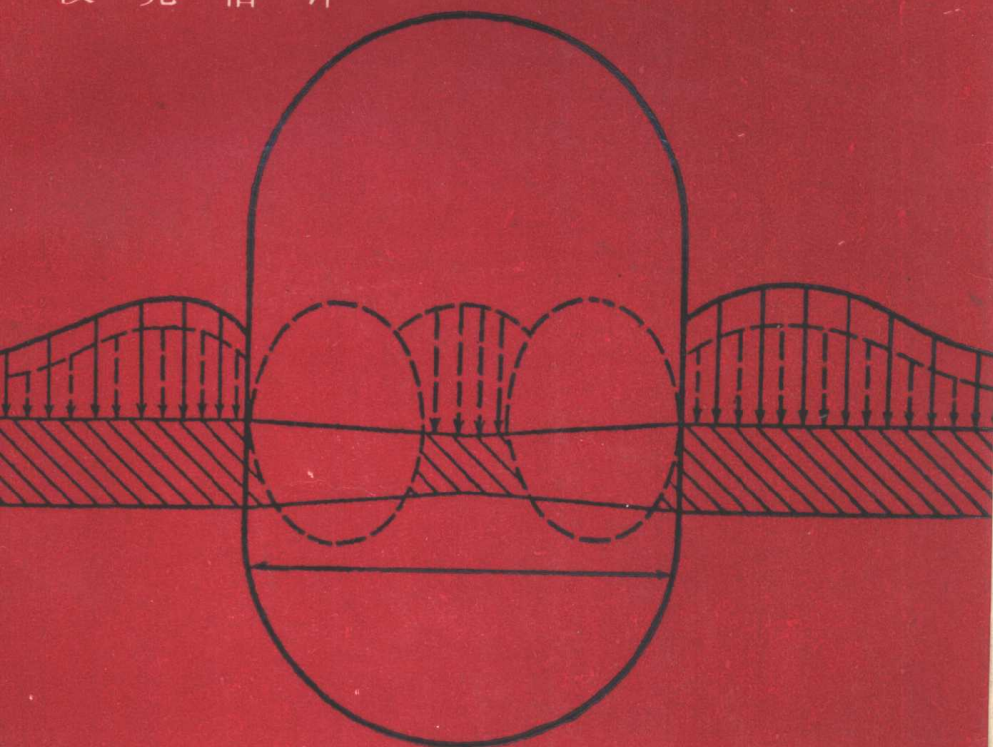


冲击地压和突出的力学计算方法

[俄]И. М. 佩图霍夫 等著

段 克 信 译



煤炭工业出版社

冲击地压和突出的力学计算方法

〔俄〕И. М. 佩图霍夫 等著

段克信 译

煤炭工业出版社

(京) 新登字042号

图书在版编目 (CIP) 数据

冲击地压和突出的力学计算方法/ (俄) 佩图霍夫
(Петухов, И. М.) 等著. —北京: 煤炭工业出版社,
1994

ISBN 7-5020-1036-X

I. 冲… II. 佩… III. 冲击地压煤层-地质力学-研究-
俄罗斯 IV. TD 713

中国版本图书馆CIP数据核字 (94) 第10629号

И. М. Пемухов, А. М. Линьков, В. С. Сизоров,
В. В. Зубков, И. А. Зубкова, В. П. Кузнецов,
Н. В. Кромов, А. А. Гребеншиков, Е. Д. Хоэырев,
М. А. Тлеужанов, М. Г. Мусмафин
**РАСЧЕТНЫЕ МЕТОДЫ В МЕХАНИКЕ ГОРНЫХ
УДАРОВ И ВЫБРОСОВ**

Москва “Недра” 1992

*

冲击地压和突出的力学计算方法

〔俄〕И. М. 佩图霍夫 等著

段克信 译

责任编辑: 黄朝阳

*

煤炭工业出版社 出版

(北京安定门外和平里北街21号)

煤炭工业出版社印刷厂 印刷

新华书店北京发行所 发行

*

开本 787×1092 mm^{1/32} 印张 9^{1/2}

字数 207 千字 印数 1—450

1994年12月第1版 1994年12月第1次印刷

书号 3804 定价 12.00 元

内 容 提 要

本书在总结俄罗斯国家地质力学与测量科学研究院几十年来在冲击地压和煤与瓦斯突出防治领域研究成果的基础上，首次综合阐述了未扰动矿山岩体和复杂开采条件下的应力计算方法；论述了冲击地压和煤与瓦斯突出动力现象的稳定性和能量平衡的计算，煤柱和煤层边缘支承压力计算及煤柱留设原则和方法；介绍了保护区、矿山压力增高区的构成和计算，矿山岩体渗透性计算，开采保护层、卸载区瓦斯抽放和区域煤层注水的参数计算和典型布置方案。

本书可供煤矿、金属矿等矿山及科研、设计部门的工程技术人员阅读，也可供矿业院校师生参考。

译 者 的 话

冲击地压和煤（岩石）与瓦斯突出是矿井具有破坏性后果的突发灾害，是一种力学过程十分复杂的动力现象。它的力学计算不仅涉及到运动学、静力学、动力学以及能量守恒的基本定律，而且与地下岩体的非均质性、原岩应力场和采掘空间几何条件的多变性密切相关。

我国属世界上冲击地压和煤与瓦斯突出严重的国家之一；多年来，通过长期生产实践、试验研究和借鉴国外先进经验，对矿井动力现象机理、显现规律和预测预防方法的探索取得了明显进展，防治工作亦有显著成效。然而，就我国目前矿山事故的实际状况而言，煤与瓦斯突出和冲击地压仍是矿井主要灾害之一，一些理论和实践问题急待进一步解决。为了促进我国矿井动力现象防治技术和研究的深入发展，保证安全有效的开采地下矿藏，特翻译本书供读者参考。

本书概括了俄罗斯国家地质力学与测量科学研究院几十年来在冲击地压和煤与瓦斯突出防治领域的研究成果，首次综合阐述了未扰动岩体和复杂开采条件下的应力计算方法。它具有理论密切联系实际、实用性强和数值模拟与解析及统计分析相结合的特点。对大部分方法的论述采用了便于工程技术人员应用的方式，叙述附以必要的诺模图、表格、曲线和说明。

本书共分10章，主要包含以下几方面的内容。

首先论述了未扰动断块岩体现代构造应力状态和采空区

周围采动岩体应力状态计算的边界元数值方法，着重分析了边值问题，给出了开采单一煤层和煤层群时采掘空间周围岩体的应力分布。

其次论述了冲击地压和煤与瓦斯突出的能量-力理论及统一理论，围岩参与冲击和瓦斯参与突出的重要作用，煤层-围岩系统的变形特性、强度性质、失稳条件和能量平衡，煤柱和煤层边缘支承压力计算方法，煤柱留设原则和方法。

第三叙述了保护区、矿山压力增高区的构成和计算，矿山岩体渗透性计算，开采保护层、卸载区瓦斯抽放和区域煤层注水的参数计算和典型布置方案。

此外，书中还列出了几个主要应用程序的说明。

译者相信，本书的翻译出版，对我国从事矿山冲击地压、煤（岩）与瓦斯突出工作的工程技术人员会有所帮助。

由于译者水平所限，书中不当之处，请读者批评指正。

目 录

译者的话

1. 冲击地压和突出问题概论	1
1.1 问题现状	1
1.2 冲击地压和突出的实质	4
1.3 动力现象分类	8
1.4 预测和预防动力现象及瓦斯动力现象的基本原则	10
2. 矿山未扰动岩体的应力状态	13
2.1 对地壳某些区域主应力值的评估	13
2.2 用边界元法计算断块体的应力	19
2.3 在矿区构造断裂条件下构造渗透预测	25
3. 计算采空区周围岩体中的应力	32
3.1 基本前提和定义	32
3.2 边界条件问题	37
3.3 开采单一煤层时应力计算 (平面问题)	41
3.4 开采单一煤层时应力计算 (空间问题)	43
3.5 开采煤层群时应力计算 (平面问题)	52
3.6 开采煤层群时应力计算 (空间问题)	65
4. 开采煤层 (矿层) 层面上支承压力的计算	76
4.1 支承压力计算	76
4.2 矿山技术因素对支承压力的影响	87
5. 不同用途的煤柱计算	92
5.1 煤柱发生冲击地压的条件	92
5.2 煤柱工作状态和应用方法	93
5.3 确定“煤柱-围岩”统一系统特性	93

5.4 储备系数选择和煤柱参数修正与优化	103
5.5 煤柱工作状态和冲击危险性分析	104
5.6 对宽煤柱及考虑煤层边缘部分弱化区的计算	110
5.7 考虑冲击危险性的煤柱计算方法	114

6. 动力现象和瓦斯动力现象的稳定性和能量

平衡的计算	131
6.1 动力现象和瓦斯动力现象的能量平衡	131
6.2 评价稳定性时极限后变形曲线计算	139
6.3 动力现象和瓦斯动力现象危险性评价	153
6.4 破坏波	156
6.5 倾向动力折断岩层的稳定性和能量平衡计算	162
6.6 冲击时释放能量的计算	167

7. 保护区的构成和计算

7.1 保护标准和卸载作用	170
7.2 开采单一煤层时保护区的计算	177
7.3 开采几个保护层时保护区计算	182
7.4 保护区计算和构成示例	184

8. 矿山压力增高区的计算和构成

8.1 矿山地质和技术因素对矿山压力增高区尺寸和 轮廓的影响	186
8.2 开采单一煤层时矿山压力增高区的计算和构成	189
8.3 开采煤层群时矿山压力增高区的计算和构成	194
8.4 矿山压力增高区尺寸计算示例	201

9. 瓦斯抽放和煤层注水的渗透性计算

9.1 渗透介质模型	203
9.2 沼气含量和含水率计算	210
9.3 渗透性计算	212
9.4 瓦斯抽放计算图	221
9.5 煤层注水计算图	233

10. 岩体应力状态和瓦斯动力状态的控制	238
10.1 超前开采保护层	238
10.2 在卸载区突出危险和富含瓦斯煤层的瓦斯抽放	243
10.3 冲击和突出危险煤层区域注水	246
10.4 采矿工程设计和施工时地质力学状态的预测 分析.....	248
10.5 采矿工程远景规划	253
10.6 应用控制应力和瓦斯动力状态地质力学图的技 术经济分析	258
附录.....	268
开采煤层群时平面图上任意形状采空区周围岩体应力计 算说明 (“PLANES”程序)	268
开采煤层群时空区周围岩体应力计算说明 (平面应变) (“Shvarc”和BIE程序)	271
煤柱系统支撑能力和稳定性计算说明 (“LIMINGI” 程序)	283
断块岩体应力计算说明 (“BLOCKC”程序).....	285
软化岩体中圆形巷道(孔)周围应力-应变状态 计算说明 (“RING”程序)	288
参考文献	293

1. 冲击地压和突出问题概论

1.1 问题现状

约200年前就发生的矿山冲击地压和煤、岩石与瓦斯突出，至今仍是世界上许多矿区的现实问题。在波兰、原西德、印度、法国、原捷克斯洛伐克和南非等国矿井开采煤层、金属矿床和非金属矿床时，都有数量可观的冲击地压和突出事故发生。

40年代在基泽尔煤田发生了原苏联煤矿的第一次冲击地压。以后，对于所有主要的煤矿、金属及非金属矿区有冲击地压危险矿层的开采就成了特殊的问题。在基泽尔、库兹涅茨、伯绍拉、波里马拉煤田和特克布里-绍拉、苏拉勃、苏留克金、克泽尔-凯伊金属矿及非金属矿矿田的194个矿井中，总计有847个煤层具有冲击地压或突出危险。其中100个矿层同时具有冲击地压和煤与瓦斯突出危险。

煤矿共发生了750次有严重后果的冲击地压（图1.1），其中，大多数发生在50、60年代。

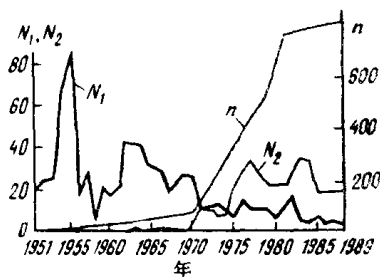


图 1.1 有冲击地压倾向的矿井煤层数 n ，煤矿的冲击地压数 (N_1) 和金属矿的冲击地压数 (N_2)

70年代北乌拉尔铝钽土矿、塔什塔戈尔铁矿、卡里磷灰石矿、十月共生金矿开采深部赋存的金属或非金属矿床时，开始显现冲击地压，共发生了350次冲击地压（图1.1）。有冲击地压倾向的金属矿床和非金属矿床数超过80个。

20世纪初，在原苏联顿巴斯的某些矿井中，发生了首批有记载的煤与瓦斯突出，至今在顿涅茨、库兹涅茨、卡拉干

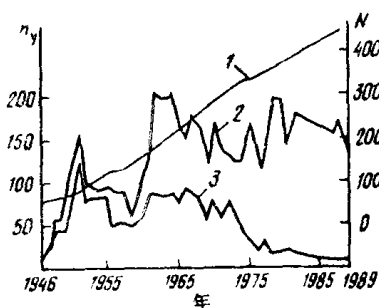


图 1.2 有突出危险的矿井煤层数 N 和煤与瓦斯突出数

1—有突出危险煤层数；2—突出总数，包括爆破诱发的；3—突出数

达、伯绍拉煤矿矿区和远东金属矿及非金属矿矿区记录了约6000次煤与瓦斯突出（图1.2），其中一半以上在震动爆破作业时发生。所有联合企业的200个矿井开采有煤与瓦斯突出危险煤层、突出威胁煤层及开采时需进行预测的危险煤层，煤与瓦斯突出的预防问题对它们是极其

重要的。这些煤层的产量占矿井总产量的五分之一。

顿涅茨矿区的煤与瓦斯突出显现最危险，75%的矿井发生过突出，88%的矿层有煤与瓦斯突出倾向。此外，顿巴斯10个矿井在有突出危险的砂岩中掘进巷道时具有岩石与瓦斯突出危险，爆破作业时这种现象的总数超过了3500次（图1.3）。

有效地解决冲击地压和突出防治问题不仅有经济意义，而且有重大的社会意义。

俄罗斯国家地质力学与测量科学研究院和以 A.A. 斯阔

成斯基 (А.А. Скочинский) 命名的矿业研究院是解决冲击地压与突出的领先研究机构。

近40年来,原苏联进行了广泛地综合研究。在矿井研究和应用了一系列有效地预测、治理冲击地压与突出的方法及手段,深入研究了冲击地压与突出的基本理论。因此,使煤矿的煤、岩石与瓦斯突出数量急剧减少,煤矿中个别几次冲击地压也仅是在违反了预防要求的情况下发生的。在开采金属矿床和非金属矿床的矿井中,冲击地压次数减少了一半多。

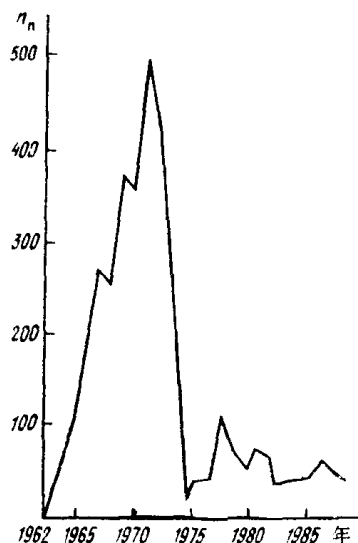


图 1.3 岩石与瓦斯突出数

但是,冲击地压和突出的防治问题依然是迫切的:还应仔细研究煤与瓦斯突出(有的后果严重)的某些情况,金属矿和非金属矿还没有完全彻底地采用足够有效地预防冲击地压的综合措施,它们显现的危险性仍存在,实施防治突出和冲击地压局部措施的工作量仍很繁重,而且随着矿床采深增大,将会变得更加迫切。

在冲击和突出危险矿层进行采矿工作的丰富经验,运用冲击地压理论和突出的能量-力理论的基本规律解决实际矿山问题,有价值地发现地下条件下岩石破坏的规律性,以及

有用于计算矿山岩体应力状态与瓦斯动力状态的方法和程序保证，这一切导致出现了原则上统一地解决深井动力现象与瓦斯动力现象预测预防问题的新方法。50年代初，原全苏矿山地质力学和测量科学研究院就为该方法奠定了基础，它包括在开采矿层、矿层群的各个阶段，研究有目的的控制岩体应力状态和瓦斯状态的方法和手段，以及研究开采有冲击与突出危险煤层的预测预防的方法和手段。

在煤矿田（金属矿田及非金属矿田）开采过程中，同时控制矿山压力和瓦斯压力，不仅可在防治冲击地压和突出时应用，而且也可以解决在更大深度上开采金属及非金属矿床时所产生的其他地质力学问题，这就要求在矿井设计、施工和开采时要考虑矿山岩体的断块结构和自然应力状态。

1.2 冲击地压和突出的实质

为了建立安全有效开采冲击和突出危险矿层的工艺，要有可靠的理论基础。

原苏联经过广泛综合的研究认定，被破坏的煤（岩）体和与之相邻的岩体组成的系统参与了冲击地压的显现。在此基础上深入研究并创立了冲击地压基本理论〔34、37〕。

图1.4所示的岩体力学模型说明，发生冲击地压时，能量从破坏源围岩流入煤体（岩体）。冲击能量 W 由被破坏的煤（岩）积蓄的能量 W_{BH} 和邻接于煤柱或煤（岩）层边缘部分的岩石弹性变形能 W_{BH} 所组成。即是从外部流入的能量（ W_{BH} ）赋予冲击地压以动力。

无论是发生在煤柱或煤体边缘处的冲击地压，还是岩体中的震动，对于其能量平衡的解释，引用的围岩参与冲击地压能量平衡的岩体力学模型都是同样适用的。因为震动显现

的动力特征也是以来自周围岩石的盈余能流为前提条件。岩石在面积 ΔS 上发生剪切破坏时，导致从同面积 ΔS 两边毗连的某部分体积岩石 V 释放能量，即在那里岩体破坏时实现了柔性加载条件。

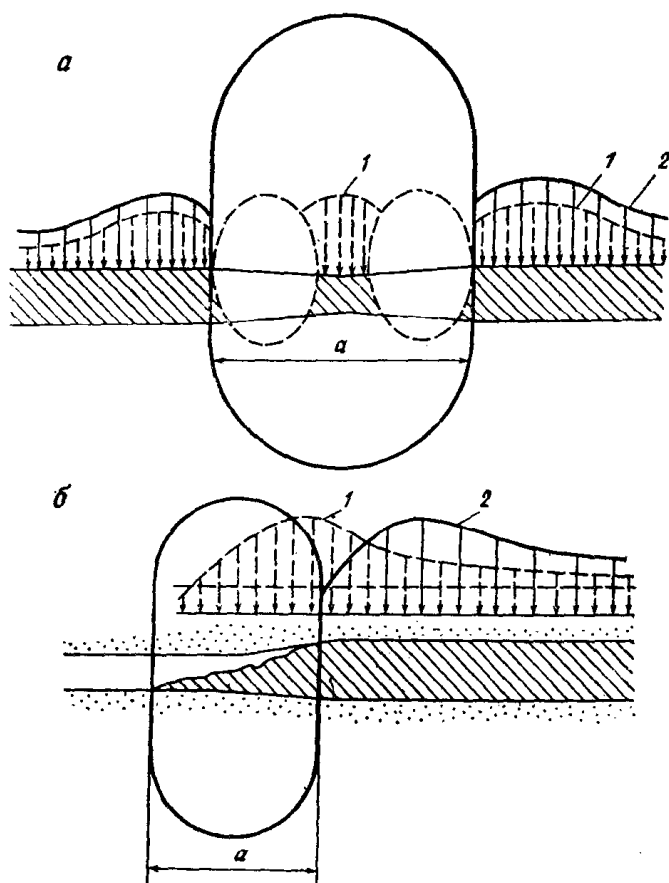


图 1.4 反映在煤柱 (a) 和煤层边缘部分 (b) 围岩参与冲击地压显现

1—冲击地压发生前支承压力和减压区；2—冲击地压发生后支承压力和减压区

由上述，冲击地压是采掘空间①影响区内部分岩体在极限应力状态下破坏的结果，当这部分岩体的应力状态变化速度超过应力松弛速度时发生的②。同时，若外部介质流入能量超过它破坏时可能吸收的能量，就会实现柔性加载条件。无论是在煤柱或岩体边缘发生的冲击地压，还是当断块沿已有或再生弱面滑动时发生的震动型冲击地压，都与这些原理有关。

冲击地压动力指数可为系数：

$$K_{\text{Д}} = W_{\text{BH}} / W_{\text{P}}$$

式中 W_{BH} ——克服受压、剪、拉或它们综合作用的岩石材料的阻力之后，从外部介质流入的能量；

W_{P} ——材料破坏时需要的能量。

$K_{\text{Д}}$ 值可从零变到10或更大。

如果在研究的岩体中开挖采掘空间，冲压地压性质及其能量特性会多种多样，一方面作为储备有一定变形潜能的统一系统，在采矿工作影响下会发生变化，另一方面作为断块系统，每个断块的应力和力学状态取决于它在系统中的空间位置、级别和与毗邻断块相互作用的特征[1]。

在极限应力状态条件下所确定的岩石破坏的规律性，一方面涉及到加载速度和应力松弛速度的关系，另一方面关系到不仅在冲击地压时，而且完全适合在煤、岩与瓦斯突出时实现的从外部流入的能量。后者已在煤、岩石与瓦斯突出的能量-力理论中得到反映[37]。

突出的能量-力理论[37]反映出矿山压力和瓦斯压力参

① 采掘空间泛指巷道和回采工作面——译者。

② 这个定理反映在№337注册发现的定律中。它的发现者是И.М. 佩图霍夫、В.П. 库兹涅佐夫、А.Н. 卓林、А.М. 里尼克、А.С. 波鲁亚尼克和В.В. 塔拉思。

与了突出从准备到显现的所有阶段，从始至终对下列情况作出评价：未扰动岩体、煤体状态，采掘空间附近岩(煤)体状态，突出的能量平衡，稳定性丧失条件，波的传播和瓦斯与煤粉混合物的运动，令人信服地给出预测、预防和控制煤、岩石与瓦斯突出方法的根据。

从准备和显现状况分析，冲击地压和煤与瓦斯突出具有显现特征上的共性和机理上的差别，从研究现象的个性中分离出其共性，这就使关于建立冲击地压和突出的统一理论问题成为可能。这种基本理论首次发表在著作〔37〕中。

建立了统一理论就能够以同一立场进行冲击地压和突出的预测、预防以及安全有效地开采。特别是对于有冲击和突出危险邻近层的个别条件，可以以统一理论为基础，同样看待它们，解决安全开采问题。就此，应高度重视许多煤层有双重危险现象。

如果在储备有一定弹性变形能的断块岩体中开挖采掘空间，特别是进行回采时，就会经常沿着断块边界原始弱面首先发生移动。

具有力学性质和应力不连续分布的断块岩体的动态规律在于，处在煤柱中或应力达到极限应力状态的个别地段的断块岩体，在开采影响下，应力-变形状态和能量都将变化，发生震动型破坏（滑移），产生柔性加载条件。

处于地壳挤压区和剪力区的有益矿床，当受开采影响应力状态改变而解除高应力水平条件时，矿床上发生的岩体震动型变形过程特别强烈。此时，在某一地点岩体震动型变形引起应力重新分布，并在其它地点显现震动。断块岩体发生震动型变形之后，要适应新的应力状态，并力求达到稳定。正如在特克布里-绍拉煤矿和北乌拉尔铝土矿研究所确定的

那样，震能达到 $10^6 \sim 10^9 \text{J}$ ，造成支护不足的采掘空间岩石冒落或引起构造型冲击地压显现。

从这个共同立场出发，下列情况下发生的地震和微震其本质相同，开采赋存很深的坚硬有益矿物（特克布里-绍拉煤矿、北乌拉尔铝土矿和塔什塔戈尔铁矿），建设和施工水工建筑物（克拉斯诺亚尔、沙亚诺-苏申、托克托古里及其它水电站），大爆破，开采液体和气体有益矿床（西西伯利亚、塔塔利亚、库伊北塞夫区等油田）。在所有这些情况下，都是断块岩体在个别地段转入极限应力状态时发生了震动型变形。

这样，由于人类活动在地壳中引起的“工艺地震”属于震动，其中大多数能够发展成构造型冲击地压，使采掘空间及其它地下结构物破坏，许多情况下地面结构物和工程也遭破坏。

必须认真研究各种各样显现的岩体震动和在采掘空间控制岩体震动型变形的重要而有效的预测预报手段，以便为在“工艺地震”显现危险地区有效开采矿床和建筑各种用途构筑物创造条件。

1.3 动力现象分类

从冲击地压本质的理论概念出发，将其详细分为：弹射、微冲击、本意上的冲击地压（破坏性冲击地压）、震动和构造型冲击地压。

弹射——在暴露面岩石（矿石，煤）的脆性破坏，显现形式是各种尺寸的扁平状薄片从岩体边缘部分弹出，并伴有尖利的声响。弹射时破坏岩体体积通常不超过 0.5m^3 。

微冲击——矿柱或岩体边缘部分距暴露面 1m 深岩石（矿