

选集

会议论文

岩体力学

全国矿山

届

第

冶金工业出版社

序 言

随着矿山建设事业的发展, 矿山岩体力学问题日益受到人们的重视。特别在全国许多矿山出现了剧烈的地压活动或边坡失稳问题之后, 进一步促使矿山工程的设计者, 研究者以及现场生产管理人员认真研究解决这一课题。

中国金属学会于一九七九年五月二十二日至二十六日在长沙召开了第一届全国矿山岩体力学学术会议, 以求对这方面的问题进行交流与探讨。会议收到来自全国冶金、水电、铁道以及军工等部门的论文一百余篇。现选择其中三十九篇编成选集出版。

本选集的内容包括: 一般性报告、岩石和岩体的力学性质及强度理论、现场应力应变测量方法与技术、模型试验与有限单元法的应用、地质力学与地表移动问题、喷锚支护原理与测试技术、边坡稳定性的研究, 以及现场测量仪器介绍等部分。

在选编时, 我们尽量考虑到矿山岩体工程问题的迫切需要, 注意反映建国三十年来在这方面研究工作的发展和成就。在内容上, 力求做到理论与实践相结合, 并以解决实践工程问题为重点。

在选题和审编时, 组成了《选集》编辑委员会。成员为: 刘宝琛、于学馥、田良灿、连志升、马光、钟叶猷、李典文、林韵梅、梁兆华、廖国华、高磊、曾宪启、于华、王庚等。最后由连志升、刘宝琛同志统一审校。限于我们的水平, 书中可能存在不当或某些错误, 希望读者批评指正。

编 者

一九七九年十一月

目 录

一 般 性 报 告

1. 矿山岩体力学的某些进展.....刘宝琛 (1)
2. 略论围岩变形破坏的基本规律.....于学馥 (15)
3. 岩体结构是岩体力学分类的地质基础.....孙广忠 (25)
4. 江西钨矿上部中段地压活动特点及采空区处理
.....甘宗安 丁嘉瑜 邵亿生 (38)
5. 井巷地压理论及其发展方向.....钟时猷 李民庆 (64)

岩石和岩体力学性质及强度理论

6. 岩石力学中常用几种强度理论的试验验证
.....张金铸 林天健 (79)
7. 以单轴抗压强度解析岩石强度图.....官本毅 (93)
8. 岩石三向强度室内试验的若干问题.....崔志莲 (111)
9. 锡矿山南矿河床矿柱的岩石力学性质测定
.....陈家瑜 (121)
10. 粉砂岩现场岩体三轴试验研究
.....林伟平 罗金堂 童克强 (132)

现场应力应变测量方法与技术

11. 光弹性应力计的原理和现场应用
.....连志升 宋育仁 何荣生 (150)
12. 铜录山铜矿的岩体应力测量.....马光 黄金寿 (178)
13. 在一个钻孔中测定岩体三向应力场
.....刘允芳 于丙子 (190)
14. 锡矿山南矿河下矿体试采区的原岩应力测量
.....张兴仁 杨立根 包东曙 关胜兰 (210)

15. 光弹性双向应变计的一种理论分析法及其应用
.....高家美(229)
16. 地应力分布的一般规律及其对岩体稳定分析的意义
.....朱维申 李光煜 白世伟(245)
17. 巴里锡矿大面积地压活动的观测与预报
.....晏从高 何泰 李典文 王国进 朱庆辉(260)
18. 用地震仪监视空区顶板岩体活动规律.....张同康(272)
19. 金川矿区的地压研究及其在设计中的应用
.....曾宪启(282)

模型试验与有限单元法的应用

20. 计算巷道地压的一种新方法.....林韵梅(303)
21. 某电站发电厂房地下硐室模型的试验研究
.....顾金才 汪克修 田玉甲(323)
22. 节理岩体非线性有限元分析.....刘怀恒(344)
23. 施工超挖对巷道围岩力学状态及稳定性的影响
.....姚宝魁(359)
24. 程潮铁矿无底柱分段崩落法回采巷道应力分析
.....熊翼翔 冯钧一 钱仁根(373)

地质力学与地表移动问题

25. 锡矿山南矿岩体结构特征及其对地压影响的探讨
.....田良灿 康怡星(389)
26. 杨家杖子钼矿床岭北06号矿体地质构造及其与地压关系的探讨
.....阎树魁(401)
27. 地表移动三维分析.....颜荣贵(418)
28. 锡矿山南矿中部地表移动的基本特征.....周继富(427)

喷锚支护原理与实践

29. 软弱地层中圆形硐室喷锚支护的计算与设计

-郑颖人 刘宝琛(442)
30. 软弱或破碎岩体中巷道喷锚支护分析.....孙学毅(460)
31. 张家洼铁矿区软弱岩体工程稳定性量测和分析
.....汪钟德 曹汝杰 任其西(477)
32. 支护作用机理的流变学研究.....刘宝琛 林德璋(491)
33. 块状围岩喷锚支护的作用原理与设计
.....程良奎 庄秉文(508)

矿山边坡稳定性的研究

34. 我国露天金属矿山边坡稳定性的研究现状
.....梁兆华(519)
35. 赤平投影网的解析原理.....廖国华(534)
36. 边坡滑动体稳定性系数的精确解.....熊传治(549)
37. 电子计算机在边坡稳定性计算中的应用...李启豪(560)
38. 边坡滑体滑动面强度指标的反算.....何志真(574)

现场测量仪器介绍

39. 几种现场压力或位移观测仪器介绍
- 39-1. DDC-1 型岩层动态参数记录仪...林紫阳(589)
- 39-2. PC-1 型钢弦频率仪.....熊武安(593)
- 39-3. 76-135-N型钢弦压力盒及其接收器
.....徐宗元(596)

一般性报告

1. 矿山岩体力学的某些进展

刘 宝 琛

(长沙矿冶研究所)

摘 要

本文介绍了矿山岩体力学发展某些方面的简况。文中论述了矿山岩体力学的特点,对岩体力学在矿山中的应用、岩体力学试验及力学模型、井巷地压及支护原理、采场地压控制技术、岩爆控制、以及建筑物与河下开采有关问题作了概括性的介绍。对矿山岩体力学方面有关动向、新观点及研究成果仅简要加以说明。

一、矿山岩体力学是岩石力学的重要分支

地质学家李四光应用力学的概念来解释构造地质现象,因而创建了地质力学。而岩石力学可以认为是用力学的观点和方法来研究岩石工程问题的科学。近年来,由于岩石力学在矿山工程中的广泛应用而逐渐形成了矿山岩体力学,它是介于基础科学与应用科学之间的应用基础科学。

有用矿产的开发,无论是地下开采,还是露天开采或海底开采,都与岩体有关。一方面,矿山井巷、硐室、采场以及露天边坡等岩体工程,在其建设和服务期间都必须保证安全,即保证它们的稳定性。为此,就要研究岩体稳定的条件和加固技术。另一方面,还需研究岩体破碎的机制,研究岩体与母岩分离并破碎成一定块度的技术。这两个方面构成了岩体力学的全部内容。

总之,可以认为:“矿山岩体力学是研究人类开采活动所涉及的那一部分地壳内的一切力学现象和力学效果的科学”。因此,

从目前来看，矿山岩体力学研究所涉及的空间范围，在深度上应为自地表或海底下数千米的范围内，也就是矿床的开采深度，在平面上约为数百米乃至数十公里的范围内，也就是一个矿区的大小。它所涉及的时间约为几十年至几百年，也就是一个矿区的服务年限。范围更大、时间更长的岩体力学应属于地质力学的研究范畴。

岩体力学的服务对象十分广泛，它可以为构造地质、地震机制、地质勘探、水电工程、地下铁道、隧道（海底和陆地）、地下油库和气库、地下军事工程、地下核试验场、建筑地基，以及采矿工程服务。矿山工程对岩体力学提出了自己的特殊要求。在不断提出和解决这类问题的基础上，逐渐形成了一个新的岩体力学分支——矿山岩体力学。

矿山岩体力学的特点是：

1. 在力学分析中，不能忽视岩体自重力的作用。深1000米的矿山，岩体自重引起的垂直应力可达250~350公斤/厘米²。自重是产生地压现象的根本原因之一。

2. 地质构造应力的存在已为地质力学分析及大量实测所证实。水平方向地应力尤为突出，其值可大于上覆盖岩层自重引起的应力（有时可达3~10倍），因此必须重视。

3. 矿山岩体决非完整连续。岩体形成以后，经历地质史上的多次构造运动，在岩体中产生大量的断裂、断层、破碎带、节理、裂隙等。因此，岩体多呈不连续、不均匀和各向异性的特点。

4. 矿山开采深度及范围随时间而不断扩大，岩体力学的分析中不能不考虑时间因素。

5. 矿山从基建、生产直到结束，不同阶段有不同的课题，并要求及时研究解决。

6. 矿区开采地点不能选择。因此不可避免地要遇到十分恶劣的构造地质、工程地质和水文地质条件，而使研究工作变得更复杂。

7. 目前矿山生产均必须进行爆破作业, 甚至一次使用上万吨炸药。因此爆破动力的影响也是矿山岩体力学的一个重要问题。

矿山岩体力学的产生与发展, 十分密切地与采矿工业的发展和现代科学技术的成就相联系。它以近代数学力学作为理论研究的重要手段, 应用电测、光测、声测、材料试验技术和模拟技术为主要工具, 日益解决更多的矿山建设和生产中的重要问题。例如: 根据岩体结构、原岩应力及岩体强度确定矿山开拓及采准方案、井巷合理位置、断面形状及合理经济的支护方式; 确定采矿场的布置、合理开采顺序、采场构成要素及空区处理方法; 确定矿柱尺寸大小、断面形状及承载能力和应力分布形式; 研究岩爆机制及其防治措施; 解决开采影响下地表移动及建筑物和河下安全开采问题, 以及海底和海下开采问题; 选择采掘机械和矿用炸药等。还有许多问题, 也应从岩体力学角度来研究, 才有可能全面地加以解决。例如: 崩落法开采时地表形成巨大陷坑而造成水及泥浆流入井下的问题; 在地表地形陡峭处, 由于岩体崩落而造成山坡滚石或滑坡问题; 地下开采对地表、农田、森林的影响问题; 复田问题、土壤微破裂造成农作物减产及森林损失的问题等。

由于对矿山岩体力学的认识和研究不足, 以及地压管理不善而造成国家矿产资源大量损失的例子屡见不鲜。自一九六二年至一九七二年, 江西八个钨矿由于地压危害造成近万吨钨精矿的损失。特别严重的是盘古山钨矿一次大规模地压活动埋掉价值 200 万元的生产设备, 造成停产近三年时间。弓长岭铁矿由于岩体移动先后丢失平炉铁矿石 1180 万吨。此外, 地压活动还对井下生产人员的安全造成重大威胁。

由此可见, 矿山岩体力学的研究, 对于矿山安全生产和回收国家资源都有十分重要的意义。

二、岩石力学试验及岩石力学模型

称小块的不包括地质构造影响的地质体为岩石, 而大范围内

的受地质构造影响的地质体则称为岩体。岩体是一种十分复杂的地质介质,它是在以亿年计的地质年代里生成的。为了便于研究,常常根据岩体(或岩石)力学试验结果而把它们理想化为符合某种既定规律的物质,即所谓“介质”。矿山岩体力学研究对象——岩体(岩石)是什么介质?它的物态方程是什么?它的稳定条件怎样?这些问题都是应由岩体(岩石)力学试验来解答。根据试验,可以把岩体分为各种不同类型的介质,从而建立起相应的地压理论。

1. 线性弹性介质(图1-1): 适用于均质完整坚硬岩体,其应变 ϵ 与应力 σ 成正比,并可用一个弹簧单元表示,力除去后,没有永久变形存在。

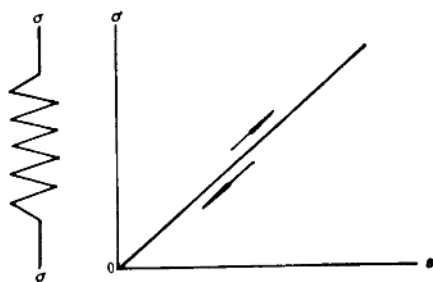


图 1-1 线性弹性介质

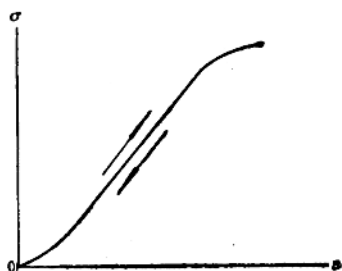


图 1-2 非线性弹性介质

2. 非线性弹性介质(图1-2): 均质多裂隙坚硬岩体, 应力与应变仅在曲线的中间部分成直线关系。

3. 线性弹塑性介质(图1-3): 适用于均质软弱岩体, 可以用弹簧串联一个滑块表示。当应力小于 σ_p 时, 应力应变呈线性关系。当应力大于 σ_p 时, 岩石进入塑性, 并产生残余应变 ε_p 。

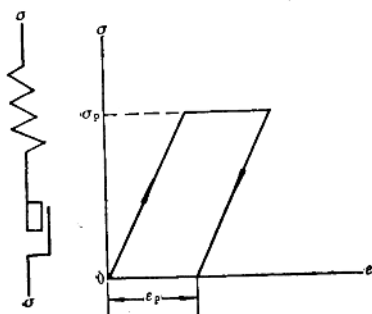


图 1-3 线性弹塑性介质

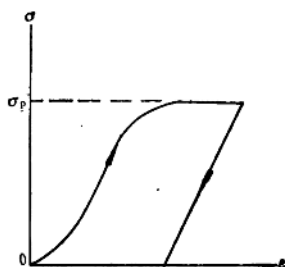


图 1-4 非线性弹塑性介质

4. 非线性弹塑性介质(图1-4): 适用于均质多裂隙软弱岩体、应力应变不呈线性关系, 在外力除去后, 有残余变形存在。

以上几种介质模型都不能解释岩体力学中时间因素的影响, 而生产实践中井巷地压、支护破坏、岩体崩落等地压现象都与时间有关。因此, 近年来对岩体流变学问题给予很大重视, 并提出一些流变模型。

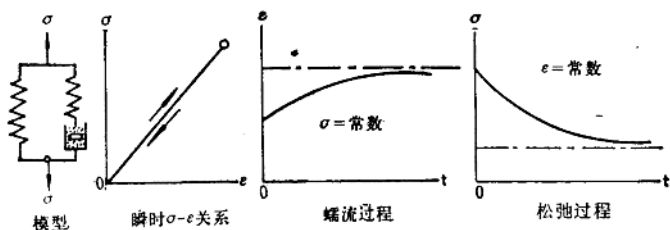


图 1-5 粘弹性流变模型及其应力、应变、时间关系

5. 粘弹性流变介质 (图1-5): 它可以用弹簧单元与活塞单元(表示粘性)并串联表示, 适用于一切坚硬与软弱岩体。瞬时应力-应变关系为线性关系, 在应力不变的条件下应变与时间的关系(蠕流过程)及应变不变的条件下应力与时间的关系(松弛过程)示于图1-5。

6. 弹粘性流变介质 (图1-6): 适用于一切极软弱的岩体。它的应力-应变关系及蠕流过程和松弛过程示于图1-6。

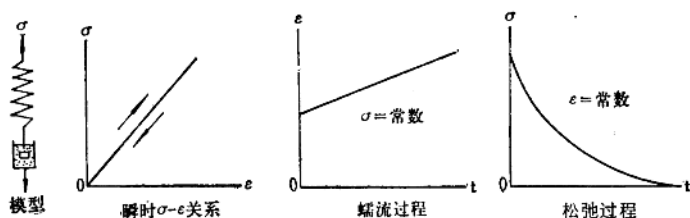


图 1-6 弹粘性流变模型及其应力、应变、时间关系

应用粘弹性流变模型研究矿山岩体力学问题, 一般都能取得一些有意义的结果。除上述各种模型以外, 也有人把岩体视为松散介质(理想松散介质或实际松散介质)或随机介质。

目前岩石力学试验研究的一个重要方面, 是三维应力下岩石强度及变形研究。矿山岩体几乎都是处于双向及三向应力状态, 它们的力学性质与单向应力状态下的相差甚大。在有侧向应力的条件下, 岩石强度随侧压的增长而增高。图 1-7 所示为部分岩石试验结果, 并总结下列经验公式做为一次近似:

$$\sigma_c = \sigma_o + k\sigma_s \quad (1-1)$$

式中 σ_c ——三向抗压强度;
 σ_o ——单向抗压强度;
 σ_s ——侧向应力;
 k ——与岩石性质有关的常数。

公式 (1-1) 仅适用于一定范围。当 σ_o 过大时, σ_c 与 σ_o 不成

直线关系。

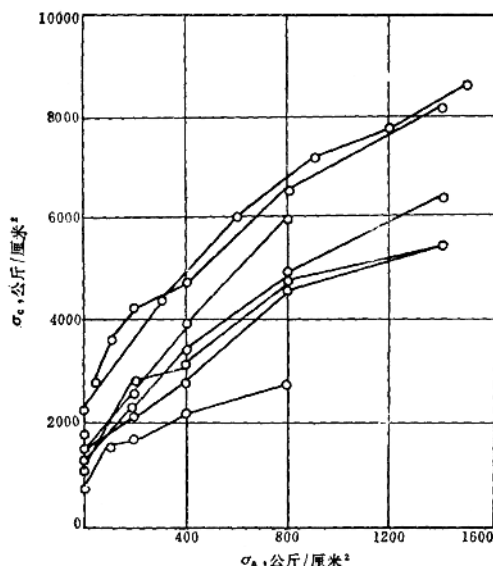


图 1-7 岩石三向压缩强度

· 岩石应力应变全过程的研究，对发展岩体力学提出了一些新的概念。图 1-8 所示为大理岩在单向 ($\sigma_3=0$) 及三向应力条件下的应力-应变全过程。岩石的应力达到顶峰时岩石破坏，但它并没有完全失去承载能力。随着变形的增加，岩石应力逐渐下降到某一数值，即残余强度。

三、井巷地压及支护原理的一些新概念

在中等稳定以上的岩体中开挖地下工程，一般并不需要支护。在中等稳定以下岩体中则大多需要支护。矿山实践中所谓地压，是指地压产生的一些可见的后果。例如：井巷围岩开裂，支护变形破坏等。确切地说，地压应理解为岩体应力的变化及其对

支护的作用。

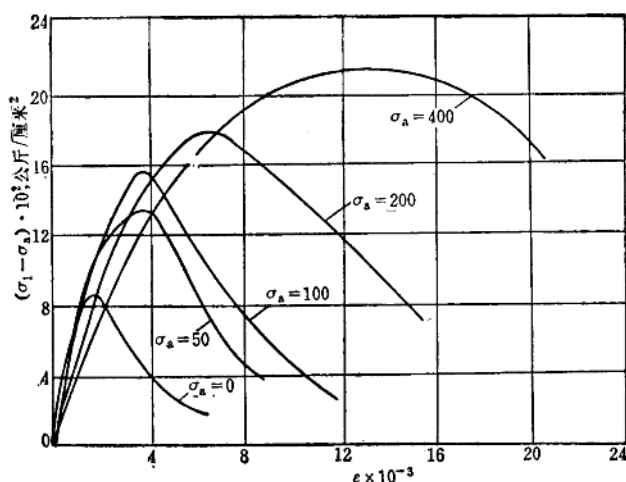


图 1-8 岩石在三向压应力作用下的应力-应变全过程

井巷开挖后，在其周围形成二次应力场，应力重新分布。如果应力过大，岩体即开裂破坏，支护就承受岩体开裂破坏那部分的重量或它的部分重量，以及岩体变形所产生的力。采用凿岩爆破方法掘进井巷时，由于炸药爆炸作用，井巷周围一定深度内的岩体遭到破坏、松动开裂，形成爆破裂隙区。此区内的应力较小或完全没有应力。对于不采取减震措施的一般掘进方法，此区的深度约为0.5~1.0米。但由于裂隙区内岩块的互相啮合，它们并不立即垮落下来而形成浮石状态。此时，支护将承受此区岩体重量或其分量。在松散覆盖层、大断层破碎带或其他十分破碎岩体中，在巷道顶板上方可以认为有平衡压力拱形成。此时，支护将承受平衡压力拱以内的岩体的重量。

井巷支护是地下构筑物，它和地表建筑物一样承受外部载荷。在支护以后，如果井巷围岩不发生变形，则支护也不变形，支护也就不受力。只有围岩发生变形并迫使支护变形，支护才开

始受力的作用，即产生井巷压力。由平衡条件，支护同时给予围岩大小相等，方向相反的反作用力。对于岩体，它是外载荷，并将引起岩体应力的重新分布。此种应力重分布将使岩体应力集中趋于缓和，改善岩体的强度状态，促进岩体趋于稳定。因此，支护并不只是被动地承受井巷地压，而且也能促使井巷围岩应力状态发生有利于稳定的转化（图1-9）。这种支护与围岩互相作用的

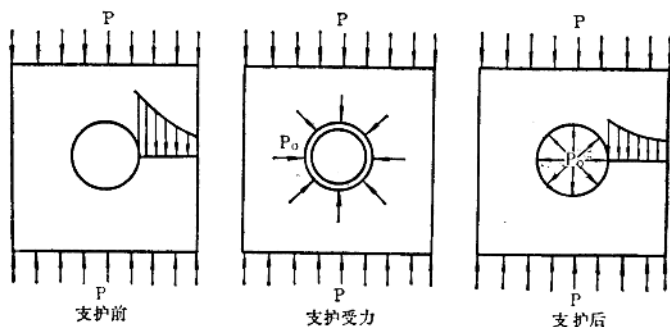


图 1-9 巷道支护前后的应力状态及支护受力状态

过程是随时间发展而逐渐完成的。因此，如不引用岩体流变学的方法，要对这种互相作用过程作任何定量分析几乎是不可能的，而岩体流变学的观点和方法却能解决此类问题。

巷道支护与否的判定是支护研究的第一个问题。井巷围岩一般都处于双向或三向应力状态，建议采用能量强度理论来代替莫尔强度理论，以便于考虑中间主应力对强度的影响。设某种岩石的强度判据为 $[\phi]$ ，则必然可对围岩划分下列几种状态：

- | | |
|----------------------------|--------|
| $\phi_K < [\phi]$ | 可不支护 |
| $\phi_0 > [\phi]$ | 必须立即支护 |
| $\phi_0 < [\phi] < \phi_K$ | 可滞后支护 |

ϕ_0 及 ϕ_K 为岩体初始 ($t=0$) 及最终 ($t \rightarrow \infty$) 强度状态。

井巷支护研究的第二个问题是支护的选型和设计原则。视岩体为流变介质，经过理论分析获得支护载荷为：

$$P_0 = K \frac{P_a - 2G_\infty U'_a}{2G_\infty + aK} \left[1 - \exp \left(-\frac{\beta}{\tau} t \right) \right] \quad (1-2)$$

式中 τ 、 β 、 G_∞ ——取决于岩体及支护的参数；

P_a 、 a ——岩体初始应力及巷道半径。

由此可见，支护刚度 K 越大（支护密度大、支护材料弹性模量大），则支护载荷也越大。当压力较大时，厚度大的钢筋混凝土支护之所以不能适应就是这个道理。刚度较小的支护（U型钢可缩性支护、喷锚支护），就可能获得更好的效果。此外，巷道支护前所发生的径向位移 U'_a 越大，支护载荷越小，这就是滞后支护可以减小地压的原理。但滞后时间过长，则岩体可能破坏。

喷锚支护强大生命力的源泉，就是它的刚度小，柔性大，与井巷岩体粘结较紧。当井巷变形时，喷锚支护能适应，使岩体内的弹性势能以粘性流的方式释放而耗散。

四、采场地压控制技术的发展

采场地压的复杂性，在于采场本身规模较大而形状又不规则，以及各采场的互相影响。采场地压控制主要不在于研究局部浮石及冒顶，而是从根本上改善采场周围岩体的应力状态，靠大规模采用采场支护来控制地压不能认为是发展方向。

应用有限单元法或边界单元法，都可以研究采场周围的应力分布规律，并以此来设计合理的采场构成要素和合理开采顺序。

在与大面积地压活动作斗争的实践中，充填空区与崩落空区都是行之有效的方法，而后者较为经济，在条件允许时应尽量采用。从降低应力集中的观点来看，崩落法可以把岩体应力集中区崩落，其效果更好。当然，充填法的采用有时并不是完全从地压控制出发，而是为了满足降低损失和贫化的要求。

充填体的作用，一直是一个有争议的问题。理论分析和生产实践证明，就是使用胶结充填也不能完全制止岩体和地表的位移和变形，这也间接说明不能制止应力的重新分布。目前国内所应用的低强度充填材料，其强度为20~60公斤/厘米²（比岩体小数十倍），其弹性模量不超过10⁴公斤/厘米²（也比岩体小数十

倍)。这就意味着，当充填体变形比矿柱大数十倍时，才能受同样大小的力。反之，在同样变形的条件下，充填体受的力仅为矿柱受力的数十分之一。实际上，绝大部分载荷都由矿柱承担了(图1-10)。充填体的作用，在于它给矿柱一定的侧向作用力，使矿柱由单向或双向受力状态转变为三向受力状态，从而提高了矿柱的强度。在回采矿柱时，由于顶板大量下沉，充填体才逐步受到较大的力。如果充填质量不好，压缩率很大，则顶板岩石移动较大而压碎残留矿柱，开采条件恶化，回采困难。

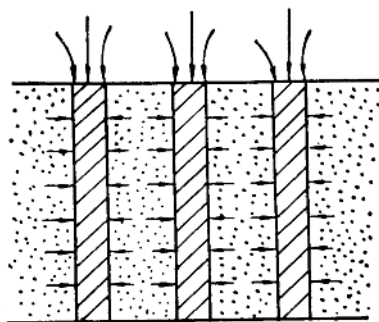


图 1-10 矿柱受力状态

由此可见，采场地压控制主要是岩体应力和变形控制。岩体内的力总是平衡的，在形成一部分应力集中区的同时，必然形成一些应力降低区。有计划的、按照规定的进程表，使后开采的部分处于前开采部分的应力降低区内，或使后开采造成的拉伸应力区与前开采造成的压应力集中区相重合，以便互相抵消。

为了实际监测和控制地压，目前已经发展了多种多点观测、信息集中处理并自动报警的全自动遥测系统。分布在全矿各处的数百个应变传感探头，按照预先制定的程序，定期送入控制中心的电子计算机，计算打印出结果，再根据观测结果调整开采进度和顺序。应用人工应力控制技术，以后的地下矿山，预计将向少支护少充填方向发展。

五、岩爆控制

岩爆，也称冲击地压，它是岩体受力后突然破坏，伴生巨大响声、震动而危害很大的一种地压现象。规模较小的岩爆仅波及一个矿柱或采场，但一次巨大的岩爆则是以链式反应形式爆发的，

瞬息之间矿柱（或矿壁）连续破坏，顶板大面积冒落，岩体剧烈震动，甚至地表可以发生象四级地震一样的现象，危害十分巨大。较大的岩爆曾在大同矿务局、北京矿务局及锡矿山矿务局所属矿山发生过。

岩爆的实质，是岩体内所积蓄的弹性变形势能在一定条件下的突然释放。释放能的一部分用于克服岩体的粘结力及内摩擦力而作功。岩爆释放能的另一部分，则以震动、岩体抛出和声响的形式表现出来。

因此，几十年来岩爆防治研究，都是以消除应力集中，增加承载能力和改变岩体性质为主要手段，以使能量释放能缓慢进行而避免能量积累。这种观点认为岩石的脆性是岩爆的内因，而应力集中是岩爆的条件。因此，有人曾把岩石划分为有冲击性和无冲击性两大类型。

近年来，由于岩石力学试验技术的发展，特别是伺服刚性压力机及应力应变全过程测试成功，把岩爆机制研究推进一步。原认为冲击性很高的坚硬石英岩，在大刚度压力机上缓慢加载，可以不发声响而平静地破坏。原认为冲击性不大的软岩，如果以快速加载，则破坏时也会发生冲击现象。因此，在分析地下工程强度的同时，必须分析它的刚度。矿柱是一种承载结构，它在承受顶板的压力的同时也给顶板以反作用力。利用有限单元法可以分析“顶板—矿柱”这一结构体系的应力应变及刚度的分布，从而确定合理的矿柱尺寸及其布置。

采用多道微震装置，配以电子计算机，可以集中监测整个矿山结构中每个矿柱和顶板岩体的微声发射情况，可以计算每次较大的微震震源的位置，并预报冲击地压的发生。

六、建筑物、河下及海下开采问题

地下矿山的开发过程中，为保护地表建筑、铁路、公路、河流、水库、竖井、平巷而留下大量的保安矿柱不能回采。这些矿柱中保有数十万乃至百万吨开拓矿量。大陆架及深海矿床尚未探明，也有大量矿藏。在二十年前，这些都是采矿的“禁区”。