



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/eng



Research
Efficient Exploitation of Deep Mineral Resources—Review

深部开采的一些挑战[†]

Charles Fairhurst^{a,b}

^a University of Minnesota, Minneapolis, MN 55455, USA

^b Itasca International Inc., Minneapolis, MN 55401, USA

ARTICLE INFO

Article history:

Received 5 July 2017

Revised 26 July 2017

Accepted 27 July 2017

Available online 22 August 2017

关键词

深部开采
岩石的不连续性
综合岩体模型
矿产资源
岩石力学

摘要

持续增长的全球矿产供给对于满足迅速增长的世界人口的需求和期望是必不可少的。这意味着要向更深处开采。由设备供应商通过自持久 R&D 研发的自动开采系统，减少了矿工暴露于恶劣的工作环境并增加了安全性。为确定矿产经济地被开采出来的深度，安全性的增长在于“地面控制”和岩石力学。尽管第二次世界大战以来，为将力学应用在采矿设计上，研究者付出了许多重要的努力，但均出现过技术和组织上的障碍。相较于大多数其他工科学科所遇到的典型工程材料，原位岩石是更复杂的一种。几千年来，采矿工程在设计上大量地依赖于经验方法。随着日益向矿山深部探索，这些方法不再适用于解决 21 世纪的挑战。2008 年综合岩体模型 (SRM) 的发展给研究者提供了分析各向异性和不连续性岩体变形行为的能力——这些属性于 1966 年被国际岩石力学学会 (ISRM) 的主席和创始人 Leopold Müller 描述为原位岩石的本质特征。运用 SRM 在大尺度采矿作业数值模拟 (如崩落法) 上的最新进展揭露了未预料到的岩石的变形行为。大量的平行计算和云计算技术的应用提供了许多重要机会，例如，评价数值预测中的不确定性；建立现用于岩石工程中的经验法则的力学基础及其在现有经验之上的岩体行为预测的正确性；还有在深部开采的优化设计中采用离散元法。首次，采矿和岩石工程将有其自有的基于力学的“实验室”。这有望成为在未来深部高效开采设计中的主要手段。通过在有 80 多年历史的塔斯马尼亚 Mount Lyell 铜矿应用采矿法反演，本文以演示实验室中 DEM 和 SRM 程序应用的讨论作为结束。

© 2017 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of the Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. 引言

毫无疑问，没有任何一门技术比农业历史更悠久，而使用金属工具的时间也与之不相上下；实际上，由于人类使用工具来耕种，因此它们至少是相同的和同时代的……如果我们去除为人类服务的金属，

所有保护和维持健康以及更仔细地保护生命进程的方法都将消失……

Georgius Agricola (1556)[‡]

自从人类文明兴起，地球矿产资源的开采一直是人类社会发展的根本^{††}。就如今许多卓越的可用技术而言，

E-mail address: fairh001@umn.edu

[†] This paper was written shortly after this author had presented a video lecture titled “Why rock mechanics and rock engineering?” at the invitation of the ISRM. The lecture addressed the more general topic of the importance of rock engineering in the 21st century, and may be of interest as complementary to this article. The lecture (~ 45 min) may be heard at <https://www.isrm.net/gca/?id=1309>.

[‡] *De re Metallica*, published in Latin by Georgius Agricola (born George Bauer, in Saxony) in 1556, was the primary text for mining engineers, especially in Europe, for approximately two centuries. The first English translation was published in 1912 by Herbert Hoover (President of the United States, 1929–1933), a mining engineer, and his wife Lou Henry Hoover (https://en.wikipedia.org/wiki/De_re_metallica).

^{††} “... sub-Saharan Africa is the cradle of mankind from which *Homo sapiens* emerged some 100 000 to 200 000 years ago and there is abundant evidence in Swaziland of early *Homo sapiens*’ activity about 43 000 BC or 41 000 BC ...” (<http://www.sntc.org.sz/cultural/ironmine.html>). The earliest known mines in Europe (at Spiennes, Belgium) date from 4300 BCE. Flint nodules were mined to a depth of 16 m in chalk (<http://whc.unesco.org/en/list/1006>). Excavation tools included picks made from deer antlers (https://en.wikipedia.org/wiki/Grime%27s_Graves [Tools]).

2095-8099/© 2017 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of the Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

英文原文: Engineering 2017, 3(4): 527–537

引用本文: Charles Fairhurst. Some Challenges of Deep Mining. *Engineering*, <http://dx.doi.org/10.1016/J.ENG.2017.04.017>

一个事实容易被忽视：几乎所有的这些技术都是基于矿产以及将其从地球开采出来的过程（即采矿），没有它这些技术都不存在。利用矿产还可生产机械化设备、肥料和农药，以满足农业生产的需要，来供养日益增长的全球人口。以上引用的Agricola的话虽然是4个世纪以前的，但在今日仍旧适用[†]。

社会能确定未来有足够的矿产供应吗？图1阐明了这一问题的重要性。自智人存在于这个星球几乎整个200 000年或者更长时间以来，地球人口保持在10亿以下，并且以主要是以农业为主的群体分散在地球上。

在18世纪下半叶，英国发起的工业革命带来了一种新元素，机械化戏剧性地改变了世界上一些地方的社会，但仍将到达世界上的其他地区。全球人口在过去200年里增长了不止7倍，并预计在未来30年中会增长到90亿（图1）。几乎所有的增长会发生在非洲、亚洲和拉丁美洲的欠发达国家。这些地区中许多国家的人民的生活质量[‡]比那些生活在世界发达地区的人民要低得多。由于全球化交流，这些地区的人民（相较于18世纪晚期和19世纪初期）更加意识到这些差距，并急于向前发展。

由于人们对提高生活质量的渴望，尤其在欠发达地区，矿产资源需求的增长速度比人口的增长速度快5倍[1]。回收和替代有助于减少需求^{††}，但目前减少的比率很低。正如在2014年美国国家研究委员会专题讨论会（National Research Council workshop）上提出的问题：“这个人口增长能从经济、社会和环境角度以可持续的方式达到吗？”[2]

矿产足够供应全球需求是这一挑战的本质。正如Bryant[3]所提出的，这将要求全球采矿工业的重大创新，包括更着重强调研究和发展。新矿床的勘探得益于卫星技术，但要有一个平行的规则，以符合安全、经济和环境保护的方式，来确保已有矿床被充分开发。

尽管许多露天矿山现在的开采深度超过1000 m，但如果矿体继续向深部发展，边坡稳定性和其他问题会导致向地下开采改变。对于传统地下开采，即矿工通过竖井、通道和许多的采矿方法来获取矿石，矿山可经济性运营的深度取决于所获得矿石的市场价值。因此，对于一个含金量为10 g·t⁻¹的矿床，并且黄金的市场价格是40美元·g⁻¹时，矿石价值400美元·t⁻¹。目前，世界上最深的矿山是南非的Tau Tona金矿，其深度为4000 m。相较而言，煤矿现估值大概是25美元·t⁻¹，大部分煤矿在地下1000 m以浅。

随着深度的增加，工作环境越来越恶劣。20世纪60年代中期，南非的Witwatersrand金矿引进了环境改善系统，使矿工能适应地下工作，当时矿山大约2000 m深[4]。印度的科拉尔金矿区（KGF）经历了相似的情况[5]。结合综合矿石价格下跌，这些情况导致了KGF于2001年在近3000 m深度时被关闭。

无论是在南非还是印度，岩爆一直是一个严重的问题。1994年，里昂委员会[6]^{‡‡}报道了“在南非的矿山，69 000多名采矿工人在1900年至1994年间失去了他们的生命，并有100万人受伤”。报告指出：“死亡的主要原因和报道的受伤的首要原因是落石和岩爆。”1982年在

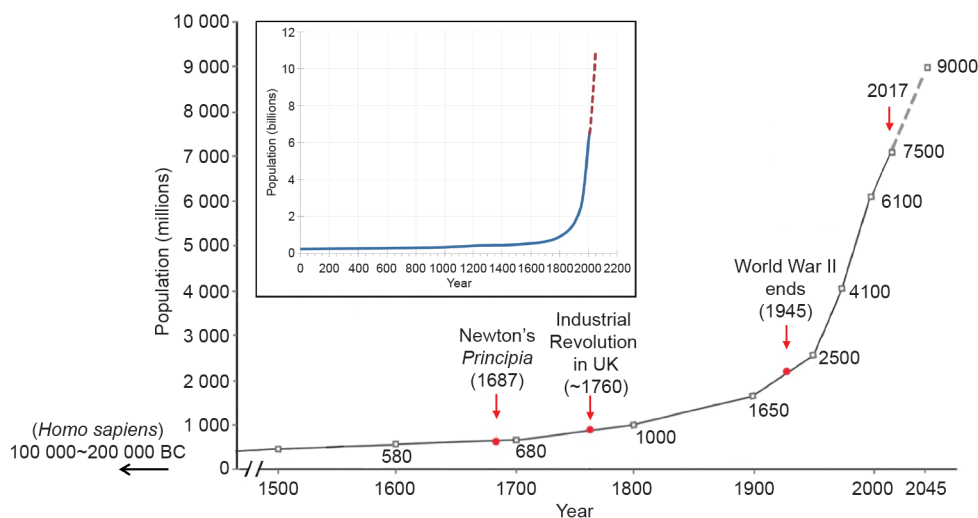


图1. 全球人口随时间推移的增长情况。

[†] The recent YouTube video (2 min) titled “Is mining important?” reaffirms this fact (https://www.youtube.com/watch?v=JXoQQB0_3SM).

[‡] As measured by gross domestic product per capita ([https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_countries_by_GDP_\(PPP\)_per_capita](https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_countries_by_GDP_(PPP)_per_capita)).

^{††} <http://www.un.org/apps/news/story.asp?NewsID=38512#.WZ-mT1SGNGN>

^{‡‡} Also see http://www.klasslooch.com/leon_commission_of_inquiry.htm

约翰内斯堡召开了国际岩爆和矿震研讨会，至今这依然是探讨岩爆问题的一个重要论坛[7]。

远程控制采矿设备的开发在持续进行中。这种设备通过减少矿工在采场工作面的热、湿及其他危险下的暴露而提高了安全性，然而为了安全性，进一步强调地上控制，以避免机械设备的破损和对地下作业的干扰。通常地上控制研发并不受设备供应商追捧。

随着深度的增加，岩石上的荷载也增大。所以只要有要求，对矿产可被经济开采的可能极限深度的任何检查，必须包括考虑开挖岩石和维持可用巷道的能力。在涵盖自控设备的情况下，地面控制预计将成为焦点，其中包括成本效益好的开采和稳定的地下硐室的维护。下面的讨论着重于与深部开采问题相关的岩石工程、可以更可靠地预测岩体对采矿的响应的岩体行为计算机模拟的最新发展，以及深部开采的限制。

2. 原岩

尽管开采出的块状岩石是几千年来应用于如金字塔、罗马桥、哥特式大教堂等建筑奇迹的主要材料，但采矿工程师必须依照岩石被发掘时的自然环境来研究它。岩石是一种非常不同的材料，应用了“原位”这个与众不同的术语。当处理岩石边坡和地基、隧道以及岩石中或岩石上的相似结构时，土木工程同样会遇到原岩。

由于上亿年甚至几十亿年地质构造和重力的演化，原岩是一个不同材料的多相组合体，在从微观的颗粒到板块构造的大尺度上，它存在变形、裂隙，某些情况下还有断裂引起的位移，因此导致了许多不同时期的不连续和空间上的异向性。

加载于岩石上的构造应力和重力一部分分散传到了固体结构上，另一部分通过液体传到了岩石中的孔隙上。一些岩石会继续变形，并在几百万年中缓慢地继续调整，然而另一些很相似的岩石类型会保持弹性和不变。力和应力在岩体中的分布会相应地变化。图2[8]显示了工程尺度上两个不均匀应力分布的例子。无论是比这些图中所示的变化大或小，所有尺度上都会出现相似的变化。在准平衡状态下，一些地区接近于不稳定，被称为“临界应力状态”；构造板块边界就是一个明显的例子。其他地区可能远不是这种临界状态。

当瑞典北部的结晶岩体构造中隧道推进时，岩爆在开挖过程中发生于若干位置，如图2中所示的沿着隧道的黑色区域。这些位置的测量表明地应力“高于计算的上覆岩层应力 σ_x 多达10倍”[†] ($\sigma_x = \rho g H$ ，式中， H 是岩爆所在位置的深度)。如图2(a)所示的二维(2D)截面所示，隧道位于一个地质上异相的位置。这些具有地质年代和起源的构造已有几百万年的时间来响应这些变化着的荷载。上覆岩层的重量也许主要由一个更柔软的、仅轻荷载下更适应变形的三维(3D)“骨骼式”的结构来承载。

图2(b)显示了在加拿大皮纳瓦地下研究实验室(URL)的一个主要结构面附近几处位置上进行应力测量的结果[8]。伴随着在花岗岩被侵蚀地区(推测该地区岩石模量降低)的较低应力和在少许侵蚀地区的高应力，可以看到在结构面法向平面上的分应力有一个大的变化。穿过结构面装入URL杆时没有水流入，然而当向地应力区钻孔时，几立方米的泥浆从钻孔中排出，并且附近有一个地表的农用井暂时枯竭了。

地震和火山喷发经常提示地下也是一个“焦躁不安”的环境。深部矿山的岩爆和水压致裂或储量膨胀引发的地震是上述事实的人为提醒[‡]。比起工程的其他部门中运用到的材料，岩体是一个更复杂和不确定的材料。

工程活动开始时，地质条件可能不太详细，但这些活动肯定会在一定程度上改变原有的平衡状态。在某些情况下(如沉积构造)，尽管在开挖区域内断层可能出现在几个间隔中，但岩体在整个工程项目范围内可能是均质的。同样，相较于同种岩石在地质年代上的响应，许多岩石构造对相关工程的快速荷载重分配响应也许会相当不同。不确定性和可变性是岩石工程的特点。

3. 经验论

贯穿文明史的采矿和土木工程师已经学会了与原岩的复杂性作斗争，并发展出实用准则和方针，通过设计的经典经验尝试法进行演变。在1678年牛顿定律发表之前，基本上所有的工程都遵循经验方法。这个方法运用得很好，如在金字塔、罗马桥和排水系统以及中世纪欧洲的许多哥特式大教堂这些壮观的成就是显著的。经验主义引起的创新激发了工业革命；牛顿力学的原理，尽管早了近70年被提出^{††}(图1)，但本质上没起作用。

[†] Personal communication from Professor Martna.

[‡] <http://timesofindia.indiatimes.com/city/kolhapur/Koyna-earthquakes-triggered-by-reservoir-claim-seismologist/articleshow/50815347.cms>

^{††} https://en.wikipedia.org/wiki/Philosophi%C3%A6_Naturalis_Principia_Mathematica

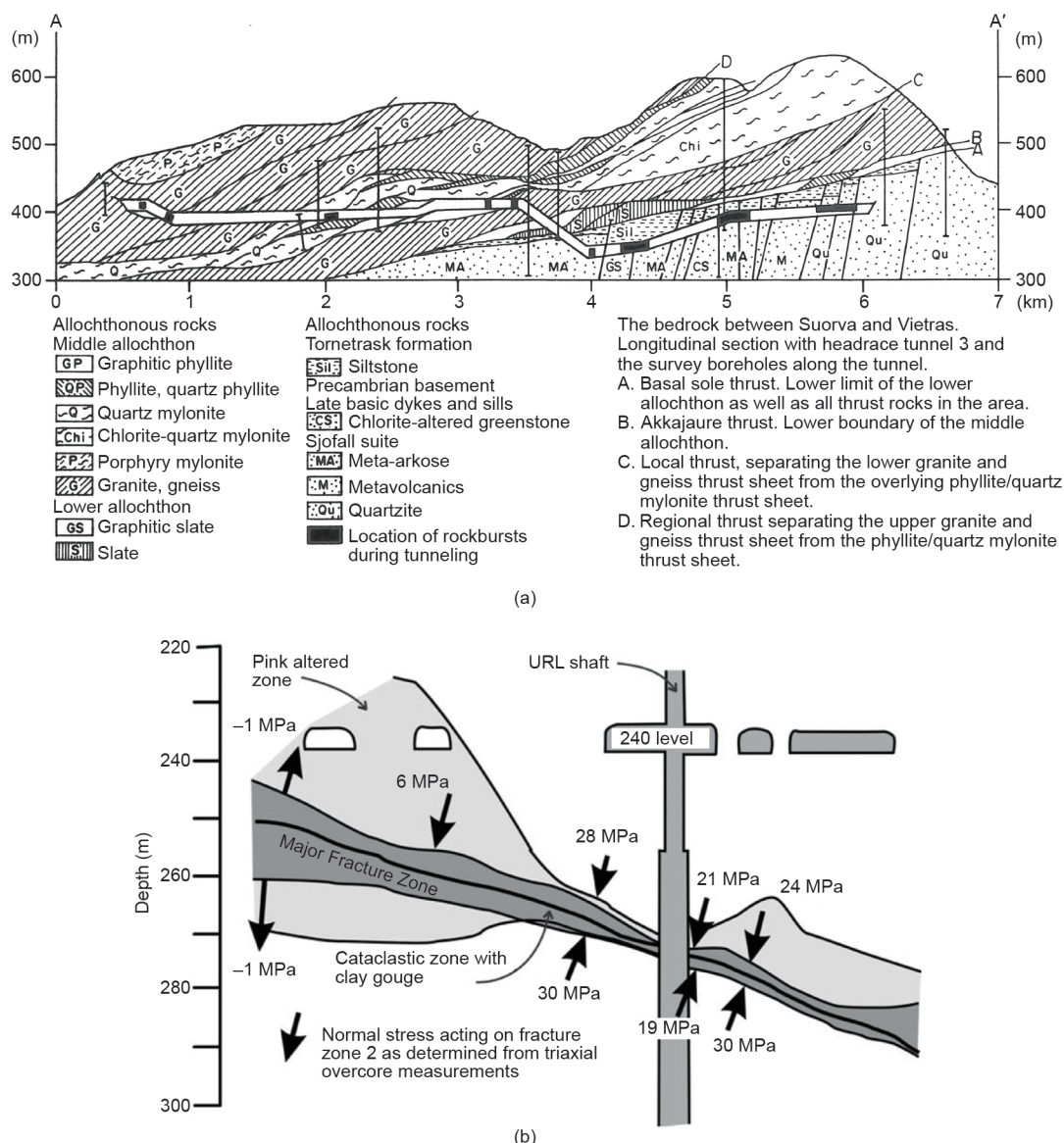


图2. (a) 瑞典北部通过结晶岩开挖隧道时的应力变化实例 (courtesy of Professor Martna, Vattenfall AB, Stockholm, Sweden); (b) 地下断层附近的正常应力变化 [8]。

受助于17世纪下半叶微积分的发展和Cauchy (1821年)[†]提出的连续介质力学, 力学中对边界值问题的连续弹性解[9-11]得到发展, 并吸引了工程师的注意, 导致了多领域的发展。为解释脆性材料强度等, Griffith[12]对英格里斯解[11]的应用激发了线弹性断裂力学 (LEFM) 领域的研究, 并引出了当今的高性能材料。第二次世界大战引起了力学更深远的巨大发展, 以及激励了计算机的发展。

连续弹性体 (和塑性体) 理论的应用对采矿工程产生了许多有价值的早期贡献[13-16] (见参考文献[17]中的讨论), 还有更多随后的贡献, 岩体的整体复杂度已

引起研究者对经验法则的持续关注。经验法则的一个重要原则是它们不应被应用于已知的惯例之上。

4. 岩石的不连续性

1959年12月2日法国的玛尔巴塞拱坝的倒塌, 随后1960年1月21日南非的Coalbrook煤矿的矿难, 每个事件都有超过400人死亡, 使利Leopold Müller确信岩石工程实践在令人难以理解地冒险, 并且该现状需要获得国际关注。1962年5月, Müller在奥地利萨尔兹堡注册了国际岩石力学学会 (ISRM)。

[†] See https://en.wikipedia.org/wiki/Cours_d%27Analyse

当解释成立ISRM的原因时，Müller特别注意了原岩的一个特殊性质，即普遍存在的、基本平面的、不连续的：岩石中由地质构造应力和重力向各向产生的三维裂隙，从而导致岩体在过去的地质年代中破裂。就像他在第一届国际岩石力学大会（1966年在里斯本举办）的致辞中提到的：“……不连续性和各向异性是岩石材料最重要的特质……节理介质的特性相较于岩石更多地依赖于岩石块体系统的黏结材料。”

实际上Müller的意见重新开启了一个在连续介质力学初期曾被热烈讨论的话题。具有离散微观结构的所有真实材料的力学行为能正确地（或适当地）被一个连续体的概念代表吗？Filonenko-Borodich[18]提出了对早期争论的深刻理解（见Section 1 in Supplementary），并注意到：

尽管体积小并假定与主体脱离的物体仍包含许多的分子，这一事实提示研究者求助于大数定律，并应用这个后来被称为统计学的方法；这使得缩小数学分析的连续空间与作为离散介质的固体之间的差距成为可能。

要注意的是那时关注的“离散元”是微观的。传统实验中得到的这些材料所制小试样的弹塑性可被应用于相同材料但体积大得多的工程结构中。

非连续性对Müller和工程师面临的更大尺度的原岩是很重要的，所以连续介质假设的正确性不能以同样的理由被证实。

Müller的意见和ISRM的创建激励了相当多的试图考虑这个“离散”非连续体的国际活动[17]。1966年伦敦帝国理工大学的Evert Hoek博士建立的跨学科岩石力学团队的贡献值得被特别注意。“*Rock Slope Engineering: Civil and Mining*”[19]和“*Underground Excavations in Rock*”[20]这两本开创性的书籍总结了这一团队的一些研究成果。

估算一个含节理和其他地质特征[†]岩体强度的Hoek-Brown(H-B)准则是从这个体系中发展的，并可能是现今最被广泛运用的国际准则。1990年在“*Underground Excavations in Rock*” (op cit)书中作为一部分被介绍，并从那时起充分演化[21]。需要注意的是H-B准则是一个

连续体准则，并假设岩石是各向同性的。由Hoek和Marinos[21]提出：

Hoek-Brown准则的一个基本假设是所应用的岩体是均匀的和各向同性的。它不应应用于结构上破坏控制的分析，如坚硬岩体中结构面间距与所分析的隧道或者边坡的尺寸相似，并且破坏过程明显是各向异性的。

H-B准则同样被设计为一个实用准则，现场工程师应用时：“在该准则的发展中被清晰地认识到，除非参数可以从简单的现场地质观测中估算到，否则它没有实用价值。”

这个岩石力学团队中Nick Barton博士和Peter Cundall博士的贡献在本文中特别提到。回应Müller的对作为岩体本质特征的不连续性和各向异性的界定，Barton和Cundall都将他们的职业生涯——至今45年——致力于尝试评估三维的不连续性对变荷载的力学响应。

Barton等[22]发现需要确定实用准则来帮助现场工程师合理地考虑节理岩体。他们在1974年引入了经验性的“Q系统分类法”[22]，并在岩石工程大量应用的广泛观察基础上持续完善该系统[‡]。2011年Barton的Müller讲座[23]提供了在过去这段时期中Q系统发展的精彩回顾。

Cundall[24]继续研究可将节理岩体看作由贯穿平面的不连续体发展而来的块体组合的计算模型，不连续体之间通过块体的交界面相互影响。1971年他的文章[24]向岩石力学界介绍了离散元方法（DEM）。该方法在随后的40年时间里被继续发展，如今在岩石力学中被广泛应用。

5. 离散元方法

图3阐明了DEM的原理。该方法是仅仅基于牛顿运动第二定律（ $F = ma$ ）的应用，并基于一个假定的在系统中单元间接触面的本构响应（力-位移的关系）^{††}。

施于固体上的荷载的任何变化在体系中以声速传播。在DEM中动态响应通过一个时步算法来数值表示，在这个算法中假设速度和加速度在每一个时步中是恒定

[†] The criterion is also applied for estimating the effect of confining pressure on intact rock (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1674775514000559>).

[‡] A concise explanation of the Q system is provided on the website [https://en.wikipedia.org/wiki/Q-system_\(geotechnical_engineering\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Q-system_(geotechnical_engineering)).

^{††} This relationship must be assumed, since field-scale data are generally not available. This is part of the uncertainty discussed earlier in this article. Development of massive parallelization techniques in computing allows such assumptions to be varied, and analyses repeated, to assess the sensitivity of the analyses to this assumption and to other uncertainties discussed in this paper.

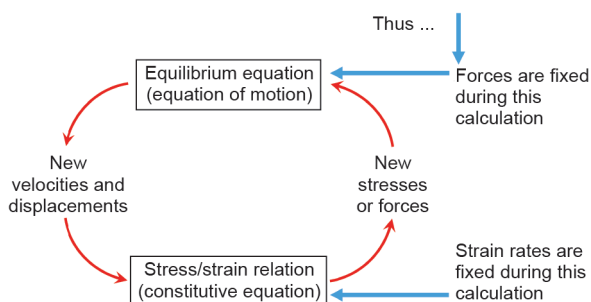


图3. 显式有限差分法：计算周期。

的。为了满足这一假设，这个时步必须非常小；而模拟变形过程需要大量的时步。

DEM因此是计算上密集的，但它有个优点是变形过程可以被详细地模拟直至最终平衡状态——这一状态也可能直到完全破坏才能达到。通过记录在非常小的时间间隔里的变化，它也可模拟系统的动态响应（可与现场微震系统观察到的动态响应对比）。另外，可得到每一时步的力和变形；由此，它是一个可发展整个变形过程的连续“电影”的简单程序。将模型预测法传达给那些不熟悉计算力学但能辨别计算预测和现场观测区别的同行人，这是一个有效的方法。这一交互方法是一个迭代设计过程的必要组成[†]。

需要注意到节理体系的二维分析通常导致了对三维体系真实力学行为的错误解释[25–27]。此外，三维分析增加了计算机分析的计算要求。包含其他因素，如承

压流体流动，又引入了另一种维度。

大量的平行计算和云计算方面的近期发展，引人瞩目地增加了DEM问题中的计算速度，这样该方法对岩石工程更实用并能考虑到那些可能对岩石体系的预测和实际行为有关键影响的相关因素。

6. 综合岩体

基于DEM，2007年对综合岩体（SRM）的介绍[28]，是朝向将岩体考虑为一个三维（各向异性的）不连续体的重大进步（同见参考文献[25,26]）。这一进步在Müller指出作为岩体主要特征的不连续性在岩石工程中有重要影响的40多年之后才出现。

图4阐述了SRM的单元[28]。取决于对岩芯的室内试验，完整岩石的变形性和强度被表示在一个颗粒黏结模型（BPM）中[29]，如图4中的黄色圆柱体。假定这些BPM属性除主要的不连续体外，可应用于更大型岩体。一个大尺度不连续体的网格见图4中的右上角；这些是由现场观测决定的，并被称为离散裂隙网络（DFN）。DFN叠加在完整岩石块体上以组成SRM（图4中的中心块体）。DFN设定和应用的现状被La Pointe讨论，见参考文献[30][‡]。

SRM被用于表示受地应力等作用的岩体，并使得隧道、采矿作业等被发展和在计算机分析中被模拟[31,32]。

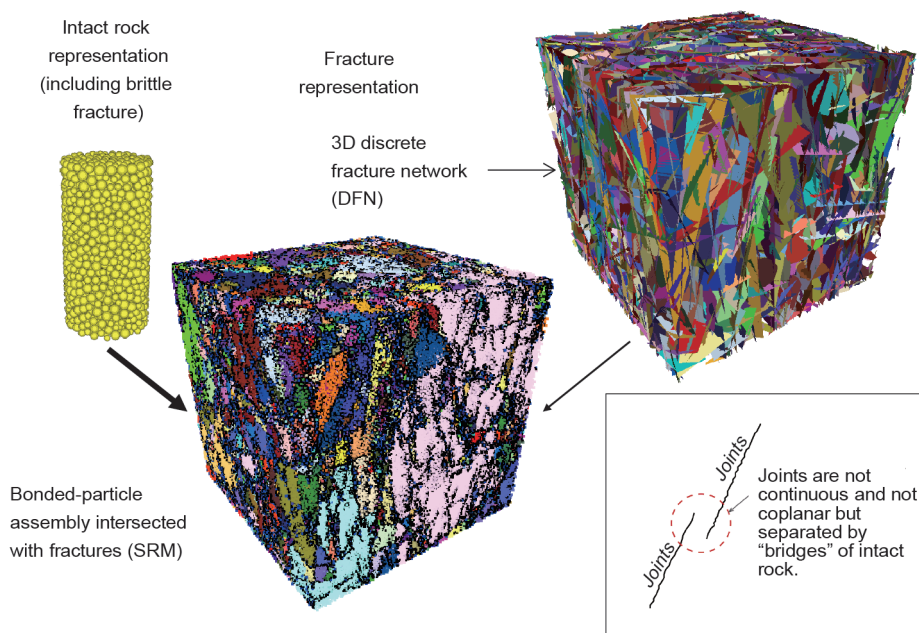


图4. SRM图解 [28]。

[†] Some additional discussion of the DEM can be found at <http://www.itascacg.com/software/pfc/distinct-element-method>.

[‡] See also *ARMA Newsletter* at http://armarocks.org/documents/newletters_r2/2017_issue_20_winter_.pdf

岩体中被观察到的裂隙具有有限的长度。尽管它们可被定义为具有特定方向的裂隙组，个别裂隙可能有点背离该组的主方向和平均长度。同时，裂隙经常被假定为椭圆形的，但这显然不是实际情况。

岩石力学中模型相关的某些不确定性可用图4中右下角的矩形方框内的讨论来解释。DFN的一个重要影响是将地应力集中在相邻裂隙的尖端之间的完整岩石部分。由于各裂隙间方向和长度的差别，重叠区可能会在块体中有所不同。一个例子中，重叠可能显示在图4的方框中——就是说，下部的裂隙重叠到上部裂隙的左边。它也可能被颠倒——就是说，下部的裂隙重叠到上部裂隙的右边。图5显示了这两种情况的简单二维分析的一个结果，其中获得了在有重叠颠倒的情况下含两个裂隙岩石的轴向强度。发现强度在一个例子中比另一个高36%（7.6 MPa/5.6 MPa）。

在Case 1（7.6 MPa的强度）中，剪切将趋于拉伸扩展（靠近尖端）到上部裂隙的上端和同样到下部裂隙的下端；即为裂隙（蓝色区域）趋于向远离重叠区发展。在Case 2（5.6 MPa的强度）中，情况是相反的；也就是说，拉伸扩展到上部裂隙的下端和下部裂隙的上端，直至重叠区域。Case 1需要在相互作用和破坏发生前施加更大的压缩荷载。（图5中显示的情况是从一段视频中截取的，该视频展示了裂隙区贯通和样本破坏前裂纹的轻微扩展。）

如前所述，DFN没有被精确地定义，重叠的范围会变化。裂隙面之间会有摩擦。三维的裂隙网络将处于不均匀应力场的岩体里，如这个岩体可能在一个地下道路

的附近和（或）在临近巨大洞室的大范围区域内。裂隙断面间的完整岩石区域对决定裂隙岩体强度起决定作用。

图5的讨论同样强调了Hoek和Marinos[21]的下述观点：

应用Hoek-Brown准则时错误的最大来源之一就是对完整岩石强度 σ_{ci} 的错误理解，在评价岩体特性时该强度的作用几乎与GSI（地质强度指标）相同。地质学家将完整强度与岩体强度混淆是很常见的，这导致了对最终岩体强度的严重低估。

在一次采矿工作的实例中，岩体会随着采矿开展而经历一系列的荷载变化。就像在参考文献[31,32]中阐述的那样，一个含不连续体的岩体可能会在连续介质法下显示出出乎意料的力学行为。

通常，在开采设计时，几乎没有什么可用信息提供给裂隙网格。这种情况下，更倾向于假定DFN，而不是运用等效连续体法，因为后者不会显示在变荷载下的同样响应。

7. 数值模拟和岩石工程

Starfield和Cundall[33]将数值模型考虑为一个在岩石工程中具有价值的工具，但强调相较于在大多数其他工程学科中，这些模型在现场必须被区别应用。延续Holling[34]，他们将问题分为4个不同类型，如图6所

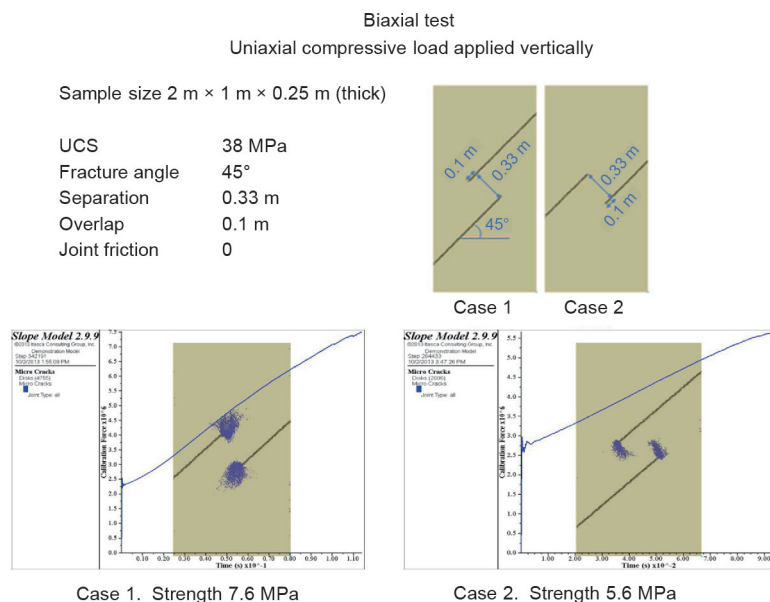


图5. 裂隙岩石中岩桥的裂隙发育。

示[33,34]: 首先, 通过现有数据的质量和(或)数量; 其次, 通过对待解决问题的理解层次。

Starfield和Cundall的意见包括以下观点, 这里注释在方框中:

Region 1中, 有好的数据, 但理解不足——统计学是合适的模拟工具。

Region 3中, 同时具有数据和认知——这里模型可以被建立、验证和使用。(Region 3是在工程的许多分支中适合建模和解决问题的区域。)

Region 2和Region 4与数据有限的问题相关, 比如相关数据不可用或难以获取……岩石力学(和岩石工程)中的问题通常陷入数据有限的范畴; 很少能获得关于一个岩体足够的信息来明确地模拟它。

随后, 他们补充:

岩石力学模型永远不应只运行一次; 其结果对于参数的变化非常敏感并假定模型已获得最多的信息。

模型成了建设者的实验室。

一个好的概念模型可以节省更好的设计的实地测试的时间和金钱。

本文前述的计算机技术的发展强调了后述三点。现在重复多次运算模型成为可能, 如在一个系统化方式中改变假定值来实现敏感度分析, 以便于确定关键参数和不确定性。

也有可能用来检验现用于岩石工程的实验步骤(如巴顿的Q系统分类法), 以扩展这些完全基于力学或者

能被改善以提升其有效性的范围。这样, 它们的用途可能扩展到更有把握预测未测试情况下的力学行为。

8. 岩石工程实验室

室内试验在连续介质力学的发展中起关键作用。Hooke证明荷载和弹簧拉伸量之间呈线性关系的经典实验提供了线弹性理论的基础[35]。浏览Nadai的“*Theory of Flow and Fracture of Solids*”[36], 其中提供了室内实验是如何促进塑性理论发展的许多例子。

尽管传统的实验室规模对岩石工程的某些方面有意义, 但在传统室内实验中无法将大规模的现场问题包含在岩石工程中是一个重要的制约因素。

计算的发展描述了上文中现今提供给采矿工程(和其他涉及岩石工程)师一个由两部分组成的实验室的单元: 计算机模拟。与另一单元紧密联系的——现场观测和与现场工程师紧密交互——岩体三维不连续介质模型创造了采矿的重要机遇。这些机遇与可经济地获取矿产资源的深度限制问题相关。

第二单元的重要性——由富有经验的个人提出的关键评价——得到了美国前总统奥巴马的关注“……世界上最强有力的计算机并不是直观的像我们与生俱来的那样。”[†]这个新的两部分“实验室”的发展能帮助将岩石工程问题从图6中的Region 4向Region 2移动。

朝着这个目标, Sharrock(见Section 2 in Supplementary Information)提出了一个反演分析步骤的有趣变化, 主要由Sakurai[37]在土木工程中使用, 以对比开挖附近岩石的实际变形与原设计分析中的预期。

9. 岩石破碎和迅速开挖

采矿的主要成本, 尤其是随着向地下和深部转化, 通常与在开采之前发展竖井、巷道等基础设施所需时间有关, 并与岩石破碎成本相关。

下述讨论阐明了针对岩石钻爆法和岩石破碎的动力学问题DEM建模步骤的应用。

目前, 作为挖掘机和自动矿山机械发展的一部分, 研究者为提高岩石破碎系统的有效性正在做相当大的努力。全断面隧道掘进机(TBM)在开挖隧道方面很流行, 以及发现切割机可应用于矿石开采[38]。

尽管还有创新的空间, 但岩石破碎和尺寸的减小是

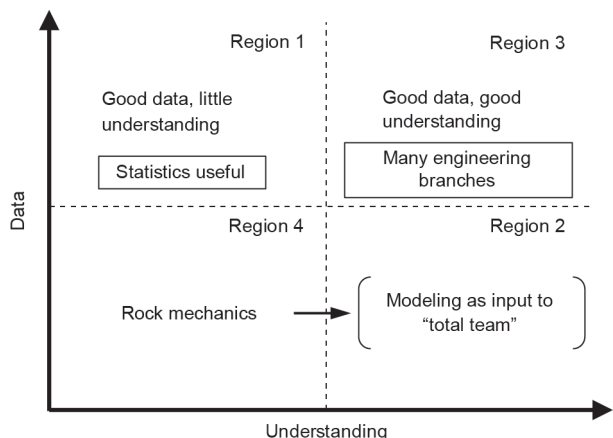


图6. 建模问题分类(改编自文献[33,34])。

[†] Comment by President Obama on 2 April 2013 in Brain Initiative (<https://obamawhitehouse.archives.gov/the-press-office/2013/04/02/remarks-president-brain-initiative-and-american-innovation>, para. 8, last sentence).

由破碎颗粒的尺寸和获得最终尺寸所需能量的基本关系控制的。Lynch和Rowland[39]提供了一个粉碎理论的有价值的讨论[40–43]。所有这些关系指出达到最终产品尺寸所需的能量是与最终破碎尺寸成反比的。这从Griffith的分析中也可以预计到[12]。图7[44]显示从多种多样的破碎系统得到了本质上相同的关系。(总体说来,相对于其他系统的破碎,岩石中的核爆炸是效率较低的,因为大部分爆炸能量被消耗在爆炸附近熔融的岩石中[45],并产生了大范围的破碎。)

尽管有能量与破碎尺寸的关系(图7),但我们认识到相对于破碎岩石,不是所有的能源都相当。相较于压碎和研磨系统,爆破有效得多,并且先于破碎研磨之前使用炸药将岩石爆炸至小尺寸有可观的经济价值的观点存在争议:“对于破碎岩石而言,化学能比机械能更高效,大约高25倍,尽管对于破碎和移动岩石来说,现在的爆炸只是它们理论能量的30%~60%。”[46]

自从1952年Robbins TBM在Oahe大坝引入,TBM已经做了相当大的改进[47]。切削机寿命、轴承等都达到了高开发和高可靠性的阶段。切割进程和产出的破碎尺寸保持不变,总体推进速率似乎不太可能有本质上的提高。

通过智能钻爆系统的应用,建议及时地寻求提升传统钻爆步骤的机遇[†]。正如参考文献[38],在传统钻爆循环中每一次爆破的推进几乎与隧道直径相等[‡]。这是由设计爆炸使得岩石碎片朝“自由面”移动的需要所决定的,即隧道面。“直眼掏槽”,形成中央腔体,通常在主爆炸之前通过立刻的强烈爆炸产生,其应用帮助沿隧道轴线方向提供自由面[38]和开放空间以适应岩石碎片的

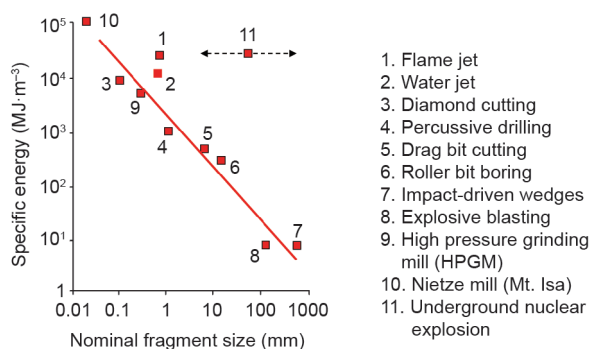


图7. 石英岩中不同岩石破碎方法的比能量(修改自文献[44])。

“膨胀”。直眼掏槽最初的目的是使所有钻孔基本上平行于隧道轴线,但是装载量(推进/爆炸)保持与隧道直径大致相等[38],如图7所示。Chitombo和Trueman[48]开展了几次“深炮眼”直眼掏槽的现场试验。他们使用了两倍于隧道直径的装载量,并没有产生不良影响。显然,没有钻孔设备可以尝试更深的装载。

图8阐述了一个假设的钻爆系统,该系统中,钻有一个沿隧道轴线方向的中央腔和一圈围绕着的平行孔^{††}。从一系列钻于最终剖面外缘外的引导孔或是一个装在中央腔体的控制器来电子化地控制这些围绕孔的平行度。建议进行一系列的数值实验来评估在多个隧道直径的深度上钻孔的可行性,以便确认破碎对孔平行度的敏感度以及从预钻中央腔中的传感器来控制后者的可能性等。

因为钻车必须占据比最终隧道剖面略大的截面,在每次钻孔周期的初期为适应较大的钻机,开挖一个“启动通道”是必要的[38]。(使用一个与Wirth切割机上相同的单个刀盘就可以轻易地实现[38],切割时要与开挖外围平行。)

基于BPM[29]并强调了DEM的动态建模能力,由Furtney等[49]采用的编码修改版的有效性,加上现如今已经具备的快速处理技术,允许通过计算机模拟对这个概念相关的各种问题进行调查。原则上,是否可以将

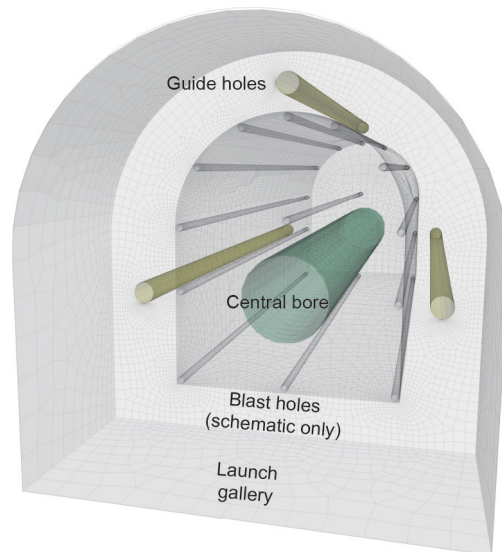


图8. 长孔“智能”钻爆系统示意图。

[†] Nuclear explosions result in a wide range of fragment sizes, from solidified, initially molten rock, to very large fragments remote from the explosion. (See Ref. [42] Overview Fig. 1.9, Fig. 1.10, and para. 2.)

[‡] At a distance of one diameter ahead of the tunnel face, the state of stress in the rock is essentially unaffected by the presence of the tunnel face.

^{††} A stimulus for the notion of “smart drilling,” as discussed here, was the National Academies Report, *Drilling and Excavation Technologies for the Future* (1994), which can be found at <https://www.nap.edu/catalog/2349/drilling-and-excavation-technologies-for-the-future>: “Rapid innovation in microelectronics and other fields of computer science and miniaturization technology holds the prospect for greater improvements—even revolutionary breakthroughs—in these systems. The development of smart drilling systems has the potential to revolutionize drilling.” The remarkable developments in directional drilling for petroleum production (since this 1994 report) indicate the possibilities.

推进/环绕增加到几个隧道直径或更多？什么是发展块体体积的最佳途径呢？一个单一的中央腔，还是几个分布在隧道截面的较小孔洞呢？是否有机会来限制从隧道外围传来的地面震动（如通过采用“预裂隙”技术）呢？这些计算机研究同样可以帮助报告分块崩落法中岩体爆炸预处理的可能性。的确，迅速和经济地通过计算机检验几个案例的能力允许我们评估采矿中许多潜在创新的可能性，并且，从这些例子中，可以更加明智地计划现场试验。

以上深孔钻爆的讨论是基于力学的“计算机实验”如何在进行更耗费成本的现场实验之前，被用于评估各种设计实用性的阐述。尤其是当考虑在月球和其他星球上进行开挖的可能性。

如图9[29,50]中，DEM建模步骤同样可被用于分析不同颗粒级配的岩石破碎，这是高效岩石开挖系统设计的核心问题[†]。

10. 讨论

上述讨论试图阐述在高速计算方面目前和未来的继续发展，这开启了岩石工程的新阶段。尽管这些发展在所有地下工程应用中都很重要，但在深部开采中尤其意义重大，因为深部开采中地压条件有可能很严峻而经验是有限的。

迄今为止，采用SRM的研究来表明那些不能通过岩体连续介质模型获得的岩体力学行为。地下观测确定了考虑如在采矿过程中遇到的三维不连续体的重要性[31,32]。

现在计算的发展形成了矿山规模“实验室”的概

念——计算机预测和地下观察紧密的结合[‡]，用测试拟建的工程来提供一个现实的、成本效益好的选择。这是国际采矿工程界建立自己的采矿研发小组的一个重要机会，并利用其他科学和技术部门中许多正在进行的开发和应用，特别是开发一种基于力学的方法来评估深部开采的限制。地下开采同样提供一个有意义的“通过直接地下观察的代码验证”的作用，这在远程提取和注入系统中是不可能的。

这种专注于计算机发展带来的设计机会不应被解释为意味着减少其他途径的作用，来发展对岩石大规模工程行为的更全面的理解。理论研究、地球物理观测等都可以为深部岩石行为提供有价值的观点。笔者相信并希望这个“实验室”将成为一个向着更好的岩石工程设计和对地下采矿限制的更好认知方向的强有力的新发展。

尽管本文的重点是采矿，但采矿工程师的本质紧密地跟随着岩石工程相关领域的发展（如石油工程、地热工程、废物处置工程和水利工程）。这些领域的研究者在追寻着大致相同的目标，即为提供全球幸福之根本——满足不断增长的世界人口对地下资源的需求而发展更好的技术。这些都涉及原岩工程，并且都可以从其他工程中学到很多。

11. 结论

1956年4月，美国三所采矿工程学院联合举办了第一届美国岩石力学大会，以期更好地了解原岩的工程力学行为。仅仅一年之后，1957年10月4日，苏联发射了斯普特尼克1号并开始了太空和全球革命，这在当时以不可思议的方法改变了世界。斯普特尼克成为国际地球

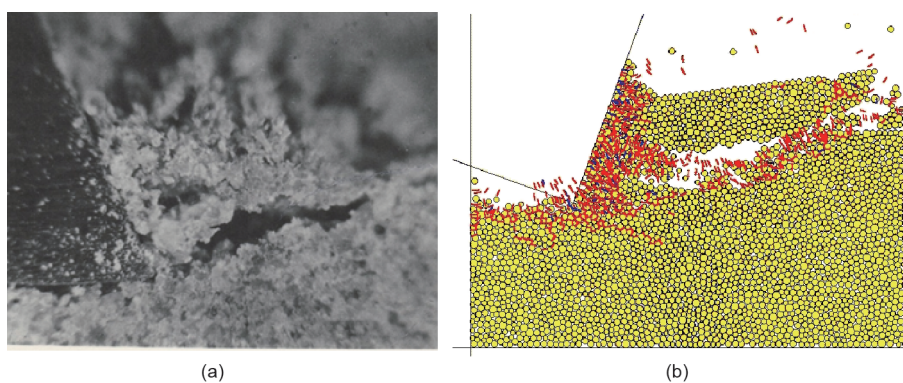


图9. 岩石切削中的切屑形成。(a) 物理观察 [50]; (b) 计算机建模 [29]。

[†] Study of the rock-cutting process led Detournay et al. (see <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013795212002244?via%3Dihub>) to demonstrate that the compressive strength (and Mohr Coulomb failure envelope) of a rock can be determined by the use of a non-destructive “scratch” test. (A system is now available commercially: <http://www.epslog.com/website/article.php?action=display&catId=2.>)

[‡] These “observations” include both the critical review of computer predictions by experienced field engineers, and underground instrumentation.

物理年的一部分，晚宴上在一小部分地球物理学家的中心播下了种子。有人建议“有了现在这些新工具，如火箭、雷达和计算机，或许是时候建立一个地球系统的可协调的全球性研究了”。[†]

尽管采矿工程在过去的60年中受益于太空时代的发展，现在是时候去利用“现今所有可用的新工具”了。想要迎接深部开采的严峻挑战和满足迅速增长的世界人口对矿产资源的需求，这是根本。广泛讨论了采矿工程中急需的创新。“新的可用工具”仍有待开发。像其他理工科中所证实的那样，采矿中多学科研发团队的建设是面对21世纪这些挑战的合理途径。

Acknowledgements

The views expressed in this article have benefitted from decades of interaction with many colleagues internationally, all with an interest in advancing the “state of the art” of rock mechanics/engineering, and stimulated throughout by a background in mining engineering. Colleagues at Itasca and the University of Minnesota have had a profound influence. Special thanks are due to David Degangé, who developed much of the graphical material for this paper.

Supplementary Information

<http://engineering.org.cn/EN/10.1016/J.ENG.2017.04.017>

Fig. S1

Refs. [1–3]

References

- [1] Freeman LW, Highsmith RP. Supplying society with natural resources: The future of mining—From Agricola to Rachel Carson and beyond. *The Bridge* 2014;44(1):24–32.
- [2] National Research Council. Can earth's and society's systems meet the needs of 10 billion people? Summary of a workshop. Washington, DC: The National Academies Press; 2014.
- [3] Bryant P. The imperative case for innovation in the mining industry. *Min Eng* 2015;67(10):39.
- [4] Wyndham CN, Strydom NB. Acclimatizing men to heat in climatic rooms on mines. *J S Afr I Min Metall* 1969;70(5):60–4.
- [5] Krishnamurthy R, Shringarputale SB. Rockburst hazards in Kolar Gold Fields. In: Fairhurst C, editor *Rockbursts and seismicity in mines: Proceedings of the 2nd International Symposium on Rockbursts and Seismicity in Mines*; 1988 Jun 8–10; Minneapolis, MN, USA. Rotterdam: Balkema; 1990. p. 411–20.
- [6] The South African OHS Commissions. Leon Commission report (volume 1): Report of the Commission of Inquiry into Safety and Health in the Mining Industry [Internet]. Johannesburg: Association of Societies for Occupational Safety and Health (ASOSH) and Chamber of Mines of South Africa; 1995 [cited 2017 Aug 20]. Available from: <http://www.cwbpi.com/AIDS/reports/LeonCommissionV1.pdf>.
- [7] Ortlepp WD. RaSiM comes of age—A review of the contribution to the understanding and control of mine rockbursts. In: Potvin Y, Hudyma M, editors *Controlling seismic risk: Sixth International Symposium on Rockburst and Seismicity in Mines proceedings*; 2005 Mar 9–11; Perth, Australia. Crawley: Australian Center for Geomechanics; 2005. p. 3–20.
- [8] Martin CD, Chandler NA. Stress heterogeneity and geological structures. *Int J Rock Mech Min* 1993;30(7):993–9.
- [9] Lamé MG. *Leçon sur la théorie mathématique de l'élasticité des corps solides*. Paris: Bachelier; 1852. French.
- [10] Kirsch G. Die theorie der elastizität und die bedürfnisse der festigkeitslehre. *Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure* 1898;42(29):797–807. German.
- [11] Inglis CE. Stresses in a plate due to the presence of cracks and sharp corners. *Trans Inst Nav Arch* 1913;55:219–30.
- [12] Griffith AA. The phenomena of rupture and flow in solids. *Phil Trans R Soc Lond A* 1921;221:163–98.
- [13] Berry DS. An elastic treatment of ground movement due to mining—I. Isotropic ground. *J Mech Phys Solids* 1960;8(4):280–92.
- [14] Berry DS, Sales TW. An elastic treatment of ground movement due to mining—II. Transversely isotropic ground. *J Mech Phys Solids* 1961;9(1):52–62.
- [15] Berry DS, Sales TW. An elastic treatment of ground movement due to mining—III. Three dimensional problem, transversely isotropic ground. *J Mech Phys Solids* 1962;10(1):73–83.
- [16] Cook NGW, Hoek E, Pretorius JPG, Ortlepp WD, Salamon MDG. Rock mechanics applied to the study of rockbursts. *J S Afr I Min Metall* 1966;66:435–528.
- [17] Fairhurst C. Newton in the underworld. *Hydraul Fract J* 2017;4(1):18–31.
- [18] Filonenko-Borodich M. *Theory of elasticity*. Konyaeva M, translator. Moscow: Peace Publishers; 1963.
- [19] Wyllie DC, Mah CW. *Rock slope engineering: Civil and mining*. 4th ed. New York: Spon Press; 2004.
- [20] Hoek E, Brown ET. *Underground excavations in rock*. London: Spon Press; 1990.
- [21] Hoek E, Marinov P. A brief history of the development of the Hoek-Brown failure criterion. *Soils Rocks* [Internet]. 2007 Nov [cited 2017 Jul 4];30(2): [about 13 p.]. Available from: <https://roscience.com/documents/hoek/references/H2007.pdf>.
- [22] Barton N, Lien R, Lunde J. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mech* 1974;6(4):189–236.
- [23] Barton N. 2011 Müller lecture: From empiricism, through theory, to problem solving in rock engineering [Internet]. In: *The 12th ISRM International Congress on Rock Mechanics*; 2011 Oct 18–21; Beijing, China; 2011 [cited 2017 Jul 4]. Available from: <http://www.isrm.net/gca/index.php?id=1066>.
- [24] Cundall PA. A computer model for simulating progressive, large scale movement in blocky rock systems. In: *Rock fracture: Proceedings of the International Symposium on Rock Mechanics (volume 2)*; 1971 Oct 4–6; Nancy, France; 1971. p. 129–36.
- [25] Cundall PA. An approach to rock mass modelling. In: Potvin Y, Carter J, Dyskin A, Jeffrey R, editors *Proceedings of the 1st Southern Hemisphere International Rock Mechanics Symposium [CD-ROM]*; 2008 Sep 6–19; Perth, Australia. Crawley: Australian Center for Geomechanics; 2008.
- [26] Cundall PA, Pierce ME, Mas Ivar D. Quantifying the size effect of rock mass strength. In: Potvin Y, Carter J, Dyskin A, Jeffrey R, editors *From rock mass to rock model: Proceedings of the 1st Southern Hemisphere International Rock Mechanics Symposium (volume 2)*; 2008 Sep 6–19; Perth, Australia. Crawley: Australian Center for Geomechanics; 2008. p. 3–15.
- [27] Fairhurst C. Why rock mechanics and rock engineering? 17th ISRM Online Lecture [Internet]. 2017 Apr 27 [cited 2017 Jul 4]. Available from: <https://www.isrm.net/gca/?id=1309>.
- [28] Pierce M, Cundall P, Potyondy D, Mas Ivars D. A synthetic rock mass model for jointed rock. In: Eberhardt E, Stead D, Morrison T, editors *Rock mechanics: Meeting society's challenges and demands. Volume 1: Fundamentals, new technologies & new ideas*. London: Taylor & Francis Group; 2007. p. 341–9.
- [29] Potyondy DO. The bonded-particle model as a tool for rock mechanics research and application: Current trends and future directions. *Geosys Eng* 2015;18(1):1–28.
- [30] La Pointe P. It's the cracks that matter: DFN modeling of everything rock [presentation]. In: *The 46th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*; 2012 Jun 22–28; Chicago, IL, USA; 2012.
- [31] Garza-Cruz TV, Pierce M, Kaiser PK. Use of 3DEC to study spalling and deformation associated with tunnelling at depth. In: Hudyma M, Potvin Y, editors *Deep mining 2014: Proceedings of the Seventh International Conference on Deep and High Stress Mining*; 2014 Sep 16–18; Sudbury, ON, Canada. Crawley: Australian Center for Geomechanics; 2014. p. 421–34.
- [32] Pierce ME. Forecasting the vulnerability of deep extraction level excavations to draw-induced cave loads. *Engineering* 2017. In press.
- [33] Starfield AM, Cundall, PA. Towards a methodology for rock mechanics modelling. *Int J Rock Mech Min* 1988;25(3):99–106.
- [34] Holling CS, editor. *Adaptive environmental assessment and management*. Chichester: John Wiley & Sons; 1978.
- [35] Hooke's law [Internet]. [cited 2017 Jul 4]. Available from: https://en.wikipedia.org/wiki/Hooke%27s_law.
- [36] Nadai A. *Theory of flow and fracture of solids (volume 1)*. New York: McGraw-Hill; 1950.
- [37] Sakurai S. Field measurements and back analysis in rock engineering. 7th ISRM Online Lecture [Internet]. 2014 Nov 28 [cited 2017 Aug 21]. Available from: <http://www.isrm.net/gca/?id=1171>.
- [38] Dehkoda S, Fairhurst C. Rapid excavation and tunneling techniques. *Hydraul Fract J* 2017;4(1):101–8.

[†] The dinner was at the home of Dr. J. Van Allen and his family in Silver Spring, Maryland. *Opening Space Research, Dreams, Technology, and Scientific Discovery*, George H. Ludwig (2011), see Chapter 3: The international geophysical year. See also <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2011EO400009/abstract>, https://en.wikipedia.org/wiki/International_Geophysical_Year.

- [39] Lynch AJ, Rowland CA. The history of grinding. Englewood: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration; 2005.
- [40] Von Rittinger RP. Lehrbuch der aufbereitungskunde. Berlin: Ernst and Korn; 1867. German.
- [41] Kick F. Das gesetz der proportionalen widerstande und seine anwendung. Leipzig: Arthur Felix Verlag; 1885. German.
- [42] Bond FC. The third theory of comminution. *Trans AIME* 1952;193:484–94.
- [43] Bond FC. Crushing and grinding calculations, Part I and Part II. *Br Chem Eng* 1961;6:378–85,543–8.
- [44] Cook NGW, Joughin NC. Rock fragmentation by mechanical, chemical and thermal methods. In: *Proceedings of the 6th International Mining Congress*; 1970 Jun 1–7; Madrid, Spain; 1970.
- [45] Fairhurst C, Brown ET, Detournay E, de Marsily G, Nikolaevshiy V, Pearson JRA, et al. Underground nuclear testing in French Polynesia: Stability and hydrology issues. A report of the International Geomechanical Commission. Paris: Documentation Française; 1999. Available from: <https://conservancy.umn.edu/handle/11299/162862>.
- [46] “Innovation—mining more for less”, on the theme of innovation; excerpts from Ian Smith’s speech on 30 October 2013 [Internet]. 2013 Nov 18 [cited 2017 Jul 4]. Available from: <https://ceecthefuture.org/comminution-2/innovation-mining-less/>.
- [47] Anon. Robbins celebrates 60 years of achievement [Internet]. Phoenix: TunnelTalk; 2012 Oct [cited 2017 Jul 4]. Available from: <https://www.tunneltalk.com/Accolades-Awards-Oct12-Robbins-celebrates-60-years-of-TBM-achievement.php>.
- [48] Chitombo G, Trueman R. Long round drilling—State-of-the-art. AMIRA P475-Scoping Study. Brisbane: CRC for Mining Technology and Equipment, Julius Kruttschnitt Mineral Research Center; 1997.
- [49] Furtney JK, Cundall PA, Chitombo GP. Developments in numerical modeling of blast induced rock fragmentation: Updates from the HSBM project. In: Sanchidrián JA, editor *Rock fragmentation by blasting: Proceedings of the 9th Int. Symp. on Rock Fragmentation by Blasting—Fragblast 9*; 2009 Sep 13–17; Granada, Spain. London: Taylor & Francis Group; 2009. p. 335–42.
- [50] Fairhurst C. Some possibilities and limitations of rotary drilling in hard rocks. *Trans Inst Min Eng* 1955;115:85–103.