

主编 T. 斯韦吉茨基
G.R. 拜尔德
T.N. 李特利

西澳大利亚采矿岩土工程会议

译文集

冶金部科技司资源环保处
一九九六年八月

3
4

西澳大利亚采矿岩土工程 会议译文集

主编 T. 斯韦吉茨基
G.R. 拜尔德
T.N. 李特利

冶金部科技司资源环境处
1996年8月

译 者 的 话

四十多年来,我国铁矿勘探、开采取得了巨大的发展,探明工业储量居世界第五位,矿石产量由建国初的 59 万吨增加到 1995 年的 2.46 亿吨,采掘规模居世界首位。现已建成的露天铁矿大部分已进入深凹开采,形成大量较高边坡;地下铁矿也大部分进入深部开拓和后期开采,存在许多地压问题急待研究处理。实践证明,采矿地质力学的发展对矿山设计和生产有着重要作用,对改善露天边坡和地下巷道的稳定性有重要意义。因此,重视采矿地质力学的发展和应用,必然对提高我国铁矿山的安全性和生产能力起到很大的促进作用。

为了进一步推动我国采矿地质力学的发展,促进采矿地质力学研究成果的应用,我们组织翻译了 1992 年第一届西澳大利亚采矿地质力学会议文集——《Western Australian Conference on Mining Geomechanics》。本书内容丰富,涉及矿山管理、采矿工程、采矿地质力学、工程地质和工程地球物理等领域,全面反映西澳大利亚在采矿地质力学方面的进展和研究成果,我国从事矿山边坡研究及其它相关行业的工作者可以从中汲取有益的经验 and 知识。

本文集的编译承蒙冶金部科技司、外事司的大力支持。参加译校工作的有祝玉学、张绪珍、卢世宗、牛京考、熊传治、江国正、张四维、杨颖、纪衡、雷平喜、周曲波等同志。最后由牛京考、祝玉学、熊传治、江国正、张四维等同志做了总的审核工作。

1996 年 8 月

绪 言

西澳大利亚矿业学院的采矿工程和矿山勘测系荣幸地出版了于1992年6月在卡尔古利市召开的第一届西澳大利亚采矿地质力学会议论文集。近年来,西澳大利亚和世界各地在采矿地质力学方面有了很大的进展。这里包括:生产和设计部门、教育和研究机关、以及培训和咨询机构。地质力学的重要性对矿山设计和生产现今已得到充分证明,此处,地质力学专业的作用现也已变得越益明显,而且被充分肯定。

会议选择“采矿地质力学”的主题是因为考虑到在采矿工业中,提出的有关地质力学的论点有各种各样。我们认为召开这次会议将能为专业之间的交流,引导建立新的理论,开辟新的信息交流渠道提供一个良好的机会,从而提高矿山的安全性和生产能力。

本会议的目的是为矿山管理、采矿工程、采矿地质力学、工程地质和工程地球物理等领域的咨询和研究工作者的专业活动提供一个论坛,从而为推进采矿地质力学理论和实践作出贡献。在会议的三日期间内,发表的文章内容有:地下矿和露天矿的地质力学、岩石测试和模型制作、岩体特征、破碎和爆破以及环境的地质力学。

原来会议打算针对西澳大利亚的采矿地质力学问题作为本次会议的主题,但根据澳大利亚和世界各地大量事实证明:这样的会议已期待

很久了,因此,在汇编的论文集中有 50 多篇论文,由于内容丰富多彩,使得会议的时间由原来计划的 2 天增加到 3 天。此处,在会议的后期专门组织了地下爆破专题讨论会。

这里我们感谢所有为这次会议准备和按时提交文章的作者。我们也感谢为这次会议成功地召开提供帮助的所有的人们,特别是组织和论文评审委员会。

主 席:T.N. 李特利

副主席:T. 斯韦吉茨基

西澳大利亚卡尔古利市 1992.5

目 录

综 述

1	澳大利亚采矿地质力学的发展、成就与挑战	(1)
2	与采矿地质力学有关的动力学的某些特性	(10)
3	西澳大利亚采矿地质力学	(19)

地下矿山岩土工程

4	回采空间的计算机辅助设计	(26)
5	地下巷道的支护	(31)
6	锚杆支护要求的经验标准	(38)
7	地质力学在计划薄矿脉分层充填采矿法中的作用	(43)
8	长壁开采法中平巷的地压及其控制	(52)
9	天井稳定性的地质力学评价	(57)
10	加固的分类系统及其在设计中的应用	(66)
11	地下矿柱强度的确定	(75)
12	采用概率关键块和相关的风险分析进行坚硬岩石开挖支护设计	(81)
13	巷道支护回填对巷道周围软岩变形特性的影响	(86)

露天开采岩土工程

14	鲸背山铁矿边坡稳定性监测	(90)
15	大地摄影测量在露天矿边坡监测中的应用	(93)
16	概率概念在红土边坡设计中的应用	(97)
17	构造地质及其在鲸背山铁矿边坡稳定性分析及采场边坡设计中的应用	(103)
18	锚索在鲸背山矿的实地应用	(111)
19	莱迪布特梅尔矿滑坡再回采	(117)
20	边坡监测的测量方法	(126)
21	安全处理露天矿边坡不稳定的方法	(135)
22	边坡稳定性极限均衡分析中地质构造面的考虑	(140)

岩石试验与岩土工程模型

23	多标度地质力学模拟	(144)
----	-----------------	-------

24	四分之一比例推土机模型模拟节理状岩石挖掘的初步成果	(154)
25	试件尺寸对原岩强度的影响	(159)
26	关于坚固岩芯直接拉伸试验准则的表述	(166)
27	离心机模拟在采矿和岩石力学中的作用	(176)
28	关于泥岩力学性质和声波性质相互关系的实验研究	(183)
29	将弹性梁理论用于采矿平巷改进了的顶板设计公式	(187)
30	含气体煤或岩石的断裂机理新模型	(193)

岩 体 特 性

31	提高原位应力测量精度的技术	(197)
32	岩体分类在坎巴尔达镍矿山的应用	(204)
33	为工程设计预测岩体强度和变形性——实验室实践	(211)
34	作为地质力学工具的岩芯钻孔	(224)
35	采用电子罗盘和电子记录系统进行岩石构造测绘	(230)

破 碎 与 爆 破

36	垂直柱状装药造成的弹性半空间表面上的质点运动	(240)
37	非爆破破碎岩石方法在地下金属采矿工业中的应用	(246)
38	岩石采用高压水射流的可切割性	(256)
39	西澳纽曼鲸背山铁矿境界爆破的最新进展	(267)
40	可爆性指数用于露天矿山爆破设计	(273)
41	模糊集理论和专家系统技术在爆破中的应用	(277)

环 境 岩 土 工 程

42	预测矿山尾矿固结性能的方法	(287)
43	科利尔煤盆地为最优化疏干作业砂岩含水层的岩土工程评价	(294)
44	东部金矿区废弃地下矿山引起的岩土工程问题	(302)

澳大利亚采矿地质力学的发展、成就与挑战

E.T. 布朗

提 要 自 19 世纪 50 年代以来,采矿成为澳大利亚最重要的工业之一。自 20 世纪 60 年代初,它在澳大利亚作为学科出现以来,地质力学对澳大利亚采矿工业的技术发展和竞争作出了很大的贡献。本文概述了澳大利亚采矿地质力学的发展,并讨论了某些最重要的成就。扼述采矿工业中最新地质力学关注点以及未来可能的某些挑战。

1 导引

地质力学是研究地质材料的力学响应。它涉及到土和岩石的物理、力学性质和响应,及其与水的相互作用。它包含岩石力学学科,1966 年美国岩石力学国家委员会把岩石力学定义为“岩石和岩体力学性能的理论与应用科学;这是因为力学分支与岩石和岩体对其物理环境的受力场的响应有关”。国际岩石力学协会和章程扩展了这个定义,即“岩石力学领域包括与岩石和岩体物理、力学性态有关的所有研究,以及为深入了解工程场地的地质过程知识而进行的应用”。

采矿地质力学是地质力学(包含岩石力学)的一部分,研究地质材料(土、岩石和水)的物理和力学性态方面知识在采矿结构物(包括开挖)的调查、设计、实施和性能中的应用。图 1 说明采矿地质力学的主要学科的许多组成部分。

很清楚,地质力学是基础采矿科学。虽然有关原理包括工程力学原理保持相同,但在露天开采和地下开采,金属矿开采和煤矿开采上有不同的重点。不考虑有关的采矿技术,对矿山结构物的性能,可指定 4 个通用的地质力学目标(Brady and Brown, 1985)。

- (a) 保证受主矿源、采空区、综合矿体和邻近地区岩石限定的完整矿山结构物的总体稳定性;
- (b) 保护较大的矿山工作巷道,在其设计工作年限内都要如此;
- (c) 在矿石生产集中区内或周围,提供到安全工作地点的可靠通路;
- (d) 保护未采矿石储量的可采条件。

澳大利亚是一个地表面积近 7700 万 km^2 的岛状大陆,为世界第 6 大国,但也是人口最稀少国家之一;长期以农产品和矿产品出口为主的资源丰富国家,永久性基地的保障需要有资源开发企业,并且开采活动本身也对澳大利亚地质力学的发展提供较大的激励。澳大利亚的第一个采矿机构是在 19 世纪 20 年代新南威尔士的纽卡尔煤矿。国家第一个金属矿(银-铅-铜)是 19 世纪 40 年代在南澳大利亚露天开采。1851 年 2 月在 NSW 的萨默希尔河爱德华·哈格雷夫斯在地表发现可采金矿,同年在维多利亚殖民区内的克伦斯和布尼尼翁,发现更大金矿,从而导致较大的本土采矿工业的首次发展(Blainey, 1963)。继这些发现之后的金矿突进带来大量人口移入,突出了房屋、运

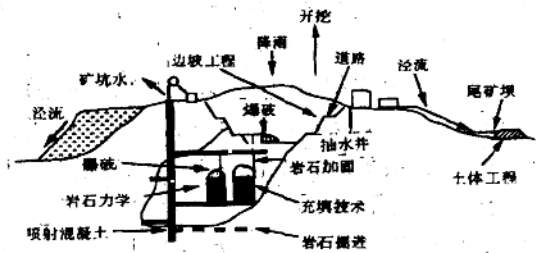


图 1 采矿地质力学的构成部分

输、供水和卫生设施的保障。

从这开始,尽管历经周期性盛衰,采矿工业对澳大利亚的发展、它的出口利润和生活标准极为重要。近 30 年来,澳大利亚通过基础研究和应用研究,对地质力学的进展作出了重大贡献。在澳大利亚采矿工业中,地质力学的应用已成为技术革新的一部分,在日益困难的经济环境中它支持了采矿工业的发展和国际竞争(Watson, 1987)。

本文概述澳大利亚采矿地质力学的发展,以及地质力学对澳大利亚采矿工业所作的某些较大贡献。最后,讨论采矿地质力学的某些现代企业和面临的未来挑战。

2 发生与发展

当澳大利亚最初进行采矿地质力学工作时,试图规定执行,尽管非常吸引人,但还是无效的。澳大利亚的最初的矿工和工程师来自英格兰,他们主要在北部煤矿山、康沃耳的锡和铜矿山获得了经验。最早的政府采矿官员之一是来自北安伯兰德的 John Busby,他于 1824 年 2 月提出矿物测量人员和土建工程师进驻新南威尔士的殖民地。他开始的任务是开发纽卡斯尔煤田。但是,对他最好的记忆也许是 Busby 隧道开挖,3.6km 长供水隧道,在 1827~1937 年间逐渐变成雪梨市。

19 世纪 40 年代已经开采的南澳大利亚银-铅和铜矿山,采用科尼什矿工及其经验或“首领”引进的开采方法与工程方法。维多利亚金矿区的开采最初是冲击砂矿,但不久就发展成开采地下砂矿床,然后开采巴拉腊特和本迪戈的石英脉。截止 1895 年,在本迪戈,乔治兰塞的 180 个矿山已达到 970m 深,使它成为当时世界上最深矿山。到这时,采用了从欧洲其它国家和美国引进的采矿方法和选矿方法,局部改进了原本英国的方法(Carroll, 1988)。

澳大利亚采矿工程师协会成立于 1893 年,于 1921 年转成澳大利亚采矿与冶金协会。在协会会报的早期卷中涉及主要的采矿地质力学有关问题是用木支架支护(例如 Godfrey 1901, Beaumont 1903),当然,在近代地质力学中没有这些报道。在南澳大利亚,最早对水流入地下矿山的控制予以极大关注。在罕见的采矿地质力学的早期论文中,Kenyon(1901)讨论了美国和澳大利亚某些矿山包括本迪戈的 180 个矿山中地下坝或挡土墙的建设。

尽管地质压力和采矿沉陷的一般论题在 19 世纪 70 年代欧洲和北美洲已成为系统研究的课题(例如 Fayol 1885; Young and Stock, 1916),但澳大利亚对采矿地质力学发展的贡献,直至 19 世纪 60 年代初期,似乎是极小的。

20 世纪 50 年代初期,开始发生变化,当时,岩石锚杆引进澳大利亚的地下煤矿(例如, McKenney, 1953, Horseman, 1954)和金属(例如, Yates and Holly, 1956; Cawdle, 1957)矿山。但是,1949~1969 年间,不朽功绩的雪山水力发电规划的设计和施工,对澳大利亚实用地质力学研究和实践给予较大的推动。最有意义的进展是出现了岩石力学学科,特别是以下领域:地质数据收集和分类(Moge, 1959),单位应力测量(Alexander, 1960),地下开挖设计(Lang, 1957)和岩石锚杆的理论与实践(Lang, 1957, 1961; Pender et al. 1963)。在土坝和堆石坝设计与施工方面,在监测坝体性能的测试仪器方面(Hosking and Hilton, 1963)所做的贡献也为采矿工业的继后的发展打下基础。

澳大利亚采矿工业很快就利用 50 年代和 60 年代发生的岩石力学专业知识的发展。在 60 年代,许多采矿公司采用雪山规划所积累的知识,提出专门问题报告(Barnes, 1963; May 1980)。在 1963 年,芒特艾萨矿山建立一个强有力的应用岩石力学小组并在世界上任何地方从事的特殊采矿作业的工作。Davies(1967)肯定了 Mathews and Edwards(1969)所述的岩石力学程序对芒特艾萨采矿作业的重要影响。这些发展,得到了 J.C. Jaeger、澳大利亚国家大学(堪培拉)优秀研究人员及合作者组成的小组自 50 年代后期以来所进行的基础的和应用的岩石力学研究的极大支持。

从这时起,采矿地质力学成为澳大利亚其它几所大学的研究题目,并很快受到较高等级的奖励

(例如 Radmanovich, 1960; Rosengren, 1961), 使采矿地质力学专题的论文在澳大利亚得到发展(例如, Hargraves, 1958, Radmanovich and Hargraves 1962, Rosengran, 1963)。从 60 年代中期起, 澳大利亚采矿工业成为地质力学研究的主要倡议者。尽管某些研究经费直接由个别采矿公司提供给研究组(例如, Watson, 1987), 但通过澳大利亚矿物工业研究联合有限公司(AMIRA)提取很大比例的工业基金。

AMIRA 成立于 1959 年, 以提供合作研究项目的协调和开创, 以合作研究作为它的主要活动之一(May 1980, 1986)。AMIRA 与研究组签订合同, 对已识别出的问题进行研究, 因为这些问题对企业的某一部分至关重要。除了它的会员费以外, AMIRA 的许多公司为他们特别感兴趣的各个项目提供资金。这样, AMIRA 起到工业界的科研经纪人和管理载体的作用。他们开初的业务与矿物加工和勘探有关。开始介入采矿地质力学是 1966 年在帝国学院(伦敦)倡议设立露天矿边坡稳定性项目。AMIRA 在澳大利亚主办的第一个地质力学项目是节理岩石响应特性的实验和数值研究, 由汤斯维尔大学进行并提供资金的, 从 1968 年 1 月起为期 3 年(May 1980)。

地质力学的综合领域的学术活动在澳大利亚开始于 1952 年 6 月, 当时, 由墨尔本大学土木工程和澳大利亚工程师协会组织了土的剪切特性讨论会。讨论会结束时, 作出决定, 把这次讨论会叫做第一届澳大利亚-新西兰土力学和基础工程讨论会, 并且以后按固定时间间隔持续召开讨论会。一系列的每四年一次的澳大利亚-新西兰讨论会(自 1971 年以来改作地质力学)自此保持下来。自 1971 年布里斯班讨论会以来, 采矿地质力学在这些讨论会中占有主要地位。

岩石力学作为独立学科出现以后, 1962 年成立国际岩石力学协会, 并于 1966 年在里斯本召开他的第一届国际大会, 澳大利亚作者提交了唯一一篇论文。在澳大利亚, 有比较少的专业人员兼顾对土木和采矿工程、土力学和岩石力学有兴趣的。产生了最好由一个团体担负起地质力学协会的信念。相应地, 于 1970 年, 在澳大利亚工程师协会、澳大利亚采矿和冶金专科学校联合主办下, 成立了澳大利亚地质力学协会, 由 D. M. Trollop 任创办主席。

所以, 可以得出结论, 截止 1970 年, 澳大利亚采矿地质力学完全确立。在以前 10 年, 已经建立了对较大采矿公司贡献的跟踪纪录, 在澳大利亚各大学已经培养出研究生和大学毕业生, 已经有了工业研究经纪人和管理机构的参与, 并受到适当的学会活动的支持。这一阶段对该学科的继后发展和成就发挥了重要作用。

3 重大成就

3.1 意义

澳大利亚已经并仍在对地质力学和综合发展及其在采矿工程、土木工程中的应用作出很大贡献。对于比较小的国家, 我们的成就是令人钦佩的。将选择若干个有特色的贡献作以简要讨论, 来说明澳大利亚在采矿地质力学领域的成就。选择必然是个人的, 因人而异的, 并不企图是权威性的。它也许反映作者本人在地下“坚硬岩石”开采的兴趣, 将按大致的年度顺序讨论所选择的澳大利亚对采矿地质力学的 7 方面贡献。

3.2 地下巷道的设计和加固——雪山水电规划

似乎脱离常规, 讨论所选择的第一个贡献实际上与采矿作业无关。第 2 节强调了 T. A. Lang 领导的小组在雪山水电发电规划中对现场调查研究方法、地下岩石巷道的设计与加固所作的贡献。Lang(1957, 1961)是第一位系统解释这种方法的, 按照这种方法, 在巷道顶, 系统的岩石锚杆形成一个加固岩石的不用支护的拱(图 2)。根据这个理解, Lang 提出岩石锚杆的一组设计准则, 至今仍在使用。在雪山规划中, 还首创地把岩石锚杆用于永久性支护(Pender et al. 1963)。

在 50 年代后期和 60 年代初期,雪山规划所作的地下巷道设计和施工的进展引起世界范围的注意,并在许多方面领先于世界。这些贡献的回顾证明对它们所给予的注意是完全正确的(Hoell and Brown, 1980)。它们对采矿工程和土木工程目的的巷道设计和加固有长久性的影响。

3.3 单位应力测量

开采前地层中的应力状态的知识,对地质力学在采矿的许多应用中都是重要的,确实,单位应力测量成为雪山水电规划的岩石力学活动(Alexander, 1960),岩石力学在早期澳大利亚煤矿和金属矿开采中应用(Radmanovich and Hargraves, 1962; Barnes, 1963; Mathews and Edwards, 1969; Stephenson and Murray, 1970)、早期大学研究(例如, Hoshins, 1966, 1967)的一部分。

60 年代,对几种应力测量仪器包括扁千斤顶(Alexander, 1960; Hoskings, 1966)、套孔法(Hoskins 1967; Stephenson and Murray 1970)的开发和应力,对这些仪器所获得结果的解释,作出有价值的贡献。然而,70 年代,是由 Worotnicki 和 Walton (1976),后来由作出较大技术发明的 CSIRO 应用地质力学局研制的空心气体三轴应力传感器。一段时间,这种仪器也许是世界上最广泛、成功地用于测量岩石中完整应力张量的方法。在不可通达测量场地的场合,采用水力压缩法进行应力张量二个分量的可靠直接测量。CSIRO 应用地质力学局的 Fnever 及其同事对水压裂仪器和技术的开发作出较大贡献,这种仪器和技术广泛用于全澳大利亚(Fnever, 1988; Fnever et al. 1990)。

由于 30 年间的努力和以往 15 年 CSIRO 空心气体应力传感器的普遍有效应用,现在澳大利亚拥有可用于世界任何国家的单位应力测量的最全面、可靠的一个数据库。Brown 和 Windsor(1990)介绍了 1989 年末的应力测量的汇编(图 3)。数据是连续收集的,并不断更新澳大利亚的应力图。

3.4 水泥充填采矿方法

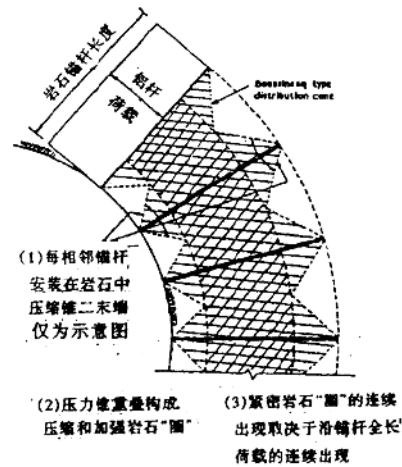


图 2 巷道周围不用支护岩石加固圈的产生

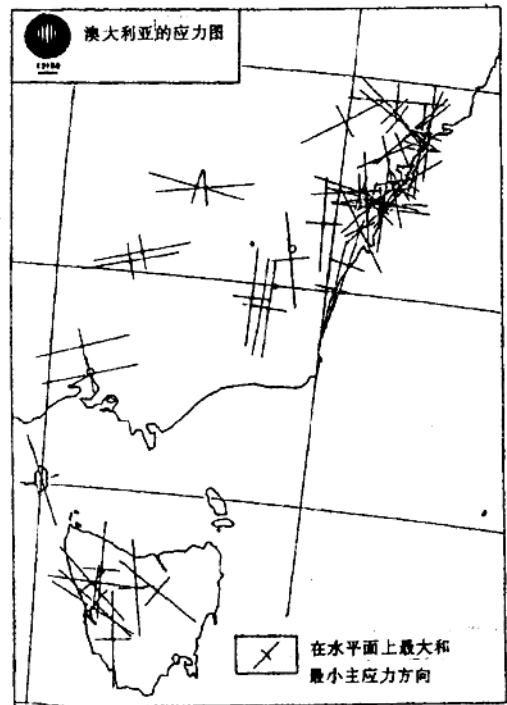


图 3 东南澳大利亚水平主应力方向的选择性图示

50 年代以前采用的干式充填,在澳大利亚许多地下金属矿已用水力分层充填所替代(例如, Cawdle 1957; Yates and Holly, 1956)。机械分层充填采矿法于 1964 年芒特艾萨的拉塞库斯铅矿体引进(Davies, 1967), 1965 年在利巴尔铜矿 C. S. A 矿山采用(Brady et al, 1969)。在 70 年代, 分层充填已成为图 4 所示的 10 个矿山的主要地下金属矿开采方法。

1969 年, 澳大利亚矿业研究协会发起的涉及分层充填采矿问题的研究课题, 由 CSIRO 应用地质力学局开始执行。在继后的 10 年间, 这个项目及其继承人, 与采矿公司内部的研究开发问题结合在一起, 对各矿山生产率的发展起到一定作用。在水力充填技术(Thomas 1981), 锚索和合缝加固、监控岩体性能的仪器(Enever et al, 1977, Willoughby, 1981), 数学模型和对顶挂性能的了解(Worotnicki et al. 1980, Lee and Bndges 1981)等领域, 取得特别重大的进展。

Willoughby(1981)概述了图 4 中所示各矿产地获得的变化如下:

无轨设备的引进在其中大多矿产地有了较大发展, 但是, 另外的进展认为是岩石力学应用和材料状态较好了解的缘故。一般, 这使分层充填工作面高于澳大利亚以往采用高度, 且矿粒较小。自 1975 年以来, 另一变化包括: 金岛钨矿成功引进留放矿挂分层充填法; 新南威尔士州利巴尔 C. S. A 矿山从完全分层充填变成深孔空场采矿法; 芒特艾萨多矿体系统减少限制分层充填顺序的应用; 使以前使用木支架矿山, 其木支架使用量惊人的降低。

虽然, 这些变化最初是从经济考虑开始的, 由劳力和材料成本增加, 澳大利亚开采量降低而产生的, 但是这些变化一部分是由于工业界对岩石力学研究的需要和应用的接受。

3.5 大断面空场回采法

上一节已经提到, 科巴的 C. S. A 矿由分层充填深孔空场采场法。虽然, 分层充填法在某些地方仍在使用, 特别是在西澳大利亚的东部金矿区(Swindells and Szwedzicki 1991), 经济上的制约使得大量的澳大利亚地下金属矿山采用空场法, 通常回填。这个发展结果强烈依靠采矿地质学知识, 和“分层充填时代”积累的专门经验。地质力学对这些发展的贡献, 以芒特艾萨 1100 矿体空场采矿法发展的下列概述完全可以说明(Watson, 1987)。

在 20 世纪 60 年代后期和 70 年代初期, 较大的采矿研究计划在芒特艾萨各矿山和澳大利亚的许多研究机构开始执行, 拟定 1100 矿体的开采系统, 其排定为之后 20~30 年主要铜矿资源。

这是由于该矿体具有许多不同于芒特艾萨以前所开采矿体的实际性质。它们是

- 大的实际尺寸 2500m(长)×450m(宽)×100~300m(高);
- 地表以下深度增大(700~1000m), 使单位应力增大;
- 高的岩石温度达 +40℃。

在对该矿体建立新的采矿系统时, 必须满足许多目标, 包括:

- 矿体回采率最大, 地质品位降低最小;

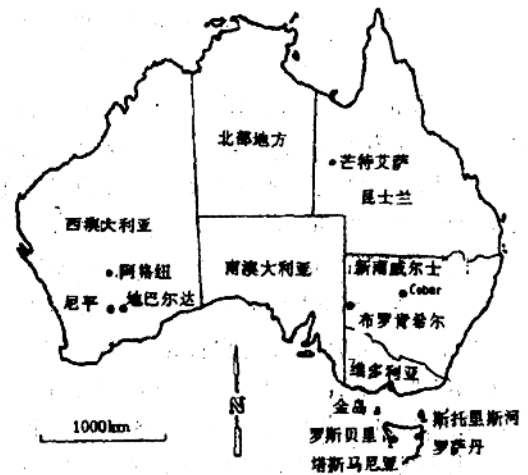


图 4 1980 年澳大利亚分层充填采矿矿山

- 达到低开采成本;
- 保证产量目标;
- 确保安全生产条件。

达到这些目标所要克服的最大困难与矿体的绝对尺寸有关。这就决定,需要留下较高比例的矿体作为矿柱,以往证明这些矿柱是难以开采的,招致较高成本,品位贫化和低的回采率。

为了帮助选择矿房和矿柱尺寸,开展了2个联合研究项目:

1. 不同矿柱和矿层尺寸、不同开采顺序的三维物理模拟;
2. 研制分析回采顺序的应力分析程序,与昆士兰大学土木工程系人员合作。

选择和最终开采布置图要求稳定的填料充填第一次回采矿房。这就需要研究低成本胶结充填,通过与新南威尔士大学采矿工程学院的工作人员联合研究,已经进行(Williams, 1977)。

而且,利用矿房和矿柱的实际尺寸和爆破孔穿凿技术的进步,必须研制炸药和起爆器,使之爆破大吨位矿量,在50万t到100万t范围。按照英国化学工业公司澳大利亚控股有限公司和芒特艾萨矿山有限公司指导的合作研究程序,研制了适合的炸药和电子引爆系统。合成的能变性泵送浆状炸药,经15年以上的应用,证明是成功的。

由于这些研究项目的直接结果,芒特艾萨的铜金属产量从70000t/a增加到170000t/a。据Watson(1987)报告,到那时,以最小贫化、高回采率和低成本开采了高品位铜矿石60Mt,包括从矿柱回采的24Mt。这使得芒特艾萨各矿山在金属价格下落10倍的时期,仍在世界上保持竞争地位。此外,所研究的采矿方法也使地下工人在安全、环境上更可接受的条件下工作。空场采矿方法的这些以及继后的发展都强烈地依赖于胶结充填的应用(Williams 1977),Barrett and Cowling 1980)和锚索技术。

3.6 锚索和锚栓加固

20世纪70年代初,锚索(Cable bolt)和锚栓(dowel)加固引进到澳大利亚的地下金属矿山(Clifford 1974)。虽然在加拿大和斯堪的纳维亚同时对这种技术感兴趣,但澳大利亚在锚索加固的研究和实践上都领导世界。最初应用于分层充填采矿(Fuller, 1981),但继后,预置锚索加固对地下采矿的大尺寸空场采场方法的引进是非常重要的(Bywater and Fuller 1983; Thompos et al. 1987)。澳大利亚工程师不仅研制和改进了目前最高水平锚索加固技术,他们还有关力学理解和适当设计方法的提高作出重大成就(例如,Fuller and Cox 1978)。几乎可以置信,即便最新研制系统(例如Hutchins et al, 1990),澳大利亚仍然在锚索和锚栓加固工艺方面领先世界。

本世界70年代和80年代,露天金属矿山边坡工程引起极大关注。建设了较多的露天矿山,对日趋加陡露天矿边坡的要求导致锚索加固技术的发展和广泛应用。在风化岩石中,用挖掘而不是爆破方法形成最终露天矿边坡,减少了爆破破坏影响,并允许采用较陡的边坡。虽然作了很大的努力在别处用锚索加固露天矿边坡,但在澳大利亚,值得注意地在西澳大利亚的铁矿、金矿等露天矿山取得很大进步。如同在地下采矿情况一样,还提高了适宜的设计方法(Dight 1983; Rosengren et al. 1987)。

3.7 矿山设计的数值模拟

自20世纪60年代后期,澳大利亚较大的采矿公司发起了应力分析的适当数值方法的研究,并把它们用于矿山设计。虽然,早已有把计算的方法用于深水平南非金矿山的长壁采矿布置的设计中,但是,研制数值方法,并应用于较普遍的地下金属采矿方法,在澳大利亚可能比其它地方更成功。

早期,芒特艾萨矿山有限公司的数值方法的主要研究由昆士兰大学G. Beer支持、由J. L. Meek

进行的(Meek, 1985)。CSIRO地质力学局也研制出一组给人深刻印象的程序,用于各种各样环境的矿山设计(Coulthard & Beer, 1988),在整个总体研究计划中,主要的具有独创性的贡献有:

- 水力和岩石胶结充填响应的有限元模拟(Cowling et al. 1983);
- 陡倾角页岩上盘性态的模拟(Beer et al. 1985);
- 无限范围的无限边界单元的研制(Beer and Meek, 1981; Beer and Watson, 1989);
- 边界元-有限元3维偶合程序BEFE的研制(Beer, 1986);
- 3维边界元程序用于露天矿边坡设计(Watson and Cowling 1985; Cowling et al. 1991);
- 应力分析方法用于研究应力控制和加固策略,在地下煤矿规划中采用(例如 Cale and Blackwood 1987)。

3.8 爆破力学

穿孔和爆破长期以来已成为岩石力学和采矿地质力学知识主体的一部分,尽管他们有点“灰姑娘身世”。由于爆破质量、岩体几何形态和矿房几何形态相互影响产生的贫化问题还是地下金属矿山长期存在并一直关心的。通过改进爆破设计和质量达到破碎块度、贫化控制和有效利用成本方面的提高,导致这个领域大约已有15年主办许多成功的研究和发展计划。

JKMRC矿业研究中心、昆士兰大学、CSIRO地质力学局、炸药厂商和各矿山公司进行了爆破研究。通过JKMRC的临近现场震动监测和分析,取得特别的成功(Mckenzie 1989)。可以利用试验或生产爆破所作的记录,辨别出各种不良的装药结构和评价爆破总效率。这种研究使得澳大利亚广泛的露天和地下金属矿山和露天煤矿爆破效率提高,穿孔和爆破成本降低(Mckenzie 1989)。评价爆破设计和预测爆破质量的计算机方法也由于这些研究程序而得以发展。

在这个领域所作出的其它进步包括:

- 爆破引起的地面震动的监测和控制(Blair 1987; Djordjevic et al. 1990);
- 块度控制、评价、模拟和优化(Cheung and Ord 1990, Kleine et al. 1990);
- 为估计单位块度尺寸分布,测绘及结构分析技术的提高;
- 识别、测量和模拟爆破引起破坏的技术的发展(Spathis et al. 1987; Chitombo and Scott 1990)。

4 现在的关注

澳大利亚目前所关注的许多采矿地质力学论题基本上不同于第3节所述的导致进步的那些。另外还有更新的原因(例如长壁煤矿开采和强调环境问题)。地层控制的一般性问题仍然是各种类型矿山的较重要的问题。由于经济上的制约,新近的重点似乎是放在期望短期(比如说2年)内给开采矿山带来成本和生产率方面回报的研究上。通过本次大会提交的论文和范围完全可以反映这些关注重心。这些论文给出的最深印象是,虽然许多论文和标题不是新的,但是,新的有效方法和技术仍在发展。

澳大利亚采矿工业的新近主要关注的地质力学问题似乎与几个关键性论题有关:

(a) 地下金属矿山较大的、较多的生产工作面的工程。这就导致充填技术、加固系统和基本数值方法的开挖设计的较大发展,其讨论于3.4、3.6和3.7节。

(b) 露天金属矿山边坡工程。如3.6节所述,要求矿山加陡边坡,导致了锚索加固技术的发展和广泛应用。特别是在西澳大利亚,许多露天金矿山的服役年限较短,增加了边坡工程的最新挑战。

(c) 地下煤矿开采的长壁法的引进,为了提高澳大利亚地下煤矿山的生产率,引进了长壁开采方法。澳大利亚许多煤矿区的地质力学条件,相对于欧洲发现的那些煤矿山来说欠有利于长壁法开采。这就引起巷道掘进与支护、工作面支护和崩落控制以及沉降预测问题。

(d) 开挖技术和效率需要改进。生产率和成本问题对澳大利亚采矿工业的所有部门,都是明显关心的。虽然,有些精力集中到机械采掘方法如 Robbins 移动式挖掘机(Sugden 1990),但是,“坚硬岩石”开采的重点仍在实现爆破效率提高上,以改进块度,降低成本和贫化上,如 3.8 节所述。

(e) 环境问题。这个论题近几年引起澳大利亚公众极大关注,并对澳大利亚采矿工业有较大影响。它们一般通过环境效果研究和对各种废料适当处理影响地质力学实践的。这引起采矿工业界日益关心这些论题,如矿山场地复田,尾矿坝设计和复田,采矿引起沉陷及其影响,地下水污染和爆破的环境影响。

Swindells 和 Szwedzicki(1991)指出了澳大利亚采矿工业的几个有特点的目前关注的地质力学问题,他们同时还评述了影响西澳大利亚东部金矿区地下矿山的岩石力学论题。该研究突出的几个特点是:

- 需要改进地层控制系统的设计方法:技术和设备,以减少岩石冒落的可能;
- 通过采矿方法和矿房地层控制、特别是矿体地层控制方法的改进,降低矿体可避免贫化水平的方法;
- 需要比较好地了解东部金矿区地震活动的控制;
- 判别与开采有关的沉陷的控制,这种沉陷可能发生在开采期间或矿山废弃之后。

5 挑战

可以把第 2.3 节叙述的澳大利亚采矿地质力学的发展和成就看作是进步,而不是革命。Lang 和其他人员在雪山进行了初期的岩石力学工作,紧接着是 Jaeger 在澳大利亚国家大学进行的工作,以及在芒特艾萨岩石力学处的成立,都体现出尽可能接近于“科学革命”(Kuhn, 1962)的变化。正如第 4 节所指出的,自那时以来,随着以许多特别重大贡献为标志的成就的平稳积累,这一过程逐渐增加。

未来的一种局面应当是持续的渐进发展。应当很迅速地制定澳大利亚采矿工业的每个部门需要注意的地质力学问题(Swindells and Szwedzicki 1991),这种通过假定采矿方法和技术本身类似的渐进发展,可能适合于露天煤矿和金属矿开采部门。在工业界内部逐渐产生关注,然而,这种逼近可能不足以保持澳大利亚在高度竞争的国际市场上的地位(Richards, 1991)。

1991 年 9 月在塔斯马尼亚岛的伯尼召开的第 32 届技术年会主题是“澳大利亚如何能够恢复地下金矿开采的领先地位”?在发言者中,显著地一致,要求改变方向。Hobbs(1991)非常清晰地指出有关问题。他的成熟曲线(图 5)为评价指定矿山、工业的一个部门或整个工业界在指定时间所处的发展阶段,提供一种方法。结论是,澳大利亚地下金属矿开采工业至少是接近曲线的峰值。

广泛承认,地下金属矿开采方法需要基本的或革命性变化。最普遍认为的需要是发展连续地采矿系统,以替代现行的穿孔、爆破出矿

“坚硬岩石”开采过程(当然,地下煤矿开采工业已在长壁法中引进这种采矿系统)。非常绝妙地是发展自动或遥控机械挖掘或岩石切割机。朝着这个目标的研究项目,目前在几个国家包括澳大利亚在内正在进行之中。地下矿石运输,采用运输

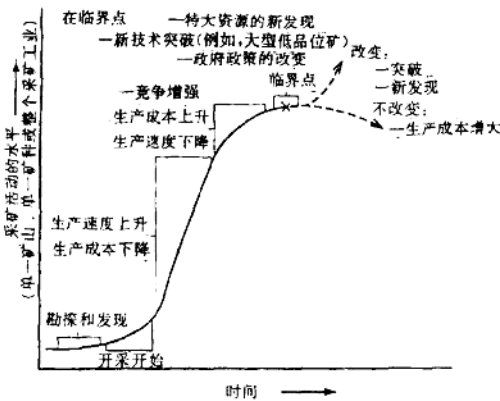


图 5 成熟曲线,显示出采矿活动随时间的变化水平

机是可能的,理想地,将需要新的提升系统(可能采用液压方法)。还可能采用机械控制方法进行掘进。有的可能必须发展在挖掘之前软化岩石的技术,以分裂岩石,更便于切割。

为了研制这些采矿系统,将需要较大的和革命性研究与开发计划。CRA 远景技术部的研究计划的各单元、新近成立的采矿技术与设备协作研究中心都是朝这些目标的。新技术基于改进的、更自动定量的描述的定义矿体、围岩的方法,改进对岩石断裂和破碎过程的了解。这些领域所涉及的研究仅提供主要的地质力学的挑战,但是上述全部,正如 Hobbs(1991)指出:

如果澳大利亚金属矿采矿工业的董事会不准作必要的投资,以保持他们的公司的竞争锋芒,那我们可能吻别我们的出口盈利、我们的生活标准和生存方式。

如果不考虑未来的途径是进化方式,还是革命方式(或者跨越工业界作为整体,二者结合),那么,实际上仍然是:人们将必须规划和开采未来的矿山。这要继续配置大量的教育和培训系统。

尽管澳大利亚采矿地质力学取得显著成就,但它们预防措施中弱点之一是缺乏地质力学实际工作人员的正规培训中心(这个一般化的一个值得注意的例外是现已不多存在的工业上定向硕士教程,这是由昆士兰大学詹姆库克指导的)。我们的许多地质力学研究人员和实际工作人员具有其它学科的背景,必须“忙碌着”学习这个学科,或必须学习其它国家的教程。除了几个例外,在许多采矿公司还没有很好地发展地质力学。更重要地,在前不久,在我们的大学里对这个学科似乎还没给予重视。有一些可喜的征兆,即已认识到这个问题,并以培训方式作以适当补救(Hobbs 1991; Little and Szwedzicki 1992)。他们的效果是有生命力的。

与采矿地质力学有关的动力学的某些特性

D.P. 布莱尔

提 要 对目前与采矿地质力学有关的岩石和土动力学的某些特性予以讨论。岩石动力特性关系到地震脉冲传播技术的应用,以评价原岩体的状态,大型试样和岩心的实验室试验,地下金属矿山岩石声响的监控。还对大的原岩体对周期性荷载的低频响应特性的评价予以讨论。土动力特性与埋入土中的爆破震动台座有关。因此,大部分讨论涉及到地质材料在动荷载下的稳定性。然而,还包括应用,因为它应用以前的经验解决普通问题:地下钻孔端点的精确位置。该讨论限于 CSIRO 和 WASM 获得的某些比较中肯的结果。

1 引 言

本要旨论述将是目前与采矿地质力学相关的岩石和土动力学的某些领域的介绍。

将按不同的详细程度考虑 5 个一般领域:1)爆破震动监测、模拟和控制;2)高频地震脉冲传播,作为评价岩体物理状态的工具;3)大型原位建筑物的低频动力响应特性;4)岩石声响(声发射)监测;5)地下钻孔“失控”的地震方法定位。

虽然,世界范围有许多机构对这些领域进行研究,但本发言不可能包容所有相关的研究。因此,重点放在 CSIRO 地质力学局在指定地区所采用的特殊方法。这种范围的限定证明是正确的。因为,我认为,CSIRO 工作在许多方面有它独到的性质不同的方法。还叙述了 CSIRO 与柯蒂恩大学合作在西澳大利亚采矿学院(WASM)最近所做的工作。

现在,叙述这些特定领域的详细内容。

2 爆破震动监测、模拟和控制

2.1 监测

矿山环境规程往往要求精确测量指定场地的爆破震动水平。环境规程是强制性的,不管场地是由基岩组成的,还是由土组成的。如果仔细地把探测器连接到无裂隙的基岩区,那么,Blair (1987)指出,连接的探测器能精确地测量基岩真实移动。然而,对于许多开采环境,在适合位置上,无裂隙基岩并不存在,并且,震动探测器必须连接在土上。如果震动台与土墙连接不良,则所测量的震动水平可能产生很大的异常(Blair, 1987a)。

普通的震动监测系统由三向排列的探测器、前置放大器、放大器和存储装置(磁带记录仪或计算机)组成。虽然,满意地放大和存储震动记录是比较简单的事情,但是,非常难于保证探测器排列精确地与震动介质连接。只讨论连接方法,因为,现在考虑的是与爆破震动监测有关的突出问题。

在多数情况下,标准作法是把探测器与打入土中的星销连接,或与原地浇注的混凝土座连接。然而,据 CSIRO 研究结果(Blair, 1989),强烈建议,必须避免这种做法。在这两例中,土与台之间的接触刚度是非常高的变量,且不可能预测。实际上,与土连接的唯一满意的方法是把探测器与仔细埋入的预制台座连接。

通过推测刚性台座(立方体或圆柱体)如钢材,特别是埋入很软的半空间如胶体的响应,可以获得地表或埋入台座的响应的实际内情。假定钢材与胶体之间所有接触点,钢与胶体焊接在一起。