

国外金属矿山
充填采矿技术的研究与应用

主编 刘同有 黄业英

中国矿业协会采矿专业委员会
中国有色金属学会采矿学术委员会
金川有色金属公司
长沙矿山研究院



国外金属矿山 充填采矿技术的研究与应用

主编 刘同春 黄业英

中国矿业协会采矿专业委员会
中国有色金属学会采矿学术委员会
金川有色金属公司
长沙矿山研究院

国外金属矿山充填采矿技术的研究与应用

编 委 名 单

主编：刘同有 黄业英

编委：(按姓氏笔划为序)

王爵鹤 刘同有 张宏光

周成浦 姚必鸿 袁家谦

徐树岚 黄业英 黄树勋

阎学增

前 言

自从古老的干式充填发展成为水力充填尤其是胶结充填以来,充填采矿技术在金属矿山的应用进展很快。胶结充填技术的应用使充填采矿法得到全面的改进,出现了用机械化作业的上向或下向分层充填、垂直分条充填、以及分段充填等采矿方法,大大地扩展了充填采矿法的应用范围。此外,还可作为嗣后充填,以利于分步骤实现全面回采。它已成为深部开采和保护地表的一种有效的采矿技术,几乎可在任何困难条件下采用。虽然,充填法一般存在工艺复杂、效率较低和成本较高的缺点,但是,方案选择合理,实际应用得当,特别是与无轨自行采矿设备和其它先进设备结合,仍能获得很高的劳动生产率,创造良好的经济效益和社会效益,因而使用也将日益广泛。

充填采矿技术涉及充填体支护机理、充填材料选择、充填系统设计与工程、充填工艺技术的应用等。现代数学方法和最新的非线性应力分析技术,包括土力学理论的评价、充填材料水动力学特性的测量与评估以及影响充填体应力——应变特性相关因素的研究等,使对围岩与充填体间的相互作用,充填材料的水力与其它输送特性及其固化过程的认识进了一步,为寻找合理的设计判据和施工理论指导提供了一定的技术基础。现代充填采矿技术的发展已将地下开采技术推向高新技术领域,使地下采矿方法获得新的技术突破,使人类能更充分地回收利用矿产资源,消除采矿对环境的危害。因此,这一技术的发展也引起采矿科技界的特别重视与关注。

近年来,国内充填采矿技术的研究与应用发展很快,在原来低浓度细砂胶结充填和低标号粗骨料混凝土充填以及高浓度细砂胶结充填的基础上,已开发出利用全尾砂为主体的高浓度全尾砂胶结充填、碎石全尾砂膏体泵送充填、高水基全尾砂速凝固化胶结充填以及块石胶结充填等新材料、新工艺、新技术。上向和下向机械化胶结充填采矿法日趋成熟,其它采矿法也已开始试验和使用。使一批经济技术实力强、装备水平高和管理好的矿山生产进入高产、高效的世界先进行列。如金川有色金属公司的两座地下矿山,成功地应用了高浓度充填工艺和下向机械化充填采矿方法,实现了“采富保贫”和无矿柱大面积连续回采,主要技术经济指标达到世界先进水平。矿石产量逐年增长,目前产量已超过300万吨/年,充填量已超过100万米³/年。凡口铅锌矿、大厂矿务局在充填采矿技术的发展和应用方面也有很好的进展。为了展示成就,总结经验,推动发展,有色系统先后在金川公司、北京和建德铜矿召开了三次技术交流研讨会议。但是,要全面提高我国充填采矿技术水平,仍有大量工作要做。应用中存在的充填质量、充填成本和作业环境等问题需要进一步解决。充填材料的评价、充填工艺、设备的选择、充填机理的认识尚需要做进一步的研究。因此,要认真吸取国外的先进技术与经验。

国外对充填采矿技术十分重视,学术交流也很活跃。自七十年代起,先后在澳大利

亚、瑞典、加拿大、南非举行过五次国际充填采矿技术会议,第六次国际充填采矿会议将于 1998 年 4 月在澳大利亚布里斯本召开。一些应用充填技术较多的国家也单独开展了有关的学术活动。为了更好地掌握国外充填采矿技术发展动向,学习国外先进经验,我们从 1988 年南非充填采矿会议论文集(Backfill in South African Mines),1993 年在南非召开的第五次国际充填技术会议文集(Minefill 93)以及德国 Schwing 公司专门为金川公司搜集的一批充填技术德文资料中共选出 51 篇文章译编成《国外金属矿山充填采矿技术的研究与应用》文集,作为技术交流资料出版,供大家参考。

这本文集内容的选编注意了新颖性、实用性和系统性的特点。凡是国内中文刊物上未查阅到而有参考价值文章,即使发表时间较早也予收入,国内中文刊物上已有的则不采用。论文能够提供新思路、新经验、新判据,以及充填体能量释放率、充填变形带新概念、可降低主管磨损的满管充填、膏体输送新工艺、粘度测量在充填中的应用等。特别是南非矿业协会研究中心对充填材料的试验研究和评价方法,对充填作为区域支护和局部支护作用的研究;加拿大充填研究方向(块石胶结充填、高浓度充填和膏体充填)和充填成本模型与综合分析;德国的膏体泵送充填技术等对我们都有极好的参考价值和实用意义。文章大多选自会议文集,反映问题比较全面和系统。为保持其系统性,我们将其归纳为三个部份,即:(一)充填采矿法的应用与发展;(二)充填材料的选择、制备、输送工艺和设备;(三)充填体支护机理及岩石力学特性。以使读者对充填技术发展的各方面都有更好的了解。

参加翻译、审核、编辑、出版工作的同志,为文集付出辛勤的劳动,在此,谨表衷心的感谢。

编 者
一九九七年五月

目 次

第一部分 充填采矿法的应用与发展

南非黄金矿山充填技术和充填系统发展中应优先考虑的问题	(1)
尾砂胶结充填的评价	(3)
用于深部矿山区域支护的充填评价	(9)
美国矿业局的充填研究	(22)
加拿大的充填研究	(30)
过去 10 年间德国金属矿山充填技术的发展	(39)
斯洛文尼亚共和国的胶结充填采矿	(48)
加拿大马尼托巴纳缪湖矿胶结碎石充填的应用	(53)
采用胶结充填回采急倾斜厚大金矿脉	(61)
日本栅原矿下部矿体的充填采矿	(68)
加彭贝里矿下向分层充填法的改进	(76)
杜伦方丹金矿 1989 至 1992 年间充填的使用情况	(83)
布赖堡矿分段法中的混凝土充填	(90)
泵送充填——一种新型的采矿方法	(94)
下向回采混凝土充填采矿法	(99)
拉梅尔斯贝格金属矿回采及充填技术发展	(106)
库克 3 号矿井多矿脉条件下的充填采矿法综述	(113)
纳入长壁开采法金矿的废石充填系统	(120)
充填与环境控制的关系	(134)
魁北克矿山充填综述及成本模型	(144)

第二部分 充填材料的选择、制备、输送工艺及设备

水力充填的充填料特性	(158)
法尔里夫斯金矿充填料试验评述	(167)
尾砂加筋胶结充填	(175)
膏体充填料的泵送和流变特性	(183)
粘度测定法在充填料水力输送中的应用	(189)
充填料输送管道材料的选择	(199)

絮凝剂及其在充填中的作用	(206)
南非金矿充填料性能的定量评价	(210)
兰德方丹庄园威特沃特兰金矿有限公司充填系统的设计	(226)
除去超细组分制备高质量充填料	(231)
南非金矿深水平的充填密闭(挡墙)	(240)
国际镍公司的膏体充填试验	(248)
金矿集团的井筒充填料浆输送立管	(258)
充填料管道输送设计中流体参数的预测	(268)
拉麦尔斯贝格金属矿混凝土充填水泥输送装置	(279)
一种用于稠料液力输送的新型四活塞泵的研制与开发	(285)
低含水量充填料的制备	(290)
细骨料胶结充填体强度的影响因素——国外矿山之研究及其结果.....	(298)
工业废料用作充填料组份——矿山的一种额外财源	(304)
薄板状矿体充填系统设计和运作方面的研究	(310)
充填前从充填料中回收具有经济价值的矿物	(316)
脱泥尾矿的充填输送系统	(325)
约翰内斯堡联合投资公司充填作业的工程研究和设计	(330)

第三部份 充填体支护机理及岩石力学特性

充填体的承载特性(非胶结充填)	(341)
充填在低下沉量采场中的支护机理	(351)
充填对地震能传播的影响	(358)
加彭贝里矿下向分层充填采矿法的岩石力学调查	(364)
对充填效用的岩石工程研究述评(1986~1992)	(372)
南非深水平金矿胶结充填体的原位性能	(380)
胶结充填体暴露面稳定性设计程序	(389)
矿山充填原地应力—应变定量测定仪器	(395)

南非黄金矿山充填技术和充填系统 发展中应优先考虑的问题

南非矿业协会研究中心资深主任 J. M. Stewart

摘 要 为建设性地将历届会议考虑的问题联系起来创造一个有益的前提。我建议这届会议应优先考虑南非黄金矿山充填方法和充填技术发展中的的一些重要问题。

1 急需解决的问题

首先,急需解决一个问题。1985年总共有311人死于岩爆和岩石冒落的故事,因岩爆死亡的人数有125人,因岩石冒落死亡的人数为186人。显然,目前迫切需要用充填来解决这类问题。如果这个问题不给予适当地解决,只能更增加其紧迫性。岩爆和岩石冒落不仅会降低生产率,无疑,将还成为与参加工会组织的劳工产生纠葛的一个社会问题。由于充填的预期效果,扩大充填法的使用范围,必定会给矿山安全这个十分重要的领域带来很大的好处。

2 不同的充填料质量要求

迄今,工作中所形成的观点之一,是不同的用途要用不同种类的充填方法,其用途逐项列举如下:

区域性支护 为适用于这种用途,要求用优质的刚性充填料,以减少弹性体积闭合和产生岩爆的危害。

岩层控制 在这种情况下,对充填料的质量要求并不十分苛刻,但要求大范围充填,且充填后不应收缩。

多矿脉开采 在这种用途中,对充填料的主要要求是在较低的应力状态下,充填料应是刚性的,以便使岩层变形位移保持最小。

环境控制 为保证封闭住上盘以免风流

通过采空区,要求用充填后不收缩的充填料进行大范围充填。

减少废石提升 如果竖井提升能力有限,可在井下制备和破碎废石作为充填料,从而增加矿石的提升量和提高效益。

3 未来的采矿生产

当今黄金价格较高,矿山开采埋深较浅的低品位矿脉在经济上是合理的,但无容置疑的是,到2000年时许多矿山或是大多数矿山的开采深度都将达到3000m以上。因此,用充填法进行区域性大面积支护的需要将日益增加,这将越发强调使用优质的刚性充填料。

4 可以理解的要求

上面简要说明的几个要考虑的问题,从而确定了以下三项基本要求:

(1) 现在就要有切实可行和可靠的系统。

(2) 为达到不同的要求需要不同的系统。

(3) 为了在合理的基础上选择所需的系统,必须定量地确定不同系统的有效性。

5 要优先考虑的问题

根据以上的基本要求,我认为在充填系统和充填技术发展中,我们应优先考虑以下几方面的问题。

(1) 要集中力量形成实用而可靠的系统,

以便能进行和评估大范围的充填。那么,这将确保用不同的系统满足不同的充填要求。要强调使用简单的设备和系统,尤其要注意研究和开发有效的充填技术,要强调使充填作业与采矿作业循环结合为一体和重视全矿充填系统的管理工作。

(2) 研究可使现有系统达到优化设计的技术。利用现有的相当可观的力量,研究构成优质充填料的粒级分布(便于泵送、充填中排水和承载);研究在水力旋流器和破碎方面已有所改进的充填料制备工艺流程。研究不仅用于优化充填料分配系统设计(如压力损失、磨损、腐蚀),也可用于优化充填系统总体设计的数据和准则。

(3) 加强基层人员对充填料制备、输送、充放和受载变形过程的定量认识。以支持和指导上述两项需要优先考虑的问题的解决。这种认

识将最终为发展新的系统以满足采矿工业的长远需要奠定坚实的基础。

6 结论

迄今所举行的历届会议主要是解决第一个要优先考虑的问题,今后的会议将主要解决第二个、第三个要优先考虑的问题。因为许多文章已经论及了充填系统、设备和充填材料特性定量评价的研究问题,所以,很可能会把其中要提交会议讨论的许多文章误以为是现在工作的无益评论。但是,参照我所提出的要优先考虑的问题的背景,则应当把要提交会议讨论的论文和主题,看作是对目前工作有所补益和对今后的发展具有指导意义的重要成果。

刘亮生 译 王维德 校

尾砂胶结充填的评价

南非矿业协会研究中心 I. H. Clark

摘 要 在某些采矿情况下,不仅要求充填体本身能自立,而且还指望能支撑顶板。因此,要求充填体在一段时间内要经得住一定的计算应力。在可供利用的充填材料中,充填料组分的选择并非可以轻易确定的,为此,提出了尾砂胶结充填的评价方法。这种评价方法的全面应用,将大大有助于在生产应用中对材料特性进行比较科学的分析,以及对充填料的选择作出决断。

1 引 言

胶结充填在许多采矿作业中得到应用。在充填料中添加水泥和火山灰的理由是:

- (1)提高充填体的承载能力(即稳定性);
- (2)在宽大的回采空间里使充填体能够自立;
- (3)为机械设备作业提供工作表面。

拉莫斯(Lamos)和克拉克(Clark)1986年对尾砂胶结充填的有关文献调查表明,它缺乏一致的试验方法和数据表示,而且很少陈述充填采矿的目的和设计准则。因此,本文提出一种尾砂胶结充填的评价方法作为响应。全面使用所提出的评价模式将能对充填料的特性作出工业比较,并有助于充填料组分的决定。

斯图尔特(Stewart)、克拉克和马里斯(Marris,1986)就充填的目的而言,描述了充填类型的选择。因此,假定业已决定采用胶结充填,随之的问题是选择能满足必要准则的充填料组分。在可供利用的材料和预定的约束条件下,这种选择可能甚至更为困难,只有在精确的材料评价后才能作出最佳的最终选择。本文以选厂尾砂、普通硅酸盐水泥和粉煤灰分别按干重比例 90:3:7 的一种充填混合物为例介绍了所建议的材料评价方法。

首先描绘组成材料,此后,按其充填特性(克拉克,1986)、渗透率和强度的变化来评价充填料。用这些数据绘制一组设计曲线,作为按要求准则构成充填料选择的基础。

2 材料特性描述

2.1 颗粒尺寸分析

图1所示为三种组成材料的颗粒尺寸分布曲线。利用液体比重计来测定 $-38\mu\text{m}$ 的部分,然后用 Microtrac 校核。虽然有一些变化,但材料的粒度组成百分数排列是:

粉煤灰>水泥>尾砂

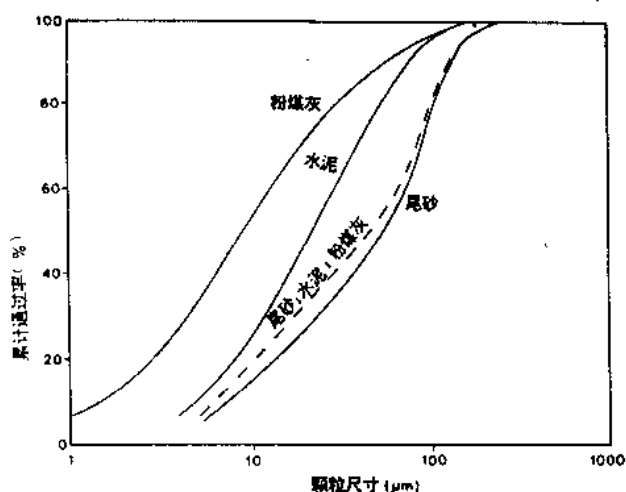


图1 尾砂、水泥、粉煤灰混合充填料及三种组分颗粒尺寸分布曲线
这三种材料的分布曲线特性如下:

材 料	$d_{50}/\mu\text{m}$	d_{60}/d_{10}	d_{80}/d_{10}	$-38\mu\text{m}\%$
尾砂	50	10.3	8.3	42
水泥	22	5.9	6.2	68
粉煤灰	9	8.6	10.4	86

2.2 相对密度

为计算试样的孔隙率和配料体积(供配料

用), 必须知道每一组分的相对密度。其相对密度使用比重法测定。

物 料	相对密度
尾砂	2.72
水泥	3.15
粉煤灰	2.20

2.3 表面积

物料的细度增加, 通常会伴有表面积增大, 这又影响混合物的需水量。对于物料特性的初步评价来说, 表面积的测量并非必需。

物 料	表面积(m ² /kg)
尾砂	220
水泥	320
粉煤灰	450

但为了记录在案, 应包括单位表面积(SA)的 Blaine 空气渗透率的测定结果。

2.4 化学分析

尾砂胶结充填中的水泥(OPC)重量比可通过只测量主要元素钙和镁的氧化物来定量确定。就尾砂: 水泥: 粉煤灰=90: 3: 7的混合物而言, (CaO+MgO)将按照以下关系式随水泥量成线性关系增加:

水泥(OPC)量(%)=4.05[(CaO+MgO)-1.05]

主要元素的 X 射线荧光分析值列于表 1, 以供与本文引用的例子相比较。

3 充填料特性说明

3.1 颗粒尺寸分析

将三种充填料组分按其各自的比例混合在一起, 总的颗粒尺寸分布和单一尾砂的相比较(见图 1)没有什么大的不同。混合物的分布特性是:

d ₅₀ /μm	d ₆₀ /d ₁₀	d ₈₀ /d ₂₀	-38μm%
44	10.5	9.5	42

3.2 充填特性

克拉克(1986)曾论述过充填特性。图 2 所

示为只与最初构成的潮湿充填料有关的尾砂胶结充填的特性曲线。该曲线表明, 在水砂比为 0.28 时, 这种充填料可达到 44% 的最小孔隙率。

表 1 充填料的主要组分分析

组 分	尾 砂	水 泥	粉煤灰
Fe ₂ O ₃	2.37	3.44	6.7
MnO	0.08	0.08	—
TiO ₂	0.34	0.36	1.8
CaO	0.12	65.50	30.4
K ₂ O	1.54	0.07	0.1
P ₂ O ₅	0.03	0.12	0.9
SiO ₂	85.00	23.40	40.7
Al ₂ O ₃	7.70	3.10	33.0
MgO	0.70	1.6	3.7
Na ₂ O	0.20	0.20	0.2
LOI*	1.53	2.24	3.7
Cl	<0.01	<0.01	—
S	0.15	2.10	1.0

* 烧失量

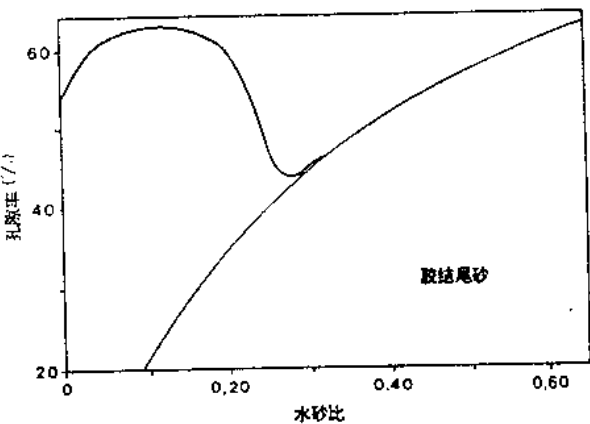


图 2 尾砂、水泥、粉煤灰充填料的充填特性曲线

3.3 渗透率

在尾砂胶结充填料中, 渗透系数(K)随着胶结反应的进行而迅速减小。因此, 脱水性能不良, 且当有大量的非常细的物料(如粉煤灰)存在时, 在充填后的初期阶段可能恶化[托马斯(Thomas)等人, 1979]。

渗透率的测定是利用不同的初始水砂比制备的试样用恒定压头渗透仪进行的。对渗透流要进行为期一周的监测。

单个的渗透率试验结果绘于图3。在每条曲线上有一个明显的转折,它被认为是表示胶结反应的开始。超过这个转折点,渗透系数的变化速度大大降低。显然,这不能作为渗透系数的单一数值。因此,总的结论是,渗透系数将随充填水砂比的减小而下降。

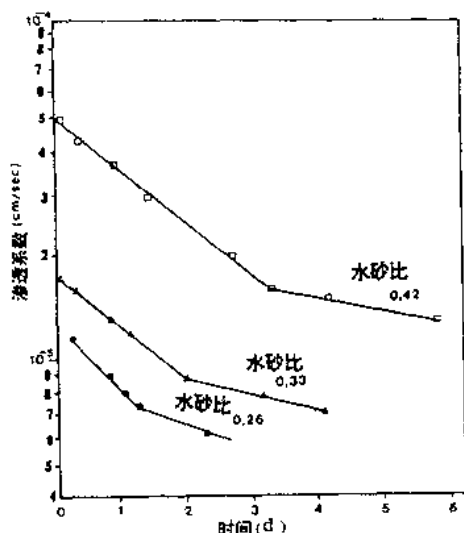


图3 以不同初始水砂比制备的尾砂、水泥、粉煤灰充填混合物的渗透系数的变化

3.4 强度

制备立方体试样(100mm),在22°C的水中养护,按标准试验方法(英国标准,1983)进行试验。选择养护温度代表充填条件,试验结果列于表2,表中还包括抗压强度、断裂强度、杨氏模数、孔隙率和水砂比等数据。这些数据按抗压强

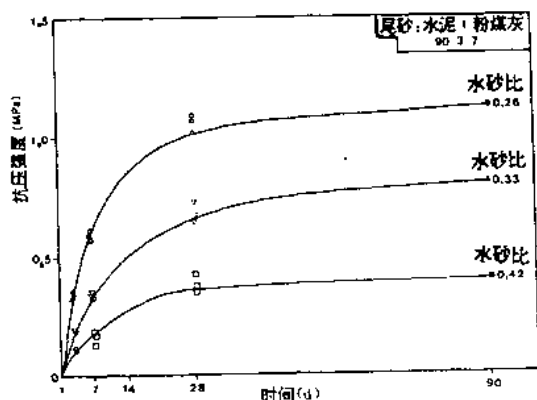


图4 按不同初始水砂比制备的尾砂、水泥、粉煤灰充填料的强度变化

度与时间(图4)、抗压强度与杨氏模数(图5)和抗压强度与断裂应变(图6)的关系绘制成曲线。

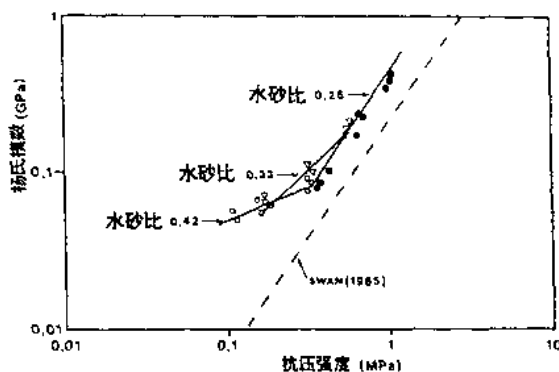


图5 抗压强度与杨氏模数的关系

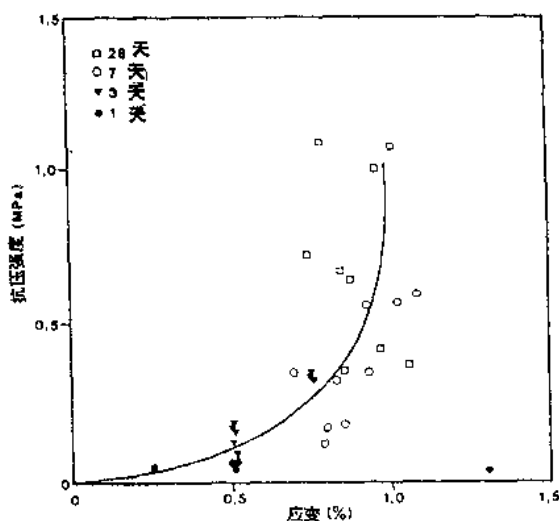


图6 抗压强度与断裂应变的关系

4 充填料的评价

为了按设计目的来评价充填料的质量,下面将依次讨论充填料各种特性对其质量的影响。在要评价可能替换充填料组分范围的场合下,对每种充填混合物将重复相同的评价方法。

尾砂胶结充填料的充填特性曲线(图2)明显表明了最佳水砂比为0.28时,相应的浆体相对密度为1.97。在这种状态下,充填料的有效孔隙率为44%。因此,为这种充填料组分设计分配系统时,应该考虑的最大密度是1.97。按较低的相对密度制备这种充填料的结果是,会使有效

的充填孔率增加。这样,按相对密度 1.80(水砂 有 53.3%的有效起始孔隙率。实际上,它夹带有
比为 0.42)制备的充填料,假定全饱和时,则具 一些空气,通常为 3%~5%的体积(克拉克,

表 2 试 验 数 据

序 号	W/S	η (%)	应力 (MPa)	应变 (%)	杨氏模数 (GPa)
1-26-1	0.2471	43.1	0.050	0.50	0.016
1-26-2	0.2482	42.6	0.038	0.25	0.020
1-26-3	0.2484	43.7	0.050	0.50	0.026
1-33-1	0.3109	48.0	0.033	1.30	0.006
1-33-2	0.3075	47.8	0.030	0.50	0.013
1-33-3	0.3100	48.0	0.035	0.50	0.011
1-42-1	0.3773	51.8	—	—	0.005
1-42-2	0.3772	52.3	—	—	0.003
1-42-3	0.3785	50.9	—	—	0.003
3-26-1	0.2529	43.8	0.316	0.75	0.090
3-26-2	0.2531	44.2	0.335	0.75	0.085
3-26-3	0.2554	44.9	0.318	0.75	0.074
3-33-1	0.3274	49.6	0.156	0.50	0.067
3-33-2	0.3236	49.2	0.183	0.50	0.061
3-33-3	0.3217	49.0	0.162	0.60	0.054
3-42-1	0.3977	53.4	0.087	0.50	0.021
3-42-2	0.3927	53.0	0.112	0.50	0.049
3-42-3	0.3922	52.9	0.107	0.50	0.056
7-26-1	0.2565	44.6	0.600	1.10	0.211
7-26-2	0.2605	44.7	0.572	1.03	0.188
7-26-3	0.2547	44.4	0.561	0.93	0.172
7-33-1	0.3291	48.6	0.339	0.70	0.103
7-33-2	0.3260	48.6	0.348	0.93	0.082
7-33-3	0.3205	48.2	0.321	0.83	0.111
7-42-1	0.3838	52.2	0.175	0.85	0.062
7-42-2	0.3918	52.8	0.170	0.80	0.071
7-42-3	0.3901	53.3	0.122	0.79	0.028
28-26-1	0.2579	43.5	1.088	0.79	0.417
28-26-2	0.2634	43.8	1.005	0.96	0.342
28-26-3	0.2615	43.7	1.075	1.02	0.371
28-33-1	0.3139	46.7	0.720	0.75	0.224
28-33-2	0.3166	48.0	0.670	0.85	0.236
28-33-3	0.3095	48.6	0.645	0.68	0.170
28-42-1	0.4651	53.2	0.367	1.06	0.085
28-42-2	0.3828	52.1	0.420	0.97	0.102
28-42-3	0.3839	52.0	0.349	0.85	0.080

1986)。随着时间的推移,当充填料脱水时,孔隙率将会减小。但是,这种固结沉陷或孔隙率减小的程度,取决于充填密度(水砂比)(图7)。根据以下公式可以计算出预期的固结沉陷量。

$$\text{固结沉陷} = \eta_0 - \left[\frac{(100 - \eta_0)\eta_f}{(100 - \eta_0)} \right]$$

式中: η_0 —以3%的空气夹带量修正过的充填料初始孔隙率;

η_f —最终孔隙率,取28天的平均值。

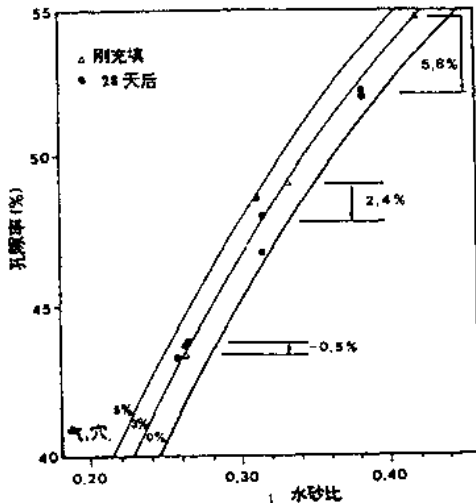


图7 尾砂胶结充填可能的固结沉陷图

对表3中的养护试样,参照孔隙率和水砂比数据,计算出以下的固结沉陷量。

表3 养护试样的孔隙率和水砂比

水砂比	相对密度	η_0 (%)	η_f (%)	固结沉陷率 (%)
0.42	1.8	54.84	52.05	5.82
0.33	1.9	49.01	47.77	2.37
0.26	2.0	43.32	43.60	-0.50

对按水砂比为0.26制备的充填料,预期会计算出负的固结沉陷或膨胀,因为这种充填料位于最佳水砂比(图2)的干燥侧,这样,按水砂比0.28制备的充填料照理不会发生体积变化。

渗透率在时间上的变化示于图3,甚至出现变化的时间也取决于充填料的密度。这些转折点可能是充填料尚未固结的重要标志。因此,按密度1.8充填的充填体有可能在充填4天后

还不稳固,而按密度2.0充填的充填体一天之后就可能稳固了,这种推断是值得重视的,特别是如果实行同时充填的话。

充填体强度是充填时间和充填水砂比两者的函数(图4)。参阅该图,值得注意的是,按水砂比0.42充填的充填料在临界期比按水砂比0.26充填的充填料,产生更大的强度。但是还必须考虑按杨氏模量(E)测量的充填体刚度。示于图5的杨氏模数与抗压强度之间的关系可由下面的方程表示:

$$E = a\sigma c^b$$

然而,该方程的回归系数a和b,对于龄期28天的试样和7天的试样是不同的。因此,这些常数和其各自的测定系数(r^2)列在一起。

龄期(天数)	a	b	r^2
28	0.35	1.41	0.99
7	0.35	1.04	0.91
3	0.18	0.67	0.62

同样的数据可用来检查充填水砂比对变形模数(E)的影响,回归系数是:

水砂比	a	b	r^2
0.26	0.36	1.28	0.99
0.33	0.28	0.87	0.92
0.42	0.13	0.42	0.90

把这些结果与斯旺(Swan,1985)对各种胶结充填料所获得的关系进行比较是有意义的。斯旺发现,变形模数和强度之间的通用关系可由下列方程式表示:

$$E = 0.21\sigma_c^{1.44}$$

这是28天养护试样获得的公式,面不论其充填水砂比如何。因为28天后的尾砂、水泥、粉煤灰充填料不会产生什么额外的强度(图4),故可结论为:

$$E = 0.35\sigma_c^{1.41}$$

上式是当今尾砂、水泥、粉煤灰充填料的通用关系式。图6所示,为断裂应变(%)与抗压强度(MPa)之间的关系。应变数据有相当大的离散,这可能是因为较软弱试样的塑性类变形所

致。但是,对所绘制的曲线在数据上可以看出有一种趋势,最明显的是,在超过极限强度前能允许1%的最大应变。

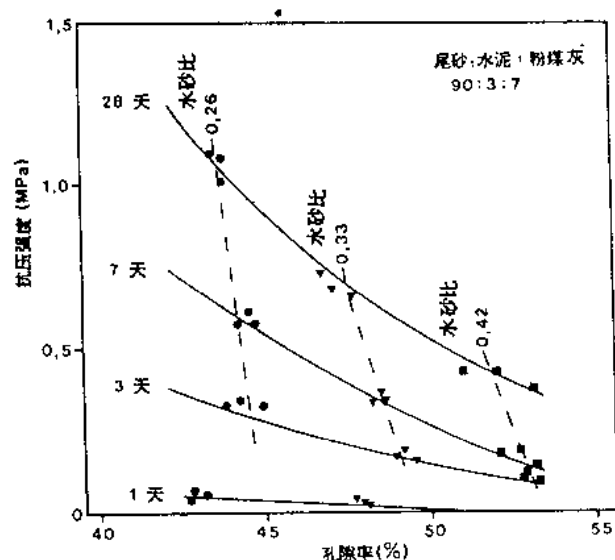


图8 尾砂、水泥、粉煤灰充填混合物的设计曲线

最后,为充填混合物推荐了一组设计曲线(图8)。这样一组曲线有助于一目了然地表示整个充填时间的强度变化和最初的充填水砂比,而同时消除了不同起始孔隙率的影响。

5 讨论

5.1 适用条件

对类似于所述充填料的评价,应在浇筑充填料的任何决策和充填工程系统的任何设计之前进行。这种方法提出了有关充填料的最佳密度的信息,随之又指导了脱水装置、储存设施、泵、管道以及衬垫料场要求的选择。对充填浆体的密度还进一步提供了可能出现的固结沉陷的估计数。

渗透率数据给出了充填体不稳定的最小时限的表示法。应力—应变数据有许多用途。根据抗压强度与断裂应变曲线图(图6),可以断定,断裂判据与应变有关,而和应力无关,从而必须规定出最大的允许应变。这个概念特别适

用于采矿胶结充填,因采矿工程中上盘岩层的移动必须保持最小。图8的充填设计曲线对表示整个时期的强度变化和初始水砂比(浆体密度)是有用的,而同时排除了不同的起始孔隙率的影响。

5.2 限制条件

本文没有讨论变形特性,因为它对充填料系统的设计、选择和评价关系不大。倘若模拟开采过程要求变形特性的话,这可在三轴荷载条件下测量,并构成进一步研究的基础。

6 结论

本文提出了评价尾砂胶结充填的基础,并对一系列可能的充填料组分提供了一种迅速而可靠的评价方法。为了便于生产中的比较和结果分析,重要的是以一致的方式提供数据。因此建议,在有关尾砂胶结充填的任何可行性研究报告中,要包括以下资料:

- (1) 充填理由和目的;
- (2) 为满足一定目的所需充填强度的极限;

- (3) 必须满足应力或应变准则的时限;
- (4) 被认为可行的充填料组分范围。

然后,说明充填料组分材料的下列特征:

- (1) 颗粒尺寸分布;
- (2) 相对密度;
- (3) 比表面积;
- (4) 化学(或矿物学)分析。

说明所选定充填料组分的下列特征:

- (1) 颗粒大小;
- (2) 充填特性;
- (3) 孔隙率;
- (4) 强度变化情况。

在准备好设计曲线和评价所有与规定目标有关的数据后,完成充填料的评价。

参考文献(略)

姚必鸿 译 刘维震校

用于深部矿山区域支护的充填评价

南非矿业协会研究中心 P. S. Piper J. A. Ryder

摘 要 本世纪 60 年代,有人提出通过充填可以降低采场顶板的下沉量及由此而产生的岩爆危害,近来的各种进展便于充填料在井下大量充填,现在正好是重新评价充填作为区域支护对策的一部分所带来可能好处的时候了。

本文采取的充填效果的主要判据是:充填对工作面能量释放速率(ERR)和平均矿柱应力(APS)水平的影响以及允许的最大矿石回采率。此外,还简单地评述了充填对过量剪切应力(认为调节大的岩爆活动)的可能影响。介绍了描述充填料特性及其在某些理想的几何形状条件下,对 ERR 和 APS 的影响。并与测试参数灵敏度的广泛序列的计算机模拟结果相比较。

结果表明,为了使 ERR 保持在允许水平,在超过 2000m 深处则需要采用区域支护,而充填的矿柱在小于 3300m 的深处能独立地完成这一任务。在更深处,使用支撑矿柱是绝对必要的,但在此情况下,辅助充填矿柱也能降低 ERR 和 APS 水平并可显著提高矿石采出比。

1 前 言

岩爆与岩层冒落是南非采金工业所面临的重大危害。统计表明,尽管在过去 25 年中由岩爆和岩石冒落所造成的事故发生率(每个雇员)几乎减少了一半,而在同一时期的死亡率却持续的保持不变(事故防治委员会,1986)。

自 1908 年首次感到采矿诱发的地动以来,在减轻这一问题上已经取得了一些重大进展。在 1908、1915 和 1924 年建立的各委员会为使岩爆影响降到最小限度而推荐了一些实用方法,可是在那时对岩爆的原因和机理的了解是肤浅的。

直至 1950 年,才认识到不能单独地通过试图将岩爆影响减至最小来论述这一问题。承认作为维持深井采矿作业的一个先决条件,是必需了解岩爆的原因及构成其基础的机理。

对此问题深入研究的结果很快变得显而易见。包括萨拉蒙(Salamon,1965)在内的各研究工作者确定弹性理论可以用来描述黄金矿山中所遇岩体的特性。库克(Cook,1966)等人提出板状矿床深部采矿所引起的能量变化是怎样与采空区的空间有关。已知岩爆与能量变化有关联,从而建议通过减小采空区体积的采矿设计以减

轻岩爆问题的严重程度(库克等人,1966)。并提出了减少采空区体积的三种方法:

- (1) 降低回采宽度;
- (2) 建立一定间隔的条状矿柱;
- (3) 充填采空区。

由于在采场工作面进行回采作业所需的最低高度限制了靠降低回采宽度而减少采空区体积。一定间隔的条状矿柱(现今称之为支撑矿柱)的建立,被认为是三种方法中最有效的一种。目前许多深部矿山正成功地将支撑矿柱作为区域支护系统。然而,这种方法的一个缺点是,大量的黄金永久地搁置在这些矿柱中。

充填技术方面的最新进展,使得有可能在井下实施大量充填。因此,有必要重新考虑充填的潜力以便作为深部矿山的区域支护辅助的主要方法,从而直接降低引起岩爆的能量。

本文评价了利用充填取代或补充作为主要区域支护系统的支撑矿柱所获得的各种好处,并通过对能量释放速率值、支撑矿柱应力值以及能被开采的额外矿量的比较对其加以确定。

2 分析方法

2.1 设计标准

霍奇森(Hodgson)和朱格欣(Joughin,

1967)证实,在深部矿山中,岩层破坏和能量释放的空间速率(ERR)之间存在着一种关系。后来的研究工作表明:ERR 为预测岩层质量和地质较不复杂区域中的岩爆发生率提供了非常有用的经验标准。因此,可根据 ERR 值对区域支护的必要性和减少岩爆发生率的充填潜力加以量化。深部长壁采矿的经验表明,30MJ/m² 是 ERR 的可接受值。本文还考虑了 20MJ/m² 和 40MJ/m² 的 ERR 值。

现已提出称之为“超量剪切应力”(ESS)的标准,作为断裂地层中的矿山设计的借鉴(Ryder, 1986)。某些初步研究结果(Spottiswoode, 1986, 和 Ryder, 1986)认为存在这样一种可能性,即超量剪切应力(ESS)从长远观点看可能较之 ERR 能提供更坚实的地震危险一般测度的基础。

只有少数研究特别谈到充填对超量剪切应力的影响。纳皮尔(Napier, 1986)模拟了靠近一扩大充填采场的断层面的上的滑动并发现活动量有轻微减少。斯波提斯伍德(Spottiswoode, 1986)报导在断层横切待采区的地方,充填对活动量能更显著地加以控制。普劳特(Prout, 1986)通过对邻近的、先前已开采过的地段填入高强度充填料的模拟,发现过量剪切应力显著减少并随之断层面呈稳定。赖德(Ryder, 1986)证明,如果采用区域充填,其结果会使得大跨度开挖的有效回采宽度减半,超量剪切应力的正弦半周范围也减半,而且有关地震活动的能量减少四成。

但是超量剪切应力标准仍处于探索阶段,且严格的设计值至今还不能制定。相反,能量释放速率(ERR)至少在地质上较未扰动的地层区域内与现场数据具有紧密的相关性而获得应用。此外,测算 ERR 的数值和分析技术业已很好地确立并被广泛采用(见附件)。为此,ERR 仍然是评价深部采矿环境严重程度的首选的基本测度,在本文中专门加以采用。

先前的研究表明:如果需用支撑矿柱以提供区域支护的话,

(1) 为了矿柱不受破坏,其宽、高比至少应

为 20:1(库克和萨拉蒙,1966);和

(2) 为避免“基础破坏”,平均矿柱应力(APS)不应超过周围岩体单轴抗压强度(UCS)的三倍[库克(Cook)等人,1969;瓦格纳(Wagner)和舒曼(Schumann),1971]。

200MPa 的 UCS 是矿脉周围石英岩的典型值,因此认为 600MPa 为 APS 的可接受值。同时还考虑了 450MPa 和 750MPa 的 APS 值。

用于采矿布置设计的另一标准是,采矿布置的采出百分比应尽可能大而同时仍能使能量释放速率(ERR)和平均矿柱应力(APS)标准得到满足。

2.2 结果计算

本研究的所述结果因下列原因,大部分是以 MINSIN-D(纳皮尔,1985)计算机模拟为基础:

(1)在此项工作开始时,没有可用于部分充填的分析解;而且

(2)为了充填,认为有限区的开采较之无限区更为现实。而分析解大部分是以无限区开采为基础的,并为此,给 ERR 和 APS 水平提供不利的(但是独特的)上限值。

由萨拉蒙(Salamon, 1983)和后来由赖德(Ryder, 1986)取得的这些分析解由于被用来验证在此报导的 MINSIM-D 模拟数值的精确度以及为某一特定情况(图 2f)扩大和补充这些结果,仍作为本文的补充附件而被包括在内。同时,由于这些分析结果大致包括本文考虑的同样几何外形,它们事实上为扩大本论文的结果,诸如不同的具体充填料的快速评价或者更为详尽地考察其它具体充填宽度实践的蕴涵,提供了最为有效的方法。

2.3 充填料的特性

充填料的近似特性已由赖德和瓦格纳(Ryder 和 Wagner, 1978)加以确定,其特性符合下列双曲性函数:

$$\sigma_f = \frac{a\varepsilon}{b - \varepsilon}$$

其中: σ_f = 充填体应力

ε = 充填体应变