

钻孔内岩石局部爆破破碎若干影响因素分析

季荣生¹, 冉恒谦², 陈庆寿¹, 王贵和¹, 周辉峰¹

(1. 中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京 100083; 2. 中国地质科学院勘探技术研究所, 河北 廊坊 065000)

摘要: 钻孔内小自由面条件下对岩石局部进行准确地爆破破碎并非易事, 这一问题的解决将有助于便捷地通过钻孔获取大量的矿物岩石, 提高水溶法采盐、地浸采铀的作业效率, 同时使得通过钻孔开采某些具有重大潜在价值的难采矿产成为可能, 这无论对钻孔取样还是钻孔采矿都具有重要的意义。论述了钻孔内岩石爆破破碎涉及的技术问题, 并对钻孔内岩石爆破破碎若干影响因素进行了分析。在充分考虑各种岩矿赋存条件的基础上, 采取合理的加载形式获得钻孔局部岩层较好的爆破破碎效果是可行的。

关键词: 爆破; 岩石破碎; 钻孔

中图分类号: TD235.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2008)09-0066-04

Analysis on Some Influencing Factors of Local Rock Fragmentation by Blasting in Drilling Hole/Ji Rong-sheng¹, RAN Heng-qian², CHEN Qing-shou¹, WANG Gui-he¹, ZHOU Hui-feng¹ (1. China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. The Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China)

Abstract: To accurately blast the local rock in a borehole is a technical knot in rock blasting. The solution of this problem may be helpful to obtain masses of minerals by way of boreholes and promote the efficiency of solution mining and in-situ uranium mining, and make it possible to obtain some difficult-to-mine minerals with significant potential value. A couple of blasting technical issues on rock fragmentation in borehole were discussed and the influencing factors were analyzed in this paper, it was indicated that well fragmentation of rock mass in-situ borehole could be achieved by way of adopting a reasonable loading means with full consideration of deposit conditions of rock.

Key words: blasting; rock fragmentation; borehole

0 引言

固体矿产的勘探与开采是人类发现、认识并利用自然资源的重要生产实践活动, 这一活动涉及找矿与采矿两个方面, 经过专业技术人员长期的探索和发展, 无论是勘探找矿还是矿床的开采都形成了较完备的工艺体系和技术方法。进行矿床勘探时, 如果想进行深入的矿物物理、化学性质研究, 有用矿物可选性及深加工试验研究(以便确定该矿床是否具有工业价值), 则必需获得一定量的岩矿样品, 钻探常规作业有时难以满足上述生产需要, 通常需要坑探作业来解决这一问题, 但是坑探工程有人力、物力、财力消耗大, 同时工期长的缺点, 并且在一些特殊地层(地下水位高、涌水量大、富含瓦斯地层及极破碎等地层)即使采用坑探作业要想获得足够数量的岩矿, 无论在技术上还是在经济上都有较大的困难。如果利用控制爆破技术对勘探孔内岩矿进行爆破破碎并结合特殊钻进规程通过冲洗液将岩矿样品提升至地表, 这一问题便可能得到较好的解决。

此外, 在一些特定条件下, 如矿体埋深较大、规模相对较小、矿体产状及空间分布不规则, 通过钻孔结合控制爆破进行孔内岩石破碎, 并用水力方法将已破碎的岩矿石采出, 不但可降低矿山开拓、采准工程量, 降低某些矿产的开采成本, 还能使一些目前“无工业价值”的小矿或难采矿床具有开采价值。另外, 这一技术问题的解决, 目前某些因技术、经济、安全等因素无法开采的矿体(如高瓦斯、高涌水煤矿)也完全有可能安全高效地进行回采。钻孔内局部岩石爆破破碎问题的解决, 对传统地浸采矿方法也具有重要意义。通过合理的孔网布置和装药结构设计, 对深部矿体在一定范围内进行较准确的爆破破碎后采用合适的溶剂将有用组分原地浸出, 可以减小地浸采矿中溶剂的浪费, 并提高有用元素的浸出量。在煤炭安全生产方面, 此法也可于煤层中人为地产生一系列需要的裂隙, 提高低渗透高瓦斯压力煤层中瓦斯的渗透性。

另外, 在水溶法采盐中, 实践表明, 采用压裂连

收稿日期: 2008-03-28

基金项目: 本论文相关研究得到中国地质大学(北京)科学钻探国家专业实验室开放课题和中国地质大学(北京)科学基金的资助

作者简介: 季荣生(1969-), 男(汉族), 浙江人, 中国地质大学(北京)副教授, 地质工程专业, 工学硕士, 从事地质工程教学与研究工作, 北京市海淀区学院路29号。

通法对压裂裂隙方向和计划压裂连通方向不能人为控制。定向井水溶开采法,如果采用单井对流水溶开采通常需较长时间才能完成定向井的溶蚀连通^[1]。采用钻孔内控制爆破技术则有可能从根本上改变上述状况,最终提高井盐回采效率。

因此,这一课题的研究对提高某些矿体的勘探效率、降低勘探成本、提高矿石回采率、降低某些矿床的可采指标、扩大可采矿体的范围具有重要意义。

1 钻孔内岩石局部爆破破碎特点

本条件下岩石的爆破破碎由于是在钻孔内进行,与通常情况下的矿山爆破、土石方工程爆破的爆破条件有较大的差异。其差异主要表现在以下几个方面。

1.1 爆轰条件差

钻孔可视为处于无限介质之中,对爆破作业而言基本不存在自由面(或者说仅有钻孔壁微不足道的一点自由面),岩石爆破破碎后的碎胀空间完全由钻孔空间补偿,在这种条件下进行岩石的爆破破碎,比台阶爆破、硐室爆破等常用方法能量利用率低,破碎相同体积的岩石需要更多的炸药,如果考虑钻孔自身的稳定与安全,就某种程度而言,对围岩造成的爆破危害可能更大。

在通过钻孔内爆破破碎这一方法采取岩石作业时,钻孔内通常有冲洗液,爆破作业一般在水下进行,必须采用防水炸药(乳化炸药、浆状炸药、硝化甘油类炸药或TNT等)或对抗水炸药进行必要的防水处理。此外,采用钻孔进行岩石采取作业通常深度较大,药柱可能受到较大的冲洗液柱压力的作用,而矿业生产所采用的炸药多为混合型工业炸药,混合型炸药对自身密度有一定要求,如果在深孔较高冲洗液压力情况下有可能会因液柱压力过高而造成炸药被压实后密度增加,出现爆轰参数劣化^[2],因此采用混合炸药时必须考虑所使用炸药的耐压特性,或在作业时改用耐压抗水的单质炸药。

1.2 通常处于非均匀初始应力状态下

处于一定钻孔深度的岩石,钻孔空间的出现,其原始应力状态被破坏,由于受地质构造及上覆岩石自重等方面因素的影响,需要破坏的岩石通常处于一个相对复杂的非均匀原始应力状态下,这对岩石的破碎会产生较大影响。尤其是当需要破碎的岩石处于较深钻孔时,非均匀原始应力数值会显著增大,状态也会变得更为复杂,在这一条件下的岩石的力学特性与自由状态下的参数会发生显著变化,其

破碎特征也因此而改变。

1.3 块度要求严格

钻孔内控制岩石局部爆破破碎对破碎后的岩石块度还有较严格的要求,在露天矿或传统的地下矿山(无论是充填采矿法还是崩落采矿法),破碎下来的岩石运搬通道通常都有较大的空间,因此,大块率对生产的影响主要还在于经济上的影响。但在钻孔内破碎岩石并通过钻孔排至地表时,块度对生产的影响则不仅仅在经济层面,更重要的还在技术层面。如果块度不能满足要求,块度太小则会增大矿石(主要是粉矿)从冲洗液中分离出来的难度,延长分离时间,增大分离成本,而块度太大不但无法将矿石输运至地表,甚至有可能造成严重的卡堵,对钻孔的正常作业造成严重影响。

1.4 爆破震动

在钻孔内进行岩石的局部爆破破碎,由于其特殊的边界条件,如果药量及装药结构不进行严密的考虑,则岩石对药包爆轰作用的夹制将会非常严重,其结果是导致剧烈的爆破震动,这极可能导致某些不应破坏的孔段过早破坏,对作业的正常进行造成极为不利的负面影响,严重的话可能威胁到作业人员的安全。

从上述情况可以看出,在钻孔内控制对岩石的爆破破碎,需要考虑的问题涉及以下几个方面:自由面条件,孔内初始应力,碎胀空间、块度以及爆破震动控制要求。只有这些问题得到较好解决,钻孔内控制岩石爆破破碎才能获得理想的破碎效果。

2 孔内岩石爆破破碎若干影响因素

对钻孔内局部岩石进行爆破破碎,由于工艺及边界条件的限制,对最终爆破破碎效果产生影响的因素是多方面的,除通常爆破作业时的起爆方法、装药结构(耦合与不耦合装药、连续与不连续装药)等因素外,下列因素也会对最终的爆破效果产生较大的影响。

2.1 碎胀空间

钻孔半径为 R ,岩石碎胀系数为 K ,并且采用柱状耦合(通常为水耦合)装药,考虑到被破碎下来的岩石有足够的碎胀空间,则应满足下式:

$$R \geq R_0 \sqrt{(k-1)/k} \quad (1)$$

在钻孔内单个药包爆破作用,其边界条件接近于爆破的内部作用,设粉碎区的半径为 R_0 ,柱状耦合装药条件下的粉碎区半径与岩石强度及有关参数存在下述关系^[3]:

$$R_s = r_2 (v_0 \rho_c c_p / N \sigma_b) \quad (2)$$

式中: r_2 ——炮孔半径; v_0 ——孔壁质点振动速度; ρ_c ——岩石密度; c_p ——岩体内纵波速度; N ——岩石动态强度提高系数; σ_b ——岩石静单轴抗压强度。

由上述两式可得出,孔壁质点振动速度越大,粉碎区也越大,而孔壁质点振动速度随孔壁上冲击应力的增大而增大,也就是说,相同的岩石条件下孔壁上爆轰压力越高,粉碎区半径越大。同时(2)式也反映出,岩体内纵波速度越大,粉碎区半径越大,这实质上反映的是当岩体完整性越好,岩体内不连续面越少,越有利于应力波的传播,粉碎区越大。但实际情况并不完全如此,因为不连续面的存在,炸药爆破破碎岩体需形成新的破裂面就相对要小,从某种程度上有利于减小破碎单位体积岩石的爆破能量。

因碎胀空间限制,钻孔内第一次爆破时,粉碎区不能太大,否则破碎下来的岩矿体积不会增加,反而会因药量的增加造成破碎下来的岩矿石被挤密而无法抽出。过多的炸药能量只能消耗于岩石的过粉碎与弹性波的传播上,同时对孔壁的稳定造成不利影响。

2.2 冲洗液柱压力

在较深孔内,因较大的冲洗液柱压力也会对照药的正常爆轰产生影响。矿用炸药以铵油、铵梯类炸药为主,在有防水要求的作业条件下进行爆破作业时,通常可采用各种类型的乳化炸药,或对铵梯类炸药进行防水处理。这一类炸药由多种成分组成,除部分重铵油炸药外一般密度较小,而且为保证其较好的爆轰性能通常较疏松(铵梯炸药)或含有一定比例的微泡(乳化炸药),因此具有一定的可压缩性,当在较大压力作用下药柱体积会减小,炸药密度会变大。比如在 50 m 水深时,药柱所受的水压可达 490 kPa,而在钻孔内,冲洗液密度一般比水的密度大,因此压力会更大。炸药被压密后,许多混合炸药的性能会劣化,如普通的铵油炸药,当密度 $> 1.1 \text{ g/cm}^3$ 时,则有可能不发生爆炸反应。在现场试验中,就出现过同一种乳化炸药在浅水正常爆轰而在数十米深水中部分爆轰的情况。要解决这一问题,可从两方面入手:一是选择合适的炸药,如选用单质抗水炸药,或耐压的抗水混合炸药;二是在炸药外加抗水耐压装置。

2.3 破碎块度

通过钻孔直径确定最大允许破碎块度,通常情况下只有当通过管道的块度小于管道直径的 1/3 时

才能较好地避免因楔效应摩擦而造成的管道中块体的“成拱”^[4]。因此为高效地采用水力方法从孔中抽出爆破破碎下来的岩矿石,破碎块度最好小于钻孔直径的 1/3 或抽渣管直径的 1/3。若大于该尺寸,爆破破碎下来的岩矿碎块将有可能在爆生气体作用下形成不利于排渣的堵塞,即便爆破作业时未形成堵塞,也有可能在水力运搬时产生堵孔现象。虽然这些不利于排渣的情况也可以通过钻进工艺的调整来加以解决,但这终究对快捷高效地作业不利,尤其是进行上规模的钻孔采矿作业时,其效率对作业的影响将会更大。

精确控制爆破破碎块度,如果在地表,或在传统地下采矿作业时,由于可以通过对自由面的利用和合理孔网参数的选择,尤其是结合岩体原有不连续面进行孔网的优化,爆破后岩矿石的块度完全可进行较为准确的控制。但是在硐室爆破以及本文所述的钻孔内局部岩体的爆破破碎,由于爆破条件劣化,如自由面条件差,岩体在爆破作业前揭露少,未知因素多,以及岩石在碎胀过程中受到围岩的约束较大,精确控制岩石爆破破碎块度并不容易。

许多学者通过对爆破破碎块度的统计分析研究,总结出了若干预测岩石爆破破碎块度的方法。

前苏联的 Kuznetsov (1973) 给出了下式^[5]:

$$K_{50} = A (V/Q)^{0.8} Q^{0.17}$$

式中: K_{50} ——平均块度, m; A ——岩石因子,对极弱的岩石 A 为 1,对中等硬度 A 为 7,对硬而有裂隙的岩石 A 为 10,对硬而少裂隙的岩石 A 为 13; V ——单孔爆破的体积; Q ——装药量。

虽然将岩石因素按硬度、是否有裂隙的性质特点进行量化处理,但其总结出来的方法准确性不高,有一定的随意性。

印度的 Raina (2002) 对上述研究结果进行改进给出下式:

$$K_{50} = A (V/Q)^{0.8} Q^{0.17} [V_p / (EN_r)] D^2$$

式中: V_p ——穿孔速度, m/h; E ——推进压力; N_r ——钻头的转速, r/min; D ——钻孔直径, in (1 in = 25.4 mm); 其余与前一公式相同。

从上述公式可以看出,岩石因素、爆破量、炸药量、钻孔直径是岩石最终破碎块度的决定因素。

2.4 炸药与不同岩石的波阻抗匹配问题

研究表明,在耦合装药条件下,当被爆岩石与炸药的波阻抗匹配时,爆炸能量的传递效率较高,并且通常情况下可提高被爆岩石的破碎效率。但在实际作业时,尤其是钻孔穿越地层情况复杂,被爆岩石波

阻抗变化可能较大,不可能准备各种对应波阻抗的炸药。在实际作业时当岩石与炸药阻抗明显不匹配时,可在岩石与炸药间加入阻抗介于两者之间的中间物质或采用不同的耦合系数加以调整^[6]。当采用不耦合装药时;由于装药条件发生变化,上述匹配并不见得就是适宜的,因此不同的装药结构应当有不同的最佳波阻抗与之匹配。研究表明,空气不耦合与水不耦合装药其最佳波阻抗的匹配存在较大差异,但总体而言,较高阻抗的岩石采用较高阻抗的炸药才能获得较理想的爆破能量利用的关系却是普遍存在的^[7]。

2.5 岩体结构

岩体结构对爆破破碎效果的影响已越来越为爆破作业人员所重视,岩体结构面对爆炸作用可以是积极的,也可以是消极的,怎样研究裂隙岩体的爆破破碎,如何提高裂隙岩体爆破效果,是 20 世纪 70 年代末以来爆破界的一个研究热点。岩体中由于结构面(裂隙、结理、层理等不连续面)的存在,使岩石在破碎时表现出突出的非均质体特性,即同一种岩体在不同的加载方向以及不同的加载形式下会表现出完全不同的破坏特征。因此在钻孔内对岩体进行局部爆破破碎时,如果能较好地利用岩体结构特性,结构面同样能在爆破中产生积极作用。

3 孔内加载形式对爆破效果的影响

钻孔内爆破加载形式,按药柱的分布及药柱特点不同可采用如图 1 所示的 3 种。图 1(a)为连续柱状装药,图 1(b)为各药柱相同的不连续柱状装药,图 1(c)为各药柱不同的不连续柱状装药。这 3 种加载方式对孔壁施加的荷载近似于图中箭头标出的受力情况。

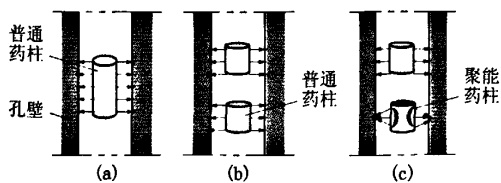


图 1 孔内局部岩石爆破破碎加载形式

在图 1(a)加载形式条件下,将在药柱所在孔段柱面上施加均布荷载,对应孔壁的岩石破碎,孔壁表面及浅层主要为压碎,而深部则为卸载后,岩石因弹性释放而造成的拉伸破坏为主。在药柱的上下端附近孔壁的破坏主要为爆破加载后衍生的拉伸破坏所致。药柱所在孔段,表层压碎破坏虽然所占比例不

大,由于岩石的动压强度远远大于其抗拉强度,所以消耗的能量却比较大。因此从炸药能量利用率角度来看这一加载方式并不是一种好的加载方式。此外,由于采用连续加载方式,一次起爆药量较大,对控制爆破震动、保护孔身以及安全生产是相当不利的。如果单纯通过减小药量来克服上述不足,又会牺牲了破碎岩石的效率。因此这一加载形式除了作业简单易行、爆破操作可靠外,从技术角度而言并不理想。

采用图 1(b)加载形式时,药柱所在孔段柱面上受到了不均匀的荷载,与图 1(a)的最大不同是,药柱间隙所对孔壁柱面受到的荷载比较小。由于加载的分散,因加载而衍生的拉伸应力区较图 1(a)情况大,压缩破坏区相对减小,能量利用率较前种加载形式大为提高。另外,采用这一加载方式,使得孔内微差成为可能,因此还可采用微差爆破技术手段进一步改善加载孔段的受力情况。一次作业可起爆的药量也能在一定限度内大为提高,这是图 1(a)形式所难以做到的。

在图 1(c)加载形式下,由于药柱采用聚能装药,聚能穴所对的孔壁上将会受到非常强的集中荷载作用。采用聚能装药即使在孔内自由面条件极差的情况下,也能通过聚能爆炸射流于孔壁坚硬的岩矿石上打开缺口,配合合理的延时,后期起爆炸药可以利用聚能射流创造的有利爆破条件。采用这一方法将可能在图 1(b)的基础上进一步改善岩石的爆破破碎效果。

4 结论

钻孔内进行岩矿石爆破破碎具有下述特点:自由面条件差,孔内药包爆轰条件恶劣,对爆破后岩石破碎块度要求严格,孔壁岩石常处于非均匀初始应力条件下。因此在爆破破碎时通常要考虑的问题有:岩石的碎胀系数,孔内冲洗液柱对药包的压力,块度控制,波阻抗的匹配。而在这一爆破体系中,只有加载形式具有一定的可调整性,因此,在钻孔内进行岩矿石爆破作业时,选择合理的装药结构和孔内微差是在这一条件下获得理想的岩石爆破破碎效果的关键。

分析研究表明,孔内不连续加载形式与连续柱状药包加载形式相比,前者可使得孔壁产生更有利于岩石破碎的受力状态。无论在爆炸能量利用率方面,还是岩矿石的爆破破碎效果方面,不连续装药均

(下转第 75 页)

埋注浆管进行了注浆处理,由于采取了这一措施,解冻阶段地面未发生大的沉降。

6.3 冻胀压力检测结果分析

6.3.1 测压孔布置(见图 7)

6.3.2 冻胀压力检测结果分析

根据图 14 及图 15 可知,冻胀力在冻结初期几乎未发生变化,随着土体温度的下降,土体进入冻结,冻胀力迅速增大。冻胀力的发展大部分发生在积极冻结期间。在开挖、构筑阶段冻胀力有一定的发展,但发展趋势趋缓。在构筑完成后,冻胀力发展到最大值。

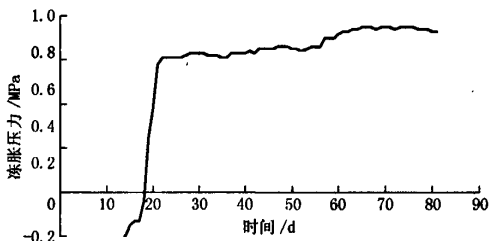


图 14 测压孔 1 测点 2 冻胀压力曲线

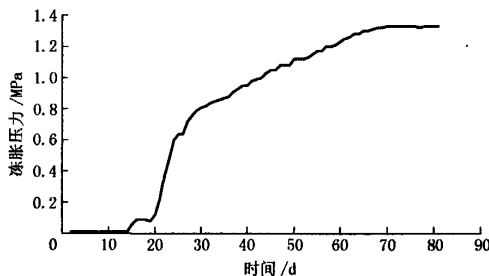


图 15 测压孔 3 测点 1 冻胀压力曲线

6.3.3 温度与冻胀压力的关系

测压孔 1 与测温孔 3 是共用一孔的,测压孔 3 与测温孔 2 也是共用一孔的。根据图 16 及图 17 可知,冻胀力在温度 $>0^{\circ}\text{C}$ 时几乎为 0。随着温度的下

降,至 0°C 以下,冻结管周围土体发生冻结,冻胀压力开始迅速增大,随着温度的进一步下降,增长率减小,冻胀压力的发生主要是在土体温度下降至 -10°C 之前完成。

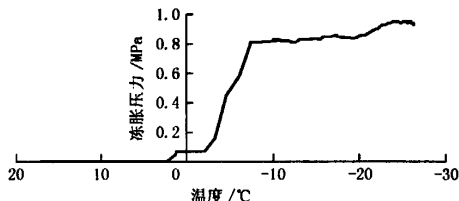


图 16 测温孔 3 与测压孔 1 温度 - 冻胀压力曲线

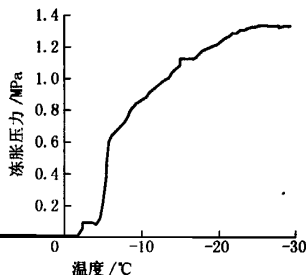


图 17 测温孔 2 与测压孔 3 温度 - 冻胀压力曲线

7 结语

旁通道的施工包括冻结孔施工、冻结施工、开挖构筑等许多阶段。只有针对各个阶段的特点及可能出现的问题采取相应的措施,同时,要对温度、地面变形、冻胀压力等进行监测,用以指导施工,才能保证旁通道冻结法施工的安全。

参考文献:

- [1] H. 崔托维奇. 冻土力学[M]. 北京: 科学出版社, 1985.
- [2] 周希圣. 城市软土冻结加固技术[M]. 中州煤炭[J]. 1997, 2(S1): 26 - 28.
- [3] 王文龙. 钻眼爆破[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1984.
- [4] 陈仕海, 林从谋. 水压爆破岩石的破坏特征[J]. 煤炭学报, 1996, 21(1): 24 - 29.
- [5] 张明. 湿喷稠流混凝土技术研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2003.
- [6] 周家汉. 第七届国际岩石爆破破碎学术会议概述[J]. 工程爆破, 2003, 9(1): 53 - 60.
- [7] 李夕兵, 等. 常规炸药与不同岩体匹配的可能途径[J]. 矿冶工程, 1994, 14(1): 17 - 20.
- [8] 宗琦, 孟德君. 炮孔不同装药结构对爆破能量影响的理论探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(4): 641 - 645.

参考文献:

- [1] 王清明. 欧美国家水溶采矿发展的历史概况[J]. 盐业史研

(上接第 69 页)

能取得较高的技术经济指标。此外,岩体结构面与钻孔的相对空间关系对爆破破碎效果也会产生重要影响,不同的空间关系对加载的响应是不同的,如果在考虑岩体结构的前提下,以孔内微差为基础并结合聚能装药的使用,在孔内取得较好的岩矿石综合爆破破碎效果是完全可能的。