

基于动量平衡密封装置的大孔径静态爆破掏槽试验研究

温尊礼¹, 徐全军², 廖瑜², 姜楠², 杨涛², 刘迪²

(1. 核工业南京建设集团公司, 江苏 南京 210003; 2. 解放军理工大学工程兵工程学院, 江苏 南京 210007)

摘要:根据大孔径静态破碎膨胀压力测试结果,分析了大孔径静态破碎剂反应机理。基于动量平衡原理发明了新型大孔径静态破碎密封装置,并成功运用于模拟掏槽实践。结合掏槽实践实测数据,修正了孔间距近似计算公式。该技术对小净距交叉环境下掏槽工程具有一定参考意义。

关键词:大孔径静态破碎;密封装置;掏槽技术;孔间距

中图分类号:U455.41;U455.6 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2014)10-0079-03

Experiment Study on Cutting for Large Borehole Static Blasting Using Momentum Balance Sealing Device/WEN Zun-li¹, XU Quan-jun², LIAO Yu², JIANG Nan², YANG Tao², LIU Di² (1. Nuclear Industry Nanjing Construction Co., Ltd., Nanjing Jiangsu 210003, China; 2. Engineering Institute of Engineering Corps., PLAUST, Nanjing Jiangsu 210007, China)

Abstract: According to the test results of expanding pressure of large borehole static cracking, the reaction mechanism of large borehole static cracking agent is analysed. Based on momentum balance principle, a new sealing device was invented and has been successfully applied to analogue cutting engineering practice. The hole-spacing approximate calculation formula is modified with test data of cutting practice. The technology has some reference to cutting engineering practice in conditions of small interval intersection.

Key words: large borehole static cracking; sealing device; cutting technology; hole spacing

随着社会经济的发展、城市交通量骤增,城市拥堵已成顽疾,严重制约着经济的发展。市区交通隧道地下交通设施的建设是医治这一顽症的有效途径。一般城市地铁和交通隧道都具有埋深较浅、穿越地表建筑物密集 2 个特点。空间的限制不可避免地会遇到新建设的隧道、基坑等与已运行地铁隧道近距离的相互交叉问题。这种城市新建地铁隧道或公路隧道与既有运行地铁隧道小净距交叉问题越来越多且日益复杂,运行地铁保护问题日益突出。为控制爆破震动产生的危害,常采取缩短循环进尺控制爆破规模;隧道轮廓线周围布置减震孔^[1,2];掏槽孔采用间隔装药,孔内分段毫秒延迟等减震措施^[3]。以上措施在工程实践中都能取得良好的效果,当钻爆法施工风险度处于高度关注范围时,这些减震措施会影响工程施工进度、增加施工难度及工作量。为缩短工期,实现施工过程安全、环保、无震动,大孔径静态破碎掏槽技术便应运而生。

1 大孔径静态破碎剂反应机理

文献[4]在孔径 100 和 40 mm 的钢管中进行膨

胀压力和反应温度测试。试验发现:Ø100 mm 钢管中,反应进行到第 55 min 时,膨胀压力发生压力突跃,即膨胀压力从 30 MPa 瞬时突跃到 240 MPa;第 65 min 时,膨胀压力达到稳定值 97 MPa;反应温度在 40 min 时达到 235 ℃。而 Ø40 mm 钢管中产生的破碎剂膨胀压力最大值是 Ø100 mm 钢管的 1/8,破碎剂膨胀压力稳定值是 Ø100 mm 钢管的 0.31 倍,不会出现膨胀压力突跃,反应峰值温度是 Ø100 mm 钢管的 0.15 倍,膨胀力达到稳定时间是 Ø100 mm 钢管中的 40 倍。浆体热膨胀力的不同是大孔径静态破碎相较于小孔径静态破碎具有高反应温度和高膨胀压力的原因。

常温下,静态破碎剂中的碱性物质与气膨剂反应产生气体,释放热量。热量的累积为 CaO 水化反应提供激发能,随着水化反应的进行,浆体形成强度较低的多孔粘塑体。热量的积聚和体积的膨胀在炮孔约束体内形成了高温高压环境,CaO 与 SiO₂ 在高温高压作用下,充分反应生成一系列具有胶结性和一定抗压强度的结晶水化物填充多孔粘塑体,形成强度很高的浆体结构。该浆体结构体积膨胀和热膨

收稿日期:2014-05-13; 修回日期:2014-09-01

作者简介:温尊礼(1973-),男(汉族),江西人,核工业南京建设集团有限公司副总经理、高级工程师,矿业工程专业,从事工程施工技术与管理工作,江苏省南京市察哈尔路 16 号,h_wenhong@126.com。

胀之和大于约束体体积形成一种不协调装配而产生膨胀压力。相同炮孔深度条件下,随着炮孔孔径增加,水化反应速度成指数增长,水化反应释放的能量快速积聚,在高温作用下,热膨胀力瞬时增大,膨胀压力出现突跃升高;由于高强度粘塑体形成过程对热量的不断消耗,热膨胀力急剧下降,高强度粘塑体形成后,膨胀压力趋于稳定。因此,静态破碎膨胀压力和反应温度随孔径增大而增大。岩石抗拉强度一般低于 30 MPa,因此,大孔径静态破碎技术运用到掏槽的工程实践中具有现实可行性。

2 大孔径静态破碎机理

2.1 大孔径静态破碎剂膨胀压力

静态破碎剂膨胀受到约束时,浆体介质对容器壁施加的作用力即为静态破碎剂膨胀压力。膨胀压力值大小主要依赖于约束体刚度和体积膨胀率,对于相同约束刚度的介质,静态破碎剂产生相同大小的膨胀压力。因此,在不利于测试的岩石介质中测试膨胀压力时,寻求相同刚度的金属管替代岩石膨胀压力测试。膨胀压力值是静态破碎掏槽技术的关键参数。利用电阻应变片法用金属管对静态破碎剂的膨胀压力进行测试,膨胀压按下式计算^[5]:

$$P = E_s (K^2 - 1) \{ \varepsilon_0 / (2 - \mu) \} \quad (1)$$

式中: P ——膨胀压, MPa; E_s ——钢管弹性系数; K ——钢管系数; ε_0 ——钢管圆周方向应变变量; μ ——泊松比,取 0.3。

2.2 大孔径静态破碎炮孔间距近似计算模型

炮孔间距大小主要由破碎剂膨胀压力 P 、炮孔直径 d 和岩石静态断裂韧性 K_{Ic} 决定。Shobeir Arshadnejad 利用量纲分析理论建立了炮孔间距方程^[6]:

$$s = f(P, d, K_{Ic}) \quad (2)$$

$$s = \beta P^a V^b K_{Ic}^{-c} \quad (3)$$

$$s = \beta p^2 d^2 / K_{Ic}^2 \quad (4)$$

式中: β ——无量纲系数,通过试验修正。

岩石静态断裂韧性 K_{Ic} 是表征岩石介质抵抗断裂能力的大小,与岩石断裂裂纹几何形状和强度相关。为进行工程近似计算,当岩石单轴抗拉强度满足 $0.5 \text{ MPa} \leq \sigma_t \leq 20 \text{ MPa}$ 时, J. A. Huang 建立了静态断裂韧性与单轴抗拉强度经验计算模型^[7]。表达式为:

$$K_{Ic} = 0.270 + 0.107\sigma_t \quad (5)$$

将式(5)代入式(4),则无量纲系数 β 修正公式为:

$$\beta = [(1.1449\sigma_t^2 + 5.778\sigma_t + 7.290)s / (p^2 d^2)] \times 10^{-2} \quad (6)$$

3 大孔径静态破碎掏槽试验及分析

3.1 试验装置

目前,静态破碎技术都是基于小孔径静态破碎技术,一旦炮孔孔径增加,极易出现危险的喷孔现象。经过反复试验,设计出基于动量平衡原理的大孔径静态破碎平衡密封装置。平衡密封装置由中心钢筋、内外顶盘,硅胶套,无纺布袋,螺丝、垫片等组成,如图 1 所示。静态破碎剂膨胀作用时,同时产生向下和向上的轴向膨胀力,该装置使轴向力相互平衡抵消,加上硅胶套的密封作用,使破碎剂浆体产生的膨胀力大部分作用在炮孔壁上,实现直孔内大孔径静态破碎。



图 1 自平衡密封装置

3.2 大孔径静态破碎模拟掏槽试验

此次试验为岩石 3 孔试验,其中顶部孔为空孔。为模拟隧道掏槽工程实践,选取高为 8 m,宽为无限岩石介质峭壁。试验岩石为板岩,其抗压强度约为 8 MPa,抗拉强度约为 98 MPa。根据岩石性质,布置 3 个炮孔,炮孔间成等边三角形布置,孔间距 $s = 50 \text{ cm}$ 。距峭壁底部 1.5 m 处,按图 2 所示钻孔,孔深 $h = 1.2 \text{ m}$,孔径 $d = 0.115 \text{ m}$,炮孔轴线与峭壁法线夹角为 10° 。安装自平衡密封装置,并将其塞入炮孔;根据炮孔体积公式 $V = \pi d^2 h / 4$ 算出所需破碎浆体体积,继而计算出破碎剂用量;将破碎剂按照水灰比为 0.3 的比例与水搅拌均匀,灌满 $\varnothing 115 \text{ mm}$ 炮孔。



(a) 试验前



(b) 试验后

图 2 试验前后对比

转动钢盘,使用扳手将堵孔器上端螺母拧紧。2 h 后,炮孔边缘形成微小裂缝;2.5 h 后,左边炮孔形成长约为 1.0 m,宽约为 0.02 m 的裂缝(如图 3、图 4 所示)。右侧炮孔形成长约为 0.7 m,宽约为 0.01 m 的裂缝。岩石开裂过程无噪声、无震动、无飞石。



图 3 试验后裂缝最大长度



图 4 裂缝最大宽度

3.3 试验结果分析

大孔径静态破碎技术进行隧道开挖时必须选好爆破设计参数,以便控制开挖整个过程,保护既有结构物,实现安全生产。岩石在破碎剂浆体膨胀力作用下,产生两条裂纹,裂纹发展方向为岩石抗拉强度较小方向;当炮孔周围有空孔时,另一条裂纹向空孔方向发展。因此,进行隧道掏槽工程实践,利用空孔对裂纹发展的导向作用,实现高效掏槽。

为获得大孔径静态破碎孔间距离公式修正系数,根据试验结果,在同种岩石中分别进行了 4 次试验,裂缝长度测试结果如表 1 所示。

表 1 介质裂缝长度

岩石类型	炮孔孔径 d /m	孔深 h /m	岩石抗拉强度 σ_t /MPa	裂缝长度 s /m
板岩	0.115	1.2	8	1.12
板岩	0.115	1.2	8	0.78
板岩	0.115	1.2	8	1.10
板岩	0.115	1.2	8	0.85

岩石在静态破碎剂作用下,岩石裂缝形成时间远远大于 1 h,因此,大孔径静态破碎膨胀压力取膨胀压力测试稳定值,即 $P = 97 \text{ MPa}$;将表 1 参数代入

式(6),分别得到 $\beta_1 = 1.14 \times 10^{-2}$; $\beta_2 = 0.79 \times 10^{-2}$; $\beta_3 = 1.12 \times 10^{-2}$; $\beta_4 = 0.86 \times 10^{-2}$ 。以上数据是基于炮孔最长裂隙所得的结果。在裂纹后半部分,裂纹未在岩石法线方向形成贯穿裂缝,即在裂纹后半部分是表面裂缝。经过反复模拟掏槽双孔试验,当裂缝计算长度 $s \leq 0.5 \text{ m}$ 时,能够在孔间形成贯穿裂缝,最大裂缝宽度达 0.02 m。将 $s = 0.5 \text{ m}$ 代入式(6)可得: $\beta = 0.509 \times 10^{-2}$ 。最大孔间距近似计算模型可写为:

$$s = \frac{0.509p^2 d^2}{1.1449\sigma_t^2 + 5.778\sigma_t + 7.290} \quad (7)$$

本次试验形成了裂缝,但并没有实现压碎岩石的目的;下一步,将设计采取组合炮孔形式进行掏槽施工,即两孔或多孔间距 $< 25 \text{ cm}$ 组成一组炮孔,不同组别炮孔间距取 0.5 m,试图实现岩石掏槽。

4 结论

(1) 通过发明基于动量平衡原理新型密封装置,解决了大孔径静态破碎喷孔难题。经过反复试验和改进,达到岩石破碎目的,实现了大孔径静态破碎掏槽技术。

(2) 结合孔间距实测数据,修正了基于量纲分析理论大孔径静态破碎孔间距近似计算公式。为大孔径静态破碎掏槽孔网布置工程实践提供了依据。

(3) 大孔径静态破碎技术高效、安全、环保、无震动,为解决禁爆区和环境敏感区域施工,提供了一种新型施工工法。提出组合炮孔大孔径静态破碎工法,可加大岩石破碎程度。

参考文献:

- [1] 惠峰,李志龙,徐全军,等.空孔对爆破地震波的减震作用数值模拟分析[J].爆破,2012,29(4):58-61.
- [2] 楼晓明,赖红源,唐小军.紫金山金铜矿靠帮高陡边坡爆破减震研究[J].爆破,2011,28(2):56-59.
- [3] 石洪超,张继春,夏森林,等.层状围岩小净距隧道掏槽爆破减震技术[J].爆破,2013,30(4):60-65.
- [4] Xu Qianjun, Jiang Nan, Long Yuan, Liu Ying, Ji Chong. Study of a New Large Scale Borehole Soundless Cracking Technology [Z]. The 23rd World Mining Congress and Expo. Montreal. 2013.
- [5] JC506-2008,无声破碎剂[S].
- [6] 吴家龙.弹性力学[M].北京:高等教育出版社,2001.152-153.
- [7] J. A. Huang and S. J. Wang, An experimental investigation concerning the comprehensive fracture toughness of some brittle rocks [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. 1985,22(2):99-104.
- [8] 温尊礼,徐全军,姜楠,等.新型大孔径静态破碎技术的试验研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40(5):72-74.