

单仁亮, 耿慧辉, 吕进阳, 等. 新喷混凝土强度受爆破荷载影响的模型试验[J]. 煤炭学报, 2014, 39(11): 2157-2164. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2013.1515
Shan Renliang, Geng Huihui, Lü Jinyang, et al. Model test on the strength of young shotcrete under blasting load[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(11): 2157-2164. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2013.1515

新喷混凝土强度受爆破荷载影响的模型试验

单仁亮 耿慧辉 吕进阳 焦少鹏

(中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院 北京 100083)

摘要:以物理模型试验为主要手段,利用预埋试件拉拔法测得模拟喷射混凝土薄层的强度,辅以电阻应变测试,从受振时不同龄期、距掘进工作面不同距离、同一断面不同位置这3个方面,研究了新喷射混凝土受爆破荷载后,其强度质量发展的变化。试验结果表明:在龄期5~12 h期间,由于混凝土未达到终凝状态,一定量的爆破振动可提高喷射混凝土的密实程度,进而促进喷射混凝土的强度增长,起到“捣实”的作用;龄期12~24 h为新喷混凝土受爆破荷载影响的主要时期;而龄期大于24 h的喷射混凝土,受爆破荷载的影响则逐渐减小。距掘进工作面1.8 m以内的喷射混凝土强度受到爆破振动降低最为严重,而1.8 m以后,爆破荷载对喷射混凝土终凝强度的影响逐渐减小,9 m以后则无影响。通过对比同一断面不同位置处喷射混凝土薄层的强度变化和应变波形,得知爆破荷载对洞室拱顶位置的喷射混凝土层强度影响最大。

关键词:新喷混凝土;强度;爆破荷载

中图分类号:TD235

文献标志码:A

文章编号:0253-9993(2014)11-2157-08

Model test on the strength of young shotcrete under blasting load

SHAN Ren-liang, GENG Hui-hui, LÜ Jin-yang, JIAO Shao-peng

(School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: The model tests as the primary means is used for the research on the effects of blasting load on young shotcrete. The strength of similar shotcrete lining was measured by pull-out method of the embedded parts, combined with resistance strain gauge test; the effect of blasting load on quality of shotcrete strength development was analyzed from three aspects, including different age of shotcrete, various distances from the tunnel face and different positions in the same section. The results show that, in the age of 5-12 h period, as the shotcrete not reaches the final coagulated state, a certain amount of blasting vibration can increase the compactness of shotcrete, means play a "tamping" role; the main effects of young shotcrete under blasting load is in 12-24 h; the influence of blasting gradually decrease to those shotcrete greater than 24 hours. 1.8 m is the critical point, with increasing distance from the tunnel face, the influence of young shotcrete under blasting load decreases and there is no influence after 9 m. By contrasting the changes of the shotcret strength and strain waveforms, it can be judged that the vault gets the greatest influence under blasting load.

Key words: young shotcrete; strength; blasting load

喷射混凝土是借助喷射机械,利用压缩空气或其他动力,将按一定比例配合的水泥、砂、石等拌和料,

通过管道输送,并以高速喷射到受喷面上凝结硬化而成的一种混凝土^[1]。由于喷射混凝土施工工序简

单、使用机动灵活,因而被广泛应用于多种支护结构体系中。但在实际地下工程的施工过程中,通常都不可能等喷射混凝土达到其终凝强度后再进行掘进爆破等施工,由于施工进度以及其他方面等要求,掘进爆破与喷射混凝土支护常常是同步或穿插进行。这样一来,喷射混凝土在几个小时内就会受到强烈的爆破振动冲击,这必然会影响到喷射混凝土的早期强度成长,也将直接影响其后期的强度发展,使其终凝强度无法达到设计要求,造成支护结构承载能力的降低。如何平衡好施工进度要求和混凝土强度质量之间的关系,并解决好二者之间的矛盾是当今岩土工程界一个亟待解决的问题。

对于喷射混凝土受爆破荷载的影响,许多学者做了相关的研究工作。陈明等^[2]根据弹性波在介质中的传播规律,研究了新混凝土衬砌在爆破应力波作用下的破坏模式及其安全振动速度;易长平^[3]利用有限元法,较为全面地研究了爆破振动对不同形状的邻近硐室和本硐室围岩稳定性、混凝土衬砌及砂浆锚杆的影响;李宁等^[4-5]通过室内的爆破模拟试验,研究了爆破振动对不同龄期混凝土衬砌的影响;方树林等^[6]采用混凝土应力计,通过现场监测分析了喷射混凝土层的各向应力状态;饶增^[7]通过现场爆破振动监测试验,得到爆破近区和远区的振动衰减规律;吴亮等^[8]通过数值模拟,分析了爆破荷载作用下喷射混凝土衬砌的质点振动速度和受力情况;李顺波等^[9]结合数值模拟分析和现场振动监测,研究了爆破振动对隧道衬砌的影响,并验证了数值模拟方法的可行性;Lamis Ahmed 等^[10]通过数值分析,利用 3 种不同的建模方法,研究了爆破应力波作用下喷射混凝土和岩体之间的相互作用;Ki-H Song 等^[11]利用冲击回波法,通过数值模拟分析和模型试验,获得了喷射混凝土与岩石黏结程度的判别方法;丁泰山等^[12]、胡振锋等^[13]根据混凝土损伤理论,利用数值模拟分析,研究了爆破应力波荷载对早期喷射混凝土支护结构的损伤影响。

本文以爆破近区的新喷射混凝土为研究对象,借助大比例模型试验,分析了爆破产生的动荷载对锚喷支护体系中喷射混凝土各项强度指标的影响。通过这些研究,明确爆破产生的动荷载对喷射混凝土支护效果的影响,该研究成果可用作相关施工组织设计时的参考,帮助工程人员找到一些解决爆破动载对新喷射混凝土负面影响的方法,保证新喷射混凝土在爆破振动作用下的安全性及混凝土强度的正常发展,以实现安全、快速、经济施工。

1 物理模型设计

1.1 工程概况及基本假设

模型试验模拟岩体中的巷道开挖爆破及支护情况。本次试验不针对具体工程背景,只是按照一般的工程状况进行设计^[14],对被模拟的原型条件进行如下简化和假设:

- (1) 假设模拟岩体为各向同性的均质、连续体,且强度中等,根据模型材料的物理力学参数和相似比推得岩体的实际参数值;
- (2) 巷道硐室形状为直墙半圆拱形,跨度为 4 ~ 5 m;
- (3) 模拟喷射混凝土的厚度按几何相似确定;
- (4) 对锚喷支护结构的模拟一般只考虑力学效应上的相似,忽略其结构形式的影响;
- (5) 单次装药量根据单耗进行控制,只计算掏槽药量并采用集中装药的形式。

本次试验所要模拟的是直墙半圆拱形巷道,巷道跨度 4.8 m,高度 4.2 m,墙高 1.8 m。试验模拟的硐室围岩按Ⅲ类岩体性质考虑,参照中华人民共和国国家标准《锚杆喷射混凝土支护技术规范》(GB 50086—2001)^[15],查得Ⅲ类岩体的物理力学参数为:容重 24.5 ~ 26.54 kN/m³,内摩擦角 39° ~ 50°,黏聚力 0.7 ~ 1.5 MPa,变形模量 6 ~ 20 GPa,泊松比 0.25 ~ 0.30,岩体单轴饱和抗压强度 20 ~ 60 MPa,岩体纵波速度 3.0 ~ 4.5 km/s。模拟的喷射混凝土强度等级为 C20,喷层厚度为 60 mm。巷道爆破掘进,炮孔深 1.8 m,进尺约 1.8 m,采用二级乳化炸药,1-5 段雷管起爆。

1.2 物理模型尺寸

根据实际工程条件、研究内容和测试手段,设计试验模型尺寸:长×宽×高=2.5 m×2.0 m×2.1 m,如图 1 所示。模型采用水泥砂浆制作试验体,试验体直接在地面上浇筑完成,模型底面与地面固定为一体,以保证整体的抗振能力。试验设计时,考虑到模拟爆破药量小,爆破产生的能量衰减快,而且试验体表面比较松散,应力波在试验体周边产生的反射波传到测试点的能量很小,可以忽略,因此没有在模型体周边设置侧限和顶压。

1.3 模型相似比及模拟材料

由于该模型试验涉及到多种材料,故而将各种材料中同类的物理力学参数综合考虑,确定其相似比。根据相似理论^[16],考虑经济实用的原则,经过对多个模型比例尺方案的综合分析,确定模型的几何相似比 $C_L=6$,密度相似比 $C_\rho=1.3$ 。而原型与模型有相同重

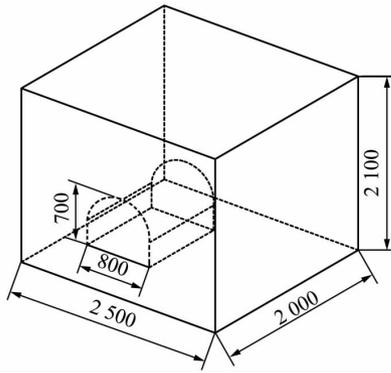


图 1 物理模型示意

Fig. 1 The schematic diagram of physical model

力场的限制,即 $C_a = 1$ 。根据相似准则,可以求得模型主要物理力学参数的相似比,见表 1。

表 1 主要参数的相似比例系数

Table 1 Proportional coefficient of main parameters

序号	物理参数	相似准则	相似比
1	线尺寸 L	C_L	6
2	质量密度 ρ	C_ρ	1.3
3	弹性模量 E	$C_E = C_L C_\rho C_a$	7.8
4	单轴抗压强度 R	$C_R = C_E$	7.8
5	黏聚力 C	$C_C = C_E$	7.8
6	集中力 P	$C_P = C_E C_L^2$	280.8
7	炸药药量 q	$C_q = C_\rho C_L^3$	280.8
8	炸药爆速 v	$C_v = C_E^{0.5} C_\rho^{-0.5}$	2.45
9	应力 σ	$C_\sigma = C_E$	7.8
10	加速度 a	C_a	1
11	位移 δ	$C_\delta = C_L$	6
12	时间 t	$C_t = C_L^{0.5}$	2.45

依据模型试验对相似材料的各种要求,综合考虑被模拟岩体的性质和计算所得的相似比,以及模型材料的经济性等,本文试验选用水泥砂浆作为模拟岩体的材料,其基本配比为:水泥:砂:水 = 1.5 : 7 : 2,试验时,根据实际情况的变化,也可对这一比例作适当调整。试验模拟的硐室形状为直墙半圆拱形,如图 1 所示,模拟巷道宽 800 mm,高 700 mm,墙高 300 mm,分 3 步开挖支护,每个进尺 300 mm。

模型试验采用石膏材料来模拟喷射混凝土。石膏凝固需要的时间较短,初凝时间一般为几分钟,0.5 h 内即可达到终凝。本文试验所模拟的是设计强度为 C20 的喷射混凝土,其弹性模量为 21 GPa。由于以石膏为主的脆性材料,其弹性模量主要随水膏比(w/p)的变化而不同,通过查阅多篇文献并结合试验数据分析,确定选用水膏比为 1.3 的石膏浆体来模拟喷射混凝土,水膏比 $w/p = 1.3$ 时,其弹性模量等

力学性能均符合模拟喷射混凝土的要求。模拟喷层的设计厚度为 10 mm,喷射范围为边墙和拱顶。

模型试验采用 6 号金属壳毫秒延期电雷管和 MFB-200 发爆器等巷道常用的爆破器材。考虑雷管的起爆能力和现有的炸药类型,试验时采用集中装药方式,炸药种类为二级岩石乳化炸药,爆破药量 30 g,炮孔直径设置为 30 mm,炸药直径控制在 28 mm 左右。药包插入雷管并埋置于孔底,正向起爆,为了防止出现“冲炮”现象,保证爆破效果,将炮眼的剩余部分用炮泥填堵密实。

2 试验原理与测试装置

2.1 拉拔试验原理

喷射混凝土的强度有多种检测方法,综合考虑模型尺寸和模拟材料性质等因素,本文模型试验采用预埋试件拉拔法来测试模拟喷射混凝土的强度。预埋试件拉拔法简称拉拔法,该方法是为了对实际喷射混凝土进行早期强度的测定而制定的,目前被应用于欧美及日本等国的工程检验中。

拉拔法是在混凝土内预先埋入一个带有中心螺杆的金属圆盘(文中统称为“销钉”),待喷射混凝土到达所定龄期后,对销钉施以向外的拉力。由于混凝土是脆性材料,当外力增加到一定限度时,混凝土将沿着一个与轴线成 45° 左右角的圆锥面破裂。混凝土对于这种抽拔力的抵抗作用,与标准试件抵抗压力的作用相似,因而,可以用极限拉拔力作为估算混凝土抗压强度的指标。根据荷载及破坏面的面积,可求出混凝土的抗剪强度,如果被拔出的锥体表面积为 A ,则喷射混凝土的抗剪强度 f_{cr} 为

$$f_{cr} = P' / (A \cos 45^\circ) \quad (1)$$

式中 P' 为锥体被拉出时的荷载; A 为锥体表面积。

锥体表面积可以按式(2)计算得出,图 2 说明了式(2)中各参数之间的关系。锥台代表所拔出的锥体, r 为销钉圆盘半径, H 为所测喷射混凝土的厚度, α 为破坏面夹角, R' 为锥体底面半径。锥体的表面积为

$$A = \pi (R' + r) \sqrt{H^2 + (R' - r)^2} \quad (2)$$

试验证明,拉拔法和常规的抗压强度试验法之间的相关系数为 0.878,相关程度很好^[1]。喷射混凝土抗压强度 f_c 与拔出力 P' 之间的关系为

$$f_c = 4 \frac{P'}{A} + 2.6 \quad (3)$$

2.2 应变测试原理与设备

电阻应变测试技术是用电阻应变片测定构件的表面应变,再根据应力、应变关系确定构件表面应力

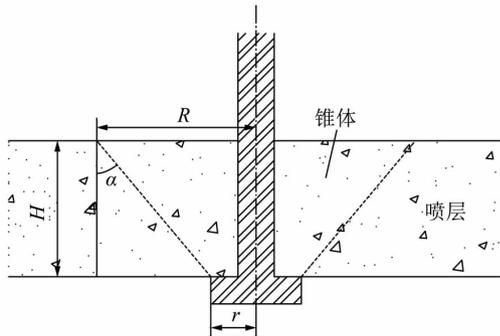


图 2 由拉拔产生的锥体

Fig. 2 Cone caused by drag

状态的一种实验应力分析方法。它的基本原理是:将电阻应变片固定在被测构件上,当构件受力变形时电阻应变片的电阻值也发生相应的变化。通过电阻应变仪将电阻应变片中的电阻变化值测定出来,并换算成所需要的应变值和应力值。

应变片、应变放大器和动态测试分析仪连成一条完整测试线路用于应变的测试分析,如图 3 所示。试验采用 TST3406 型高速高精度动态测试分析仪和 KD6009 型应变放大器,选择 BE120-2AA 型应变片,其阻值为 $(119.9 \pm 0.1) \Omega$ 、灵敏系数为 $(2.18 \pm 1)\%$ 。测试时采取设备滤波、桥路补偿、屏蔽和接地等措施,以防止电磁干扰,并确保试验结果准确。试验采样率设定为 1 MHz,低通滤波设置为 10 kHz 或 100 kHz。

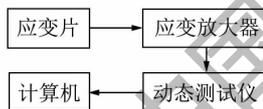


图 3 动态应变测试系统

Fig. 3 Dynamic strain measurement system

2.3 喷射混凝土的动力特性

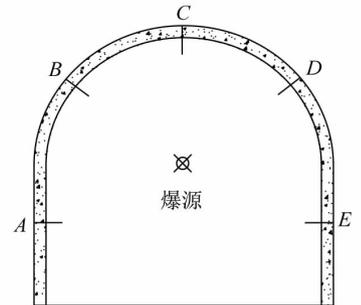
在抗动荷载的工程项目中,喷射混凝土在快速变形下的强度和变形性能是非常重要的。我国科学家曾经利用 C-3 动载试验机,在不同的应变速率 $\dot{\epsilon} = 0.006, 0.450, 0.427 \text{ s}^{-1}$ 下,测定了喷射混凝土抗压强度、抗剪强度以及其弹性模量的动力性能^[1]。试验结果与静载条件下的测试结果相对比,得知:在快速加载的条件下,喷射混凝土的抗压强度、抗剪强度和动弹性模量均有不同程度的提高;加载速度越快,相应的轴心抗压强度就越大。

3 试验结果与分析

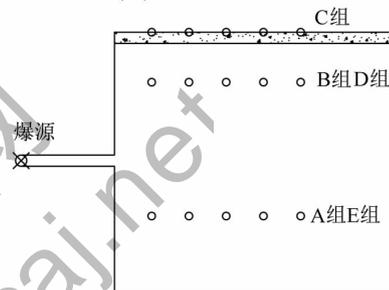
3.1 不同龄期喷射混凝土的动载影响

在已经成型的模拟巷道中做静载拉拔试验,测点按照图 4 布置,在与动载试验同等外界条件下,不施

加爆破扰动,让模拟喷射混凝土层自然凝固硬化,获得强度增长,测试其达到终凝时的极限轴拉力并求均值,依照式(1)和(3)计算其终凝强度,得到抗剪强度和抗压强度分别为 0.441 8 和 3.849 2 MPa,用于动载试验成果的参照和对比。



(a) 断面测点布置



(b) 侧视图

图 4 测点布置示意

Fig. 4 Schematic program of measuring points

本节主要分析喷射混凝土在不同龄期时受爆破振动扰动后的强度变化。试验方案设计为:分别在模拟喷层龄期为 20 min, 1, 2, 3, 4, 6, 8, 16 和 24 h 时进行爆破模拟试验。结合求得的时间相似比例系数,试验取 $C_t = 3$,折算出实际的喷射混凝土受振时龄期分别为 1, 3, 6, 9, 12, 18, 24, 48 和 72 h。为了便于与前人研究成果进行对比分析,文中所述龄期均为折算出的实际喷射混凝土真实龄期。

试验时,在同一断面布置 5 个测点,视为 1 组,测点布置位置如图 4 所示。在各测点埋置销钉,达到设计龄期时施加爆破动载,24 h 后再进行拉拔测试,由于石膏凝固快,此时测得的数据可视作其终凝强度,进而得到喷射混凝土在不同龄期受振动荷载后的强度值与受振时龄期的关系曲线,如图 5 所示。由静载试验结果可知,达到终凝状态时,模拟喷层的抗剪强度和抗压强度分别为 0.441 8 和 3.849 2 MPa,折算出实际喷射混凝土的抗剪强度和抗压强度分别为 3.446 2 和 30.023 8 MPa,将此值与喷射混凝土在不同龄期时受爆破动载后的强度值做对比,为了更加直观地看到对比的结果,将该值在图 5 中表示为一条直线。

由式(1)和(3)可知,喷射混凝土的抗剪强度和

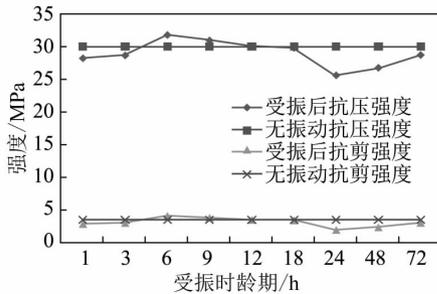


图 5 喷射混凝土在不同龄期受振后的强度曲线

Fig. 5 Strength curves of shotcrete after vibration at different ages

抗压强度成线性比例关系,因此图 5 中所得到的两条曲线形状相似,与无振动时的强度关系也是一致的。从图 5 可以看出,爆破振动对于喷射混凝土并非都是降低其强度的,在龄期 5~12 h 期间,一定量的爆破振动不但没有影响喷射混凝土的强度增长,反而使其强度有所提高。初步分析其原因为:

(1) 龄期小于 12 h 的喷射混凝土还没有达到终凝,此时施加爆破动载,相当于起到了“捣实”的作用。在水灰比一定的情况下,捣实作用可以提高混凝土的密实程度,自然会提高其强度;

(2) 由于喷射混凝土还没有完全凝固,振动产生的微裂缝很快就被后期凝固重新黏合,这种现象称为混凝土的自愈现象;

(3) 爆炸会在硐室内产生瞬间的高温,这种高温环境会促进喷射混凝土的凝固硬化,进而使其提前达到终凝强度。

在龄期 12 h 以后,喷射混凝土已经基本凝结硬化成固体,其内部的原生裂缝已经形成,此时施加爆破动载,不但起不到捣实的作用,反而会使其内部的原生裂缝扩展,而且,由于受到振动扰动,喷射混凝土内部还会形成新的裂纹,使得内部空隙率增加,从而造成终凝强度的降低。随着受振时龄期的增长,喷射混凝土的强度又呈增长趋势。这可能是因为,在相同强度的爆破振动作用下,混凝土内产生的微裂缝逐渐减少。这种趋势说明,爆破振动对龄期大于 24 h 的喷射混凝土影响逐渐减小。

由 2.3 节喷射混凝土的动力特性可以了解到,在快速加载的条件下,喷射混凝土的抗压、抗剪和动力弹性模量都会有一定的提高。而爆破是炸药能量的瞬时释放,其产生的动荷载以极快的速度作用于喷层,结合喷射混凝土的动力特性,也可以为上述试验结论提供佐证,说明该结论是合理的。

文献 [17-18] 通过模拟井壁受振试验,研究了凿井爆破振动对现浇混凝土井壁的影响,也得到了与本文较为一致的结论。其中,张昌锁等 [17] 得到的结论

为:对于龄期 36 h 之前的混凝土,爆破振动可以增强其终凝强度;黄琦等 [18] 得到的结论为:混凝土在初凝至中凝以前受爆破振动会增加其终凝强度,龄期 20 h 以后受振则会降低其终凝强度。

3.2 爆破近区不同距离处喷射混凝土的动载影响

试验测试距掘进工作面不同距离处的喷层强度,分析爆破动载对不同距离处喷射混凝土强度的影响程度。为尽可能排除龄期的干扰,本节试验在喷涂石膏层后 4 h 进行。试验测试点布设位置如图 4 所示,分别在两侧边墙、拱肩和拱顶布设 5 组金属销钉,每组沿硐室轴向设置 5 个测点,与掘进工作面轴向距离分别为 100 200 300 400 500 mm。试验时按照距掘进工作面由近及远的顺序拔出销钉,测得拉拔力,并按照式 (1) 和式 (3) 分别计算抗剪强度和抗压强度。

由于喷射混凝土抗剪强度与抗压强度成线性比例关系,可知二者与无振动时的强度关系基本一致,因而此处仅以抗压强度为例进行分析。将每组测点位置的抗压强度与距掘进工作面的距离生成关系曲线,与无振动时的抗压强度放在一起对比,如图 6 所示。试验目的是为寻求爆破动载对喷射混凝土强度的影响随距离的变化规律,并非求其具体的强度值,因此试验结果未按相似比折算,图 6 中的抗压强度为实测的石膏层的强度。

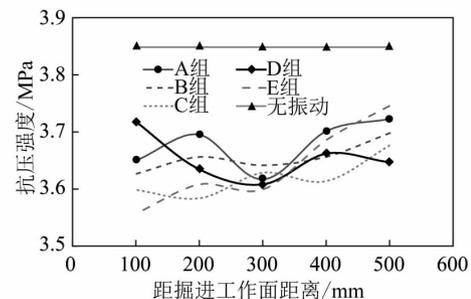


图 6 爆破振动距离对喷层强度的影响

Fig. 6 Effect of blasting vibration distance on lining strength

从图 6 中可以看出,受爆破动载后,各组测点的喷层强度均小于无振动时的强度,说明受爆破动载扰动后,喷射混凝土的强度受到了一定的影响。由于试验模型尺寸的限制,该组试验未能测试更远距离处的喷层强度变化情况,测点只布置到距掘进工作面 500 mm 处,按照相似比例系数计算,相当于原型的 3 m,该距离远未超过爆破振动的影响半径,均处于受爆破动载较严重的区域。但从图 6 所示关系曲线可以看出,距掘进工作面 300 mm 处为喷层强度变化的临界点,按照相似比例计算,相当于原型的 1.8 m,可

知: 距掘进工作面 1.8 m 以内, 喷层强度受爆破动载影响最为严重; 而 1.8 m 以外, 随着与掘进工作面距离的增加, 喷层的强度呈总体上升趋势, 爆破动载对喷层强度的影响逐渐减小。按照图 6 中测点 300 ~ 500 mm 处曲线段的上升趋势分析, 可以推知: 该上升曲线与无振动时强度直线的交点约在 1 500 mm 处, 相当于原型的 9 m, 即: 距掘进工作面 9 m 以外, 喷射混凝土的终凝强度将不再受爆破动载的影响。因此, 在一般的巷道掘进中, 应将喷射混凝土置后工作面 9 m。

3.3 同一断面不同位置处的动载影响

为了研究爆破动载作用下, 距离掘进工作面相同距离的断面上, 不同位置的点受影响程度是否一致, 相互之间有何种关系, 采用拉拔试验和电阻应变测试相结合的手段进行检测, 两种方法所测得的结果可以互为参照、进行对比分析。

试验时, 电阻应变测试与拉拔试验同步进行: 在每个模型硐室布置一个测量断面, 在两侧边墙、拱肩和拱顶位置共布置 5 个测试点, 做拉拔试验, 测点位置如图 4 所示。在硐室内支护工作面上喷涂 10 mm 厚的石膏浆体模拟喷射混凝土, 同时将销钉分别埋入 5 个测点位置。由于巷道断面形状是对称的, 硐室两侧边墙和拱肩的对应点所测得的数据, 可互为参照对比。待石膏基本完成凝结硬化、表面干燥后, 在边墙、拱肩和拱顶位置设 3 个应变测试点, 如图 7 所示, 在每个试点沿硐室轴向粘贴应变片做单点应变测试, 准备工作完成之后, 装药爆破, 通过电阻应变测试系统采集应变波形并存储; 然后用缓慢而均匀的速度将各

测点的销钉拔出并记录拉力值。

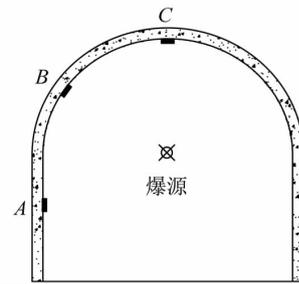


图 7 测点布置

Fig. 7 Measuring points

以上步骤为一组试验, 一组试验完成后, 用工具清除掉硐室内支护工作面上的石膏, 重复以上步骤, 共进行 6 组试验。试验的模拟爆破均在同一个爆破孔中进行, 因此在装药段爆破孔壁难免发生破碎和变形。为了克服该问题的不利影响, 采用逐步改变装药位置的办法, 用炮泥和碎渣将爆破孔壁破碎段填充捣实, 装药位置逐步向孔口移动。

拉拔试验数据分析时, 将每个测点的 6 次试验数据求均值, 按公式(1)和(3)分别计算抗剪强度和抗压强度, 与喷层不受振动荷载时的终凝强度相比, 计算出强度降低率, 列入表 2, 从表 2 中可以看出, 各测点的拉力平均值相差不大。同时, 将抗剪强度和抗压强度的降低率用柱形图表示, 如图 8 所示。从图 8 中可以直观地看出: 受爆破动载后, 位于拱顶位置的 C 点强度降低率最大, 说明受振后拱顶位置喷射混凝土层的强度变化最大。按照同样的方法对比不同龄期、不同距离时的测试结果, 也可以得出相同结论。

表 2 试验数据

Table 2 Test data

测点	拉力均值/N	抗剪强度/MPa		抗剪强度降低率	抗压强度/MPa		抗压强度降低率
		受振后	无振动		受振后	无振动	
A	348.6	0.369 9	0.441 8	0.162 8	3.645 8	3.849 2	0.052 8
B	381.4	0.404 7	0.441 8	0.084 1	3.744 2	3.849 2	0.027 3
C	312.7	0.331 8	0.441 8	0.249 0	3.538 1	3.849 2	0.080 8
D	354.2	0.375 8	0.441 8	0.149 4	3.662 6	3.849 2	0.048 5
E	390.8	0.414 7	0.441 8	0.061 5	3.772 4	3.849 2	0.020 0

应变测试的结果并不理想, 由于种种原因, 部分测点并没有测到有效的波形数据, 图 9 列出了一组较为典型和完整的应变波形, 图中的应变, 正值表示拉应变, 负值表示压应变。

从图 9 中可以看出, 模拟喷射混凝土层在硐室边墙 A 点位置主要受拉应变, 喷射混凝土中的应变波

持续时间大约为 8 ms, 应变峰值为 1.152×10^{-6} , 之后减小至残余应变 306×10^{-6} , 经过约 5 ms 的平缓期趋于稳定值 198×10^{-6} ; 在硐室拱肩 B 点位置, 喷射混凝土先是受压, 其后应变慢慢增大, 由受压变为受拉, 达到应变峰值为 857×10^{-6} , 应变波持续时间大约 13 ms, 残余应变 80×10^{-6} ; 在拱顶 C 点位置, 喷射混

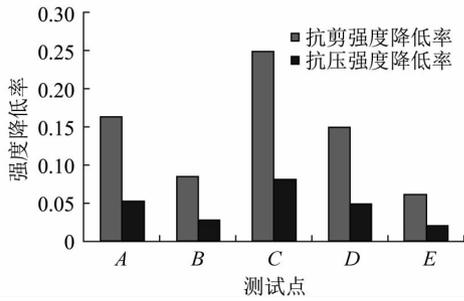


图 8 各测点的强度降低率

Fig. 8 The rate of strength decrease

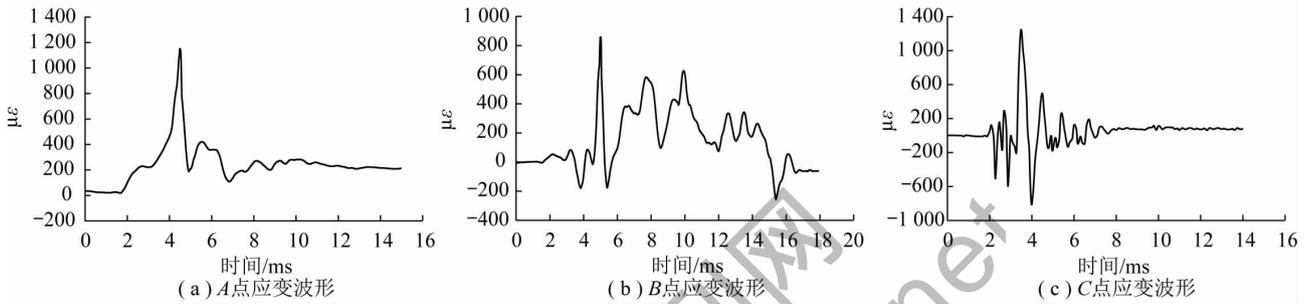


图 9 各测点应变波形

Fig. 9 Stress waves in different survey points

4 结 论

(1) 通过分析喷射混凝土在不同龄期时受爆破振动后的强度变化,得到了受爆破振动后,喷射混凝土的强度变化与其受振时龄期的关系曲线,对比不受扰动时喷层的终凝强度,可知:在龄期 5 ~ 12 h 期间,一定量的爆破振动不但没有影响喷射混凝土的强度增长,反而使其强度有所提高;爆破动载对新喷混凝土的主要影响期为 12 ~ 24 h;对龄期大于 24 h 的喷射混凝土影响则逐渐减小。

(2) 根据各测点位置喷层强度与距掘进工作面距离的关系曲线,与无振动时的强度作对比,可以得出:距掘进工作面 1.8 m 以内,喷射混凝土强度受爆破动载影响最为严重;而 1.8 m 以外,随着与掘进工作面距离的增加,爆破动载对喷射混凝土强度的影响逐渐减小,并可依此趋势推知:距掘进工作面 9 m 以外,喷射混凝土的终凝强度将不再受爆破动载的影响。

(3) 结合拉拔试验和应变测试,对比硐室边墙、拱肩和拱顶位置的试验强度和应变波形,可以得知:爆破振动作用下,拱顶位置的喷层所受的最大应力为 2.92 MPa,其强度下降率最大,说明爆破动载对硐室拱顶位置的喷层强度影响程度最大。

凝土既受压又受拉,应变峰值为 1.258×10^{-6} ,应变持续时间约为 6 ms,之后趋于平缓,残余应变 157×10^{-6} 。

石膏的弹性模量为 2.32 GPa,根据应变信号和应力转化关系 $\varepsilon = \sigma / E$,可以计算得知爆破动载引起的应力大小,在硐室边墙、拱肩和拱顶位置,最大应力分别为 2.67,1.99 和 2.92 MPa。此结果也可以说明,爆破振动作用下,拱顶位置的喷层受到的应力比较大,而且是反复拉压,就必然会造成强度的降低,这与上述拉拔试验结论一致。

参考文献:

- [1] 程良奎,李象范. 岩土锚固·土钉·喷射混凝土——原理、设计与应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
Cheng Liangkui, Li Xiangfan. Geotechnical anchoring · soil nails · Shotcrete-theory, design and application [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2008.
- [2] 陈明,卢文波. 爆炸应力波对新浇混凝土衬砌的影响研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(2): 454-459.
Chen Ming, Lu Wenbo. The influence of explosive stress wave on young concrete lining [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(2): 454-459.
- [3] 易长平. 爆破振动对地下硐室的影响研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2005.
Yi Changping. The influence of blasting vibration on underground chambers [D]. Wuhan: Wuhan University, 2005.
- [4] 李宁,陈蕴生,韩焜. 爆破对衬砌损伤特性影响的室内试验研究[J]. 工程爆破, 1996, 2(2): 6-10.
Li Ning, Chen Yunsheng, Han Xuan. Lab test on damage behavior of the tunnel lining under blasting load [J]. Engineering Blasting, 1996, 2(2): 6-10.
- [5] 陈蕴生,李宁,吕强. 混凝土衬砌的爆破模拟试验研究[J]. 西安理工大学学报, 1996, 12(1): 47-51.
Chen Yunsheng, Li Ning, Lü Qiang. The concrete lined blasting vibration simulation test [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 1996, 12(1): 47-51.
- [6] 方树林,康红普,林健,等. 锚喷支护软岩大巷混凝土喷层受力监测与分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2012, 29(6): 776-

782.
Fang Shulin ,Kang Hongpu ,Lin Jian ,et al. Mechanical monitoring and analysis on shotcrete layer of soft rock main roadway supported by bolt-shotcrete [J]. Journal of Mining & Safety Engineering 2012 , 29(6) : 776-782.
- [7] 饶 增. 隧道钻爆施工对初期支护的影响及控制标准的研究 [D]. 北京: 北京交通大学 2010.
Rao Zeng. Study of impacts and control standard of drilling and blasting method on primary support [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University 2010.
- [8] 吴 亮 ,钟冬望. 不同布置条件下邻近隧道掘进爆破对既有隧道的影响 [J]. 煤炭学报 2009 34(10) : 1339-1343.
Wu Liang Zhong Dongwang. Effect of tunneling blasting on the existing adjacent tunnel under different conditions [J]. Journal of China Coal Society 2009 34(10) : 1339-1343.
- [9] 李顺波 ,杨 军 ,夏晨曦 ,等. 近距离爆破对隧道衬砌影响的数值模拟研究 [J]. 煤炭学报 2011 36(S2) : 421-424.
Li Shunbo ,Yang Jun ,Xia Chenxi ,et al. Numerical simulation of close blasting on the impact of tunnel lining [J]. Journal of China Coal Society 2011 36(S2) : 421-424.
- [10] Lamis Ahmed ,Anders Ansell. Structural dynamic and stress wave models for the analysis of shotcrete on rock exposed to blasting [J]. Engineering Structures 2012 35: 11-17.
- [11] Ki-H Song ,Gye-chun Cho. Bonding state evaluation of tunnel shotcrete applied onto hard rocks using the impact-echo method [J]. NDT & E International 2009 42(6) : 487-500.
- [12] 丁泰山 ,李万喜. 爆破施工对新喷射混凝土的损伤影响分析 [J]. 地下空间与工程学报 2006 2(5) : 834-838.
Ding Taishan ,Li Wanxi. Damage analysis of fresh shotcrete under excavating blast load [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering 2006 2(5) : 834-838.
- [13] 胡振锋 ,吴子燕 ,李 政. 喷射混凝土衬砌爆破损伤的数值分析 [J]. 矿业研究与开发 2005 25(5) : 71-75.
Hu Zhenfeng ,Wu Ziyan ,Li Zheng. Numerical analysis on the blasting damage of shotcrete lining [J]. Mining Research and Development 2005 25(5) : 71-75.
- [14] 单仁亮 ,周纪军 ,夏 宇 ,等. 爆炸荷载下锚杆动态响应试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报 2011 30(8) : 1540-1546.
Shan Renliang ,Zhou Jijun ,Xia Yu ,et al. Experimental investigation on dynamic response of rockbolt under blasting load [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2011 30(8) : 1540-1546.
- [15] GB50086—2001. 锚杆喷射混凝土支护技术规范 [S]. 北京: 中国计划出版社 2001.
GB50086—2001. Specifications for bolt-shotcrete support [S]. Beijing: China Planning Press 2001.
- [16] 杨俊杰. 相似理论与结构模型试验 [M]. 武汉: 武汉理工大学出版社 2005.
Yang Junjie. Similarity theory and structural model test [M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press 2005.
- [17] Zhang Changsuo ,Hu Feng ,Zou Steve. Effects of blast induced vibrations on the fresh concrete lining of a shaft [J]. Tunnelling and Underground Space Technology 2005 20(4) : 356-361.
- [18] 黄 琦 ,胡 峰. 爆炸荷载下混凝土的力学特性测试研究 [J]. 煤炭学报 1996 21(5) : 502-504.
Huang Qi ,Hu Feng. Test of mechanical properties of concrete under the load of blasting [J]. Journal of China Coal Society 1996 21(5) : 502-504.