

在爆炸荷载作用下长锚杆喷锚 支护坑道的动态反应

黄 承 贤

提 要

本文介绍在断裂构造发育的风化花岗岩中采用长锚杆喷锚支护坑道的抗爆试验研究。在爆炸瞬时测定了锚杆和喷层的受力状态及洞周边的质点运动规律,以检验设计的可行性;爆后用声波法、钻孔电视和宏观调查确定其破坏状态,未发现掉石和底鼓等现象。对比相邻的毛洞段和短锚杆试验段的破坏状态,表明长锚杆支护效果显著,抗爆性能优良,设计合理。

前 言

喷锚支护是地下工程中一种新的围岩支护形式,它优于衬砌结构,在地下工程建设中已得到广泛应用。对于静载作用下,喷锚支护的作用原理、设计理论和计算方法,在各种专门著作中都有较详细论述^[1-3],但在爆炸荷载作用下,喷锚支护的描述,却并不多见^[4],因此它对防护工程和地下坑道抗震性能及缩短相邻洞库的安全距离等研究有重大的意义。我们结合工程任务,对长锚杆喷锚支护的坑道在条形药包爆炸作用下的动态反应进行了试验研究。

一、工程地质概述

试验场区为燕山中期灰白色中粗粒花岗岩,但因各炮试验坑道所处位置的不同,所以岩石风化和节理裂隙发育情况有一定差异。坑道平行于爆源轴线(简称平行坑道,下同),位于爆源一侧,相距为 $41.9R_0$ (R_0 为单元药包等效半径),由主洞和引洞两部分组成,均为直墙拱顶式。主洞长为 68.3m,跨度为 9.3m,矢高为 2.95m,直墙高为 2.8m;引洞长为 33.4m,跨度为 3m,高为 3m。坑道围岩为风化花岗岩,断裂构造发育,断层破碎带有 F_1-F_{12} ,大断层有 f_1-f_5 ,主要构造节理有三组,局部为四组,多呈北东东、东北及北西西向展布,断层间距为 2—8m,节理间距为 0.3—0.7m,它们将围岩切割成大小不等的块状结构体,长锚杆喷锚段坑道围岩在距壁面 5m 以内断层破碎带和节理发育,5m 以外岩体较完整(图 1,图 2)。岩石纵波波速为 2884m/s,横波波速为 1507m/s,容重为 27.5kN/m³,弹性模量为 3.54×10^5 Pa,泊松比为 0.31,抗压强度为 740×10^5 Pa,抗拉强度为 53×10^5 Pa。

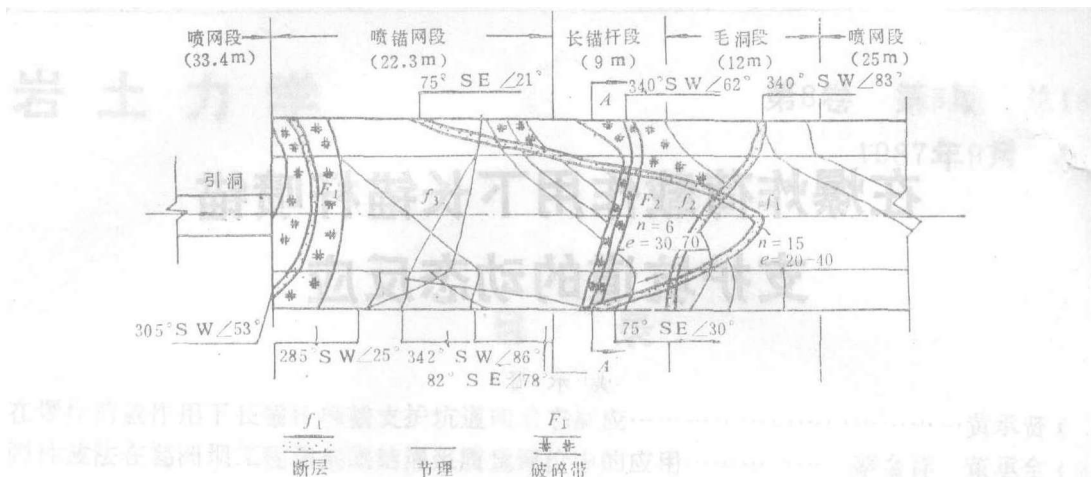


图 1 坑道主洞地质素描展开图

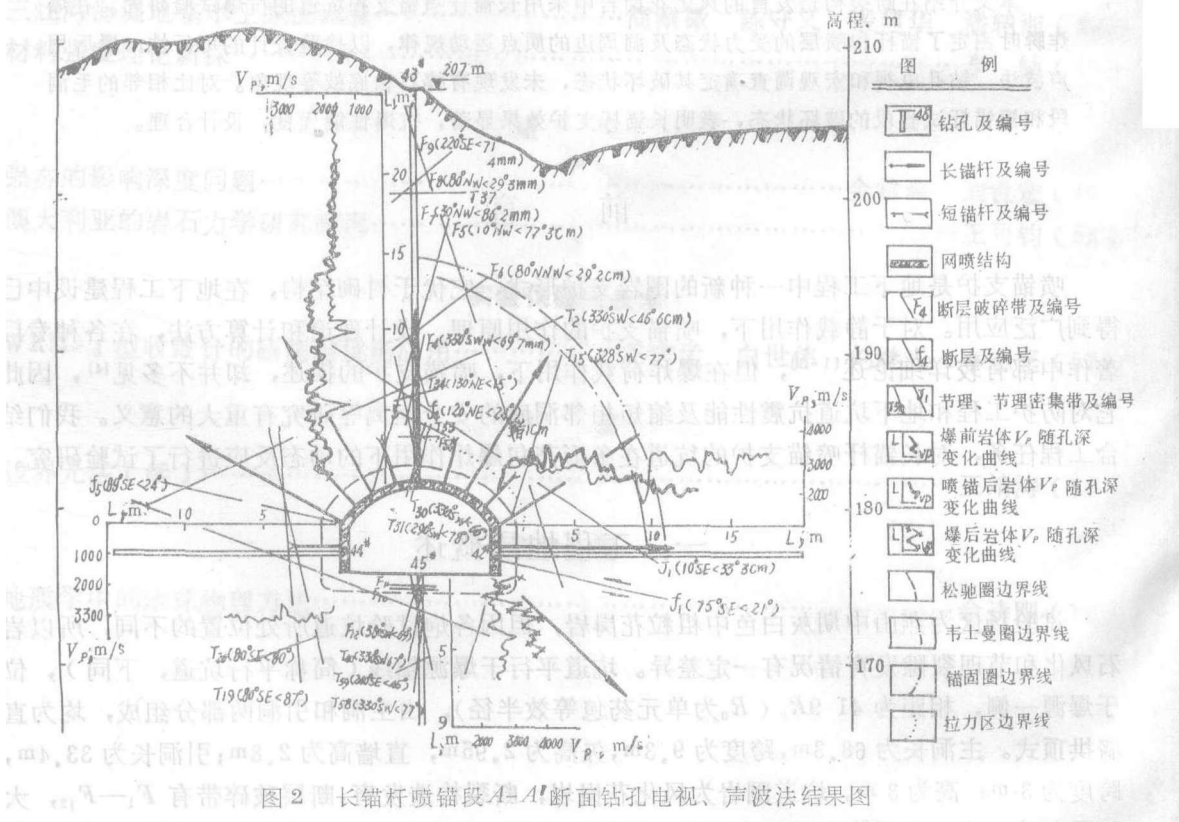


图 2 长锚杆喷锚段 A-A' 断面钻孔电视、声波法结果图

二、平行坑道荷载的确定

作用于地下坑道的荷载，一般是山岩压力和残余应力所引起的静应力 σ' ，爆炸波引起的动应力 σ'' ，以及它们共同作用的应力总和 $\sigma' + \sigma''$ 。如果地下坑道埋深不大，原始应力引起

的静应力场可以忽略时,可根据岩体自由场应力波的传播衰减规律和孔洞效应来估算坑道的荷载大小和应力分布。

(一) 条形药包爆炸时岩体中应力波的传播衰减规律

本文试用下式拟合同一试验场区岩体自由场实测应力波参量

$$\psi = K(\bar{R})^{-\alpha} \quad (1)$$

式中 ψ ——应力波参量,可代表应力、应变、加速度、速度和位移;

K ——实验确定的系数;

$\bar{R}$ ——比例距离, $\bar{R} = R/R_0$ [R 为测点至爆源轴线距离(m), R_0 为单元药包等效半径(m)];

α ——应力波峰值衰减指数。

按(1)式回归垂直条形药包轴线的测线上各测点的应力波参数径向分量的实测数据,获得岩体声阻抗为 $(5-13) \times 10^5 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{s}$ 的径向应力 σ_r , 径向应变 ϵ_r , 径向加速度 a_r , 径向速度 V_r 与比例距离的关系式

$$\sigma_r = 3.6 \times 10^3 \bar{R}^{-2.08} (\text{MPa}) \quad (2)$$

$$n = 18, r = -0.9337$$

$$\text{适用范围: } 16.7 \leq \bar{R} \leq 69.2$$

$$\epsilon_r = 8 \times 10^4 \bar{R}^{-1.89} (\mu\epsilon) \quad (3)$$

$$n = 17, r = -0.8635$$

$$\text{适用范围: } 10 \leq \bar{R} \leq 100$$

$$a_r = 5.96 \times 10^6 \bar{R}^{-3.02} (g) \quad (4)$$

$$n = 11, r = -0.9798$$

$$\text{适用范围: } 5 \leq \bar{R} \leq 80$$

$$V_r = 7.01 \times 10^4 \bar{R}^{-1.86} (\text{cm/s}) \quad (5)$$

$$n = 8, r = -0.8351$$

$$\text{适用范围: } 8 \leq \bar{R} \leq 19$$

(二) 在侧向爆炸荷载下平行坑道周边的力学参数

应力波遇到平行其波阵面的地下坑道产生反射和绕射,当 $\lambda/D \leq 1$ 时(D 为坑道断面的等效直径, λ 为爆炸应力波波长),应力波主要是自坑道迎爆面反射,呈现拉应力状态;当 $\lambda/D > 1$ 时,应力波与坑道的相互作用主要是绕射,产生环向应力集中。

有限元计算和现场实测结果表明:

1. 力学参数和运动参数在坑道周边的分布是非对称的,迎爆面大于背爆面,拱顶中央高于底板中央(图3),迎爆壁直墙围岩应力值比背爆壁直墙围岩相应点的应力值大17—18倍,并有一时间差;迎爆壁直墙面的径向加速度值比背爆壁直墙的大8—19倍,拱顶中央径向加速度值比背爆壁直墙的大3—4倍,比底板中央的大3—8.5倍。

2. 孔洞效应只在波传播至1—1.5倍跨度时出现,拱顶中央应力集中最大,动应力集中

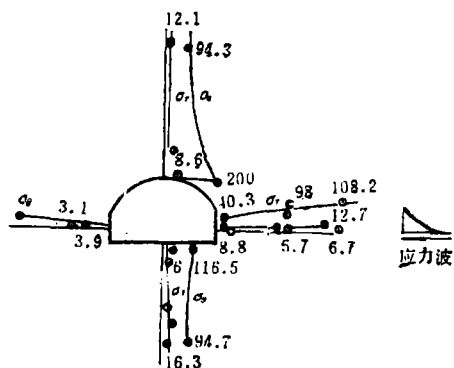


图3 坑道周边最大应力计算及实测结果图

σ_r ——径向应力 σ_θ ——环向应力

●——实测值 ·——计算值

系数实测值为2.1, 计算值为2.12, 墙脚处有压应力集中, 侧压系数实测值为0.4, 计算值为0.45, 拱顶中央加速度径向分量集中系数为1.01, 垂直分量集中系数为0.95。

3. 平行坑道迎爆壁和底板环向应变实测值为正值, “拉应变”, 拱顶和背爆壁为负值, “压应变”, 迎爆壁和拱顶应变值最大。

4. 平行坑道周边的环向应力, 拱顶的大部分区域都处于同一应力符号下, 在迎爆壁和背爆壁直墙中点附近出现应力反号, 分布是非对称的。

三、平行坑道在爆炸荷载作用下的破坏特点

在同一试验场区进行一系列不同比例的爆炸试验, 综合分析可见: 对断面尺寸为 $9 \times 6\text{m}^2$ 的直墙拱顶型平行坑道, 在爆炸荷载作用下一般是呈现非对称的破坏特征, 迎爆壁和拱顶围岩破坏严重, 背爆壁围岩破坏较轻。洞口部分比洞里, 引洞比主洞破坏严重。坑道围岩的变形、破坏程度与药量、距爆源距离、岩性、地质构造、坑道形状、尺寸及施工方法等密切相关, 随距爆源远离而减轻(图4)。

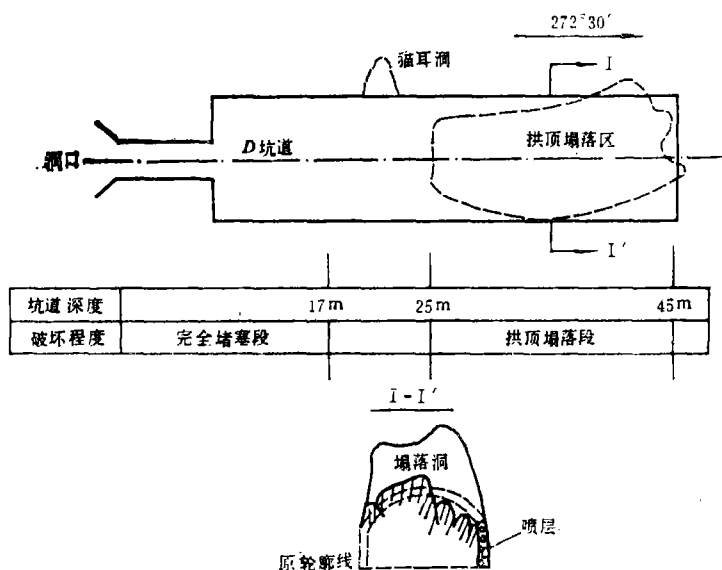


图4 D坑道爆后破坏形态

四、应力扰动区的存在及范围

由于开挖坑道破坏了岩体中原始应力的平衡状态,引起洞周应力集中和应力场重新分布,通常将坑道围岩分为三个区:松弛区、应力增高区和应力未扰动区。用声波法查明坑道围岩存在应力扰动区。松弛区厚为1—1.2m,纵波波速比应力未扰动区的降低14.5—40.7%,应力增高区厚为9—10m,纵波波速比应力未扰动区的增加19.7—20.5%(图2)。作者在其它的现场观测结果表明:(1)随着时间的增长,应力扰动区逐渐向岩体内部转移,松弛区厚度逐渐增大(图5), (2)若围岩中的应力值小于其极限强度,则应力扰动区的发育将增加坑道围岩自稳,承载拱的效应显著,否则相反,围岩进入塑性状态或者产生脆性破裂,加速松弛区的发展。因此,适当调整应力增高区的应力值,有利于提高坑道围岩的强度和自稳能力,可采用给锚杆施加预应力的办法达到此目的。

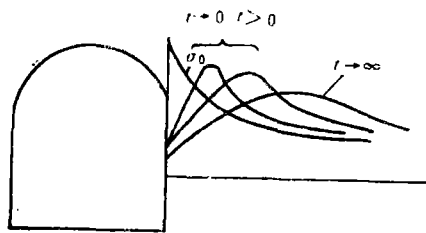


图5 坑道开挖后侧墙围岩环向应力状态的变化

五、预应力锚杆对毛洞围岩应力状态的影响

预应力锚杆光弹模型试验和有限元计算结果表明:当锚杆间距为其长度的 $\frac{1}{2}$ 时,锚杆组之间出现一个均匀的具有一定厚度的受压区,只是靠坑道壁面附近还存在面积不大的受拉区(图6)。

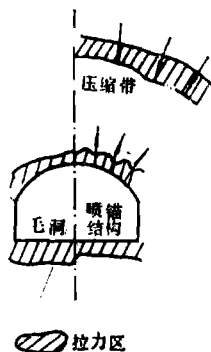


图6 毛洞与喷锚支护的有限元计算比较

综合分析小型模拟试验资料,用声波法确定:当锚杆间距为其长度的 $\frac{1}{3}—\frac{1}{4}$ 时,锚杆间出现一个均匀的径向压缩带,其厚度约等于 $0.6—0.9L$ (L 为锚杆长度),当锚杆间距为其长度的 $\frac{1}{2}$ 时,均匀径向压缩带厚度等于 $0.3—0.5L$,锚杆间距愈大,则坑道壁面的拉力区深度愈大,但大体上不超过 $0.1—0.2L$ 。这种受拉区完全可以由预应力短锚杆和喷射混凝土层及挂网所承担。

六、采用长锚杆喷锚支护加固坑道

在综合分析室内外试验和现场地质调查及有限元计算等资料的基础上,确定采用长锚杆喷锚支护为主体加固坑道,在两边设置毛洞段、短锚杆喷网段与之比较,以进一步深化以往试验,并检验其承载能力和抗爆性能。

在强爆炸荷载作用下,直墙拱顶的平行坑道两侧及拱顶围岩中出现“破裂楔体”向洞内坍塌,类似于列布希维兹(Rabczewicz, L.V.)等人提出的圆形洞室在静水压力作用下的剪切破坏^[2],因此可将直墙拱顶坑道化成等效圆形洞,近似计算长锚杆喷锚支护的抗力。经计算,本设计的安全系数为4.4。

试验段的设置(图7):

1. 短锚杆喷网段(长22.3m) 此段两端岩体裂隙发育,完整性差, f_1 断层和 F_1 断层破碎带正好分别从两端经过,中间稍完整。该段采用楔缝式注浆锚杆,杆体采用 $\phi 18-20\text{mm}$,

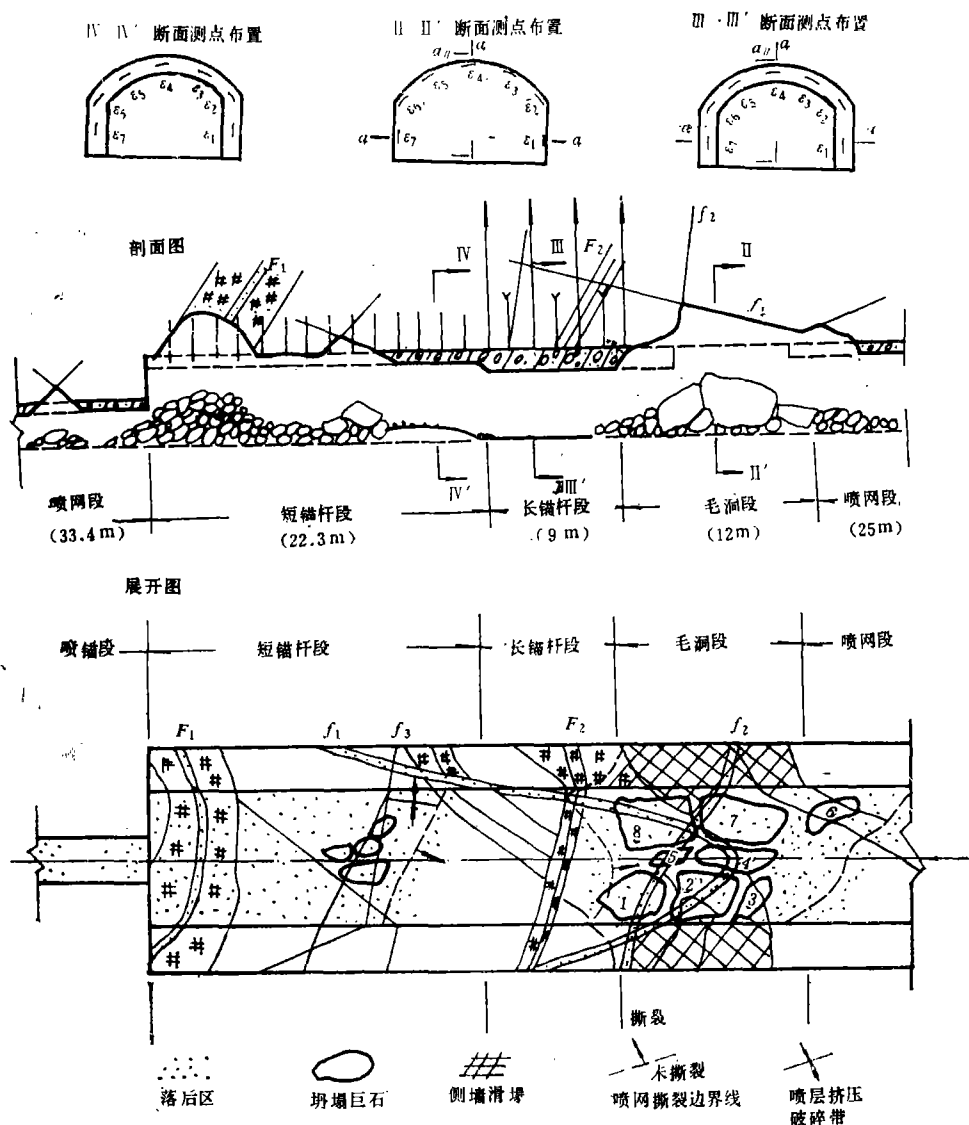


图7 坑道试验段的设置及其爆后破坏状态图

长1.8—2.2m的螺纹钢筋,无垫板,未施加预应力,呈梅花形布置,间距1.5m,挂网环向筋采用 $\phi 12\text{mm}$ 、轴向筋采用 $\phi 8\text{mm}$ 钢筋,网孔 $25 \times 25\text{cm}^2$,喷层厚约5—8cm,侧墙未作处理。

2. 长锚杆喷锚段(长9 m) 该段围岩破碎, 裂隙发育, 位于 f_1 断层和 F_2 断层破碎带交汇处, 迎爆壁还有几组裂隙与 f_1 , F_2 相交, 背爆壁属断层破碎带。长锚杆为长12m, 外露1m, 注浆回填11m的涨壳式预应力锚杆, 由内锚固段、张拉段与外锚固段三部分组成; 张拉段是由内锚固段延伸的6股钢绞线经张拉锚固后灌注水泥砂浆形成, 每股由7根 $\phi 4\text{mm}$ 的高强度钢丝制成, 悬吊力为 $90 \times 10^4\text{N}$, 每根长锚杆预先施加 $21\text{--}30 \times 10^4\text{N}$ 的预应力(图8),

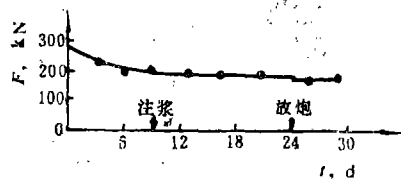


图8 III-3长锚杆拉力-时间变化曲线

采用全断面配置, 迎爆面适当加密, 背爆面和底板锚杆间距适当增大, 在两根长锚杆间, 设置一根3 m长的楔缝式短锚杆, 杆体为 $\phi 18\text{mm}$ 的钢筋, 底板不埋设短锚杆, 长短锚杆间距约为1.5m, 锚杆埋设方向基本上垂直壁面, 遇断层略作调整。对 VI-12*, VII-12* 两根短锚杆作拉拔试验测定其锚固力为 $1.8\text{--}2.7 \times 10^4\text{N}$ 。挂网采用 $\phi 6\text{mm}$ 的钢筋(抗剪强度为 $2280 \times 10^5\text{Pa}$), 网孔为 $25 \times 25\text{cm}^2$, 喷层厚10—15cm。

3. 毛洞段(长12m) 该段围岩破碎, 裂隙发育, 位于 f_1 和 f_2 断层相交处, 属未被复和未支护的毛洞, 仅长锚杆段的喷网超复此段1—2m。

七、试验结果分析

据 f_1 断层面上擦痕的方向确定, 在爆炸应力波作用下, 断层上盘的山体向 290° 方向错动约0.8—1m, 致使座落在断层上盘的坑道段(包括毛洞段、长锚杆喷锚段, 短锚杆喷网段)向背爆方向整体位移。现将坑道短锚杆喷网段、长锚杆喷锚段和毛洞段爆后的宏观破坏现象和周边力学参数量测结果及其抗爆效应做一比较(图7)。

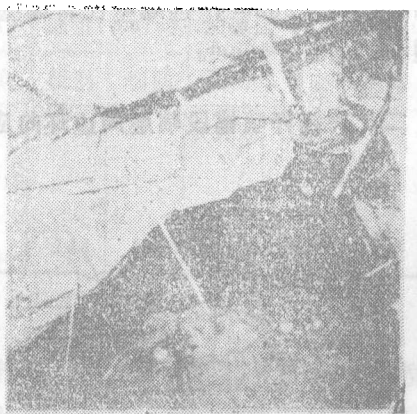
(一) 在爆炸荷载作用下坑道试验段破坏效应的比较

1. 短锚杆喷网段 本段围岩和喷层破坏较严重, 在35.7m处(从坑口往里, 下同), F_1 断层破碎带顶部产生大面积塌方约一百余方, 塌落高度4.3m, 造成29.2—41.7m坑道



(照片1)

坑道29.2~41.7m段呈半堵塞



(照片2)

短锚杆暴露与喷层剥离



(照片3)
顶部结构体塌落



(照片4)
短锚杆喷网段坑道底板隆起

呈半堵塞状态(照片1),短锚杆暴露和喷层全部剥离(照片2),呈帘状悬挂;41.7m处 $330^{\circ}\text{SW}/46^{\circ}$ 节理密集带和 $82^{\circ}\text{SE}/78^{\circ}$ 节理切割的顶部结构体塌落(照片3)。在33.4—48.7m处坑道底板隆起约30cm(照片4),迎爆面原裂隙张开5—10cm,在该段背爆面 $\frac{1}{4}$ 侧拱处产生一条与洞轴平行的挤压破碎带,宽0.2—0.3m,喷层被压碎剥落,钢筋挤压成“U”形。

2. 长锚杆喷锚段 坑道底板上无落石,也未隆起,仅与毛洞段相毗邻和超复部分的喷层,由于毛洞段顶部围岩崩塌和剥离,将喷层撕裂1—3m,呈帘状悬挂,其余部分完好无损,逐根检查长、短锚杆,没有一根短锚杆被破坏,未发现拔出和松动的现象,仅Ⅶ-3#,Ⅶ-11#两根长锚杆在距垫板2.5m处被毛洞段原生结构体滑落时拉断。对比坑道底板钻孔电视观察结果,在10m深以内岩体没有错动现象,但有原裂隙压密现象,压密量达0.5—1mm,用声波法测定爆后岩体的弹性波速比爆前的增加15—20%(图2)。

3. 毛洞段 围岩滑塌剥离严重,坑道呈半堵塞状态(图9)。沿轴线堆积长约19m,最厚为3m,约265m³,迎爆壁比背爆壁滑塌严重,堆积物厚,堆积物多为原结构体,原裂隙张裂和错动5—10cm。

(二)长锚杆喷锚段喷层周边环向应变值与毛洞段壁面环向应变值的比较(表1)

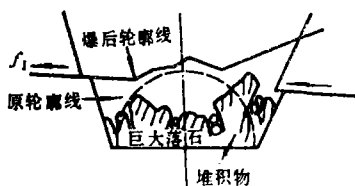


图9 爆后毛洞段Ⅱ-Ⅱ'断面破坏状态

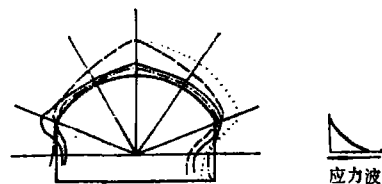


图10 不同类型支护结构喷层周边环向应变

——毛洞段周边环向应变
- - -长锚杆段喷层环向应变

表1 毛洞段壁面和喷层周边环向应变实测值一览表

支 护 类 型		毛 洞 段		长锚杆喷锚段	备 注
环向应变值		实测值 $\epsilon_{\theta}(\mu\epsilon)$	计算值 $\epsilon_{\theta}(\mu\epsilon)$	$\epsilon_{\theta}(\mu\epsilon)$	
测 点 位 置	迎爆面直墙	+429**	+160	+61	**中国科学院工程力学所数据 “－”，压应变 “＋”，拉应变
	迎爆面拱脚	－200	－310	－77	
	迎爆面拱肩	－150		－100	
	拱 顶	－202	－608	－169	
	背爆面拱肩	－75		－51	
	背爆面拱脚	－300	－154	－89	
	背爆面直墙	+45	－580	－42	

分析比较表 1 可知，毛洞段迎爆面直墙和背爆面直墙环向应变是拉应变，拱顶是压应变，且呈非对称性；长锚杆喷锚段喷层的环向应变除迎爆壁直墙为拉应变外，其它部位均为压应变，且应变值比毛洞段壁面环向应变值小 16—70%（图 10）。

（三）毛洞段壁面与支护段岩面运动参数值的比较（表 2）

分析比较表 2 可知，各试验段周边围岩的质点振动规律呈非对称性，迎爆面质点振动加速度值最大，顶板和底板次之，背爆面的最小，短锚杆喷网段振动加速度、速度实测值与毛洞段底板的十分接近；长锚杆喷锚段迎爆面围岩振动加速度径向分量实测值比毛洞段的小 58%，底板振动加速度径向分量实测值比毛洞段底板的小 37.5%，切向分量比之小 51%。底板振动速度径向分量实测值比毛洞段底板的小 16%，切向分量比之小 35%。

表2 毛洞段壁面和支护段岩面运动参数实测值一览表

支 护 形 式		短锚杆段				毛 洞 段				长锚杆喷锚段			
运 动 参 量		加 速 度 (g)		速 度 (cm/s)		加 速 度 (g)		速 度 (cm/s)		加 速 度 (g)		速 度 (cm/s)	
方 向		径 向 *	切 向	径 向	切 向	径 向	切 向	径 向	切 向	径 向	切 向	径 向	切 向
测 点 位 置	迎爆面直墙					84				35			
	拱 顶					55.5	39.2						
	背爆面直墙					12							
	底 板	41	51	193	200	44	51	144	199	27.5	25	121	130

*径向、切向是对坑道而言

综上所述，在相近的地质条件、同一爆炸荷载作用下，同一坑道内不同结构类型的支护，它们却呈现不同的应力状态和抗爆效应，长锚杆喷锚结构周边的力学效应和振动效应及破坏效应均比其它支护结构的小，充分显示出长锚杆支护的抗爆性能和对坑道的加固作用优于其它类型的支护结构形式。

八、岩体强度与其弹性波速的关系

据室内外岩石力学和声波法试验,获得岩体的强度与岩石强度、弹性波速存在如下关系:

$$\sigma_{m,c} = K \left(\frac{V_{m,p}}{V_{r,p}} \right)^2 \sigma_{r,c} \quad (6)$$

$$\tau_{m,c} = K \left(\frac{V_{m,s}}{V_{r,s}} \right)^2 \tau_{r,c} \quad (7)$$

式中 $\sigma_{m,c}$, $\tau_{m,c}$ ——岩体抗压、抗剪强度(或喷锚支护前);

$\sigma_{r,c}$, $\tau_{r,c}$ ——岩石抗压、抗剪强度;

$V_{m,p}$, $V_{m,s}$ ——岩体纵波、横波波速(或喷锚支护前);

$V_{r,p}$, $V_{r,s}$ ——岩石纵波、横波波速。

坑道围岩加固后,做岩石力学试验测定其强度是困难的,甚至不可能,我们用声波法测定现场岩体和岩石标本的弹性波速,采用下式确定现场岩体喷锚支护后所提高的强度值

$$\Delta \sigma_{m,c} = K (V_{m,p}'^2 - V_{m,p}^2) \frac{\sigma_{r,c}}{V_{r,p}^2} \quad (8)$$

$$\Delta \tau_{m,c} = K (V_{m,s}'^2 - V_{m,s}^2) \frac{\tau_{r,c}}{V_{r,s}^2} \quad (9)$$

式中 $V_{m,p}'$, $V_{m,s}'$ ——围岩喷锚支护后的纵波、横波波速。

九、结 论

从以上试验结果及分析表明:在爆炸荷载作用下,采用长锚杆喷锚支护加固坑道,设计合理,抗爆性能优良,对加固坑道、改善坑道的爆破效应及减少最小防护层厚度、缩减相邻洞库的安全距离等问题具有实用价值与理论意义,获得的试验数据及资料为类似抗爆结构设计提供了依据。

某工程任务组承担本项现场试验研究,宋大卫同志参加资料整理,89002部队刘玉堂等同志负责锚杆施工,谨此致谢。

参 考 文 献

- [1] 陈宗基,地下巷道长期稳定性的力学问题,岩石力学与工程学报,1982年第1期。
- [2] Rabcewicz, L. V., Stability of Tunnels under Rock Load, Water Power, No. 6, 7, 8, 1969.
- [3] The Austrasian Institute of Mining and Metallurgy Illawarra Branch, Symposium on "Rock Bolting", Feb. 1971.
- [4] 向良海,预应力锚杆的锚固效果,地下工程,1981年第10期。

The Dynamic Response of Gallery Supported by Long Bolts under Blasting Loads

Huang Chengxian

Abstract

The response of long bolts in weathered and fractured granite under blasting was experimentally studied. The opening supported with long bolt and shotcrete was chosen for the design, which was examined by monitoring stress states and particle vibrations round the opening during blasting. Borehole TV, sonic wave method and macro investigation were also used to determine fracture features post blasting. Neither falling rock nor bulging on bottom were found. The long bolt strengthened opening has proved to have good support effects and excellent response against blasting, compared with neighbouring unlined or short bolting opening.