

南平长大隧道钻爆设计技术

李 俊

(路桥集团第一公路工程局厦门工程处 厦门市 361021)

摘 要: 通过南平长大隧道的施工与实践, 对不同围岩类别隧道钻爆开挖施工进行总结, 阐述隧道钻爆的影响因素, 钻爆参数确定方法, 进行隧道钻爆设计研究, 从而获得最佳进尺效果和洞身周边爆破效果。

关键词: 隧道; 钻爆; 参数; 围岩

我国是一个多山的国家, 约有 75% 的国土面积是山地或重丘, 在公路建设过程中, 不可避免地会遇到隧道施工问题。随着科学技术的发展, 施工技术水平和装备水平不断提高, 公路隧道施工已由过去单一的矿山法, 发展到掘进机法、新奥法、盾构法、沉管法、顶管法等多种施工方式, 隧道长度已突破 18.6 km (陕西秦岭隧道), 隧道宽度正向三车道或四车道发展。在目前公路建设高潮中, 公路隧道施工技术面临一个新的机遇和挑战。本文根据福建省南平京福高速公路上洋隧道施工实践, 对隧道钻爆设计技术进行研究。

1 岩体自承能力

一般认为坑道开挖前, 岩体处于初始应力状态, 呈三轴应力平衡状态, 岩体是稳定的。坑道开挖后, 三轴应力平衡被瓦解, 将引起一定范围内的围岩应力重分布和局部地层残余应力的释放, 在重分布的应力作用下, 一定范围内的围岩产生位移, 形成松弛。当岩体应力小于围岩强度时, 围岩岩体仍为弹性状态, 除由于爆破影响而有少许松弛外, 洞室仍是稳定的; 当岩体应力超过围岩强度时, 则坑道围岩的一部分处于塑性以至呈松弛状态, 此时围岩岩体是不稳定的, 坑道将发生破坏。因此, 坑道开挖后, 如果围岩较差, 坑道围岩周边附近产生塑性变形区域较大, 围岩应力通过塑性区减弱, 并迫使塑性区内的围岩向坑道内剪切滑移、松弛破坏, 此时必须提供支护抗力来限制变形和加强、保护坑道围岩, 形成完整的围岩支撑系统。

2 钻爆施工影响因素

2.1 工程地质条件

工程地质条件是影响钻爆作业的首要因素, 因此, 首先要结合地质钻探和超前地质预报分析, 认真进行爆破试验和加强监控量测, 尽快地把握围岩地质特征, 不断调整钻爆设计参数, 使其符合地质现状。一般隧道钻爆施工受工程地质影响主要有以下几点。

(1) 围岩结构特征和完整状态。围岩结构特征是作为一个定性评价围岩稳定性的指标, 体现围岩体所经历的地质构造变动和外力作用下的特点; 围岩完整状态是大体评价围岩稳定性的定量指标之一, 是体现围岩体被各种结构面所切割的块度大小的特点。通常以节理裂隙发育、间距、密度、裂隙张开大小及充填物、岩石质量 (RQD)、产状等指标, 定量和定性确定围岩技术指标。

(2) 岩体强度。岩体强度是围岩结构特征和完整状态的力学属性的一个定量反映, 是岩体抵抗外力破坏的量化指标。对土质围岩, 基本以土体抗剪强度所决定。对石质围岩, 其稳定性取决于裂隙的产状、组合和软弱面抗剪强度。通常是以岩石饱和单轴极限抗压强度 (R_b)、岩石坚固系数 f 、弹性模量 E 、泊松比 μ 、弹性抗力系数、抗剪强度参数等量化指标来评定。

(3) 水的影响。水对围岩稳定性的影响主要有软化围岩, 促进破碎带、裂隙剥离, 黏土膨胀与无凝聚力围岩的流动化, 降低围岩的内摩擦角, 危及岩体自稳性, 同时对作业环境和混凝土质量也会有较大影响。

2.2 支护因素

爆破作业是通过施工实现设计意图的第一步。按新奥法原理设计的隧道Ⅱ、Ⅲ类软岩初期支护由钢拱架、注浆锚杆、钢筋网、喷射混凝土组成,辅助施工采用管棚、超前小导管注浆和注浆锚杆加固;因此初期支护既是永久性衬砌的一部分,又具有施工期安全防护功能。钻爆作业参数必须和初期支护、超前支护的某些参数相适应,如:钻爆循环进尺必须考虑钢拱架间距;最大循环深度不能超过超前支护的有效范围;控制爆破孔眼布置应避开超前小导管;锚杆位置、爆破扰动强度应不破坏超前支护加固围岩环等。

2.3 施工方法与施工能力

(1)施工方法。主要依据是围岩地质条件和具备的施工技术能力,钻爆必须在开挖方式制约下实施,如开挖方式与一次性爆破断面的大小、断面形状、布孔方式、钻爆循环进尺、爆破扰动范围等因素密不可分。

(2)施工能力。施工能力与人员素质、技术水平和装备水平有关,特别是在围岩地质条件复杂情况下,钻爆参数选择的不确定性因素多和成孔精度要求高,使得必须选用技术水平高、经验丰富的人员直接负责钻爆工作。同时加大岩体爆破参数实验次数,强化地质超前预报工作,在限定最大用药量的前提下,容许一线负责人根据工作面围岩变化进行钻爆参数微调,以取得最佳的爆破效果。

3 钻爆循环进尺确定

“短进尺,弱爆破,勤量测,早封闭,强支护”是软岩施工过程中,一贯遵守的法则。因此将进尺定位于浅孔范围内、将爆破定位于弱松动爆破范围,是软岩施工的原则。对硬岩进尺的确定,在围岩稳定性、施工能力和成本效益等方面综合对比后确定。

因此循环进尺的选定与围岩地质条件有很大关系,表现出某种灵活性,一般基于以下几点综合考虑:

(1)爆破后的洞身自稳时间能够完成必要的初期支护作业内容,一般要求在8 h以内完成,且留有一定富裕时间;

(2)上洋隧道观测数据反映,一般自稳时间在10~14 h之间,完全满足施工需要;

(3)循环进尺不能超越超前支护的有效范围,以免发生安全事故;

(4)围岩开挖循环进尺必须以初期支护钢拱支

架间距为模数;

(5)采用的开挖方法与作业时间、空间相协调,形成流水作业;

(6)遇有特殊工期要求时,应在加大循环进尺与变更初期支护、开挖方法之间综合分析比较;

(7)确定或调整循环进尺,必须进行不少于3次以上的钻爆参数实验;

(8)自有施工装备水平、施工技术水平和技术人员熟练程度。

4 钻爆设计

4.1 钻爆概述

上洋隧道属于低山丘陵地貌,植被发育,地形起伏大,天然坡度 $35^{\circ}\sim 45^{\circ}$,进口处坡度约 38° ,地层自上而下为第四系残积粘性土,前震旦系变粒岩、石英片岩。围岩除进口地段80~90 m区段属Ⅱ、Ⅲ类围岩较差外,其余段落围岩产状形成穿层掘进,中等倾角,互层在纵向、横向、竖向上的岩石软硬比较均匀,无明显的各向异性,结构与构造差异变化较小。

炮眼针对围岩构造特点,结合进度成本等多项指标对比,采用自制凿岩台车配普通凿岩机成孔。对进口裂隙较发育、岩石破碎、软硬不均地段,采用0.4~0.45 MPa的中等风压,进口为中速0.3 m/min左右,用十字形钎头取代一字形钎头,提高成孔效率。对硬岩段,用高压、一字型钎头快速正常成孔。

钻爆设计中,根据各种围岩的不同抗爆性能、炸药的品种、地质条件等,随时调整爆破参数。通过控制炮眼间距 E 、周边眼密集系数 m 、最小抵抗线 W 、不耦合系数 D 和装药集中度 q ,找出最佳爆破方案,提高了凿岩及爆破能力;通过光面爆破控制,很好地控制了超挖或欠挖,超欠挖量不超过10 cm,局部不超过15 cm,提高了围岩的稳定性,保证隧道成型规整,极大地减少了掘进超挖量。对渗水地段,采用超前孔泄水或封水,钻爆设计改为防水乳化炸药来减轻水害影响。

4.2 爆破参数选择

按照爆破破碎机理,利用岩石在爆破时抗压不抗拉,呈脆性破坏的力学特性,以经验参数类比为参考,紧密结合隧道的地质特征,反复实验修正,确定适合的爆破参数。

(1)隧道开挖一般属松动爆破范围,但爆破参数与选择爆破方式直接相关,这是选定各参数、控制爆破总药量的首要条件。

(2)炮眼布置必须注意不同部位、不同功能炮眼之间的相互影响和制约关系,注意解决好相互之间的互动关系,不可忽视任何炮眼参数的选择。

(3)爆破和进尺是相辅相成的关系,进尺是前提,进尺大小受开挖方式、围岩自承能力制约。

(4)各种爆破参数的确定,必须经过多次实验分析比较,采用相关因素排除法,可减少实验的盲目性。

4.3 炮眼布设要求

在隧道钻爆开挖中,炮眼根据其功能作用不同,分为掏槽眼、扩槽眼、辅助眼、二圈眼、周边眼和底板眼。掏槽眼的目的主要为增加爆破临空面,获得更好的爆破效果,本隧道采用Ⅱ、Ⅲ类围岩为楔形,Ⅳ类以上围岩为直眼中空形式。周边眼控制爆破目标是开挖轮廓整齐,围岩扰动小,杜绝不合理的超挖。因此周边眼布置在开挖断面四周,形成一个外插3°的角度,控制开挖断面轮廓,以保证开挖断面符合设计要求。辅助眼主要用以扩大掏槽体积,为周边眼爆破创造条件。二圈眼直接影响控爆效果,布眼要确保周边眼抵抗线参数,药量控制在爆破后裂隙区不扩展到周边孔轮廓线。二圈眼布眼间距应比掏槽眼、周边眼间距稀一些,而与辅助眼相比,适当加密。底板眼是确保开挖断面底部轮廓控爆效果好坏的关键,考虑有部分岩渣堆积在底板上,适当增加爆破荷载,因此炮眼布设比掏槽眼、周边眼、二圈眼稀一些,而与辅助眼相比适当加密,同时适当加密装药量。要求底板眼严格按开挖底轮廓布孔,最大下扎深度15 cm,角眼既向外插又向下扎。炮眼一般布设顺序是:掏槽眼、扩槽眼、周边眼、二圈眼、外圈辅助眼及其他辅助眼、底板眼。

4.4 Ⅱ类围岩钻爆设计

Ⅱ类围岩开挖方案为弧形导坑分部开挖法,为减少爆破对围岩的扰动,采用弱震动爆破控制,不设周边孔,而是在掏槽眼和辅助眼爆破后,人工配合机械找平周边轮廓;掏槽眼采用双斜形,装药系数取 $n=0.25$,装药量250 g/眼,眼深取1.2 m;辅助眼一般横向间距按80 cm,纵向间距为100 cm,装药集中度200 g/m,装药量200 g/眼,眼深1.0 m。爆破参数见表1。Ⅱ类围岩炮眼布置分布见图1。

4.5 Ⅲ类围岩钻爆设计

Ⅲ类围岩采用上下台阶法开挖,掏槽眼采用双斜形,装药系数 $n=0.5$,装药量500 g/m,眼深2.2 m;周边眼布设按经验公式炮眼间距 $E=16d$ 计算,

表 1 Ⅱ类围岩爆破装药参数

炮眼 编号	炮眼 名称	炮眼深 m	炮眼间 距/cm	炮眼角 (°)	炮眼数 个	装药量 kg	装药集 中度 kg/m	雷管数 发
1	掏槽眼	1.2	60	60	4	0.25×4	0.2	5
2	扩槽眼	1.2	60	75	8	0.25×8	0.2	9
3	辅助眼	1.0	80	90	6	0.15×6	0.15	7
4	辅助眼	1.0	60	90	8	0.2×8	0.25	9
5	辅助眼	1.0	80	90	8	0.2×8	0.25	9
合计					34	7.9		

注:开挖断面35 m²,循环进尺1.0 m,炸药消耗量0.2 kg/m³,采用8号火雷管与塑料导爆管继爆。

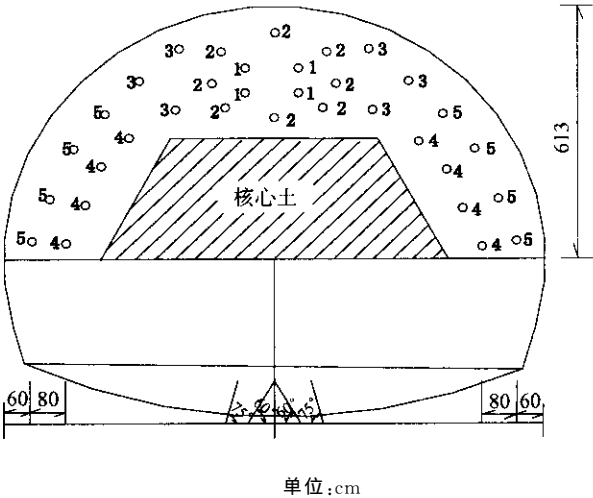


图 1 Ⅱ类围岩分部开挖炮孔布置示意

周边眼间距取50 cm,最小抵抗线 $W=1.25E$,取值为60 cm,炮眼密紧系数 $E/W=0.83$,要求成眼距离准确,眼与眼之间平行,炸药爆速大于3 000 m/s,装药集中度150 g/m,装药量控制在300 g/眼,眼深2.0 m;辅助眼一般横向间距按100 cm,纵向间距为120 cm,注意外圈辅助眼与二圈眼层距保持一致、整齐,其他辅助眼布置按掌子面剩余空间均匀梅花型布置,垂直钻孔,装药集中度250 g/m,装药量500 g/眼,眼深2.0 m;二圈眼间距55 cm,垂直钻孔,装药集中度200 g/m,装药量400 g/m,眼深2.0 m;底板眼要求按开挖底轮廓布孔,最大下扎深度10 cm,角眼既向外插又向下扎,间距65 cm,眼深2.1 m,装药集中度300 g/m,装药量600 g/m。Ⅲ类围岩爆破参数见表2。Ⅲ类围岩炮眼布置分布见图2。

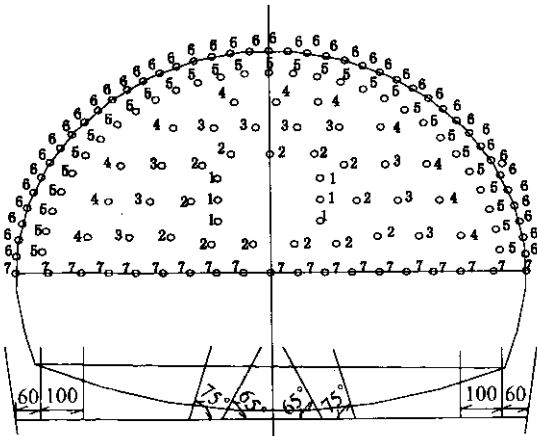
4.6 Ⅳ类围岩钻爆设计

Ⅳ类围岩掏槽眼采用双中空直眼掏槽,2个d50

表 2 Ⅲ类围岩爆破装药参数

炮眼 编号	炮眼 名称	炮眼深 m	炮眼间 距/cm	炮眼角 (°)	炮眼数 个	装药量 kg	装药集 中度 kg/m	雷管数 发
1	掏槽眼	2.2	60	内斜 65	6	1×6	0.5	7
2	扩槽眼	2.1	60	内斜 75	13	0.8×13	0.4	14
3	辅助眼	2.0	100	90	10	0.5×10	0.25	12
4	辅助眼	2.0	100	90	11	0.5×11	0.25	13
5	二圈眼	2.0	55	90	29	0.4×29	0.2	30
9	周边眼	2.0	50	外插 7	35	0.3×35	0.15	36
10	底板眼	2.1	65	下插 3	13	0.6×13	0.3	14
合计					117	56.8		

注：开挖断面 59.6 m²，循环进尺 2.0 m，炸药消耗量 0.48 kg/m³，采用 8 号火雷管与塑料导爆管继爆。



单位：cm

图 2 Ⅲ类围岩钻爆设计正台阶示意

(最好 d100 效果会更好)中孔眼不装药,作为其他炮眼爆破的临空面。掏槽眼采用 d30 特制药卷,装药量 1 050 g/m,眼深取 4.2 m。为满足爆后找顶要求,一般掏槽区应布置于开挖断面的中下方;周边眼间距取 60 cm,最小抵抗线取 80 cm,装药集中度 350 g/m,装药量控制在 1 450 g/眼,眼深 4.0 m;辅助眼一般横向间距按 100 cm,纵向间距为 100 cm,注意外圈辅助眼与二圈眼层距保持一致,其他辅助眼布置按掌子面剩余空间均匀梅花型布置,垂直钻孔,装药集中度 750 g/m,装药量 3 000 g/眼,眼深 4.0 m;二圈眼间距 65 cm,垂直钻孔,装药集中度 550 g/m,装药量 2 200 g/眼,眼深 4.0 m;底板眼要求严格按开挖底轮廓布孔,最大下扎深度 15 cm,角眼既向外插又向下扎,间距 80 cm,眼深 4.0 m,装药集中度 800 g/m,装药量 3 200 g/眼。Ⅳ类围岩爆破参数见表 3。Ⅳ类

围岩炮眼布置分布见图 3。

表 3 Ⅳ类围岩爆破装药参数

炮眼 编号	炮眼 名称	炮眼深 m	炮眼间 距/cm	炮眼角 (°)	炮眼数 个	装药量 kg	装药集 中度 kg/m	雷管数 发
1	掏槽眼	4.2	50	90	8	4.41×8	1.05	9
2	扩槽眼	4.0	60	90	8	3.4×8	0.85	9
3	辅助眼	4.0	100	90	29	3.0×29	0.75	31
4	辅助眼	4.0	100	90	24	3.0×24	0.75	26
5	辅助眼	4.0	100	90	11	3.0×11	0.75	12
6	二圈眼	4.0	65	90	24	2.2×24	0.55	25
7	周边眼	4.1	60	外插 3	32	1.435×32	0.35	33
8	底板眼	4.1	80	下插 3	15	3.28×15	0.80	16
合计					141	402.4		

注：开挖断面 78.0 m²，循环进尺 4.0 m，炸药消耗量 1.29 kg/m³，采用 8 号火雷管与塑料导爆管继爆。

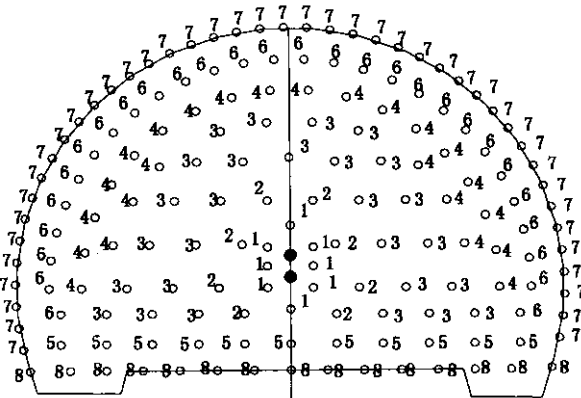


图 3 全断面钻爆设计示意

对于裂隙水比较发育地段,使用乳化炸药代替硝铵炸药,解决有水爆破问题,其控制爆破参数选择见表 4。

表 4 有水段控制爆破参数

围岩 类别	装药 不偶和 系数	周边 眼间距 cm	最小 抵抗线 cm	相对 距离 cm	二圈眼 相对距离 m	装药 集中度 kg/m	装药 结构
Ⅲ	1.9	50	65	0.77	≤0.70	0.2	连续
Ⅳ	1.2	60	75	0.8	≤0.75	0.40	连续

其他炮眼可根据经验或根据硝铵炸药参数参考酌减。

4.7 起爆网络

爆破采用微差爆破,塑料导爆管的规格有 MS-1, MS-3, MS-5, MS-7, MS-9, MS-11, MS-13, MS-15;爆破顺序为掏槽眼 MS-1,扩槽眼 MS-3,

辅助眼 MS—5,MS—7,MS—9,二圈眼为 MS—11,周边眼为 MS—13,底板眼为 MS—15。导爆管的连接网络为用塑料胶布集束捆扎雷管与塑料导爆管继爆,发爆用 8 号火雷管与导火索发爆。具体起爆顺序见表 5、表 6、表 7。

表 5 II 类围岩起爆顺序

起爆顺序	掏槽眼	扩槽眼	辅助眼	辅助眼	辅助眼
炮眼编号	1	2	3	4	5
导爆管规格	MS—1	MS—3	MS—5	MS—7	MS—9

表 6 III 类围岩起爆顺序

起爆顺序	掏槽眼	扩槽眼	辅助眼	辅助眼	二圈眼	周边眼	底板眼
炮眼编号	1	2	3	4	5	6	7
导爆管规格	MS—1	MS—3	MS—5	MS—7	MS—9	MS—11	MS—13

表 7 IV 类围岩起爆顺序

起爆顺序	掏槽眼	扩槽眼	辅助眼	辅助眼	辅助眼	二圈眼	周边眼	底板眼
炮眼编号	1	2	3	4	5	6	7	8
导爆管规格	MS—1	MS—3	MS—5	MS—7	MS—9	MS—11	MS—13	MS—15

5 效果分析

(1)隧道初期设计爆破循环次数为 1 012 次,经优化爆破设计,提高进尺深度,实际循环次数 856 次,减少了 156 次,贯通时间比预计提前 2 个月;降低辅助施工成本 36 万元,其中仅爆破器材损耗直接节约 9.6 万元。

(2)硬岩全断面光面爆破拱部炮眼痕迹保存率 90%,边墙炮眼痕迹保存率 85%;弱岩松动爆破炮眼利用率达到 95%。取得较好的爆破效果,总体上达到预期目的,超欠挖控制问题得到有效解决。

(3)炸药消耗指标:II 类围岩为 0.23 kg/m³,III 类围岩为 0.51 kg/m³,IV 类围岩为 1.38 kg/m³,雷管消耗为 0.58 个/m³。均低于施工规范指标,也比同类型岩层隧道消耗要少。这是由于坚持科学态度,不断优化钻爆设计,选取适宜的爆破参数,合理地控制循环进尺和布孔方式,开挖过程的爆破效率始终高效,致使炸药消耗指标总体水平较低。

6 体会

(1)爆破参数一定要经过现场实验的选定。各地方岩石构造、成因千变万化,对采用不同的爆破方式,其诸参数取值大小也是不同的,而且对爆破效果和开挖进尺有很大影响,一般先根据理论和经验类比初选,进行现场爆破参数的实验选择,再到洞内试爆调整,取得较为稳定的爆破参数。这是提高爆破效

率,减少围岩扰动的有效方法和成功经验。

(2)软弱破碎的岩层施工,一定要把施工重点放在超前加固地层和减少开挖中的围岩扰动,加强对开挖后岩体的初期支护上面。总的原则是:管超前、预注浆、弱爆破、短开挖、强支撑、快封闭、勤量测,做到“注浆一段,开挖一段,支撑一段,封闭一段”。

(3)要尽可能采用大断面光面爆破开挖,避免采用小导坑扩大开挖对围岩多次扰动,减轻破坏围岩稳定性的影响时间,从而减少围岩变形过大而变成有害松动的机率。

(4)钻爆设计要选择适宜的参数,尽量不损伤围岩强度。作为支护系统的一部分,借以达到围岩稳定。

(5)尽可能保证隧道轮廓平顺整齐,以避免围岩应力在某些部位集中,引起开挖面上凸出岩块滑落脱落,造成安全事故;同时在平顺整齐的轮廓上施做支护衬砌,能够保证质量。

(6)开挖后及时施做支护,提高岩体强度的利用率,减少或限制围岩变形,使其不能发展成为塑性松散体而丧失强度,失去岩体抵抗外力破坏的能力。

(7)分部开挖时,开挖断面形状容易产生应力集中,因此要尽可能早地完成断面闭合,以便在围岩稳定有利的断面形状下,完成应力重分布,减少围岩变形,提高围岩自承能力。