

# 电气化铁路二线隧道爆破掘进 安全快速施工技术

王发明

(中铁十一局集团有限公司,武汉 430071)

[摘要] 针对电气化铁路二线隧道爆破掘进如何确保既有线隧道的安全与行车正常运行的问题,文章介绍了分步开挖方法,从掏槽形式、炮眼分布、炮眼装药结构以及起爆技术等角度回答并很好地解决了这一问题,并在实践中取得了很好的技术效果与明显的社会效益与经济效益,为类似工程提供了成功经验。

[关键词] 电气化铁路;既有线隧道;二线隧道;分步开挖;掏槽形式

[中图分类号] U455.6 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2008)05-0058-05

## 1 前言

首先对“电气化铁路二线隧道爆破掘进安全快速施工技术”中的“安全快速”解读一下。所谓“安全”,是指二线隧道爆破掘进时要确保既有线隧道的安全与行车正常运行;所谓“快速”,是指在确保既有线隧道安全与行车正常运行的前提下提高二线隧道施工进度。

为扩大运输能力,襄渝电气化铁路需修建复线。由于原电气化铁路地处山区,修建复线的二线隧道与既有线隧道有数十座,其中新大成隧道二线隧道与既有线隧道最近,净间距仅有 3.5 m,而且开挖距离长,给施工带来很大困难。在专门立项进行研究后,经过 3 个月的实际施工,顺利解决了该问题。不但在施工过程中确保了既有线隧道安全与行车正常运行,而且加快了施工进度,创造了月进度 59 m 的记录,提前了半个月完成任务。文章主要介绍“安全快速”施工的主要技术措施和所取得的技术成果,以及所产生的经济效益与社会效益。

## 2 新大成隧道概况

坐落于襄渝铁路宣汉县境内的新大成隧道,其二线隧道的岩性为泥岩夹砂岩,基岩裂隙水较发育,

围岩分级级别为Ⅲ级,开挖长度为 3 614.85 m。受地形限制,紧靠既有线隧道进口一端,其中有一段长 137.15 m,净间距为 3.5~4 m;紧接着一段长 41 m,净间距为 4.0~4.64 m,如图 1 所示。

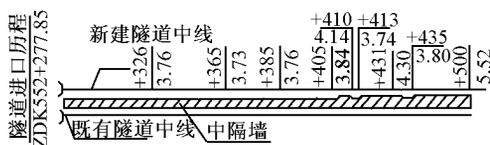


图 1 新大成二线隧道与既有线隧道小净距走向  
Fig. 1 Small net distance trend of Xin-Dacheng multiple line's tunnel and existing tunnel

## 3 安全要求

襄渝铁路于 20 世纪 60 年代末修建,又于 70 年代末建成电气化铁路。坐落于襄渝铁路的新大成隧道为电气化铁路单线隧道,受当时种种条件的限制,既未进行防水处理却又采取浆砌片石衬砌,其坚固性远不如现在修建的隧道。为此,建设单位对施工单位在小净距二线隧道进行爆破掘进施工时应做到如下安全要求。

1) 对于小净距(3.5~4.64 m)、长 178.15 m 的

[收稿日期] 2007-12-05

[作者简介] 王发明(1966-),男,湖北汉川市人,高级工程师,研究方向为工程爆破及建筑工程

二线隧道进行爆破掘进之前,应对相应长度的既有隧道采取中空锚杆注浆加固。

2)在二线隧道爆破掘进施工过程中,应在既有隧道对应二线隧道掌子面位置实施非电拱架台车加固。

3)二线隧道爆破掘进要确保既有隧道安全。所谓“安全”,是指既有隧道不能因二线隧道爆破掘进而出现裂隙、掉石块,更不能出现局部塌方;对电接触网不得有任何损坏。

4)二线隧道爆破掘进要确保行车正常运行。

5)二线隧道的爆破掘进不给出固定时间,只能利用行车间隙时间。

6)在保障安全的前提下,爆破掘进施工工期为3个半月左右。

## 4 设计与施工

为了确保既有隧道的安全与行车正常运行,同时满足建设单位的要求,在设计与施工中采取以下5项技术措施。

### 4.1 分步开挖法

对于紧靠既有隧道的二线隧道爆破掘进,由于受到爆破振动的约束,每一段别的毫秒雷管不能同时起爆多个炮眼;而且受雷管段别的限制,即便地质条件允许,二线隧道爆破掘进绝对不能采取全断面开挖。权衡安全与施工进度,一般采取多步开挖的方法。要指出的是,所谓“步”是指一次起爆为“一步”,而不是同一步分两次起爆。针对新大成隧道地质、环境现状并考虑施工进度,笔者等人选取了三步开挖方法,而第I步开挖是确保既有隧道安全的关键所在,所以在二线隧道的断面上选择离既有隧道最远的位置为第I步开挖;然后开挖其左部,即第II步开挖;最后开挖拱部,即第III步开挖,如图2所示。

### 4.2 掏槽形式

隧道爆破掘进的掏槽形式有两大类型,一种是楔形掏槽,另一种是直眼掏槽。紧靠既有隧道的二线隧道爆破掘进,对于控制爆破振动效应有特殊要求,无论采取楔形还是直眼掏槽,在第I步开挖中首先起爆的炮眼由于只有一个临空面(掌子面),引起的爆破振动最大,于是采取风枪打空眼,即不装药的炮眼,人为创造临空面。但打空眼要打多个,这样不仅增加打眼数量,而且空眼创造的临空面太狭窄,经过研究,决定采用钻一个大直径的中空眼的方法

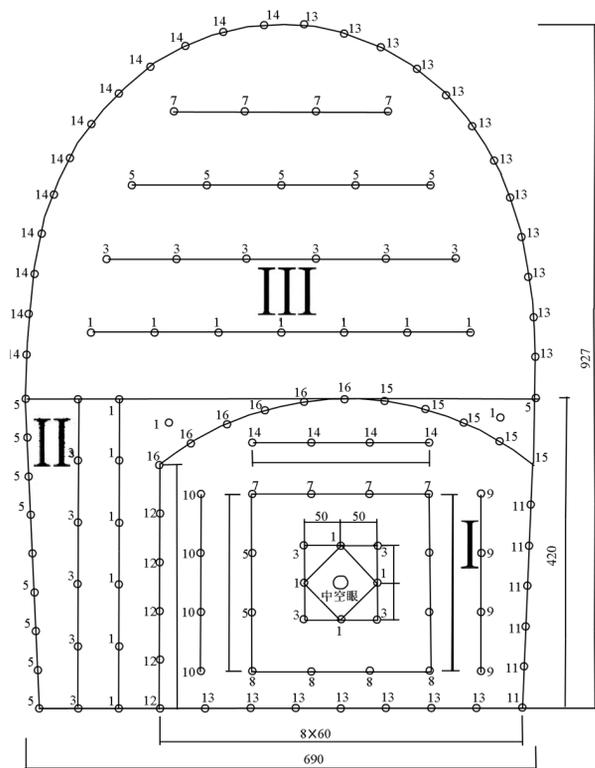


图2 三步开挖和炮眼分布与起爆顺序

Fig. 2 Three steps digging and boreholes distribution and initiation sequence

解决此问题。使用施工现场现有的通用设备即管棚钻机在第I步开挖中如图2所示位置钻一个中空直眼,钻眼直径为110 mm,每次钻眼深10 m以上。

中空直眼钻完之后,在中空直眼四周各布正方形炮眼4个,大正方形为1 m × 1 m,小正方形为0.7 m × 0.7 m,如图2所示。这样由一个大直径中空直眼及其周边的8个炮眼组成中空大直径直眼掏槽形式。要指出的是,为使打(钻)眼准确到位,施工开始阶段用红油漆标出8个炮眼的位置。

### 4.3 炮眼分布

第I步开挖,如图2所示,在中空直眼周围按照正方形布置的8个炮眼之外,再按正方形布置12个炮眼,这12个炮眼间距以及第I步开挖断面上的其他炮眼间距与隧道全断面开挖的炮眼间距基本一致。边墙光爆炮眼间距为55 cm,其他炮眼间距60 ~ 80 cm,这样第I步开挖断面(21.3 m<sup>2</sup>)上布眼61个,炮眼深2 m。

第II步开挖,如图2所示,按照隧道走向为一排上下线形(纵向)布眼,排距60 cm,间距为84 cm,边墙布光爆眼,间距55 cm。这样第II步开挖断面(8.8 m<sup>2</sup>)上布眼24个,炮眼深2.5 m。

第III步开挖,如图2所示,按照水平方向为一排

左右线形(横向)布眼,排距约为1 m,间距为85 cm,拱部光爆眼间距约50 cm。这样第Ⅲ步开挖断面(22.4 m<sup>2</sup>)上布眼46个,炮眼深2.8 m。

以上三步开挖合计断面为52.5 m<sup>2</sup>,合计布眼(打眼)131个,钻中空大直径眼1个。

#### 4.4 炮眼装药量与炮眼装药结构

经过试爆,对于第Ⅰ步开挖,其实际单位用药量为0.98 kg/m<sup>3</sup>,第Ⅱ步、第Ⅲ步开挖由于有宽阔的临空面,可以逐排起爆,所以单位用药量与第Ⅰ步开挖相比大大下降,约为0.45 kg/m<sup>3</sup>。

按照单位用药量、炮眼分布的不同以及炮眼深度,对每一步开挖的每个炮眼进行装药分配,装药量见表1。从表1可知,第Ⅰ步开挖装药量为37.6 kg,第Ⅱ步开挖装药量为10.2 kg,第Ⅲ步开挖装药量为27.2 kg。

表1 炮眼装药量与起爆顺序

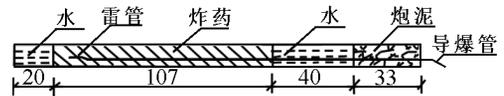
Table 1 Borehole charge quantity and initiation sequence

分步开挖	雷管段别	炮眼数量/个	炮眼深/m	单孔装药量/kg	同段雷管装药量/kg	
第Ⅰ步	1	4	2	0.8	3.2	
	3	4	2	0.8	3.2	
	5	4	2	0.6	2.4	
	7	4	2	0.6	2.4	
	8	4	2	0.6	2.4	
	9	4	2	0.6	2.4	
	10	4	2	0.6	2.4	
	11	6	2	0.5	3.0	
	12	5	2	0.6	3.0	
	13	7	2	0.6	4.2	
	14	4	2	0.6	2.4	
	15	5	2	0.6	3.0	
	16	6	2	0.6	3.6	
	合计		61			37.6
	第Ⅱ步	1	8	2.5	0.6	4.8
		3	6	2.5	0.4	2.4
5		10	2.5	0.3	3.0	
合计			24			10.2
第Ⅲ步	1	7	2.8	0.8	5.6	
	3	6	2.8	0.8	4.8	
	5	5	2.8	0.8	4.0	
	7	4	2.8	0.8	3.2	
	13	12	2.8	0.4	4.8	
	14	12	2.8	0.4	4.8	
合计		46			27.2	

为了从最根本降低爆破振动效应,必须减少炮眼装药量。对于炮眼常规装药结构,减少装药量势必影响爆破效果,而采用炮眼水压爆破装药结构就解决了这一矛盾<sup>[1]</sup>。所谓炮眼水压爆破装药结构,就是除往炮眼装药外,还必须往炮眼中“一定位置注入一定量的水”,最后用特制的炮泥回填堵塞

炮眼。炮眼水压爆破装药结构与炮眼常规装药结构相比,在达到同样爆破效果的前提下,可少装炸药20%。

对于第Ⅰ步开挖中空直眼四周的8个炮眼,炮眼深2 m,装药量0.8 kg,装药长107 cm,其炮眼水压爆破装药结构如图3所示。其他炮眼结构与图3所示基本一致,先在炮眼底部装入1个水袋,然后装入所需的炸药,根据炮眼深度不同再装入2~3个水袋,最后用炮泥回填堵塞炮眼口。要特别指出的是,表1所列的炮眼装药量为水压爆破装药量。



(单位:cm)

图3 炮眼水压爆破装药结构

Fig. 3 Scheme of charging structure of borehole water - pressure blasting

#### 4.5 炮眼起爆顺序与间隔时间

目前使用的导爆管为非电起爆系统中的毫秒雷管1~7段,其间隔时间小于50 ms;而7段之后,段与段起爆间隔大于50 ms。对于隧道爆破掘进,实际爆破表明起爆间隔大于50 ms,爆破振动基本不叠加。鉴于此,并根据现场仅有16个段别毫秒雷管的实际情况,第Ⅰ步开挖雷管段别为1,3,5,7~16段,见图2(下同),同一段别起爆药量最多为4.2 kg(第13段),最少药量为2.4 kg(第14段),见表1(下同);第Ⅱ步开挖雷管段别为1,3,5段,同一段别起爆药量最多为4.8 kg(第1段),最小药量为2.4 kg(第3段);第Ⅲ步开挖雷管段别为1,3,5,7,13,14段,同一段别起爆药量最多为5.6 kg(第1段),最小药量为3.2 kg(第7段)。

### 5 技术成果与技术水平

新大成二线隧道小净距爆破掘进长178.15 m,已于2007年6月22日安全顺利贯通。爆破掘进累计施工91天,自始至终确保了既有线隧道的安全与行车正常运行,并取得了显著的技术成果和经济与社会效益。

#### 5.1 技术成果和经济与社会效益

1)单位面积炮眼数量。新大成二线隧道开挖断面面积为52.5 m<sup>2</sup>,第Ⅰ步、第Ⅱ步、第Ⅲ步开挖合计布眼131个,单位面积布眼数量为2.5个/m<sup>2</sup>。其

中,第 I 步开挖单位面积布眼数量为  $2.8 \text{ 个}/\text{m}^2$ ,与类似工程相比,布眼数量大大降低。

2) 第 I 步开挖断面面积与掘进深度。新大成二线隧道第 I 步开挖断面面积为  $21.3 \text{ m}^2$ ,炮眼深度  $2 \text{ m}$ 。在小净距的条件下,开挖断面之大、掘进之深,在国内外均属少见。

3) 实际单位用药量。第 I 步开挖,断面积为  $21.3 \text{ m}^2$ ,设计掘进深度  $2 \text{ m}$ ;爆后实际进尺  $1.8 \text{ m}$ ,用药量  $37.6 \text{ kg}$ ,则实际单位用药量为  $0.98 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。

第 II 步开挖,断面积  $8.8 \text{ m}^2$ ,设计掘进深度  $2.5 \text{ m}$ ;实际进尺  $2.5 \text{ m}$ ,用药量  $10.2 \text{ kg}$ ,则实际单位用药量为  $0.46 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。

第 III 步开挖,断面积  $22.4 \text{ m}^2$ ,设计掘进深度  $2.8 \text{ m}$ ;实际进尺  $2.8 \text{ m}$ ,用药量  $27.2 \text{ kg}$ ,实际单位用药量为  $0.43 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。

这三步开挖折合成全断面开挖后,实际用药量为  $0.66 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。

4) 炮眼利用率。第 I 步开挖,实际打眼深度为  $2 \text{ m}$ ,爆后实际进尺平均为  $1.8 \text{ m}$  以上,则炮眼利用率为  $90\%$  以上。

第 II 步开挖,实际打眼深度为  $2.5 \text{ m}$ ,实际进尺为  $2.5 \text{ m}$ ,则炮眼利用率为  $100\%$ 。

第 III 步开挖,实际打眼深度为  $2.8 \text{ m}$ ,实际进尺为  $2.8 \text{ m}$ ,则炮眼利用率为  $100\%$ 。

5) 爆破振动速度。二线隧道爆破掘进引起既有隧道的振动大小是由 CD-1 传感器、DSV 测震仪及笔记本电脑组成的测振系统进行监测的。

布置测定选择在既有线隧道紧靠二线隧道的边墙上,其测点高度与第 I 步开挖中空大直径眼的高度一致,测点与测点距离为  $5 \text{ m}$ ,影响边墙稳定性的是垂直边墙的振动速度,所以仅测一个方向的速度即可。

对开挖长  $178.15 \text{ m}$  的二线隧道爆破掘进,每步的每个循环都需在与掌子面或临近掌子面同一里程的既有线隧道上进行振动速度监测。监测结果表明,第 I 步开挖最大振动速度为  $2.13 \text{ cm}/\text{s}$ ,第 II 步为  $0.92 \text{ cm}/\text{s}$ ,第 III 步为  $2.49 \text{ cm}/\text{s}$ 。

6) 粉尘浓度。使用 TH-40E 型恒流粉尘采样器(采用灵敏度为  $1/10\ 000 \text{ g}$  的分析天平)对第 I 步开挖爆破后进行粉尘浓度监测。爆破  $3 \text{ min}$  后,未通风,把仪器放在爆堆边缘处,采样  $5 \text{ min}$ 。监测结果表明,水压爆破比常规爆破(炮眼无回填堵塞)粉尘浓度下降了  $67\%$ 。

7) 施工进度。二线隧道开挖长  $178.15 \text{ m}$ ,钻爆与清渣累计施工  $91 \text{ 天}$ ,比预计工期提前半个月,施工进度折合全断面为  $59 \text{ m}/\text{月}$ ,在国内小净距隧道施工中处于领先水平。

8) 经济与社会效益。二级隧道  $178.15 \text{ m}$ ,原计划爆破掘进施工  $3$  个半月,而实际累计施工  $91 \text{ 天}$ ,节省人工费、机械费等  $12.6 \text{ 万元}$ 。

对于与  $178.15 \text{ m}$  的二线隧道相应长度内的既有线隧道,在二线隧道未进行爆破掘进之前,已经按要求进行了中空锚杆注浆加固。经实际爆破掘进检验,由于爆破振动小,既有线隧道既未出现裂纹、裂隙,又未出现掉石块现象。针对这一情况,完全可以不必注浆加固,这样可节省大量费用。

按照要求,爆破掘进时要进行非电拱架台车加固,施工单位考虑一次性投入太大,而且施工过后又会闲置,根据试爆效果,决定不采用拱架台车加固,这样又节省费用上百万元。

紧靠既有线隧道的二线隧道爆破掘进长  $178.15 \text{ m}$ ,施工自始至终确保既有线隧道安全与行车正常运行,产生了很好的社会效益。

## 5.2 技术水平

2007 年 9 月 28 日,湖北省科技厅在武汉主持召开了该项技术成果鉴定会,公正客观地对该项技术水平作出了评价。鉴定意见认为:该项研究针对襄渝电气化铁路新大成隧道,解决了掘进与既有线隧道净间距为  $3.5 \sim 4 \text{ m}$  时开挖长  $137.15 \text{ m}$  二线隧道和净间距为  $4 \sim 4.64 \text{ m}$  时开挖长  $41 \text{ m}$  二线隧道的工程难题,所采取的综合技术措施减弱了爆破振动,确保了紧邻运营隧道的安全,取得了明显的社会效益;针对隧道地质条件、复杂的环境和运营部门严格的安全要求,所采取的导坑超前、而后扩挖的三步开挖法,科学合理,所创造的折合全断面开挖月进度  $59 \text{ m}$ ,为小净距隧道施工条件下国内领先水平;首次采用水压爆破与中空大直径掏槽综合新技术,具有创新性。与常规爆破相比,不仅减少了炸药量,而且有效地将距离爆破点  $4 \text{ m}$  的运营隧道浆砌片石边墙的爆破振动速度控制在  $3 \text{ cm}/\text{s}$  以内,对确保既有线隧道安全与行车正常运行起到了重要作用,发展了隧道爆破技术,有广泛的推广应用价值。综上所述,该成果达到国际先进水平。

## 参考文献

- [1] 何广沂. 工程爆破节能环保技术[M]. 北京:中国铁道出版社, 2007

# Quick safety construction technology on electric railway multiple line's tunnel blast boring

Wang Faming

(*China Railway 11th Bureau Group Co. Ltd. , Wuhan 430071 ,China*)

[ **Abstract** ] How to ensure the existing tunnel's safety and the train normal running while the electric railway multiple line tunnel was blast boring? By study and practice ,the paper gives an answer through stepped digging method, underholing style, holes scatter and the structure of the hole and detonation technology. It receives good technological achievement and remarkable social and economic benefits in practical application. It provides successful experience for the similar engineering in the future too.

[ **Key words** ] electric railway;the existing tunnel;multiple line tunnel;stepped digging;underholing style