

## 4.2 超声波除垢

超声波除垢也是一种新型的防垢除垢技术，在使用超声波的情况下，介质中的  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  的含量明显比无超声波时降低的慢，甚至有所升高。 $\text{Ca}^{2+}$  随着温度的升高逐步结晶析出沉淀成碳酸钙垢物，当使用超声波时碳酸钙结晶速度缓慢； $\text{Mg}^{2+}$  在温度达到  $70^\circ\text{C}$  时出现大幅度结晶，使用超声波时不会出现结晶现象。两种离子变化趋势说明超声波具有很好的抑制结垢的作用，可以在集输管道防垢除垢中得到良好应用。

## 4.3 机械除垢

机械除垢主要有两种除垢方式，第一种是通过高压水枪、高压冲水等来进行除垢，通过利用活塞泵产生高压水，并通过专用喷嘴设备注入管道和设备内部来实现的，水流的冲力强，击打在垢层后，导致污垢脱落。这种除垢处理效率较高，除垢效果明显。但也有实践操作显示，在进行高压水枪、高压冲水除垢的过程中，高压喷水需要管道或设备具有很大的承压能力，要求内部空间大，同时工作时消耗大量的水资源。随后也会出现很多问题，如除垢后的大量水处理，清理后的垢质无法有效地消除。

第二种运用机器刷刮污垢。通过使用移动式除垢器进入管道内部，再进行自动除垢作业，对管道结垢物进行刷、刮等清理，自动化控制其除垢作业。比如 ET-O 系列除垢仪，该除垢仪具有物理振动技术，在进入集输系统后，能够快速对污垢进行振动清除，尤其是一些无机盐污垢等，不需要加入其他化学用品或其他机械操作，能够针对管道内部结构起到较好的除垢效果，整个处理过程的成本也较低，实际除垢时配合其他除垢措施进行联合使用，达到彻底除垢的目的。

## 4.4 添加缓蚀剂

缓蚀剂或抑制剂是一种可以逐渐延缓化学腐蚀的工艺。使用缓蚀剂的原则主要是在输送介质内添加缓蚀剂，使其与集输介质有效结合，有效去除集输系统中的某些腐蚀性介质，确保管道和设备的使用寿命。在具体应用中，缓蚀抑制剂可分为两类：有机抑制剂和无机抑制剂，这两类制剂最

常用于石油和天然气管道。就有机抑制剂而言，其应用过程包含先决条件，必须先确保该输送管道的安全使用，然后才能应用抑制剂。同时，石油和天然气能源中的腐蚀性介质不同，在使用抑制剂时，需要分析其中不同的腐蚀性介质，以便找到最有效的抑制剂。

## 4.5 管道内涂层防腐蚀技术

目前，我国油气输送管道中使用的主要防腐方式是使用内壁涂层，采用这种技术的主要目的是将管道内壁与腐蚀介质隔离开来，以防止它们接触，从而减少腐蚀。这种技术不仅可以在养护方面发挥有效作用，而且可以减少维护成本。此外，此技术可以提高管道内壁的规则性，减少管道的占用空间，并提高管道应用的安全性。创建内部涂层时，还可以添加防气剂，有助于在一定程度上防止内部涂层脱落，并产生防腐蚀效果。在选择防腐涂层材料时，可以使用玻璃钢复合材料，该材料不仅具有较高的强度，而且具有较高的耐腐蚀性，在高温高压下运行良好；此外，该材料具有保温功能，这些优点使其成为管道中防腐材料的主要选择。

## 5 结语

本文主要针对油田集输系统除垢技术进行研究与分析。首先对油田集输系统结垢的原因进行了一定程度的阐述，然后在此基础上有针对性的提出了相应的防腐蚀与防垢除垢工艺，其中防垢除垢工艺主要包含有化学除垢、机械洗垢、超声波除垢等。综上所述，积垢的存在一定程度上影响到了油田集输系统的运行，需积极了解并弄清积垢产生的原因，选择针对性较强且行之有效的除垢措施予以解决，保证油田集输系统的安全平稳进行。

## 参考文献

- [1] 冯辉, 刘艳, 薛磊等. 油田结垢与除垢方法的研究进展[J]. 能源与环保, 2021, 08(13): 130-131.
- [2] 王建峰, 路以文, 邢钰等. 塔河油田成垢机理分析及复合除垢剂研究[J]. 石油机械, 2022, 17(1): 342-343.
- [3] 汪昊, 刘金海, 熊明林. 塔河油田污水系统碳酸钙垢除垢实验研究[J]. 中小企业管理与科技, 2021, 05(25): 3-4.

# Discussion on control measures for over excavation and under excavation in the rock section of Xiaoxiangling Tunnel on Chengdu Kunming Railway

Yang Li

Construction Department (Engineering Management Office) of China Railway Chengdu Group Co., Ltd., Chengdu, Sichuan, 610081, China

## Abstract

To control the over excavation and under excavation of tunnels, reduce the waste of labor, machinery, and materials caused by over excavation, and improve the economic benefits of tunnel construction. Adopting the full section construction method optimization and smooth blasting test for the surrounding rock of the tunnel rock section, fully utilizing the construction role of large mechanical equipment in the tunnel, while strengthening the management of personnel allocation, management measures, and technical measures for rock section blasting, especially implementing assessment and incentive measures. The conclusion shows that the full section construction method and optimized blasting parameters were adopted in the experimental section, resulting in a smooth excavation contour of the tunnel face, controlled over excavation and under excavation, and ensured the quality of tunnel initial support and lining construction, achieving good economic and social benefits

## Keywords

railway tunnel; smooth blasting; overbreak-underbreak; control measures

# 成昆铁路小相岭隧道岩质段超欠挖控制措施探讨

李洋

中国铁路成都局集团有限公司建设部（工管所），中国·四川成都 610081

## 摘要

为控制好隧道超欠挖，减少隧道超挖带来的人工、机械和材料浪费，提升隧道施工经济效益。采用对隧道岩质段围岩进行全断面工法优化和光面爆破试验，充分发挥大型机械设备在隧道的施工作用，同时对岩质段爆破从人员配置、管理措施、技术措施上加强管理，尤其是做好考核激励措施。结论表明：试验段采用全断面工法和优化后光爆参数，掌子面开挖轮廓圆顺，超欠挖得到控制，隧道初支和衬砌施工质量得到保证，取得了较好的经济效益和社会效益。

## 关键词

铁路隧道；光面爆破；超欠挖；控制措施

## 1 引言

隧道开挖质量差主要表现在开挖面凹凸不平、超挖、欠挖等，易产生应力集中，影响围岩稳定性、易掉块、衬砌背后易形成空洞，超挖会增加出渣及圪工量而使成本巨增、欠挖会增加补炮等工序减缓施工进度并增加成本。文献<sup>[1]</sup>在现场对水平缓倾岩层做了降低喷射混凝土超耗的试验，文献<sup>[2-3]</sup>从爆破钻孔及爆破经验方面论述了良好的爆破开挖技术对于超欠挖控制的重要性。文献<sup>[4-5]</sup>表明在隧道钻爆施工中，进行爆破参数试验段的重要性，参数不当，引起的超挖

和欠挖都会影响隧道施工进度和成本效益。欠挖处理在施工过程中打乱了隧道施工节奏，返工费用高，往往又造成更大的超挖，超挖需要用混凝土来回填超挖部分，导致项目成本增加。因此，隧道超欠挖控制决定着隧道施工效益、施工质量、施工进度、施工安全及施工管理水平等方面。目前隧道因超欠挖造成的安全增大、工期延长、成本损失已经严重影响了施工企业发展，制约了各施工企业发展的核心竞争力。本文拟开展隧道超欠挖控制措施探讨，以提升岩质隧道爆破施工质量及管理水平。

## 2 光面爆破设计参数

### 2.1 依托工程概况

成昆铁路小相岭隧道全长 21.775km，起讫里程 DK345+400 ~ DK367+175，单洞双线（隧道断面见图 1），

【作者简介】李洋（1975-），男，中国四川安岳人，本科，高级工程师，从事铁路建设管理，桥梁隧道路基工程技术管理，铁路交通枢纽规划建设管理等研究。

属 I 级高风险隧道，是成昆铁路扩能工程全线重点控制工程。隧道以 IV 级围岩为主，其中 III 级围岩段 7550m，占隧道全长 35%；IV 级围岩段 12200m，占隧道全长 56%；V 级围岩段 2025m，占隧道全长 9%，隧道岩质段围岩共计 19750m，占隧道全长的 91%。隧道最大埋深约 1350m。小相岭隧道进口正洞地质以砂岩、泥岩为主，出口正洞地质揭示主要为变质砂岩夹千枚岩，花岗岩，大理岩夹变质石英砂岩，大理岩夹千枚岩，围岩不断变化，掌子面普遍较干燥，无渗水，岩质段围岩段采用钻爆法施工，爆破开挖成果与否，直接影响本隧道施工的安全性和经济性。

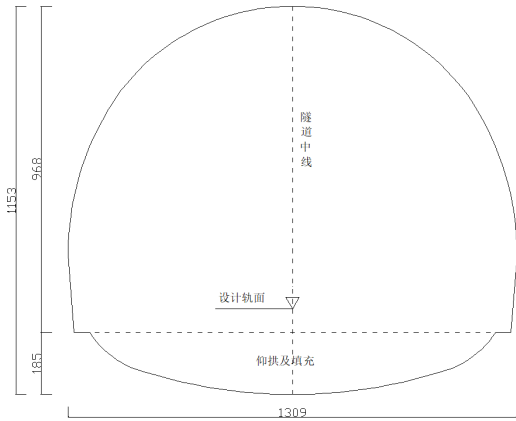


图 1 正洞单洞双轨断面图 (IV 级围岩)

## 2.2 光面爆破设计参数

为了实现对隧道超欠挖的有效控制，特针对本隧道断面尺寸、工程地质和水文地质情况开展光面爆破设计，隧道光面爆破主要参数包括：钻孔直径  $d$ ，周边眼的间距 ( $E$ )，周边眼的抵抗线 ( $W$ ) (即周边眼至内圈眼的距离)、周边眼密集系数 ( $K=E/W$ ) 和装药集中度 (线装药密度) 等<sup>[5]</sup>。通过在现场开展光面爆破试验，对试验段数据分析整理后，并满足相关爆破作业规范要求，针对成昆铁路小相岭隧道岩质段围岩的关键爆破参数给出了数据参考。

### 2.2.1 钻孔直径 $d$

隧道钻爆法人工手持风钻钻孔直径通常为 42mm。

### 2.2.2 周边孔的间距

采用不耦合装药，光面爆破时，炮孔内静压力应小于爆破体的极限抗压强度，大于岩体的极限抗拉强度。“此据理论”，按以下公式确定  $E$  值。

$$E \leq [\sigma_c] / [\sigma_p] \leq K_i d$$

$d$ ——炮眼直径，cm。

$[\sigma_c]$ ——岩体极限抗压强度，Mpa。

$[\sigma_p]$ ——岩体极限抗拉强度，Mpa。

$E$ ——周边眼间距，cm。

实施施工中，取得经验数据作为设计参数，一般  $K_i=10-16$ ，即  $E=(10-16)d$ 。

也可以在两个周边炮眼间增加导向空眼，导向空眼距

离装药眼间的距离应控制在 40cm 以内，才能取得效果。

此外，还应注意炸药品种与药卷直径对  $E$  值也有影响。

### 2.2.3 周边眼抵抗线 $W$ 和装药密集系数 $K$

周边孔的最小抵抗线  $W$  与周边孔的间距  $E$  关系密切，一般用周边孔的密集系数  $K$  表示， $K=E/W$ ，其大小决定着光面爆破效果。应力波在两期相邻炮孔间的传播距离必须小于应力波到临空面的传播距离，即  $E < W$ 。 $K=0.7-0.9$  或取  $W=(1.15-1.4)E$ ，现场爆破试验表明， $K=0.8$  较为合适。岩质段围岩爆破设计见图 2。

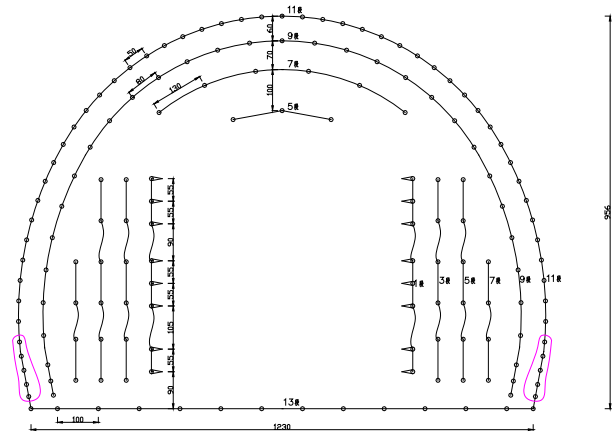


图 2 正洞岩质段全断面爆破图

### 2.2.4 周边孔装药量

周边孔装药量一般用线装药密度表示。合适的装药量应是既具有破岩所需的能量 (不留残眼)，又不使围岩过度损伤。爆破设计时，应根据孔距、装药结构、炸药种类和石质、抵抗线综合考虑确定装药量。光面爆破具体参数表见下表 (表 1)。

表 1 光面爆破参数表

围岩级别	炮眼间距 $E$ (cm)	抵抗线 $W$ (cm)	密集系数 $K$ ( $E/W$ )	装药集中度 $q$
III	40 ~ 55	50 ~ 60	0.8 ~ 0.85	0.15 ~ 0.25
IV	30 ~ 45	45 ~ 60	0.75 ~ 0.8	0.04 ~ 0.15

### 2.2.5 装药结构及装药集中度

采用不耦合间隔装药结构。不耦合装药系数 (为炮孔直径与药卷直径之比)，不耦合装药系数  $42/32=1.31$ 。周边眼用竹片辅于间隔装药，炮泥堵塞，周边眼堵塞长度不小于 30cm。

装药集中度必须严格控制。为解决眼底岩石的夹制作用，通常对眼底进行加强装药。周边眼间隔装药见下图 (图 3)<sup>[6-8]</sup>。

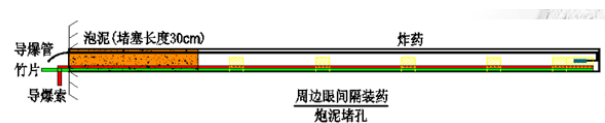


图 3 周边眼间隔装药

### 3 光面爆破质量及平均线性超挖控制标准

#### 3.1 光面爆破质量控制标准

光面爆破质量直接影响隧道施工安全、掘进进度和经济与环境效益。爆破时，围岩的破坏范围过大，将造成坍方，存在安全隐患；块度过大，将影响装运速度，甚至还需二次爆破处理装运大块石；眼底不平，炮眼利用率不高，会影响掘进速度；光爆效果不好，超挖过大，则是造成经济效益不好的直接原因。查阅相关规范文献，并根据隧道局长期施工的经验，考虑到铁路隧道施工机械设备与施工技术和管 理现状，采用下表（表 2）标准来检验隧道爆破效果<sup>[9-10]</sup>。

表 2 隧道爆破质量控制标准

项 目	岩质段围岩（Ⅲ~Ⅳ）
周边孔钻孔精度（cm）	+2.0
周边孔以外其他炮孔钻孔精度（cm）	+5.0
两炮衔接台阶最大值（cm）	12
局部欠挖（cm）	5
炮眼痕迹保存率（%）	≥80
炮眼利用率（%）	≥93
岩壁状态	爆后围岩稳定，无坍方， 无剥落
石碴块度（cm）	<80
抛距（98%以上爆碴）（m）	<20

上表注：以上标准系浅孔 1m ~ 3.5m 炮孔深的隧道爆破质量标准

#### 3.2 平均线性超挖控制标准

平均线性超挖控制标准（已考虑预留变形量）见下表（表 3）：

表 3 平均线性超挖允许值

围岩类别	平均线性超挖允许值（cm）		备注
	拱墙	仰拱	
Ⅲ	+12	+15	正洞
Ⅳ	+12	+15	正洞、平导

### 4 超欠挖控制措施

#### 4.1 工法优化

小相岭隧道岩质段围岩占隧道全长的 91%，在深入研究前期爆破开挖质量基础上，对隧道开挖断面优化以改进光面爆破效果。

按照设计，小相岭隧道正洞岩质段围岩设计施工为台阶法，由于台阶法具有以下缺点，上中台阶进尺不一，易造成上台阶拱架悬空，存在安全隐患；开挖台架伸缩平台安全防护困难，存在安全隐患；对围岩的扰动次数多，影响围岩的稳定性。造成爆破开挖超挖严重。而全断面开挖具有爆破对围岩的扰动仅有一次，避免了多次分步爆破对围岩的扰动次数，有利于保护周边围岩的完整性，降低周边围岩的松动范围，有利于围岩天然承载拱的形成，能有效控制施工过程中的安全风险和超欠挖，开挖质量明显提高。同时采用大型机械化配套设备能够实现快速掘进，工序循环时间大大缩短，工程综合成本降低，工期和施工安全质量得到确保；采用全断面法，一是为了满足大型配套机械作业空间需要，二是在隧道掌子面能够自己稳定的情况下，采用大型机械作业，又能确保掌子面稳定。为此对原设计台阶工法优化为全断面工法。

全断面法施工在安全、质量、进度、效益以及组织工效方面相比台阶法施工具有明显的优势。具体配置见下表（表 4），台阶法与全断面法综合比较见下表（表 5）。

表 4 全断面施工各工序作业人员数量

施工部位	工序名称	人员配置 / 人	备注	总人数（人）
全断面	开挖	26 ~ 28	断面小 26 人，断面大 28 人	85
	立拱、锚杆、钢筋网	22 ~ 24	拱架小 22 人，拱架大 24 人	
	湿喷混凝土	4	采用湿喷机械手	
	出渣	8	掘进 1 公里以内时 8 人（装渣司机 2 人、挖掘司机 2 人、大车司机 4 人） 掘进 1.5 公里时增加大车司机 1 人	
仰拱	开挖	5		34
	清渣	4		
	钢筋	12	仰拱有钢筋时 12 人	
	立模	6		
	混凝土浇筑	7		
二衬	铺挂防水板	5		36
	钢筋	12	仰拱有钢筋时 12 人	
	台车脱模定位	4		
	封堵头板	6		
	混凝土浇筑	9		

表5 台阶法与全断面法综合比较

施工方法	每循环进尺 (m)	每循环时间 (h)	安全方面	质量方面	效益	成型
台阶法	2.4	22.5	隐患较多	缺陷多	炸药单耗多	效果差
全断面法	2.4	15.3	隐患少	缺陷少	炸药单耗少	效果好

## 4.2 技术措施

### 4.2.1 深化技术交底、加强光面爆破原理培训

邀请行业内爆破专家，通过理论和实操培训，让开挖队和技术员了解光面爆破机理、技术参数，清楚布眼及司钻位置，清楚钻眼角度及装药结构，在遇到地质变化时，能够根据变化及时优化爆破参数，积累爆破经验，解决现场爆破超欠挖存在的问题，安排技术员跟踪试爆全过程，根据爆破成型情况，总结经验，优化光爆参数。

### 4.2.2 精确标识量测和测量

现场技术员根据量测结果和围岩级别确定合适的预留变形量，指导测量员和分队确定开挖断面尺寸。钻孔前，测量员根据图纸和交底，用全站仪测出隧道开挖轮廓线、隧道断面中线及周边孔炮孔位置，内圈眼线炮孔位置，掏槽眼炮孔位置，并用红油标示，见下图（图4）。



图4 精确测量炮眼

## 4.3 管理措施

### 4.3.1 合理分工，司钻位置相对固定

实行分工明确，各司其职。将有爆破经验和有责任心的作业人员安排开挖掏槽眼，责任心强和技术熟练的作业人员开挖周边眼，辅助眼安排分队一般人员，分队开挖人员位置应固定下来，不能轻易改变，一是方便每个人作业水平积累，同时也方便项目管理和奖罚。

### 4.3.2 严格控制钻眼精度

开挖人员根据隧道中线及周边眼间距比划出摆钻方位，有条件的插炮杆作参照。钻杆紧贴围岩初支面进钻，控制好外插角度。“定位准，方向正，角度精”作为考核作业水平的标准，见下图（图5）。

### 4.3.3 开挖作业平台结构合理

作业平台结构要合理，便于开挖人员行走和固定，结

实耐用。确保各种运输车辆及装载机能从其下面安全顺利通过。保证掌子面到前立柱的距离合适，确保前立柱宽度合适，不影响掏槽孔作业人员钻孔角度摆设。层高要适中，各种炮眼均能实现平钻。保证各区域作业空间能容下该区域的作业人员，安排好各区域钻眼工作量与钻机台数，确保各区域作业人员钻眼时间能够同时结束。



图5 严格控制钻眼精度

### 4.3.4 加强过程监控，及时纠偏

项目光爆小组、分队长建立光面爆破微信群，测量组在放开钻轮廓线时，对前一循环的开挖轮廓进行复测，现场测量人员将最大超挖值及平均线性超挖值做好记录，通过工作群的形式反馈至项目管理人员。对平均线性超挖值过大、最大超挖值超出既定标准，项目管理人员及时组织分队和技术员分析原因，在下一循环开挖作用施工中及时做出调整，并要求分队互相交流，提高光面爆破水平。

### 4.3.5 严格落实超欠挖考核兑现管理制度

项目根据光面爆破超欠挖标准和光面爆破质量控制标准制定超欠挖考核制度，考核内容及指标一旦确定，项目必须严格兑现落实，及时下发考核文件，并将考核结果对外公布，提高作业人员的积极性和主观能动性。

### 4.3.6 强化合同管理

作业人员上岗前与项目部签订开挖质量控制合同，明确爆破每道工序验收和奖罚标准。建立优胜劣汰用人机制。

### 4.3.7 强调班组长负责制

班组长是爆破作业施工工序的直接管控者、执行者、落实者，对开挖成型起决定作用，在班组长奖罚上达班组长开挖考核兑现的30%以上。

## 5 取得的成果

### 5.1 开挖轮廓圆顺，掌子面平整

炮眼痕迹保存率95%以上，相邻两次爆破成型的接茬