

隧道超欠挖原因及控制措施分析

陈琦

中国水利水电第四工程局有限公司 河北 保定 072750

摘要：随着基建浪潮推进，隧道工程日增。本文聚焦隧道超欠挖问题，首先阐述隧道超欠挖的概念。接着深入剖析其产生原因，涵盖围岩地质条件复杂、测量放线精度欠缺、钻孔精度失控、爆破参数设计不当以及施工管理体系存在缺陷等方面。针对这些原因，提出一系列切实可行的控制措施，包括优化爆破参数、提高测量放线精度、强化钻孔控制、改进爆破技术与器材、完善质量管理体系以及加强人员培训考核等，旨在为隧道施工提供科学指导，减少超欠挖现象，保障工程质量与施工安全。

关键词：隧道超欠挖；原因分析；控制措施

引言：在隧道工程施工中，超欠挖问题屡见不鲜，它不仅关乎工程成本，更对施工安全与质量有着重大影响。超欠挖会导致混凝土超耗、衬砌厚度不均，降低结构稳定性，增加后期运营风险。随着交通基础设施建设的不断推进，隧道工程规模日益扩大，对施工精度和质量要求愈发严苛。因此，深入研究隧道超欠挖的原因并探寻有效的控制措施，成为当前隧道施工领域亟待解决的关键问题，对于提升工程建设水平、保障交通网络的安全与畅通具有重要意义。

1 隧道超欠挖的概念

隧道超欠挖是隧道施工中用于描述实际开挖断面与设计基准线之间偏差的专业术语，其核心在于以设计隧道开挖轮廓线为基准，通过对比实际开挖获得的断面与基准线的位置关系进行判定。当实际开挖断面超出设计基准线时，超出部分称为超挖；当实际开挖断面未达到设计基准线时，不足部分则称为欠挖。这一概念直接反映了施工精度对隧道工程成本、质量及安全的影响。超挖现象通常由爆破参数失控、机械操作失误或测量放样误差导致，其危害体现在增加混凝土填充量、拖延工期以及削弱围岩稳定性。例如，某隧道施工中因爆破过度导致拱顶超挖，迫使施工单位额外消耗混凝土并延长支护时间。欠挖则多因钻孔精度不足或地质突变引发，其隐患更为隐蔽，可能导致衬砌结构变薄、行车空间受限，甚至引发围岩应力集中诱发塌方。某公路隧道曾因欠挖处理不当，导致通车后侧壁混凝土开裂，严重影响运营安全。规范对超欠挖的允许值有明确界定：当围岩完整且石质坚硬时，允许岩石个别突出部分侵入衬砌，但侵入值需小于衬砌厚度的1/3且不超过10cm；喷锚衬砌的侵入值则不得超过5cm，同时严禁在拱脚和墙脚以上1m范围内出现欠挖。这些标准为施工质量控制提供了量

化依据^[1]。

2 隧道超欠挖的原因分析

2.1 围岩地质条件复杂

隧道穿越区域地质构造多样，不同岩性、节理裂隙发育程度及地下水状况对开挖影响显著。软弱破碎围岩（如页岩、泥岩）自稳能力差，开挖后易发生塌落、变形，导致实际轮廓偏离设计线，形成不规则欠挖或超挖区域。坚硬岩体（如花岗岩、石灰岩）虽整体稳定性好，但局部存在原生裂隙或构造带，爆破时能量沿裂隙扩展，易造成局部超挖。地下水丰富地段，软塑状围岩遇水软化，开挖过程中易出现流塑变形，导致欠挖且轮廓线不平整。此外，岩层倾角变化、断层破碎带等地质突变区，围岩应力重新分布，传统开挖方式难以适应，进一步加剧超欠挖问题。

2.2 测量放线精度不足

隧道内环境复杂，粉尘、照明不足及施工振动干扰测量设备精度。全站仪、激光导向仪等仪器受温度、湿度变化影响，导致测角、测距误差累积。控制点埋设不稳固或受爆破冲击偏移，未及时复测校正，使中线、高程基准失准。放样时，后视点选择不当或棱镜对中偏差超过规范要求（通常 $\leq 2\text{mm}$ ），直接导致开挖轮廓线偏移。三维坐标转换误差、软件参数设置错误等计算问题，也会放大测量偏差。部分工程因测量人员操作不熟练，未严格执行“两人复核”制度，导致系统性测量错误，最终引发超欠挖。

2.3 钻孔精度控制失效

钻孔设备性能差异（如钻杆刚度、推进力稳定性）直接影响孔位精度。老旧钻机因液压系统泄漏、导向装置磨损，导致钻孔偏斜率超标（规范要求 $\leq 1\%$ ）。操作人员技能不足，未根据岩性调整钻进参数（如转速、冲

击频率),在软硬岩交界处易产生孔位偏移。钻孔深度控制不当,周边孔过深会扩大超挖范围,过浅则导致欠挖。孔口定位误差(如未使用定位模板)、孔间排距超差(规范要求周边孔间距 $\leq 50\text{cm}$),均会破坏爆破网路的均匀性。此外,钻孔过程中未及时清理岩粉,导致钻头偏移或卡钻,也是精度失控的常见原因。

2.4 爆破参数设计不合理

炸药类型与围岩不匹配(如高威力炸药用于软岩导致过度破碎),线装药密度过高引发超挖,过低则残留欠挖。周边孔间距过大或最小抵抗线设置不当,使光面爆破效果失效,轮廓线不平整。起爆时序错误(如周边孔与掏槽孔同时起爆),导致能量分布混乱,加剧超欠挖。不耦合系数选择失误,药包与孔壁间隙过大或过小,均会影响岩石破碎均匀性。现场试验参数未根据实际地质条件动态调整,套用经验值导致爆破效果与预期偏差。此外,雷管延期时间选择不当,使爆生气体作用时间不足,无法有效控制裂缝扩展方向。

2.5 施工管理体系缺陷

技术交底不彻底,施工人员对设计意图、超欠挖控制标准理解模糊,导致操作随意性大。质量检查流于形式,未建立超欠挖实时监测机制,问题发现滞后。工序衔接不畅,开挖与支护不同步,围岩暴露时间过长引发变形超挖。设备维护保养缺失,钻机、测量仪器带病作业,精度下降。人员培训不足,新入职工人未掌握钻孔、爆破关键技术,依赖经验施工。责任划分不明确,超欠挖整改责任未落实到个人或班组,导致问题反复出现。此外,进度压力过大时,为追求工期牺牲质量,人为放宽超欠挖控制标准,形成系统性管理漏洞^[2]。

3 隧道超欠挖的控制措施

3.1 优化爆破参数设计

爆破参数的精准设计是控制隧道超欠挖的核心环节。首先需根据围岩类别(I-VI级)动态调整炸药类型,软岩选用低爆速、低密度乳化炸药以减少过度破碎,硬岩采用高威力水胶炸药确保破碎效果。周边孔装药结构应采用不耦合间隔装药,通过空气间隔器或竹片控制药包与孔壁间距,使爆炸能量均匀释放,避免局部超挖。线装药密度需通过试验确定,硬岩控制在 $0.25\text{--}0.35\text{kg/m}$,软岩降至 $0.15\text{--}0.25\text{kg/m}$,同时确保孔口 $1.0\text{--}1.5\text{m}$ 范围不装药或弱装药,形成缓冲段。起爆时序采用毫秒延期雷管分段控制,周边孔滞后掏槽孔 $100\text{--}150\text{ms}$ 起爆,利用先爆孔产生的自由面引导后续爆生气体定向扩展,减少对保留岩体的扰动。孔网参数方面,周边孔间距应控制在 $40\text{--}50\text{cm}$,最小抵抗线与孔距比值(W/d)保

持 $0.8\text{--}1.0$,确保裂缝贯穿但不过度延伸。施工过程中需通过三维激光扫描实时反馈超欠挖数据,动态修正装药量、孔深及间距参数,形成“设计-实施-反馈-优化”的闭环控制体系。

3.2 提高测量放线精度

提高测量放线精度是控制隧道超欠挖的基础保障。需采用高精度全站仪(测角精度 $\leq 1''$,测距精度 $\leq 1\text{mm}+1\text{ppm}$)与激光导向系统组合,定期校准仪器参数,消除温度、湿度及气压对测量结果的影响。控制点应埋设于稳定基岩或专用测量墩上,采用强制对中装置减少人为对中误差(目标偏心距 $\leq 0.5\text{mm}$),并设置防护罩避免爆破冲击破坏。放样时严格执行“两人独立观测、数据互校”制度,中线偏差控制在 $\pm 3\text{mm}$ 以内,高程偏差 $\leq \pm 5\text{mm}$ 。针对隧道曲线段,需通过坐标正算与反算结合,精确计算各里程桩号的法线方向与切线方向,避免因曲线要素计算错误导致轮廓线偏移。引入BIM技术构建三维测量模型,将设计断面与实测数据动态对比,实时修正放样参数。此外,应建立测量数据追溯系统,记录每次放样的仪器状态、环境参数及操作人员信息,确保测量过程可复现、误差可追溯,为超欠挖责任认定提供数据支撑。

3.3 强化钻孔精度控制

强化钻孔精度是减少隧道超欠挖的关键环节。需选用高刚性液压钻机,配备自动垂直度校正系统,实时监测并调整钻杆倾角,确保钻孔偏斜率 $\leq 0.5\%$ 。钻孔前采用激光定位模板精确标记孔位,误差控制在 $\pm 2\text{mm}$ 以内,并通过三维坐标校核周边孔与掏槽孔的相对位置关系。操作人员应根据岩性变化动态调整钻进参数:软岩段降低转速($200\text{--}300\text{r/min}$)和推进压力($5\text{--}8\text{kN}$),硬岩段提高转速($400\text{--}500\text{r/min}$)并增大压力($10\text{--}15\text{kN}$),避免因参数失配导致孔位偏移。钻孔过程中需每 1m 测量一次孔深,使用电子测斜仪检测孔底偏移量,超差时立即纠偏。孔口应设置定位卡环,防止钻头摆动,同时采用高压风管及时清除岩粉,减少卡钻风险。建立钻孔质量追溯制度,记录每孔的深度、倾角及操作人员信息,对连续超差3次以上的钻机暂停使用,进行全面检修。通过标准化作业流程与实时数据监控,将钻孔精度误差控制在设计允许范围内,从源头减少超欠挖发生。

3.4 改进爆破技术与器材

改进爆破技术与器材是降低隧道超欠挖的重要手段。在爆破技术方面,推广数码电子雷管替代传统导爆管雷管,通过精确控制延期时间(误差 $\leq 1\text{ms}$)实现微差爆破,减少爆破振动对周边岩体的扰动,使轮廓面更平整。

针对软弱破碎围岩,采用预裂爆破与光面爆破复合技术,先施作预裂孔形成初始裂缝,再实施主爆孔爆破,有效控制超挖范围。同时,优化掏槽方式,根据断面大小选择直眼掏槽或楔形掏槽,确保掏槽眼深度与角度精准,为后续爆破提供稳定自由面。在爆破器材方面,研发低密度、低爆速的聚能管状炸药,通过定向聚能效应减少对保留岩体的损伤。推广使用可变密度装药结构,根据围岩硬度调整药卷密度,硬岩段采用高密度装药增强破碎能力,软岩段降低密度减少过度破碎。此外,引入智能装药设备,实现装药量、装药位置的精准控制,避免人工装药误差导致的超欠挖。通过技术升级与器材创新,形成适应不同地质条件的精细化爆破体系。

3.5 完善质量管理体系

完善质量管理体系是保障隧道超欠挖控制长效化的核心。需建立“三级质检”制度,即班组自检、技术员复检、质检工程师专检,每道工序验收合格后方可进入下一环节,确保超欠挖问题及时发现、闭环整改。引入信息化管理平台,通过三维激光扫描仪实时采集开挖断面数据,与BIM模型自动比对,生成超欠挖热力图,精准定位偏差区域并推送整改指令。制定分级考核机制,将超欠挖控制指标(如硬岩超挖 $\leq 10\text{cm}$ 、软岩欠挖 $\leq 5\text{cm}$)纳入班组绩效考核,对连续达标班组给予奖励,对超标班组进行处罚并停工培训。同时,建立超欠挖案例库,分类整理不同地质条件下的典型问题及处理方案,为后续施工提供参考。定期开展质量分析会,运用PDCA循环持续优化控制措施。强化全员质量意识,通过岗前培训、技术交底和现场实操考核,确保施工人员掌握超欠挖控制标准及操作要点。通过体系化、标准化管理,形成“事前预防、事中控制、事后改进”的全流程质量管控模式。

3.6 加强人员培训与考核

加强人员培训与考核是提升隧道超欠挖控制水平的关键。需针对测量工、爆破工、钻机操作手等关键岗位

制定专项培训计划,内容涵盖超欠挖标准、设备操作规范、地质判别技巧及应急处理措施。培训采用“理论+实操”模式,邀请行业专家授课,结合三维动画演示爆破原理,利用模拟隧道进行钻孔定位、测量放样等实操训练,确保人员熟练掌握关键技能。建立分级考核制度,考核内容分为理论考试(占比40%)与现场实操评估(占比60%),重点考察参数计算准确性、设备操作熟练度及问题处理能力。对考核不合格者实施“补考+跟岗学习”制度,连续两次不达标者调离关键岗位。同时,将超欠挖控制成效纳入员工年度绩效评价,对提出有效改进建议或避免重大超挖事故的人员给予奖励,激发主动优化意识。定期组织技能比武活动,通过限时钻孔、精准放样等竞赛项目,选拔技术能手并推广先进经验,形成“比学赶超”的良好氛围,全面提升施工队伍的专业素养与执行能力^[1]。

结束语

隧道超欠挖问题贯穿于施工全周期,其本质是地质条件、技术手段与管理效能的综合博弈。本文从围岩复杂性、测量误差、钻孔偏差、爆破失控及管理缺陷五方面剖析了成因,并针对性提出参数优化、精度提升、技术改进、体系完善及人员强化等控制路径。实践表明,超欠挖控制需以动态管理为原则,通过技术迭代与制度创新形成合力,既要利用智能监测、数码爆破等前沿手段提升作业精度,也需依托标准化流程与责任追溯机制强化过程管控。

参考文献

- [1]叶俊龙.浅谈市政隧道超欠挖原因分析及控制措施[J].福建建材,2021(05):54-56.
- [2]刘义,马斌.矿山法隧道超欠挖原因分析及控制措施[J].中国高新科技,2020(12):63-64.
- [3]杨柳,耿占勇,唐海军.隧道超欠挖原因分析及控制措施[J].价值工程,2021,36(32):170-171