

高海拔高地应力隧道光面爆破施工技术研究

许少辉¹ 杨连明¹ 吴家镇^{2,3} 江来^{2,3} 朱鑫杰^{2,3}

1. 中国水利水电第三工程局有限公司 陕西 西安 710000

2. 华能澜沧江水电股份有限公司 云南 昆明 650200

3. 华能澜沧江上游水电有限公司 西藏 昌都 854001

摘要：随着我国交通基建向西南山区等高海拔复杂地质区域推进，高海拔高地应力隧道工程日渐增多。光面爆破技术作为该类隧道施工的核心关键技术，对保障施工安全、控制成本、保护周边环境至关重要。本文以水电站相关隧道工程为背景，通过理论分析、数值模拟与现场试验，系统探究炮孔参数、装药结构、起爆顺序等关键影响因素并优化设计。结果表明，优化后的参数可有效控制隧道超欠挖、减少围岩扰动，提升施工效率与安全性，为同类工程光面爆破施工提供重要参考与实践指导。

关键词：高海拔；高地应力隧道；光面爆破；施工技术；参数优化

引言

我国交通建设持续推进，大量隧道需在高海拔、高地应力的复杂地质条件下修建。高海拔地区空气稀薄、气候恶劣，影响施工设备与人员效率；高地应力导致围岩稳定性差，开挖易引发坍塌、大变形等灾害，严重威胁施工安全并增加成本。光面爆破技术能有效控制开挖轮廓、减少围岩扰动，在该类隧道施工中应用价值显著，但传统参数与工艺需适配特殊地质环境优化。因此，深入研究其施工技术，对保障工程顺利实施具有重要现实意义。

1 高海拔高地应力隧道地质特征

高海拔高应力隧道具有区别于常规隧道的独特地质条件，深刻影响着光面爆破的实施效果：

高地应力与岩爆风险：受板块运动、区域构造挤压等影响，地应力（尤其是构造应力）显著高于低海拔区域，可能出现极高的切向应力或径向应力，埋深超过200m的隧道普遍存在水平构造应力集中现象，最大主应力可达30-45MPa。

在高地应力作用下，硬脆性岩体（英安岩）易发生岩爆（突发脆性破裂），表现为岩块弹射、声响，严重威胁施工安全。

高海拔环境效应：低气压导致炸药爆速下降5-8%，爆破能量利用率降低；低温使乳化炸药敏化不足，残孔率升高；低氧环境还制约着钻孔与装药作业效率，降低施工效率，间接增加围岩暴露时间，加大失稳风险。

地层与岩性复杂性问题：隧道位于青藏高原的东部，穿越竹卡断裂带，爆破后宜掉块甚至坍塌。地形地貌属高山地貌，呈现辽阔的高原面、高耸的山脉和深切河流。澜沧江河流侵蚀下切，多形成深切的高山“V”型

河谷，地势陡峻，区内两岸山顶高程多在4000m以上，河谷至山顶高差一般大于2000m，高山深切割区^[1]。

2 高海拔高应力隧道光面爆破影响因素分析

2.1 地质条件

岩石特性：岩石的硬度、脆性、弹性模量等力学性质对光面爆破效果影响显著。高海拔地区岩石受低温、冻融等作用，其力学性能可能发生变化。在高地应力条件下，岩石的初始应力状态也会影响爆破应力波的传播和岩体的破裂模式。例如，坚硬脆性岩石在爆破时更容易形成破碎块体，而较软岩石则可能产生较大的塑性变形，不利于光面爆破成型^[2]。

地质构造：断层、节理、裂隙等地质构造的存在会改变爆破应力波的传播路径，使爆破能量分布不均匀，导致岩体破碎情况复杂，增加超欠挖的可能性。在高地应力区域，地质构造面还可能成为围岩变形和破坏的薄弱部位，影响隧道的稳定性。

2.2 炮孔参数

炮孔间距：炮孔间距过大，爆破时两孔之间的岩体难以形成连续的破裂面，容易出现欠挖；炮孔间距过小，则会造成过度破碎，增加超挖量和炸药消耗。在高海拔高地应力隧道中，需要综合考虑岩石特性和地应力情况来确定合理的炮孔间距。

炮孔深度：炮孔深度直接影响爆破进尺。在高海拔地区，施工设备的工作效率可能降低，钻孔难度增大，需要根据设备性能和施工条件确定合适的炮孔深度。同时，炮孔深度还应考虑围岩的稳定性，过深的炮孔可能导致孔底围岩破碎严重，影响隧道成型^[3]。

炮孔角度：周边光爆孔的角度偏差会导致开挖轮廓

不规整，影响光面爆破效果。在高地应力条件下，炮孔角度的控制更为重要，因为角度偏差可能引发围岩局部应力集中，导致岩体过早破坏。

2.3 装药结构

不耦合系数：不耦合系数是指炮孔直径与药卷直径的比值。合理的不耦合系数能够使炸药爆炸产生的应力波在孔壁上的作用强度得到有效控制，避免孔壁过度破碎。在高海拔高地应力隧道中，应根据岩石性质和地应力大小确定合适的不耦合系数。

装药方式：周边光爆孔常采用间隔装药或空气柱装药方式，以降低炸药爆炸瞬间的能量释放，使爆破作用更加均匀。但在高海拔环境下，由于空气密度变化等因素，装药方式的效果可能受到影响，需要进行相应调整。

2.4 起爆顺序

合理的起爆顺序是光面爆破成功的关键之一。先起爆掏槽眼，为后续爆破创造自由面；然后起爆辅助眼，进一步扩大和修整爆破范围；最后起爆周边光爆孔，形成平整的开挖轮廓。在高地应力隧道中，起爆顺序不当可能引发围岩的过大变形和破坏，因此需要精确设计起爆顺序，并通过微差爆破技术控制起爆时间间隔，以减少爆破震动对围岩的影响^[4]。

3 光面爆破参数设计与优化

3.1 爆破试验

隧道施工现场开展光面爆破试验，依据理论计算与数值模拟结果制定方案。试验中记录炮孔参数、装药情况、起爆顺序，及爆破后的超欠挖数据、围岩损伤情况等。通过分析试验数据，验证理论与模拟结果准确性，进一步优化光面爆破参数。例如，现场发现部分地段按理论计算的炮孔间距出现欠挖，结合地质条件与爆破效果分析，适当减小间距后，爆破效果显著改善。

3.2 炮孔参数优化

周边孔设计：针对高应力脆性围岩，采用“密孔距、小抵抗线”原则：Ⅲ类围岩孔距45cm，抵抗线50~60cm，孔深2.5~3.0m；Ⅳ级围岩孔距35~45cm，抵抗线40cm，孔深1.5~2.5m。孔向偏差控制在1°以内，孔底偏差≤10cm，确保轮廓成型精度。

掏槽孔与辅助孔布置：掏槽孔采用楔形布置，孔深较周边孔深50cm，装药集中度提高20%（应对高地应力岩体硬度）；辅助孔按梅花形排列，边墙孔距×排距=60cm×42cm，拱部孔距×排距=90cm×50cm；底板孔按梅花形排列，孔距×排距=90cm×50cm，通过“多段微差”减少能量叠加。

3.3 炸药选型与装药结构

炸药选型：炸药根据岩性及地下水情况选用乳化炸药，起爆均采用数码电子雷管。

装药结构：周边孔采用空气间隔装药（间隔长度20cm），药卷直径φ25mm，线装药密度0.1~0.15kg/m；辅助孔和掏槽孔采用连续装药，药卷直径φ32mm，底部加强装药10%~15%，确保破岩效果。

3.4 起爆网络设计

爆破网络采用电子数码导报组成，串联连接，分8段起爆，起爆顺序如下：

掏槽眼（84-99），MS1、MS3；

辅助眼（52-67）、（68-83）、（100-115），MS5、MS7、MS9、MS11；

底板眼（116-138），MS9、MS11、MS13

周边眼（1-51），MS11、MS13、MS15；

最大单响药量控制≤20kg，确保爆破振动速度≤10cm/s。

4 高地应力调控技术

超前应力释放：在掌子面采用履带钻机钻孔，孔径130mm、孔深30m、孔距1.5~3m，掌子面中间的应力释放孔垂直与掌子面，周边的应力释放孔外插角为5~10°，应力释放孔30m为一个循环，必要时孔内注水软化岩体；应力释放孔应与爆破孔错开设置，应力释放孔孔径与爆破孔不符，不得作为爆破孔使用。

爆破损伤控制：强烈岩爆区采用浅孔爆破（进尺<1.5m）+掌子面和洞壁喷洒水+封闭掌子面+掌子面超前锚杆加固打应力释放孔+应力释放孔注水，单段药量≤18kg，爆破后立即喷水湿润岩面。

5 光面爆破施工工艺

5.1 施工准备

1) **测量放线：**采用高精度测量仪器，根据隧道设计图纸准确测量出隧道开挖轮廓线和炮孔位置，并做好标记。在高海拔地区，由于气温变化大，测量仪器的精度可能受到影响，因此需要定期对仪器进行校准和检查。

2) **设备选型与调试：**根据隧道施工条件和光面爆破要求，选择合适的钻孔设备、装药设备和起爆设备。在高海拔环境下，设备的性能会受到气压、气温等因素的影响，因此需要对设备进行特殊调试和维护，确保其正常运行。例如，为钻孔设备配备增压装置，以提高钻孔效率；为起爆设备采取保温措施，防止低温对其性能的影响。

3) **材料准备：**准备符合光面爆破要求的炸药、雷管、导爆索等爆破材料。在高海拔地区，爆破材料的储存和运输需要采取特殊的防护措施，防止其受潮、变质和受低温影响。例如，设置专门的保温库房储存爆破材

料，并采用保温运输车辆进行运输。

5.2 钻孔作业

1) 钻孔精度控制：孔位依据测量定出的中线、腰线及开挖轮廓线确定，严格控制钻孔的位置、角度和深度，确保炮孔符合设计要求。

周边孔应在断面轮廓线上开孔，沿轮廓线的调整范围和掏槽孔的孔位偏差不应5cm，其它炮孔孔位的偏差不得大于10cm；周边光爆孔开钻位置可根据围岩情况适当调整；对于较硬岩石可以在轮廓线上开钻；软岩可向内偏移（50~100）mm。掏槽孔较掘进孔深（150~200）mm，掘进孔（包括周边光爆孔孔深度）尽量落入同一个平面内，其炮孔深度误差控制在不超过±100mm；周边孔的外插角是控制超欠挖的关键，相邻两个钻爆循环形成的台阶尺寸因凿岩设备的不同而相差较大，应尽量减小形成的台阶尺寸，并控制其最大值不超过150mm。

2) 钻孔顺序：按照先掏槽眼、再辅助眼、后周边眼、最后底板眼的顺序进行钻孔。在钻孔过程中，要合理安排钻孔设备的移动路线，提高钻孔效率。同时，要注意避免相邻炮孔之间的相互干扰，防止出现串孔等问题。

5.3 装药与堵塞

1) 装药操作：按照设计的装药结构和装药量进行装药。周边孔采取空气间隔装药，将小药卷绑扎于竹片上，导爆索串接；其他炮孔采用连续装药方式。在装药过程中，要注意保护好导爆索和雷管，避免其受到损坏。在高海拔地区，由于空气稀薄，装药时要适当增加堵塞长度，以保证爆破效果。

2) 堵塞材料与方法：

堵塞材料及要求：堵塞材料采用水炮泥，堵塞时要确保堵塞材料密实，防止爆破气体泄漏，影响爆破效果。

堵塞长度：掏槽孔、崩落孔（包括底孔）堵塞长度不小于其最小抵抗线W，一般为炮孔长度的20%，但不小于400mm；周边光爆孔的堵塞长度不大于周边孔孔间距。

堵塞位置：掏槽孔、辅助孔（包括底孔）堵塞材料直接接触炮孔内炸药；周边光爆孔堵塞材料放置在炮孔口。

5.4 起爆作业

1) 起爆网络连接：采用数码电子雷管起爆网路，激发起爆网路采用起爆器。起爆点采用双发数码电子雷管，并将雷管的聚能穴用防水胶布包裹或两个雷管底部相对，每个起爆点连接不超过（18~20）根，并用防水胶布包裹严实，确保起爆点与炮孔引出导爆索的距离不小于200mm。

2) 起爆操作：在所有人员和设备撤离到安全区域后，按照设计的起爆顺序和起爆时间进行起爆。起爆过

程中要密切观察爆破效果，如发现异常情况，应及时采取措施进行处理。

6 施工监测与效果评估

6.1 施工监测

1) 围岩变形监测：在隧道施工过程中，通过布置全站仪、收敛计等监测仪器，实时监测围岩的变形情况，包括拱顶下沉、周边收敛等。根据监测数据，及时分析围岩的稳定性，判断光面爆破施工对围岩的影响程度。在高地应力区域，如发现围岩变形过大，应及时调整爆破参数或加强支护措施。

2) 爆破震动监测：采用爆破震动测试仪，监测爆破震动对周边围岩和建筑物的影响。根据相关规范和标准，控制爆破震动速度在允许范围内。通过分析爆破震动监测数据，优化起爆顺序和微差时间，减少爆破震动对围岩和周边环境的影响。

6.2 效果评估

1) 超欠挖评估：爆破后，采用全站仪等设备对隧道开挖轮廓进行测量，计算超欠挖量。根据设计要求和相关规范，评估光面爆破的超欠挖控制效果。如果超欠挖量超出允许范围，要分析原因并及时调整爆破参数。

2) 围岩完整性评估：通过观察爆破后围岩的破碎情况、节理裂隙发育程度以及声波测试等方法，评估围岩的完整性。良好的光面爆破效果应使围岩保持较好的完整性，减少爆破对围岩的损伤。

3) 经济效益评估：对比光面爆破施工前后的工程成本，包括炸药用量、支护材料用量、施工进度等方面的变化，评估光面爆破施工的经济效益。通过优化光面爆破参数和施工工艺，降低工程成本，提高经济效益。

结束语：高海拔高地应力隧道光面爆破施工技术研究，针对特殊环境核心难题，从参数设计、装药结构、施工工艺创新，构建适配技术体系。技术通过动态参数优化、复合装药结构创新及精细化施工，突破高海拔高地应力环境下光面爆破技术瓶颈。经多维度创新协同，实现爆破增效、围岩稳控与施工提速，为特殊地质隧道工程提供系统方案与理论实践支撑。

参考文献

- [1]刘海波.聚能水压光面爆破新技术在成兰铁路隧道施工中的应用分析[J].工程爆破,2017(1):81-84.
- [2]徐凤奎.隧道掘进水压爆破技术的研究与应用[J].铁道建筑技术,2003(4):62-63.
- [3]李庆斌.隧道掘进水压爆破技术及应用分析[J].铁道建筑技术,2013(4):99-102.
- [4]杨年华,张志毅.隧道爆破振动控制技术研究[J].铁道工程学报,2010,27(1):82-86.