

隧道衬砌防脱空技术研究

吕和章

中铁十一局集团第五工程有限公司

摘要：本研究聚焦于隧道建设中衬砌防脱空技术的提升。强调了控制爆破技术、初支施工工艺、防排水施工工艺及衬砌浇筑工艺等在隧道建设中保证衬砌质量重要性。研究突出了控制爆破参数、优化初支施工工艺、提升防排水施工质量、强化混凝土浇筑工艺来控制隧道衬砌缺陷的方法。目标是在保持高安全和质量标准的同时，减小劳动强度和消缺费用，提高隧道建设的经济效率。

关键词：高速铁路；隧道衬砌；防脱空技术；光面爆破；施工管理

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2024.06.016

引言

在高速铁路发展领域，隧道建设呈现独特挑战，尤其是在确保隧道衬砌完整性方面。本研究深入探讨了创新的防脱空技术，探索改进爆破技术和优化隧道衬砌工艺的方法。研究结果为提高建设效率和安全性提供了重要见解，这对高速铁路不断发展的基础设施至关重要。此研究不仅为该领域的技术知识做出了贡献，还强调了铁路隧道建设中精确性和质量的重要性。

一、高速铁路隧道衬砌脱空现象的调查与分析

随着高速铁路的广泛建设和使用，隧道是其中不可或缺的一部分，近几年来，高速铁路建设大部分位于山区、尤其是地质条件复杂的西南艰险山区。隧道的衬砌是保证隧道结构安全和稳定的重要组成部分，然而，由于工艺的限制和管理的困难以及和各种外部因素的影响，隧道衬砌脱空现象逐渐凸显，后期消缺成本巨大，危害铁路运营安全。

（一）隧道脱空现象的定义与识别

隧道衬砌脱空是指隧道衬砌背后不密实、脱落、空洞或破损的现象。这种情况可能会在隧道的不同部位出现，包括隧道拱部、隧道拱腰和边墙。识别隧道衬砌脱空通常依赖于目视检查、敲击声音以及现代技术等，如地质雷达、激光扫描和摄像机监控系统^[1]。脱空的识别非常关键，因为它可能导致隧道结构的不稳定性，甚至威胁到列车和乘客的安全。

（二）影响因素的全面评估

隧道衬砌脱空现象的发生受到多种因素的影响。地质条件在很大程度上决定了隧道的稳定性，不同地质条

件下可能导致不同程度的脱空现象。施工方法和爆破技术也可能对隧道衬砌的完整性产生重要影响。如果施工不当或爆破技术不合理、初支平整度差、衬砌浇筑工艺不合理，可能会导致衬砌脱空等缺陷。因此，我们需要全面评估这些因素，了解它们如何单独或共同作用，从而导致脱空的发生。

二、高速铁路隧道衬砌防脱空技术的优化与应用、创新对策

（一）加强光面爆破管理，为衬砌施工奠定基础

隧道爆破效果直接影响到隧道开挖以及后续工序的施工质量。提高隧道断面爆破成型效果既可以有效提高断面轮廓成型质量，改善初支平整度；又可以避免钢拱架背后脱空现象的产生；同时也可以通过提高断面轮廓成型质量，有效减少超挖引起的混凝土回填，避免了材料的浪费，具有极大的经济效益。

为保证光面爆破施工管理的落实，课题研究小组制定如下管理措施：

（1）优化光面爆破设计，根据爆破设计方案对所有开挖作业人员进行现场交底，明确各位置的炮眼角度、深度、间距以及装药量等爆破参数，让所有作业人员熟悉参数要求。

（2）为保证司钻人员钻孔施作质量，熟悉作业控制要点，研究小组专门制定司钻人员“定人、定位、定机、定质、定量”的管理要求，按照开挖台架构造，定人定点定量进行钻孔作业，同时针对每人作业位置进行针对性培训，并根据断面爆破效果进行点位分析调整优化，以达到各司其责，分工协作的目的。

（3）加强爆破效果检查评估，逐步优化爆破参数。隧道爆破参数不是一成不变的，要做到动态设计，每循环爆破后，由工点技术测量人员收集整理各项爆破数据，根据爆破断面测量结果进行爆破效果分析，提出改进措施，持续优化爆破成型质量。

（二）强化初支平整度，做好基础质量控制

初支平整度控制一直以来是隧道质量控制的关键点，作为后续防水层的施工基面，初支平整度将直接影响防水层施工质量；平整度控制不到位将会直接影响防水板铺设平顺性，导致防水板不能与初支基面密贴，极易造成防水板褶皱进而切割混凝土，或者防水板紧绷导致混凝土背后脱空。

由于目前喷射混凝土施工均采用湿喷机械手进行施工，操作手的施工技术水平直接影响初支平整度质量，常常会出现局部凹凸不平和拱架位置形成肋排的现象。为彻底解决初支平整度问题，研究小组组织对施工机械设备优化改装，在原有湿喷机械手上加装钢制初支刮板，通过安装在机械手喷头上的可遥控刮板，可有效地对喷射混凝土表面进行刮平处理，既避免人工处理高空作业的危险性，又提高了处理的灵活性和及时性，初支平整度得到了大幅提升。

通过加强初支平整度检查验收程序管理，强化了初支质量控制，严格卡控关键工序以及检查验收制度，确保符合规范要求后方可进入下道工序施工，为后续防水板铺设质量打好基础。

（三）防水板铺设质量控制，保证混凝土施工条件

防水板铺设施工过程中必须严格控制与基面的密贴性以及铺设松弛度，才能有效的预防衬砌脱空的发生。为保证防水板铺设质量，研究小组从防水板基面质量检查控制和防水板铺设质量两方面进行管控。

防水板基面质量控制：在仰拱施工前对初支全断面进行断面轮廓复核以及平整度检查，一方面通过断面复测确定衬砌混凝土浇筑方量，便于指导衬砌混凝土施工；另一方面通过检查断面超欠挖情况，对于断面轮廓复核，确保超欠挖全部处理完毕后方可进行下道工序施工。

防水板铺设质量控制：土工布铺设采用一体化热熔垫圈+专用射钉枪固定，热熔垫圈间距严格按照拱部不大于50cm、边墙不大于80cm进行控制。对于局部存在不顺段落以及预埋管道两侧进行加密布设。

防水板的铺设采用防水板铺挂台车，施工过程中控制防水板的松弛度。根据已打设的热熔垫圈位置使用电磁焊将防水板定位固定，同时严格控制热熔垫圈焊接质量，避免防水板脱焊引起拱部脱空。

（四）优化拱部带模注浆施工工艺，有效预防拱部混凝土脱空

带模注浆工艺：传统带模注浆工艺采用拱顶安装PVC管作为衬砌混凝土是否浇筑饱和判别手段，此工艺经实际使用效果并不理想，为保证隧道拱部注浆施工工艺的有效落实，提高拱部注浆质量，研究小组采用塑料排水板代替PVC管，采用RPC注浆管代替传统的PVC径向注浆管，进一步优化了拱部带模注浆施工工艺，大大提高了衬砌冲顶施工和带模注浆施工质量。

（1）塑料排水板预防拱部脱空施工工艺

采用塑料排水板代替传统PVC管的拱部带模注浆施工工艺可以有效的利用纵向塑料排水板来解决冲顶后

形成的真空气囊；并且通过观察塑料排水板外露端头排水溢浆变化情况可以直观判断冲顶饱满度，减小错判风险；同时可实现衬砌纵向通长排气溢浆，能有效避免因排气孔堵塞造成局部气囊形成的脱空；另外塑料排水板共设置5条，增大了拱部带模注浆排气范围，提高了防脱空范围，能有效避免衬砌拱部脱空。

（2）衬砌拱部带模注浆施工工艺

台车定位完成后将RPC注浆管插入台车顶部预留注浆孔，管头紧顶防水板。衬砌冲顶施工时，RPC注浆管亦可作为排气孔和溢浆孔使用，能有效控制冲顶混凝土饱满程度。

注浆顺序由标高最低端注浆孔向标高最高端注浆孔依次进行，注浆材料采用微膨胀灌浆料，施工过程中严格控制配合比，严禁为了注浆进度私自增大浆液流动性。注浆过程中，观察注浆管压力表和其他注浆孔溢浆情况，待注浆孔处压力达到0.2MPa时并持压5min后再次循环注浆2-3次，直到相邻注浆孔出现溢浆时关闭阀门停止该孔注浆，将注浆孔移至下一孔，直至注完所有孔。

（五）衬砌拱部防脱空综合系统

二衬拱顶设置压触式脱空传感器和防脱空压力报警、衬砌台车拱部增设插入式振捣器和可视化端头模板，为增强拱部混凝土浇筑、振捣质量，创新应用新型工艺工装；施工过程中根据以上设备再结合注浆管以及拱部塑料排水板溢浆情况相互验证，实现拱部混凝土饱满度的实时监控。

（1）拱部插入式振捣器预防拱部混凝土脱空

隧道衬砌冲顶施工采用的是单点压浆，传统附着式振捣器振捣效果有限，易造成拱部混凝土呈波形堆积形成拱部脱空，造成质量缺陷。为解决该类问题，于衬砌台车顶部加装自行式插入式振捣器对拱部混凝土深部进行充分振捣，提高混凝土的流动性的同时实现环向、纵向及厚度方向的振捣全覆盖，解决了衬砌拱部无法有效振捣的问题，有效提升拱部混凝土强度和密实度，有效的防止了拱部脱空。

（2）衬砌拱部防脱空综合系统有效的预防拱部脱空

衬砌拱部压浆施工的关键卡控点在于如何精准判断拱部各断面混凝土是否饱满，为此在引进衬砌台车时配备了防脱空压力报警系统、压触式脱空传感器、拱部可视化端头模板，防水板铺挂安装塑料排水板，以准确判断拱部混凝土灌满程度。

衬砌拱部逐孔冲顶施工中，可通过可视化端头模确认衬砌端头混凝土饱满度；通过防脱空压力报警、压触

式脱空传感器以及各注浆管溢浆情况判断对应断面混凝土冲顶饱和状态；最后再通过塑料排水板溢浆情况判断拱部混凝土饱满情况以及浮浆是否有效排出。

（六）严格落实“三量”对比提供数据支撑

隧道衬砌施工受喷射混凝土基面平整度、预留变形量、防水板铺设质量等因素影响，单一的按照设计量控制混凝土浇筑量，不能有效判定混凝土浇筑密实度，另因混凝土扩散度不足再加上衬砌钢筋较密，封顶时局部泵送压力不足导致混凝土泵送不到位，造成衬砌背后脱空，增设带模注浆施工工序，以保证拱顶混凝土密实度。

（1）严格落实“三量”对比提供数据支撑

断面成型后采用三维激光扫描进行断面复测，计算衬砌混凝土方量，为施工提供数据支撑，按照实测方量配足拌和材料确保浇筑连续，同时以计算量为依据控制混凝土施工，能有效避免冲顶误判造成的衬砌大面积脱空。

施工过程中确保实际浇筑方量不小于计算方量，在无任何外部因素影响的前提下，润管+管内预留方量+倒管损失方量为 $1\sim 3\text{m}^3$ ，具体情况根据现场施工情况确定。通过三量对比能够有效的防止拱部脱空，同时也能有效避免混凝土浪费。

（2）强化衬砌冲顶及带模注浆工序管理，提高拱部施工质量

①衬砌混凝土施工工序管理

衬砌混凝土浇筑施工采用由两侧进料口逐步浇筑至略低于台车拱部高度处，再由标高低端的拱部进料孔依次压注至饱满进行施工；施工过程中混凝土坍落度控制在 $210\sim 220\text{mm}$ ，以保证混凝土的和易性避免因引起堵管或者混凝土离析；衬砌拱部浇筑必须连续，在浇筑时必须保证混凝土的连续供应，现场至少有一辆罐车在等待，以防止突发事件导致混凝土中断。

②衬砌带模注浆施工工序管理

衬砌带模注浆施工采用由低端至高端依次注浆，以保证注浆的饱满度，注浆顺序控制能够有效的弥补冲顶混凝土不足从而导致的拱部脱空。



带模注浆

带模注浆

通过上述工艺的运用，隧道脱空缺陷大大减少，在工程实际中具有很强的意义。

三、隧道衬砌防脱空技术的其他创新对策

（一）技术对策的现状评估

隧道衬砌是高速铁路和其他交通基础设施中的重要组成部分，其稳定性对于系统的安全和可靠性至关重要。目前，隧道衬砌防脱空技术主要包括传统的衬砌设计、监测和维护方法。在实际应用中，隧道衬砌防脱空技术面临着一些问题和挑战。施工复杂性是一个重要问题。不同地质条件、隧道尺寸和交通荷载要求不同的防脱空方法，导致了技术的多样性和复杂性。成本效益也是一个挑战。

（二）创新技术与方法的探索

近年来，隧道衬砌防脱空技术领域出现了一系列创新技术和方法，旨在克服上述问题和挑战。其中之一是高效衬砌材料的开发。新型的材料，如高强度混凝土、纤维增强材料和聚合物衬砌，具有更好的耐久性和抗脱空性能，能够降低维护成本并延长隧道寿命^[4]。

结语

在高速铁路隧道建设中，防脱空技术的应用是确保隧道结构安全、稳定和可持续运营的关键环节。通过案例分析，我们深入了解了不同地理和地质条件下的防脱空技术选择和应用细节，以及这些技术在实际工程中的效果和挑战。这些经验教训为未来的高速铁路隧道建设提供了有益的指导。随着科技不断进步，我们可以期待更多创新技术和方法的出现，以进一步提高隧道衬砌的稳定性、安全性和环保性。防脱空技术的不断发展将为高速铁路交通的可靠性和可持续性作出重要贡献，确保旅客和货物的安全快速运输。

参考文献

- [1] 魏斌, 李涌, 张品. 高速铁路隧道衬砌防脱空全过程实时监测技术[J]. 铁道建筑技术, 2022, (11): 131-135.
- [2] 张朗. 高速铁路隧道衬砌防脱空技术研究[J]. 建筑技术开发, 2018, 45(16): 93-94.
- [3] 严申华, 邹嘉炜, 陈美鹏等. 断层错动对高速铁路隧道衬砌结构受力变形特性的影响研究[J]. 价值工程, 2023, 42(34): 133-135.
- [4] 朱君, 赵东平, 和琦. 岩溶弱发育地层隧道衬砌水压规律及结构安全性研究[J]. 铁道勘察, 2023, 49(05): 137-142+157.