

水利水电工程隧洞衬砌裂缝原因分析及处理

唐 瑞

中国水利水电第四工程局有限公司 青海 西宁 810000

摘 要：水利水电工程隧洞衬砌裂缝是影响结构安全与耐久性的常见病害。本文系统梳理了隧洞衬砌裂缝的类型分类，从设计、施工、温度、地质及运行期五个维度深入剖析裂缝产生原因，详细阐述表面封闭、灌浆修补、凿槽嵌缝、预应力锚固等处理技术的适用条件与工艺要点，并通过表格对比分析各方法的优缺点。从设计优化、施工管控、温度调节及运行维护四个方面提出裂缝防控措施。研究表明，裂缝成因复杂多样，需综合诊断、精准施策，为同类工程裂缝治理提供技术参考。

关键词：水利水电工程；隧洞衬砌；裂缝成因；处理技术；质量控制

引言：水利水电工程中，隧洞衬砌作为围岩支护与防渗的重要结构，其完整性直接关系到工程安全与运行寿命。然而，由于设计、施工、材料及运行环境等多因素影响，衬砌裂缝问题普遍存在。裂缝不仅削弱衬砌承载能力，还可能导致渗漏、钢筋锈蚀、冻融破坏等次生病害，严重时威胁工程整体稳定。当前，裂缝成因复杂多样，处理技术各具特点，如何准确识别裂缝类型、分析产生原因、选择合理的处理方案，已成为工程技术人员关注的重点。

1 隧洞衬砌裂缝类型分类

1.1 按成因分类

按成因可将隧洞衬砌裂缝分为荷载裂缝、变形裂缝、材料裂缝与施工裂缝四类。荷载裂缝由围岩压力、内外水压力等引起，当衬砌应力超过抗拉强度时产生，常见于地质复杂或水位变化剧烈洞段。变形裂缝源于围岩不均匀沉降、蠕变或膨胀岩遇水膨胀，分布规律性不强，常伴随衬砌局部错动。材料裂缝包括干缩裂缝、自收缩裂缝及碱骨料反应裂缝，与配合比、水泥品种及骨料性质相关。施工裂缝因浇筑工艺不当、振捣不密实、养护不到位或拆模过早产生，多呈蜂窝状或龟裂状分布。

1.2 按形态分类

按形态特征可将裂缝分为纵向、环向、斜向及网状四种。纵向裂缝沿轴线延伸，多出现在隧洞顶部或底部，因围岩压力不均或衬砌底部脱空导致弯曲拉裂，宽度由中心向两端减小。环向裂缝垂直于轴线，发生于施工缝附近或地质突变处，由温度应力、混凝土收缩或围岩纵向不均匀变形引起。斜向裂缝与轴线呈夹角，反映衬砌承受剪应力或扭转载荷，需重点关注扩展趋势^[1]。网状裂缝呈不规则网格状分布，由塑性收缩、干缩或碳化收缩引起，宽度小但分布密集，影响耐久性。

1.3 按深度分类

按深度可将裂缝分为表面裂缝、深层裂缝与贯穿性裂缝三类。表面裂缝局限于表层混凝土，深度不超过钢筋保护层厚度，宽度通常小于0.3毫米，虽不直接危及结构安全，但可为有害介质提供通道，长期可能诱发钢筋锈蚀。深层裂缝延伸至内部，超过保护层但未贯穿全断面，可能触及受力钢筋，削弱衬砌承载能力。贯穿性裂缝完全穿过全断面，形成贯通通道，是最危险的一类，严重削弱结构整体性，引发渗漏，导致水量损失、扬压力升高及钢筋锈蚀加速，必须及时妥善处理。

2 隧洞衬砌裂缝产生原因分析

2.1 设计因素

设计因素是隧洞衬砌裂缝产生的源头性原因。衬砌厚度不足、配筋率偏低或钢筋布置不当，导致承载能力无法满足实际荷载要求。围岩分类与荷载取值偏差，使设计荷载低于实际围岩压力，衬砌在超载作用下开裂。衬砌断面形式不当，如高跨比不适宜，产生应力集中。伸缩缝与沉降缝间距过大或构造不合理，无法有效释放温度应力与不均匀沉降变形。此外，回填灌浆设计不完善造成衬砌背后脱空，改变受力状态，易在脱空区产生弯拉裂缝。

2.2 施工因素

施工因素在裂缝成因中占有较大比重。混凝土配合比不当是最常见问题，水灰比过大增加干缩，水泥用量过高加大水化热。浇筑工艺方面，振捣不密实产生蜂窝麻面，分层间隔过长形成冷缝，坍落度过大产生塑性收缩裂缝。模板变形或移位导致衬砌厚度不均、受力截面改变。养护措施不到位使混凝土表面干缩开裂，温差过大时未保温引发温度裂缝。拆模过早使混凝土强度不足以承受自重，产生早期裂缝^[2]。

2.3 温度因素

温度因素是隧洞衬砌裂缝的重要诱因。水泥水化热使混凝土内部温度升高,因导热性差形成内高外低温度场,内外温差超过25℃时表面拉应力超限产生裂缝。环境温度影响显著,隧洞进出口段受气温变化影响大,温度变形受围岩约束产生温度应力。浇筑温度过高加剧水化热温升,过低延缓强度发展。施工期遭遇寒潮时,混凝土表面温度急剧下降,内外温差迅速增大,易引发表面温度裂缝。

2.4 地质与围岩因素

地质与围岩因素是衬砌裂缝的客观条件。围岩不均匀沉降与变形是最常见问题,隧洞穿越不同岩性接触带或断层破碎带时,变形模量差异导致衬砌差异变形开裂。断层、软弱夹层等不良地质体使围岩完整性降低,施加不均匀压力。高外水压力产生弯曲拉应力,侵蚀性地下水腐蚀混凝土降低抗拉强度。高地应力下围岩塑性变形或岩爆产生较大压力。膨胀岩遇水膨胀,对衬砌施加持续发展的膨胀压力。

2.5 运行期因素

运行期因素是裂缝产生与扩展的长期作用力。内水压力周期性变化使衬砌承受反复加卸载,易产生疲劳裂缝。外水压力随水位升高或排水堵塞而增大,衬砌承受反向荷载。运行期水温与气温季节性变化引起温度变形,受约束时产生温度应力。地震荷载使衬砌承受附加动力荷载,已有裂缝可能扩展贯通。邻近洞室开挖产生的爆破振动会扰动围岩,导致衬砌开裂。运行期检修频繁、荷载变化等长期因素均可诱发裂缝。

3 隧洞衬砌裂缝处理技术

3.1 表面封闭法

表面封闭法适用于宽度小于0.2毫米的非结构性表面裂缝。该方法的原理是在裂缝表面涂刷封闭材料,形成连续封闭膜,阻止水分及有害介质渗入裂缝内部。常用封闭材料包括环氧树脂涂料、聚氨酯涂料、丙烯酸酯涂料及聚合物水泥基防水涂料等。环氧树脂涂料粘结强度高、耐化学腐蚀性好,适用于干燥环境;聚氨酯涂料弹性好、可适应裂缝微量变形,适用于有变形要求的部位。施工工艺包括基面清理、裂缝干燥、底涂涂刷、面层涂覆及养护等工序,涂刷遍数一般为2至3遍,每遍间隔4至6小时。该方法施工简单、成本低廉、不影响衬砌外观,但无法恢复结构承载能力,耐久性相对较差,需定期检查维护,适用于非重要部位或临时性处理。

3.2 灌浆修补法

灌浆修补法是通过压力将浆液注入裂缝内部,填充

裂缝空隙,恢复衬砌整体性与防渗能力,是处理结构性裂缝的主要方法。按灌浆材料不同分为化学灌浆与水泥灌浆两类。化学灌浆采用环氧树脂或聚氨酯等低粘度浆液,可注入0.1毫米以上的微细裂缝,环氧树脂浆液粘结强度高、收缩小,适用于干燥环境下的受力裂缝;聚氨酯浆液遇水发泡膨胀,具有良好亲水性,适用于有水环境或活动裂缝。水泥灌浆采用超细水泥浆液,适用于宽度大于0.2毫米的裂缝,浆液结石体强度高、耐久性好、成本低廉。施工流程包括裂缝清理、注浆嘴埋设、裂缝封闭、压力注浆及注浆效果检查。灌浆压力一般控制在0.2至0.5兆帕,注浆顺序由下向上、由宽向窄。该技术能有效恢复结构整体性,防渗效果优良,但对施工工艺要求较高^[3]。

3.3 凿槽嵌缝法

凿槽嵌缝法适用于宽度大于5毫米的表面裂缝,通过在裂缝位置开凿沟槽后嵌入密封材料,达到封闭裂缝、防止渗漏的目的。施工工艺流程包括:沿裂缝走向开凿U形或V形槽,槽深一般为裂缝深度的1.5至2倍,槽宽根据深度确定,通常为30至50毫米;清除槽内浮灰与松动颗粒,保持槽壁干燥洁净;涂刷界面剂增强粘结;嵌入密封材料并压实抹平。常用密封材料有聚合物水泥砂浆、环氧砂浆、聚硫密封胶及聚氨酯密封胶等,聚合物水泥砂浆价格低廉、施工方便,环氧砂浆粘结强度高、收缩小,聚硫密封胶弹性好、耐老化。该方法施工简单、成本低、适应裂缝变形能力强,但仅能封闭裂缝表面,无法恢复结构内部整体性,适用于非受力裂缝或渗漏处理,对于深层裂缝需与其他处理方法配合使用。

3.4 预应力锚固法

预应力锚固法是通过衬砌施加预应力来抵消裂缝处拉应力,阻止裂缝继续扩展,适用于受力裂缝及变形尚未稳定的裂缝。该方法在裂缝两侧布置锚固点,通过张拉预应力筋对衬砌施加压应力,使裂缝闭合。施工工艺包括钻孔、锚固段制作、预应力筋安装、张拉锁定及防腐保护等环节。锚固材料可选用高强钢筋、钢绞线或碳纤维板,张拉力根据裂缝宽度、衬砌厚度及受力条件确定。该方法能够主动控制裂缝发展、恢复结构承载能力,适合处理宽度较大、受力明确的裂缝。但施工复杂、成本较高,对钻孔定位精度要求严格,需配备专业张拉设备,且锚固点处需进行防腐处理,适用于重要工程的关键部位裂缝处理,通常在灌浆处理完成后再进行预应力锚固,以增强处理效果。

3.5 各种处理方法的对比分析

不同裂缝处理方法在适用条件、施工难度、经济性

及处理效果方面存在显著差异，工程中应根据裂缝具体情况合理选择。下表对五种常用处理方法进行了系统对比。

表1 各种处理方法的对比

处理方法	适用裂缝宽度	适用裂缝类型	施工难度	防渗效果	耐久性	经济性
表面封闭	< 0.2mm	表面非结构性	低	一般	较差	优
化学灌浆	0.1 ~ 1.0mm	结构性/微细	中	优	优	良
水泥灌浆	> 0.2mm	结构性	中	良	良	优
凿槽嵌缝	> 5mm	表面宽裂缝	低	良	中	优
预应力锚固	不限	受力裂缝	高	优	优	差
衬砌套衬	不限	严重劣化	高	优	优	差

从上表可以看出，表面封闭与凿槽嵌缝施工简便、经济性好，但处理深度有限，适用于非受力表面裂缝；化学灌浆与水泥灌浆能够深入裂缝内部，恢复结构整体性，是处理结构性裂缝的核心技术，其中化学灌浆对微细裂缝适应性更强；预应力锚固处理效果最彻底，但施工难度大、成本高，适用于重要工程的关键裂缝。实际工程中，多种方法往往组合使用，如先灌浆修复再表面封闭，或先凿槽嵌缝再预应力加固，以达到最佳处理效果。

4 裂缝预防与控制措施

4.1 设计阶段

设计阶段是裂缝预防的首要关口。合理选择衬砌结构形式与断面尺寸，根据围岩条件进行精细化计算，确保足够承载能力与安全储备。准确进行围岩分类与荷载取值，对不良地质段采取加强设计。科学设置伸缩缝与沉降缝，岩基隧洞缝间距取6至12米，设置止水带确保防渗。优化配筋设计，提高温度钢筋配筋率，在应力集中区增设构造钢筋。完善回填灌浆设计，确保衬砌与围岩密贴避免脱空。对复杂洞段进行围岩加固设计，如系统锚杆、喷混凝土等。采用低热水泥并控制胶凝材料用量，从源头降低温度裂缝风险^[4]。

4.2 施工阶段

施工阶段是裂缝控制的关键环节。严控混凝土配合比，选用低水化热水泥，控制水灰比不大于0.45，掺加粉煤灰及减水剂，减少水泥用量降低水化热。规范浇筑工艺，分层分块浇筑，层厚30至50厘米，确保振捣密实。加强模板管理，保证刚度与平整度。严格控制拆模时间，不低于设计强度70%。做好施工缝处理，凿毛清洗并涂刷界面剂。重视回填灌浆质量，确保衬砌背后密实。建立全过程质量管控体系，每道工序检查验收，发现问题及时处理，将裂缝消除于萌芽状态。

4.3 温度控制

温度控制是防止温度裂缝的核心措施。降低混凝土浇筑温度，夏季采用冰水拌和、骨料预冷，控制浇筑温度不超过28℃。控制水化热温升，采用低热水泥，掺加粉煤灰，每立方米水泥用量控制在300千克以下。实施通水冷却，埋设冷却水管，控制内外温差不超过25℃。加强表面保温，拆模后及时覆盖保温材料。合理安排浇筑时间，避开高温季节与寒潮天气。控制入仓温度与浇筑速度，避免仓面暴露过长。建立温度监测系统，对混凝土内外温度实时监测，为温控调整提供依据。

结束语

水利水电工程隧洞衬砌裂缝成因复杂，涉及设计、施工、温度、地质及运行期等多方面因素，各类裂缝往往相互交织、多重因素叠加作用。裂缝处理需要根据裂缝类型、宽度、深度及受力状态，综合选用表面封闭、灌浆修补、凿槽嵌缝、预应力锚固等技术，通常采用多种方法组合以取得最佳效果。随着新材料、新工艺不断发展，智能监测与自修复技术将成为未来裂缝治理的重要方向，为隧洞工程安全运行提供更可靠保障。

参考文献

[1]陈乃或,苏志新,王成山,等. 水工隧洞混凝土衬砌裂缝主要原因及预防措施[J]. 东北水利水电,2023,41(2):60-63.

[2]李翔宇,李军,王海军,等. 长期服役长隧洞衬砌裂缝分布规律与仿真分析[J]. 水利水电技术(中英文),2023,54(1):108-118.

[3]李海洋.引水隧洞衬砌混凝土裂缝原因及对策措施技术[J].工程技术发展, 2022,3(4):26-28.

[4]王浩宇,李鹏飞,聂鼎. 水工隧洞衬砌混凝土多尺度开裂机理及防裂技术研究进展[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2024,43(12):27-40.