

岩石隧洞埋石回填衬砌施工技术

陈咏梅 严馥萱

中国水利水电第十一工程局有限公司, 河南 郑州 450000

[摘要]在水利水电、公路及市政工程的岩石隧洞施工中,受开挖方法、岩石破碎程度等因素影响,隧洞开挖断面常出现轮廓不规则、空腔数量多且与设计尺寸偏差大等问题;传统采用定制钢拱架、加焊支撑副拱并配合空腔混凝土浇筑的处理方式,存在施工周期长、材料消耗大、支护体系整体性不足等缺陷。为此,提出岩石隧洞埋石回填衬砌施工技术,集成“锚喷联合支护+空腔毛石回填+空腔水泥灌浆”三大核心工艺:以系统锚杆、钢拱架与钢筋网片组成初期柔性支护骨架,及时约束围岩变形;利用开挖弃渣中符合粒径要求的毛石回填岩面与钢拱架之间的空腔,实现不规则断面的找平与密实填充;再对回填露面进行喷锚封闭,并以纯压式灌浆使水泥浆液充填毛石间隙、毛石与钢拱架及岩面的接触面等各类空隙,形成致密团结体,从而构建兼具柔性及刚性的复合支护体系。

[关键词]岩石隧洞;埋石回填;复合支护;回填灌浆;围岩变形控制;绿色施工

DOI: 10.33142/ec.v9i10.20530

中图分类号: U455.91

文献标识码: A

Construction Technology of Buried Stone Backfill Lining for Rock Tunnel

CHEN Yongmei, YAN Fuxuan

Sinohydro Bureau 11 Co., Ltd., Zhengzhou, He'nan, 450000, China

Abstract: In the construction of rock tunnels in water conservancy, hydropower, highway, and municipal engineering, problems such as irregular contours, a large number of cavities, and large deviations from design dimensions often occur in tunnel excavation surfaces due to factors such as excavation methods and rock fragmentation degree; The traditional method of using customized steel arches, welded support arches, and combined with cavity concrete pouring has defects such as long construction period, high material consumption, and insufficient integrity of the support system. To this end, the construction technology of rock tunnel buried stone backfill lining is proposed, integrating three core processes of "anchor spraying combined support+cavity rubble backfill+gap cement grouting": using system anchor rods, steel arches, and steel mesh to form an initial flexible support skeleton, timely restraining the deformation of surrounding rock; Fill the cavity between the rock surface and the steel arch with rubble that meets the particle size requirements from excavation waste, to achieve leveling and dense filling of irregular sections; Then, spray anchor sealing is applied to the backfilled surface, and pure pressure grouting is used to fill various gaps such as the gaps between the rubble, the contact surface between the rubble and the steel arch, and the rock surface with cement slurry, forming a dense consolidated body, thus constructing a composite support system that combines flexibility and rigidity.

Keywords: rock tunnel; backfilling with buried stones; composite support; backfilling grouting; rock deformation control; green construction

引言

在水利水电、公路、市政等工程建设中,隧洞往往是控制工期与投资的关键性工程,其支护质量直接关系到施工安全与工程长期稳定运行^[1-3]。目前,岩石隧洞的支护形式主要有素混凝土或钢筋网片混凝土喷锚支护、锚杆支护、钢拱架(钢格栅)联合支护以及混凝土衬砌支护等。其中,钢拱架(钢格栅)联合支护因承载能力强、对复杂

围岩适应性好,在断层破碎带、节理裂隙发育等不良地质段应用最为广泛。

然而,受开挖方法、岩石破碎程度及地质条件变化等因素影响,隧洞开挖轮廓往往难以与设计断面吻合,常出现断面不规则、超挖量大,钢拱架与岩面之间形成大量形状各异、大小不一的空腔,严重时还会诱发塌方、冒顶等安全事故^[4,5]。针对此类问题,工程中多采用定制钢拱架、

钢拱架加焊支撑副拱并配合空腔混凝土浇筑的方式进行处置,但存在三方面明显弊端:一是工序繁琐、施工周期长,难以在围岩暴露的短时间内形成稳定支护结构,安全风险突出;二是钢材与混凝土消耗量大、加工安装复杂,处理费用居高不下;三是支护体系整体性不足,钢拱架与岩面之间难以密实接触,支护效果难以达到设计预期。

鉴于此,笔者所在单位依托津巴布韦卡里巴南岸扩机项目,通过理论分析、室内试验与现场实践验证,研发形成了岩石隧洞埋石回填衬砌施工技术,并获得国家发明专利(专利号:ZL202210273640.4)。该技术为不规则断面隧洞支护提供了一套高效、经济、安全且环保的技术方案。本文介绍该技术的原理、关键工艺参数、创新点及工程应用效果,以期类似工程提供参考。

1 技术背景与总体思路

1.1 工程背景与主要难题

以津巴布韦卡里巴南岸扩机项目 10.8km 交通隧洞为例,隧洞穿越区域地质条件复杂,岩石破碎严重、节理裂隙发育,开挖后岩面凹凸不平,钢拱架安装后与岩面之间形成大量形状各异、大小不一的空腔,局部空腔深度超过 1.0m。此类空腔若采用传统混凝土浇筑回填,需支设大量

模板,且混凝土收缩易在拱顶形成脱空,密实性难以保证;若采用加焊副拱的方式处理,则需大量切割、焊接作业,加工周期长且高处作业风险大。综合来看,该类工程面临三方面核心难题:一是开挖断面不规则,支护结构与围岩难以密贴;二是工序繁杂,围岩暴露时间长、安全风险高;三是钢材与混凝土消耗量大、工程成本高,且开挖弃渣排放带来较大的环保压力。

1.2 总体技术思路

针对上述难题,提出“锚喷联合支护+空腔毛石回填+空腔水泥灌浆”的复合支护技术思路(见图 1):首先以系统锚杆、钢拱架与钢筋网片紧密配合,构建柔性初期支护骨架,及时约束围岩变形;其次利用开挖弃渣中符合粒径要求的毛石回填岩面与钢拱架之间的空腔,对不规则断面进行找平与密实填充;随后对回填露面进行喷锚处理,实现对支护工程的封闭;最后采用纯压式灌浆工艺,将水泥浆液高压注入,使浆液充分充填毛石之间的空隙以及毛石与钢拱架、岩面的接触面,形成致密、坚固的固结体。通过“柔性支护-刚性固结”的协同作用,实现初期支护与后期固结的紧密衔接,从而在保证施工安全的前提下实现优质、经济、环保的施工目标。

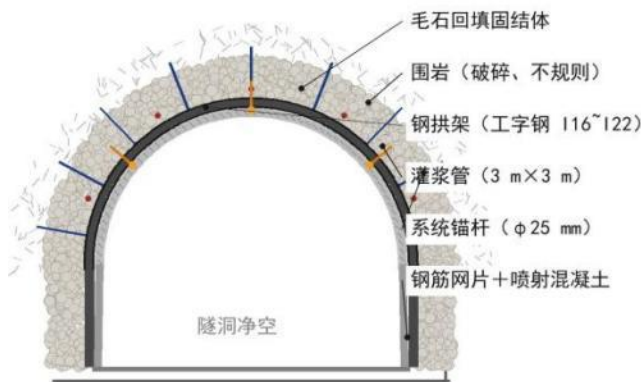


图 1 岩石隧洞埋石回填复合支护体系横断面示意

2 关键技术

2.1 复合衬砌支护体系构建技术

复合支护体系由锚喷联合初期支护、空腔毛石回填和空腔水泥灌浆三部分组成,各部分协同受力(见图 2)。施工时,先按设计间距施作系统锚杆并安装钢拱架,在钢拱架内侧铺设钢筋网片,使锚杆、钢拱架与钢筋网片形成稳固的初期支撑骨架,为隧洞提供初步安全防护并有效约束围岩变形;钢拱架安装就位后,利用符合规格要求的毛

石填充岩面与钢拱架之间形成的空腔,实现对不规则断面的找平与填充,增强支护结构的密实性;随后对毛石回填露面进行喷锚处理,达到封闭支护工程的目的;最后进行纯压式灌浆,使浆液充分填充各结构间隙,包括毛石之间的空隙、毛石与钢拱架及岩面的接触面等,最终形成致密、坚固的固结体。该体系实现了初期支护与后期固结的紧密衔接,各工艺环节协同作用,显著提升了支护结构的整体稳定性与承载能力。



图2 初期支护施工：(a) 钢拱架安装；(b) 锚杆施工

2.2 精准化施工控制技术

为确保复合支护体系各组成部分精准匹配、协同工作，需制定标准化的施工流程并明确各环节的技术参数。锚杆选用 $\Phi 25\text{mm}$ 高强度螺纹钢，按 $2\text{m} \times 2\text{m}$ 梅花形布置，使锚杆支护力均匀分布，有效发挥锚固作用；其中顶拱锚杆长 4.5m ，以保证对顶拱围岩的深层锚固，侧墙锚杆长度根据围岩地质条件取 $2 \sim 3\text{m}$ ，实现针对性支护。钢拱架选用 I16~I22 工字钢，其型号综合考虑隧洞跨度、围岩压力等因素选定，间距控制在 $0.8 \sim 1.5\text{m}$ ，并通过 $\Phi 25\text{mm}$ 纵向钢筋将各榀钢拱架焊接固定，形成连续的支撑体系。毛石粒径严格控制在 $150 \sim 300\text{mm}$ ，既保证毛石之间紧密贴合，又为水泥浆液流动预留充足间隙。灌浆管按 $3\text{m} \times 3\text{m}$ 间距均匀布设，灌浆压力保持在 $0.2 \sim 0.3\text{MPa}$ ，在此压力范围内既能保证浆液充分扩散填充，又可避免压力过大对初期支护结构造成破坏。通过对各施工参数的精准把控，实现了支护结构各部分的良好契合，保障了整个支护体系的协同受力性能。

2.3 高效灌浆工艺技术

灌浆是复合支护体系形成致密固体的关键环节，本技术采用“径向由低向高、纵向分环间隔”的灌浆顺序。径向由低向高灌浆，利用浆液自身重力作用使浆液自底部逐步向上填充，避免出现底部浆液不足、顶部空洞的问题；纵向分环间隔灌浆，可有效防止相邻灌浆孔间的浆液相互干扰，保证每一环、每一个灌浆区域都能得到充分填充。同时，配合纯压式灌浆作业，使水泥浆液在毛石间隙中均匀扩散、充分渗透。为解决灌浆过程中空气无法排出导致的灌浆不密实问题，灌浆前专门预埋排气孔，确保灌浆过程中空气顺利排出，使浆液能够完全填充所有空隙，大幅提升固结体的整体强度与密实度，保障支护结构的长期稳定性（见图3）。

3 技术创新点

3.1 支护体系创新

突破传统衬砌形式的局限，首创“锚喷-毛石回填-灌浆”复合支护模式，实现了柔性支护与刚性固结的有机结

合。锚喷支护具有良好的柔性，能够适应围岩的微小变形，充分发挥围岩自身的承载能力；毛石回填与灌浆形成的刚性固结体则为隧洞提供坚固的支撑结构。两者协同作用，使支护体系兼具柔性性与刚性双重优势，有效解决了不规则断面隧洞支护结构不稳定、易变形的行业难题，为复杂地质条件下的隧洞支护提供了新的技术路径。



图3 空腔回填施工：(a) 钢筋网片安装；(b) 毛石回填

3.2 工艺优化创新

对施工工艺进行全面优化升级，实现各工序的无缝衔接与高效推进。通过优化灌浆顺序和施工流程，避免了传统施工中工序交叉干扰、流程混乱等问题，显著提升施工效率。在喷锚支护环节，创新采用速凝剂“后添加”方式，精确控制混凝土初凝时间不超过 5min 、终凝时间不超过 15min ，既保证了混凝土在喷射过程中的工作性能，又能使喷射混凝土层快速凝结硬化，大幅缩短围岩暴露时间，减少围岩因长时间暴露而发生风化、剥落、坍塌的风险，显著提升施工过程的安全性（见图4）。



图4 封闭与固结施工：(a) 喷锚施工；(b) 回填灌浆

4 应用效果

4.1 质量控制效果

应用本技术后，支护结构整体性强，固结体抗压强度不小于 30MPa ，灌浆密实度合格率不低于 98% ；隧洞衬砌完工后经检测，断面尺寸偏差不超过 $\pm 50\text{mm}$ ，满足相关标准要求，未出现渗漏、开裂等质量问题。在已完工项目的长期运营监测中，亦未出现渗漏、开裂、变形等质量问题，充分验证了本技术的可靠性和先进性。

4.2 安全效果

标准化的安全施工流程和完善的安全防护措施，确保了作业人员的人身安全和施工设备的运行安全。在应用本

技术的项目中,围岩暴露时间控制在 24h 以内,均实现了“零重伤、零死亡”的安全管理目标,作业人员的安全防护意识和施工安全管理水平得到显著提升,为隧洞支护施工提供了坚实的安全保障。

4.3 节能减排与环保效果

节能方面,通过毛石替代部分混凝土和钢材,有效减少了高能耗建材的使用量。开挖弃渣得到资源化利用,工程建设与生态环境保护实现协同发展,契合绿色施工与“双碳”发展要求。

4.4 经济效益

直接经济效益方面,通过材料回收利用、工艺优化等举措,工程成本得到有效控制:材料成本较传统工法降低 20%,施工周期缩短 15%,相应减少了人工工资、设备租赁费用、管理费用等间接成本支出。以津巴布韦卡里巴南岸扩机项目 10.8km 交通隧洞为例,采用本工法后累计节约工程投资约 284 万元。间接经济效益方面,优质的支护质量大幅减少了隧洞运营期间的维修养护费用;施工效率的提升使项目得以提前投产运营,尽早产生经济效益,如津巴布韦卡里巴南岸扩机项目采用本技术后提前 1 个月完工,新增发电量带来了可观的间接收益。此外,工程质量的提升还增强了项目运营的安全性和可靠性,减少了因工程质量问题导致的停运损失。

5 推广应用前景

本技术适用于水利水电、公路、市政等多个领域的各类围岩条件隧洞衬砌支护,尤其适用于围岩暴露时间要求短、支护封闭快的隧洞施工。目前,已通过笔者单位的技术推广平台在国内外多个水利水电项目和公路隧道项目中推广应用。随着绿色施工理念的深入推进和基础设施建设的持续发展,本技术在节能减排、成本控制和安全保障方面的优势将更加突出,可创造更大的经济、社会和环境效益。

6 结语

(1) 提出并实践了“锚喷联合支护+空腔毛石回填+空隙水泥灌浆”的岩石隧洞埋石回填衬砌施工技术。通

过系统锚杆、钢拱架与钢筋网片构建柔性初期支护骨架,以毛石回填实现不规则断面的找平与填充,再以纯压式灌浆形成致密固结体,构建了兼具柔性与刚性的复合支护体系,实现了初期支护与后期固结的紧密衔接。

(2) 明确了主要施工技术参数:锚杆 $\phi 25\text{mm}$ 、 $2\text{m} \times 2\text{m}$ 梅花形布置,顶拱长 4.5m、侧墙 2~3m;钢拱架采用 I16~I22 工字钢、间距 0.8~1.5m;毛石粒径 150~300mm;灌浆管按 $3\text{m} \times 3\text{m}$ 布设,灌浆压力 0.2~0.3MPa。工程实践表明该参数体系合理可行。

(3) 工程应用结果表明:固结体抗压强度不小于 30 MPa,灌浆密实度合格率不低于 98%,衬砌断面尺寸偏差不超过 $\pm 50\text{mm}$;材料成本降低 20%~30%,施工周期缩短约 15%;围岩暴露时间控制在 24h 以内,应用工程均实现“零重伤、零死亡”。

(4) 该技术将开挖弃渣中的合格毛石直接资源化利用,水泥、钢材消耗量较传统方法减少 25%以上,弃渣排放量与 CO_2 排放量显著降低,契合绿色施工与“双碳”发展要求,具有广阔的推广应用前景。

[参考文献]

- [1]中国冶金建设协会.岩土锚杆与喷射混凝土支护工程技术规范 GB 50086—2015[S].北京:中国计划出版社,2015:2-3.
- [2]江苏人民出版社.水工建筑物地下开挖工程施工规范 SL378—2007[S].北京:中国水利水电出版社,2007:1-2.
- [3]招商局重庆交通科研设计院有限公司.公路隧道设计规范 第1部分:土建工程 JTG 3370.1—2018[S].北京:人民交通出版社,2018:2-3.
- [4]关宝树.隧道工程施工要点集[M].北京:人民交通出版社,2011.
- [5]王梦恕.中国隧道及地下工程修建技术[M].北京:人民交通出版社,2010.

作者简介:陈咏梅(1977—),毕业于河海大学水利水电工程专业,当前就职于中国水利水电第十一工程局有限公司,主管,高级工程师。