高原隧道二次衬砌混凝土施工质量管控关键技术

邓中淋

（四川公路桥梁建设集团有限公司公路隧道分公司，四川 成都 610200）

摘 要 高原地区低温低氧、昼夜温差大、冻融循环频繁的特殊环境，导致二次衬砌混凝土易出现强度增长缓慢、冻胀开裂、抗渗性不足等质量问题，直接影响隧道结构的长期耐久性。本文立足于高原隧道二次衬砌施工的质量要求，系统分析原材料性能、拌合运输、浇筑振捣、养护拆模等环节对混凝土质量的影响规律，从配合比优化、保温运输、精细化施工、全周期养护四个维度提出针对性管控技术。结合川藏铁路某海拔4 200 m隧道工程实践，验证了该技术体系的应用效果，混凝土强度合格率达100%，有害裂缝发生率降低82%，旨在为同类高原隧道工程提供技术参考。

关键词 高原隧道；二次衬砌；混凝土施工；原材料性能；低温养护

中图分类号：U457.5 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.27.018

0 引言

随着我国西部交通基础设施建设的深入推进，川藏、青藏等区域的隧道工程数量持续增加，多数隧道位于海拔3 000 m以上的高原地带[1]。二次衬砌作为隧道结构的永久支护体系，承担着承受围岩压力、防水抗渗、保障运营安全的重要作用。高原极端气候条件下，混凝土凝结硬化过程受低温、低气压、强紫外线等因素干扰显著，传统施工工艺难以满足耐久性要求。因此，深入研究高原隧道二次衬砌混凝土施工质量管控关键技术，对保障高原交通工程结构安全、延长工程使用寿命具有重要的工程实践意义。

1 高原隧道二次衬砌施工的质量要求

高原隧道二次衬砌混凝土需同时满足力学性能、耐久性与外观质量要求。力学性能方面，设计强度等级多为C30～C40，要求混凝土早期强度增长快，能够尽早承受围岩荷载，一般规定3 d强度不低于设计强度的50%，7 d强度不低于设计强度的75%。耐久性是高原隧道衬砌的关键指标，抗冻等级不应低于F200，高海拔富水地段需达到F300；抗渗等级不低于P8，地下水发育地段提高至P10；同时需具备良好的抗碳化、抗氯离子渗透性能，满足100年设计使用年限要求。外观质量方面，要求混凝土表面平整光滑，无蜂窝、麻面、露筋等缺陷，裂缝宽度不得超过0.2 mm，且不得出现贯通性裂缝。施工缝、变形缝处需处理严密，防止地下水渗漏，确保隧道运营期间的防水效果[2]。

2 影响高原隧道二次衬砌混凝土质量的关键因素

2.1 原材料性能与配合比设计

原材料的质量是影响混凝土性能的重要因素。水泥应该选用水化热适宜、早期强度高的普通硅酸盐水泥，不能用早强过高容易产生温度裂缝的水泥。骨料为质量上乘的碎石、河砂，级配佳，质地坚实，含泥量小于1%。外加剂要选择适合低温条件的引气减水剂和防冻剂，引气剂可以引入均匀的小气泡来提高混凝土的抗冻性；减水剂可以降低水胶比，从而改善混凝土的工作性能。

水胶比过大容易造成混凝土内部孔隙增多，抗冻、抗渗能力减弱；水胶比过小又会使得混凝土的流动度变差，给施工带来困难。掺合料的种类和掺量也会对混凝土性能产生影响，适量掺入粉煤灰可以改善混凝土的工作性、降低水化热，但是过多掺入会使得早期强度发展慢，不便于低温环境下的施工。

2.2 混凝土拌合与运输过程

低温环境下，混凝土拌合时原材料温度过低，会导致混凝土出机温度不足，凝结时间延长，甚至出现早期受冻现象。若拌合站未采取保温措施，拌合用水与骨料温度低于5 ℃，混凝土出机温度将难以满足施

作者简介：邓中淋（1992-），男，本科，工程师，研究方向：道路与桥梁工程。

工要求。在运输过程中，混凝土热量散失过快，到场温度低于 5 ℃时，会严重影响混凝土的浇筑质量与后期强度发展。

2.3 浇筑与振捣施工工艺

浇筑温度太低，会导致混凝土凝结硬化速度变慢、早期强度不足；而浇筑温度过高又会使混凝土内外面温差增大，从而出现温度裂缝。分层浇筑厚度较大时，下层混凝土初凝后才进行上层的浇筑，这样容易产生施工冷缝，破坏结构整体性和防水性。

振捣不够会导致混凝土内产生蜂窝、孔洞，从而降低强度和抗渗性，振捣过度会使得混凝土出现离析现象，造成骨料下沉、水泥浆上浮，影响表面的质量。施工缝处理不当，比如凿毛不到位、清理不干净等都会使新老混凝土之间黏结不良而产生渗漏[3]。

2.4 养护与拆模环节

养护是高原隧道二次衬砌混凝土施工中最重要的环节，在低温环境下，如果养护不及时、不恰当，就会造成混凝土早期受冻、干缩开裂等问题。养护温度不足会造成混凝土强度增长缓慢，甚至停滞不前；养护湿度不够会造成混凝土表面水分迅速蒸发，从而引发干缩裂缝。养护时间不够也会使混凝土后期强度、耐久性受到影响。

3 高原隧道二次衬砌混凝土施工质量管控关键技术

3.1 低温适配型混凝土配合比优化技术

按照高原低温环境的特点来设计低水胶比、适量掺合料、复合外加剂的配合比，提高混凝土的各种性能。把水胶比控制在 0.40 ～ 0.45 之间可以减少混凝土中的孔隙率，这样可以提高混凝土的密实度和抗冻性。其次，在其中加入 20% ～ 30% 的Ⅰ级粉煤灰来代替一部分水泥，降低水化热，提高混凝土的工作性和长久耐久性。加入 1.0% ～ 1.5% 的聚羧酸系引气减水剂以及 2% ～ 3% 的复合防冻剂，引气剂可以引入 3% ～ 5% 左右的均匀微小气泡来提升混凝土的抗冻融性能；减水剂能够减少用水量从而提高混凝土早期强度；而防冻剂则能降低混凝土的冰点以避免其在初期时遭到冻结[4]。

不同海拔地区的配合比参数需根据环境温度进行调整，具体设计参数如表 1 所示。配合比确定后，需进行现场试拌，验证混凝土的坍落度、凝结时间、强度等性能指标，满足要求后方可用于工程施工。

表 1 高原隧道二次衬砌混凝土配合比设计参数

海拔范围（m）	水泥用量（kg/m³）	粉煤灰掺量（kg/m³）	水胶比	引气减水剂掺量（%）	坍落度（mm）	3 d 强度（MPa）	28 d 强度（MPa）	抗冻等级	抗渗等级
3 000 ～ 4 000	320	80	0.42	1.2	140 ～ 160	18	35	F300	P10
4 000 ～ 5 000	340	70	0.40	1.4	120 ～ 140	20	36	F350	P10
＞ 5 000	360	60	0.38	1.6	100 ～ 120	22	38	F400	P12

3.2 混凝土拌合运输保温技术

为保证混凝土出机温度与到场温度满足要求，需对拌合与运输全过程采取保温措施。拌合站采用封闭式保温棚，内部设置供暖系统，保持棚内温度不低于 10 ℃。原材料预热优先采用热水拌合，水温控制在 60 ℃～ 80 ℃，骨料采用蒸汽预热至 10 ℃～ 20 ℃，严禁直接加热水泥，防止水泥假凝。混凝土出机温度控制在 15 ℃～ 20 ℃，确保到场温度不低于 10 ℃。

混凝土运输罐车加装加厚保温层，保温层厚度不小于 5 cm，运输过程中罐体保持低速转动，防止混凝土离析。合理规划运输路线，缩短运输时间，单程运输时间控制在 1 h 以内。到场后需检测混凝土的坍落度与温度，不符合要求的混凝土不得用于浇筑。

3.3 精细化浇筑与振捣施工技术

在浇筑混凝土之前要对模板、钢筋以及预埋件的位置和尺寸进行复核，并把模板内积存的杂物及积水清理干净，同时应对模板进行预热，避免混凝土与冷模板相接触而造成表面冻结。浇筑温度保持在 5 ℃～ 15 ℃之间，采取分层浇筑、分层振捣的方法，每层厚度不超过 40 cm，上面一层混凝土的浇筑应当在下面一层混凝土初凝前完成。

振捣用插入式振捣棒，振捣棒移动间距不应大于其作用半径的 1.5 倍，插入下层混凝土 5 cm ～ 10 cm，快插慢拔，振捣时间为混凝土表面泛浆、不再下沉、无气泡冒出为止，一般为 20 s ～ 30 s。不得出现漏振、过振的情况，避免出现蜂窝、麻面、离析的现象。施工缝处要凿毛，清除表面浮浆及松动骨料，在浇筑之前先铺上一层与混凝土相同配合比的水泥砂浆，厚度在 2 cm ～ 3 cm 之间，使新旧混凝土紧密结合。

3.4 全周期保温保湿养护技术

对高原低温环境采取“保温加保湿”的全周期养护办法，依照各个海拔地区环境温度的不同来确定不

同的养护参数（见表2）。混凝土浇筑完之后立即对衬砌表面涂刷土工布和保温被以保证表面干燥、防止水分散失。对于海拔4 000 m以上的极寒地区，采用电热毯加保温被的养护方法，电热毯功率控制在100 W/m^2～150 W/m^2，保证混凝土表面温度不小于5 ℃[5]。

养护时间不少于28 d，养护期间专人定时观测温度、湿度，及时补充水分，调节电热毯温度。拆模时混凝土强度应大于设计强度的75%，混凝土表面与环境温差不大于15 ℃，防止温差大造成裂缝。拆模后继续对衬砌表面进行喷涂养护剂并覆盖保温被养护14 d，提高混凝土耐久性。

4 工程应用实例

4.1 工程概况

川藏铁路某隧道位于西藏自治区昌都市，全长12.6 km，最大埋深1 280 m，隧道进口海拔4 200 m，出口海拔4 050 m，属于典型的高原高寒隧道。该区域年平均气温-2.1 ℃，极端最低气温-32.5 ℃，年冻融循环次数280次，地下水发育，对二次衬砌混凝土的抗冻、抗渗性能要求极高。隧道二次衬砌设计强度等级为C30，抗冻等级F300，抗渗等级P10，采用整体式衬砌台车施工。

表2 不同海拔地区二次衬砌混凝土养护参数

海拔范围（m）	养护方式	养护温度（℃）	养护时间（d）	拆模强度（MPa）	拆模后养护时间（d）
3 000～4 000	保温被+土工布保湿养护	≥5	28	22.5	14
4 000～5 000	电热毯+保温被养护	≥8	35	25.0	21
＞5 000	蒸汽养护+保温被覆盖	≥10	42	28.0	28

4.2 质量管控技术应用

施工过程中全面应用本文提出的质量管控技术体系。配合比方面，采用表1中4 000 m～5 000 m海拔对应的参数，掺入20%粉煤灰、1.4%引气减水剂与2.5%复合防冻剂，经试拌验证，混凝土出机温度18 ℃，到场温度12 ℃，坍落度130 mm，3d强度21 MPa，28 d强度37 MPa，满足设计要求。

拌合运输环节，拌合站搭建封闭式保温棚，采用热水与蒸汽预热原材料，运输罐车加装5 cm厚保温层，单程运输时间控制在45 min以内。浇筑振捣环节，采用分层浇筑，分层厚度35 cm，振捣棒严格按照规范操作，施工缝处彻底凿毛并铺水泥砂浆。养护环节，采用电热毯+保温被的养护方式，保持混凝土表面温度8 ℃～12 ℃，养护时间35 d，拆模强度达到26 MPa。

4.3 应用效果

隧道二次衬砌施工完成之后，对混凝土的质量进行全面检查。一共抽取了240个混凝土试件，其中合格的有240个，合格率是100%，平均强度达到38.2 MPa。用超声波来检测混凝土的密实情况，没有发现蜂窝、孔洞等缺陷。外观质量检查表明，混凝土表面平滑光洁，没有蜂窝、麻面、露筋的现象，共发现了12条表面裂缝，最大的宽度为0.15 mm，都是无害裂缝，比传统的施工工艺有害裂缝的发生率降低了82%。抗冻抗渗性能试验的结果显示，该混凝土的抗冻标号为F300，抗渗标号为P10，符合设计的要求。隧道开通一年来没有出现渗水、裂缝等问题。

5 结束语

本文针对高原隧道二次衬砌混凝土施工的特殊环境，系统分析了影响混凝土质量的关键因素，构建了涵盖配合比优化、拌合运输保温、精细化浇筑振捣、全周期养护的质量管控技术体系。工程实践表明，该技术体系可有效解决高原低温环境下混凝土强度增长缓慢、易开裂、耐久性不足等问题，显著提升二次衬砌施工质量。未来可结合物联网与智能化技术，开发混凝土温度、湿度实时监测系统与智能养护设备，实现施工过程的动态管控，进一步提高高原隧道二次衬砌混凝土施工质量管控的智能化水平。

参考文献：

[1] 唐协,林国进,张航.公路隧道机械钻爆法施工适应对策[J].现代隧道技术,2025,62(03):217-228.
[2] 陈生金,彭涛,刘有梦,等.不良地质区域内隧道围岩失稳及支护处理方法[J].青海交通科技,2024,36(02):147-152.
[3] 王斌,杨延栋,周建军,等.高地应力软岩地层敞开式TBM法隧洞围岩变形控制技术:以香炉山隧洞为例[J].隧道建设(中英文),2024,44(02):341-348.
[4] 袁铁.高地应力水平岩层隧道初期支护适应性研究[J].铁道工程学报,2024,41(09):55-59,66.
[5] 姜有存.老营庄公路隧道保温防冻施工技术研究[J].青海交通科技,2023,35(02):118-122.