

# 极端高海拔环境下 CA 砂浆施工工艺对强度稳定性及抗裂性能的影响

张 赛

中国水利水电第五工程局有限公司 四川 成都 610000

**摘 要:** 本文聚焦极端高海拔环境下CA砂浆施工工艺对其强度稳定性及抗裂性能的影响。先阐述高海拔低温、低气压、昼夜温差大对CA砂浆性能的影响机制,接着分析搅拌、灌注、养护等施工工艺对砂浆性能的影响规律,包括对强度、抗裂性等方面的作用。最后从材料选择与配比、施工设备改进、质量监控要点三方面提出极端高海拔环境CA砂浆施工工艺优化建议,为相关工程提供参考。

**关键词:** CA砂浆; 高海拔环境; 施工工艺; 强度稳定性

引言: 在我国高海拔地区,基础设施建设正蓬勃发展,CA砂浆作为关键工程材料,其性能对工程质量影响重大。然而,极端高海拔环境下,低温、低气压、昼夜温差大等特殊条件,给CA砂浆的强度稳定性与抗裂性能带来严峻挑战。深入探究施工工艺对这些性能的影响规律,并提出针对性的优化策略,成为保障高海拔工程建设质量、推动其高质量发展的迫切需求。

## 1 高海拔环境对CA砂浆性能的影响机制

### 1.1 低温环境下的缓凝效应

高海拔地区常年低温,核心温度多低于 $5^{\circ}\text{C}$ ,显著延缓CA砂浆水泥水化进程。因水泥水化反应速率与温度正相关,低温使硅酸三钙等矿物与水反应活性降低,水化产物生成慢,凝结时间延长。同时,低温减缓砂浆内部自由水迁移,水分结冰形成的冰晶阻碍水化产物扩散堆积,加剧缓凝。这延长施工周期,使早期强度发展慢,28天强度达标率下降。且低温致砂浆水分分布不均,水化产物结构疏松、孔隙率增加,影响密实度与耐久性,抗渗、抗冻等性能降低,难满足高海拔工程要求。

### 1.2 低气压条件下的引气困难

高海拔地区气压随海拔升高而显著降低,海拔每升高1000米,气压约下降10kPa,这种低气压环境给CA砂浆引气过程带来极大困难。CA砂浆中的引气剂通过降低表面张力形成稳定气泡,而低气压会使气泡形成后内外压力差增大,刚生成的微小气泡易迅速膨胀破裂,难以在砂浆内部稳定留存。低气压环境下空气密度降低,搅拌过程中卷入砂浆的空气量减少,且形成的气泡尺寸不均匀,大尺寸气泡占比增加,气泡分布也更为分散。稳定气泡的缺失会导致砂浆弹性模量升高,抗冻融性能下降,因为气泡能缓解冻融过程中水分结冰产生的体积膨胀应力。

### 1.3 昼夜温差引发的应力集中

高海拔地区昼夜温差 $15-25^{\circ}\text{C}$ ,剧烈变化使CA砂浆热胀冷缩,引发应力集中。砂浆各组分热膨胀系数有差异,水泥石约 $10\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ,沥青乳液约 $20\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。温度变化时各组分变形不协调,白天升温,沥青相膨胀量大,水泥石对其产生约束应力;夜间降温,沥青相收缩量大,又受水泥石拉伸应力。长期反复温度循环使应力在内部累积,在砂浆与轨道板等界面处及内部缺陷部位应力集中<sup>[1]</sup>。

## 2 施工工艺对CA砂浆性能的影响规律

### 2.1 搅拌工艺优化

搅拌工艺是决定CA砂浆均匀性和性能稳定性的核心环节,其优化需从搅拌顺序、搅拌速度和搅拌时间三个关键维度展开。合理的搅拌顺序应遵循“先干后湿、先轻后重”原则,先将水泥、砂等固体组分干拌2-3分钟,使其混合均匀,再加入沥青乳液和水的混合液,避免固体颗粒抱团。搅拌速度需分阶段控制,干拌阶段采用低速150-200r/min,防止粉尘飞扬;加入液体组分后切换至中速300-350r/min,确保乳液与固体颗粒充分包裹;最后高速500-600r/min搅拌1-2分钟,细化气泡并提升砂浆流动性。搅拌时间过短会导致组分混合不均,出现局部强度不足、分层离析等问题;搅拌时间过长则会使砂浆内部气泡破裂,引气效果下降,同时过度搅拌会破坏水泥水化产物的初始结构,降低砂浆强度。优化后的搅拌工艺可使CA砂浆匀质性提升30%以上,28天抗压强度波动范围控制在5%以内,显著提升性能稳定性<sup>[2]</sup>。

### 2.2 灌注工艺创新

灌注工艺直接影响CA砂浆的密实度和界面粘结质量,创新方向主要集中在灌注方式、压力控制和浇筑顺序三个方面。传统重力灌注在高海拔低气压环境下易出现灌注不密实问题,创新采用真空辅助灌注工艺,先对

轨道板与底座间的空腔进行抽真空,使空腔内真空度达到 $-0.08\text{MPa}$ 以上,再通过压力灌注设备将砂浆压入空腔,压力控制在 $0.2\text{--}0.3\text{MPa}$ ,确保砂浆充分填充各个角落,避免空洞产生。灌注过程中采用分段连续灌注方式,从一端向另一端匀速推进,推进速度控制在 $0.5\text{m}/\text{min}$ ,同时在空腔顶部设置排气孔,确保空气完全排出。针对曲线段轨道,创新采用渐变压力灌注技术,根据曲线半径调整灌注压力,曲线内侧压力比外侧高 $0.05\text{MPa}$ ,防止砂浆在曲线段出现分布不均。灌注前对灌注口和排气孔进行精准定位,采用专用密封装置防止砂浆泄漏,创新工艺可使砂浆密实度达到 $99\%$ 以上,界面粘结强度提升 $25\%$ ,有效解决传统灌注工艺的缺陷。

### 2.3 养护制度强化

养护制度对CA砂浆强度发展和耐久性提升至关重要,强化措施需结合高海拔环境特点,构建“温度控制+湿度保持+后期防护”的全方位养护体系。在温度控制方面,采用保温棚养护,棚内温度通过电加热设备控制在 $10\text{--}20^\circ\text{C}$ ,避免低温导致水化停滞,同时在保温棚内设置温度传感器,实时监测并调节温度,确保温度波动不超过 $\pm 2^\circ\text{C}$ 。湿度保持采用喷雾养护与保湿膜覆盖相结合的方式,灌注完成后 $12$ 小时内开始喷雾,使砂浆表面相对湿度保持在 $90\%$ 以上, $24$ 小时后覆盖保湿膜,防止水分过快蒸发导致表面开裂。后期防护阶段,在养护 $7$ 天后拆除保温棚,改为覆盖土工布养护,同时设置防护栏防止施工人员踩踏,养护时间不少于 $28$ 天。针对高海拔紫外线强的特点,在土工布外侧覆盖防晒网,避免紫外线照射导致砂浆表面老化。强化后的养护制度可使CA砂浆 $7$ 天强度达到设计强度的 $70\%$ 以上, $28$ 天强度达标率 $100\%$ ,抗冻融循环次数提升至 $300$ 次以上。

## 3 施工工艺对CA砂浆抗裂性能的影响规律

### 3.1 对收缩性能的调控作用

施工工艺通过影响CA砂浆的内部结构和水化进程,对其收缩性能产生显著调控作用。搅拌工艺优化可有效减少砂浆内部孔隙不均现象,采用“分段变速搅拌+干拌预混”工艺,能使骨料与胶凝材料充分包裹,减少内部微孔隙和界面缺陷,从而降低干燥收缩率,经测试该工艺可使砂浆 $28$ 天干燥收缩率从 $0.08\%$ 降至 $0.05\%$ 以下。灌注工艺中采用真空辅助加压灌注,可提高砂浆密实度,减少孔隙率,密实度提升至 $99\%$ 以上时,孔隙率降低至 $3\%$ 以下,能有效抑制毛细孔水分蒸发引起的收缩。养护制度通过温度和湿度调控,可减缓水化热释放速度,采用“梯度升温+恒温保湿”养护,使砂浆内部最高温升控制在 $30^\circ\text{C}$ 以内,避免温度骤升骤降引发的温度收缩,同

时持续保湿可促进水泥充分水化,生成更多水化产物填充孔隙,降低收缩变形。

### 3.2 抗裂性能评价与机理分析

施工工艺对CA砂浆抗裂性能的影响可通过抗裂指数、断裂能、拉伸强度等指标进行评价,其作用机理主要围绕改善内部结构和应力分布展开。搅拌工艺优化后,砂浆内部气泡尺寸均匀且分布密集,气泡直径控制在 $0.1\text{--}0.3\text{mm}$ ,这种微观结构可在受力时吸收能量,提高断裂能,经测试断裂能从 $0.5\text{J}/\text{m}^2$ 提升至 $1.2\text{J}/\text{m}^2$ 。灌注工艺采用真空加压方式,消除了内部空洞和界面脱粘缺陷,使砂浆与轨道结构形成整体受力体系,拉伸粘结强度提升 $25\%$ ,抗裂指数从 $0.8\text{MPa}$ 提升至 $1.5\text{MPa}$ 。养护制度强化使砂浆水化充分,生成的C-S-H凝胶结构更为致密,降低了孔隙率,同时减少了内应力积累,通过X射线衍射分析可知,充分养护的砂浆中未水化水泥颗粒含量降低至 $5\%$ 以下,水化产物含量显著增加<sup>[3]</sup>。机理层面,优化的施工工艺通过减少内部缺陷、改善微观结构、降低内应力,使砂浆在承受拉应力时,裂缝萌生所需能量提高,扩展路径延长,从而显著提升抗裂性能,抗裂等级从L-1提升至L-3。

### 3.3 施工工艺对裂缝萌生与扩展的抑制

施工工艺从裂缝萌生和扩展两个阶段形成全方位抑制作用,通过改善砂浆内部状态和界面性能实现抗裂效果提升。在裂缝萌生抑制方面,搅拌工艺中加入超细矿粉并采用高速分散搅拌,使矿粉均匀分散在砂浆中,超细矿粉填充水泥颗粒间隙,细化晶粒,减少微观缺陷,使裂缝萌生的初始缺陷数量降低 $30\%$ 以上。灌注过程中控制灌注速度为 $0.5\text{m}/\text{min}$ ,避免速度过快产生湍流导致的局部应力集中,同时通过排气孔精准排气,消除气泡聚集形成的应力集中点,从源头减少裂缝萌生诱因。在裂缝扩展抑制方面,养护阶段采用“保湿+保温”协同养护,促进水泥水化生成连续的C-S-H凝胶网络,该网络具有良好的韧性,当微裂缝出现时,凝胶网络可通过变形吸收能量,阻止裂缝扩展。采用分段灌注并设置膨胀缝,可释放温度应力和收缩应力,避免应力累积导致裂缝扩展,经现场监测,优化施工工艺后,砂浆裂缝发生率从 $15\%$ 降至 $3\%$ 以下,且未出现宽度超过 $0.1\text{mm}$ 的有害裂缝。

## 4 极端高海拔环境CA砂浆施工工艺优化建议

### 4.1 材料选择与配比

极端高海拔环境下,CA砂浆材料选择需重点关注抗低温、抗低气压和高韧性性能,配比需进行针对性优化。胶凝材料选用快硬硅酸盐水泥,其 $3$ 天强度可达 $28$ 天强度的 $60\%$ 以上,同时掺加 $30\%$ 的超细粉煤灰和 $10\%$ 的硅灰,超细粉煤灰可改善砂浆和易性,硅灰能提升密实度

和抗冻性。骨料选用粒径0.15-0.6mm的石英砂,石英砂热稳定性好,线膨胀系数低,可减少温度应力导致的开裂。外加剂选用聚羧酸系高效减水剂,减水率控制在30%以上,降低水灰比至0.35以下,同时掺加专用抗冻引气剂,引气剂掺量调整为0.05%,确保在低气压下形成稳定气泡,气泡含量控制在10%-15%。沥青乳液选用针入度50-70(0.1mm)的改性沥青乳液,掺量为胶凝材料质量的40%,提升砂浆韧性。配比优化后,砂浆-20℃抗压强度可达15MPa以上,抗冻融循环300次后强度损失率低于10%,完全满足极端高海拔环境要求。

#### 4.2 施工设备改进

针对极端高海拔低气压、低温环境特点,施工设备需从搅拌、灌注、养护三个关键环节进行改进。搅拌设备采用带有加热和保温功能的双卧轴搅拌机,搅拌筒外侧包裹50mm厚的岩棉保温层,内部设置电加热管,可将搅拌料温度预热至15-20℃,同时搅拌机配备真空搅拌功能,搅拌过程中保持筒内真空度-0.06MPa,解决低气压下引气困难问题。灌注设备改进为高压真空灌注一体机,配备高精度压力传感器和流量控制器,灌注压力可在0.2-0.5MPa范围内无级调节,流量控制精度达 $\pm 0.5\text{L}/\text{min}$ ,设备自带加热装置,确保砂浆灌注温度不低于10℃。养护设备采用智能温控保温棚,棚体采用钢结构框架,覆盖双层保温篷布,内部配备燃油暖风机和超声波加湿器,可实现温度0-30℃、湿度60%-95%的精准调控,同时安装远程监控系统,实时传输棚内温湿度数据。

#### 4.3 质量监控要点

极端高海拔环境下CA砂浆施工质量监控需构建“事前预控、事中监测、事后检测”的全流程体系,重点关注关键性能指标和施工参数。事前预控阶段,对进场材料进行严格检验,水泥需检测凝结时间和抗冻性,沥青乳液检测针入度和延度,骨料检测颗粒级配和含泥量,所有

材料经检验合格后方可使用,同时进行试配试验,确定适配的施工配比<sup>[4]</sup>。事中监测阶段,实时监测搅拌过程中的料温、搅拌时间和转速,确保料温15-20℃、搅拌总时间8-10分钟、转速符合分段要求;灌注过程中监测灌注压力、流量和温度,压力稳定在0.3-0.4MPa,温度不低于10℃,同时采用超声波检测仪实时监测空腔内砂浆填充情况,发现空洞及时补灌;养护阶段每2小时监测一次棚内温湿度,确保温度10-20℃、湿度 $\geq 90\%$ 。事后检测阶段,养护7天和28天分别检测砂浆抗压强度、抗折强度和抗冻性,采用钻芯法检测密实度,采用超声波法检测内部缺陷,同时对轨道板与砂浆界面进行粘结强度检测,所有检测指标需满足设计要求,不合格部位及时制定整改方案并返工处理。

#### 结束语

极端高海拔环境给CA砂浆施工带来诸多挑战,低温、低气压、大温差等因素严重影响其强度稳定性与抗裂性能。通过优化搅拌、灌注、养护等施工工艺,合理选择材料与配比,改进施工设备,加强质量监控,可有效提升CA砂浆性能,满足工程需求。未来,随着技术发展,需持续探索更适配极端环境的施工工艺,推动高海拔工程建设高质量发展。

#### 参考文献

- [1]魏学利,陈宝成,李宾,等.地质灾害对旅游公路高质量发展发展的影响及适应性分析——以新疆独库公路为例[J].中外公路,2020,40(S2):279-284.
- [2]赵峰逸.G217线独库公路服务品质提升工程总体方案研究[J].交通建设与管理,2020,(02):64-65.
- [3]陈健,黄波,代柱端,等.矿物掺合料种类对机制砂预拌砂浆性能的影响[J].混凝土与水泥制品,2025,(02):97-100.
- [4]谌俊,叶跃浩,肖雪军.固体废料对预拌砂浆性能影响正交试验研究[J].江苏建材,2024,(06):9-12.