

水泥稳定砾石基层防拱胀设计与施工控制浅析

郑平^{1,2}, 袁腾^{1,2}, 王健祥³, 朱世煜⁴, 蒲超^{1,2}, 王华涛^{1,2}

¹新疆交通规划勘察设计研究院有限公司, 新疆 乌鲁木齐

²新疆高寒高海拔山区交通基础设施安全与健康重点试验室, 新疆 乌鲁木齐

³长安大学公路学院, 陕西 西安

⁴安徽建筑大学土木工程学院, 安徽 合肥

收稿日期: 2026年4月16日; 录用日期: 2026年7月6日; 发布日期: 2026年7月15日

摘要

为有效防治我国西北干旱荒漠地区公路水泥稳定砾石基层沥青路面频繁出现的拱胀病害, 本研究对病害的成因进行了系统性分析, 并对现有防治措施的局限性进行了深入探讨。基于此, 本研究提出了一套优化的基层材料设计与施工控制方法, 并通过室内试验与工程应用对其效果进行了验证。成因分析揭示拱胀病害主要由极端温度应力与硫酸盐结晶膨胀共同作用引发, 特别是在干旱盐渍土地区, 高温与盐化学反应导致基层材料膨胀及强度下降。现有被动防治措施(例如设置胀缝)无法根本解决病害问题, 而主动防治措施缺乏系统性的优化设计。本研究提出了四项主动防治策略: (1) 原材料控制: 严格控制集料与拌合水的硫酸盐含量, 优选低膨胀系数、多破碎面的集料; (2) 低水泥剂量设计: 采用大粒径砾石与振动压实工艺, 减少水泥用量约0.3%, 并预留适当空隙以抑制膨胀; (3) 阻盐隔断层设置: 有效阻断盐分的迁移路径; (4) 抗离析施工控制: 优选夏秋季进行施工, 优化集料级配、拌合工艺、运输摊铺及压实流程。工程实践证明, 上述措施能显著提高基层材料的抗拱胀性能, 为干旱盐渍土地区路面耐久性设计提供了重要的技术支撑。

关键词

拱胀病害, 主动防治, 水泥稳定砾石, 盐分

A Brief Analysis on the Design and Construction Control for Preventing Arching Expansion in Cement-Stabilized Gravel Base Courses

Ping Zheng^{1,2}, Teng Yuan^{1,2}, Jianxiang Wang³, Shiyu Zhu⁴, Chao Pu^{1,2}, Huatao Wang^{1,2}

¹Xinjiang Transportation Planning, Survey and Design Research Institute Co., Ltd., Urumqi Xinjiang

²Xinjiang Key Laboratory of Safety and Health of Transportation Infrastructure in High-Cold and High-Altitude Mountainous Areas, Urumqi Xinjiang

文章引用: 郑平, 袁腾, 王健祥, 朱世煜, 蒲超, 王华涛. 水泥稳定砾石基层防拱胀设计与施工控制浅析[J]. 交通技术, 2026, 15(4): 512-527. DOI: 10.12677/ojtt.2026.154045

³School of Highway, Chang'an University, Xi'an Shaanxi⁴School of Civil Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei Anhui

Received: April 16, 2026; accepted: July 6, 2026; published: July 15, 2026

Abstract

To effectively prevent the frequent occurrence of arching expansion distress in asphalt pavements with cement-stabilized gravel base courses in the arid desert regions of Northwest China, this study systematically analyzes the causes of the distress and thoroughly discusses the limitations of existing prevention measures. Based on this, an optimized design of base course materials and construction control methods is proposed, and their effectiveness is validated through laboratory tests and engineering applications. The analysis reveals that arching expansion is primarily caused by the combined effects of extreme temperature stress and sulfate salt crystallization expansion, particularly in arid saline soil areas where high temperatures and salt chemical reactions lead to material expansion and strength reduction. Existing passive prevention measures, such as installing expansion joints, fail to address the root cause, while active prevention measures lack systematic optimization. This study proposes four active prevention strategies: (1) Raw material control: Strictly limit the sulfate content in aggregates and mixing water, and preferentially select aggregates with low expansion coefficients and multiple fractured surfaces; (2) Low cement dosage design: Use large-sized gravel and vibratory compaction techniques to reduce cement content by approximately 0.3%, while reserving appropriate voids to inhibit expansion; (3) Installation of salt-resistant isolation layers: Effectively block the migration paths of salts; (4) Anti-segregation construction control: Prefer construction in summer and autumn, and optimize aggregate gradation, mixing processes, transportation, paving, and compaction procedures. Engineering practice has demonstrated that these measures significantly enhance the anti-arching expansion performance of base course materials, providing important technical support for the durability design of pavements in arid saline soil areas.

Keywords

Arching Expansion Distress, Active Prevention, Cement-Stabilized Gravel, Salts

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>


Open Access

1. 引言

水泥稳定类材料是我国沥青路面基层修筑的主要材料,包括水泥稳定碎石、水泥稳定砾石和水泥稳定土等。我国西北广袤无垠的戈壁地区如新疆通常分布有大量的砾石,具有易取材、运距短、料源广、成本低等优势,被广泛用于路面基层,据不完全统计新疆 95%以上路面基层和底基层采用水泥稳定砾石或破碎砾石。近几年,在内蒙古、甘肃和新疆等干旱盐渍土地地区公路沥青路面频繁出现一种新型的拱胀病害,其一定间距内出现横向的向上拱起,拱起高度大多在 2 cm~5 cm,拱胀宽度在 50 cm~200 cm 之间。拱胀病害不仅导致路面形成类似天然减速带或“搓板”,极大影响行车舒适度与交通安全,已经成为新疆地区路面养护的主要肇因。基层拱胀的原因是多方面的,有盐分、温度等外因,也有水泥用量过大、级配过细等内因。研究表明,降低水泥稳定基层水泥用量是减小基层拱胀的有效措施之一[1]。本文在分析沥青路面基层拱胀成因与现有防治措施的基础上,提出水泥稳定砾石基层防拱胀设计与施工控制措施,

并通过室内实验与工程应用分析相应措施的效果。

2. 沥青路面基层拱胀成因分析

拱胀病害的发生与西北干旱荒漠地区的气候特征、温度湿度和土壤特性密切相关。国内对拱胀病害的研究主要集中在“热胀”和“盐胀”两个方面，而国外研究较少，原因在于国外多采用全厚式沥青路面，该结构能有效吸收和分散应力，减少路面裂缝和拱起现象。

2.1. 热胀

部分学者认为，拱胀病害的主要原因是干旱半荒漠地区的极端气温，导致水稳基层内部产生较大的温度应力，从而破坏了水稳基层材料。

在理论研究方面，赵昕等[2]通过压杆失稳和薄板失稳理论进行分析，提出温度应力超过基层材料的临界荷载是拱胀病害发生的根本原因，并建议通过避免冬季施工、使用膨胀性较小的骨架密实型集料来减小温度应力。张宏等[3]基于铁摩辛柯板壳理论，建立了双层层合板隆起拱胀力学模型，推导出临界荷载公式。黄河清等[4]计算温度应力和疲劳应力，指出过长连续路段、显著的季节温差和高温摊铺是拱胀的关键诱因。

在实地调研中，姚爱玲等[5]通过对内蒙古额济纳旗地区的调查发现，拱胀病害主要由夏季极端高温引起的温度应力主导。姜涛等[6]在巴丹吉林沙漠的调研中发现，夏季高温和长连续路段导致基层温度应力积累，是拱胀病害的主要原因。

在室内试验与模拟方面。唐林玲[7]通过 ANSYS 仿真研究表明，温度是水稳基层拱胀开裂的直接原因，并指出每 150~200 m 范围内会出现较大位移波动。

2.2. 盐胀

还有部分研究学者认为，水泥基材料与硫酸钠反应生成的膨胀性物质是导致土壤或路面隆起的主要原因。

国外研究表明[8][9]，硫酸盐与水泥基材料反应生成膨胀性钙矾石，导致基层显著膨胀，进而影响结构稳定。国内研究表明，吴一凡[10]发现拱胀病害位置的基层含盐量较高，级配过细，水泥剂量过大，且上下基层黏结稳定性不足，是导致盐胀的关键因素。谢红战等[11]通过电镜扫描和盐分离子检测发现，盐分在基层和路基内迁移结晶，导致膨胀并引发路面拱胀，表明盐胀与温度效应共同作用是病害的核心原因。

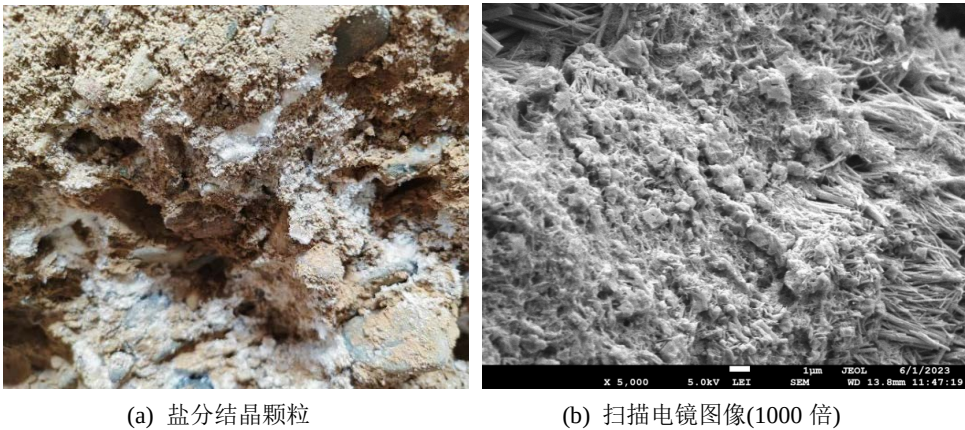


Figure 1. Salt expansion
图 1. 盐胀

室内实验方面,程力[12]的实验表明,盐含量增加和温度升高会显著增大孔隙率,验证了盐与热的耦合作用。王鹏程等[13]通过矿物分析证实,硫酸盐侵蚀水泥改良填料,形成钙矾石晶体的膨胀过程是引发基层拱胀的主要原因。图1为盐分结晶颗粒及其扫描电镜图像。

3. 拱胀防治措施研究现状

现有的拱胀病害防治措施可分为主动性防治和被动性防治两大类,当前以被动性防治为主。被动性防治措施主要针对已发生拱胀病害的路段进行补救,常见做法是在路面每隔一定距离设置消胀槽等应力释放结构,槽内填充柔性材料,利用柔性材料的变形来释放基层内部积累的应力,从而有效减小基层内的温度应力和膨胀应力。而主动性防治措施则主要从施工阶段进行预防,通过优化施工工艺和材料选择,减少病害发生的可能性。具体措施包括选择夏季施工以避免极端温差影响、改进摊铺工艺提高施工质量、换填盐渍土减少盐胀风险、严格控制施工用水和集料质量,以及设置土工布阻断盐分的迁移路径。这些措施旨在从源头上防止拱胀病害的产生,减少后期维护和修复的难度。

3.1. 被动性防治措施

阿布力孜·艾海提[14]以新疆 G3012 喀什至叶城至墨玉高速公路为依托,设置了五种试验路方案,重点对比了不同级配类型、不同胀缝宽度与间距的防拱胀效果。试验结果表明,优化后的级配在温度、湿度和含盐量变化引起的拱胀抑制方面均表现出显著优势。随着胀缝宽度的增加和间距的减小,水泥稳定基层的应变显著下降,设置宽度为 2 cm,纵向距离为 50 m 的胀缝结构有效减少了温度、湿度及含盐量变化引起的拱胀现象。

3.2. 主动性防治措施

张梦媛等[15]通过实地调查发现,拱胀病害主要由路基土中的盐分(硫酸钠和硫酸钾)向基层迁移引起,导致基层内部盐分含量升高及次生盐渍化,从而引发拱胀和劣化。他们提出在路堤顶面以下 30~50 cm 范围内设置厚度为 40~50 cm 的风积沙隔断层,以阻止盐分迁移。

在施工技术方面,彭真等[16]建议通过严格控制含水量、水泥剂量和级配,以及采用封层、集中闷料和完善排水设施等措施处理路基填料。此外,他们还提出使用隔断层和换填盐渍土的方法,以提高路床施工质量。陈贺宇和崔少平[17]通过试验研究发现,级配、水泥剂量和温度是影响基层膨胀系数的主要因素,提出通过减小粒径和降低水泥剂量来减轻拱胀效应。程力则建议严格控制集料来源与质量,通过振动压实提高基层强度并减少水泥用量,同时设置胀缝以有效降低拱胀变形,优化其宽度和深度设计以达到最佳效果。

王宏等[19]从道路结构设计的角度,提出可以采用半刚性基层 + 级配碎石倒装路面结构。采用倒装结构既可保证路面基层的承载能力,同时水泥稳定碎石顶面的级配碎石又可起到消散半刚性基层温度应力;或者在上路床设置砂砾封层。设置砂砾封层可起到隔断盐分迁移的作用,减少基层、土基盐胀效应的作用。

3.3. 现有研究的不足

现阶段防治措施仅针对单一因素作用下(盐胀、热胀)引起的拱胀病害,最为普遍的防治措施大多为被动措施,例如设置胀缝、消胀槽等,而多数主动防治手段局限于施工材料及施工方式,迫切需要针对拱胀破坏提出道路基层材料的优化设计方法。

4. 试验方法

为系统评估水泥稳定砾石材料的拱胀特性及力学性能,本研究开展了系列室内试验。所有自测数据

均基于以下试验方法获得。

4.1. 试件制备

(1) 原材料

采用新疆地区典型砾石集料，水泥为 P·O 42.5 级普通硅酸盐水泥，拌合水为当地地下水。集料与拌合水均按规范检测硫酸盐含量。

(2) 配合比

依据表 1 所示超大粒径水稳砾石级配进行设计。

Table 1. Grading of oversized water-stabilized gravel

表 1. 超大粒径水稳砾石级配

筛孔尺寸(mm)	53	37.5	19	9.5	4.75	2.36	0.6	0.075
通过质量百分数(%)	100	63	48	30	22	15	6	3

水泥剂量为 3%，另有对比组按需调整。

(3) 成型方法

分别采用振动压实法(VVTM)与静压法制备 $\phi 150\text{ mm} \times h150\text{ mm}$ 圆柱体试件。振动压实参数：激振力 6 kN，振动频率 30 Hz，振动时间 2 min。静压法压实功控制在标准重型击实试验的 98%以上。

4.2. 试验设备与参数

(1) 膨胀系数测试

使用微机控制电液伺服压力试验机，配合环境箱进行温控(温度范围 $-10^{\circ}\text{C} \sim 60^{\circ}\text{C}$ ，精度 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$)。试件在不同含盐量为 0%、0.2%、0.4%、0.8%及不同龄期为 1、4、7、14、28、60、90 d 下测试其温度膨胀系数。

(2) 力学性能测试

采用微机控制电液伺服压力试验机进行无侧限抗压强度与劈裂强度测试，加载速率 1 mm/min。

4.3. 测试标准与流程

所有试验流程均遵循《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG 3441—2024)。每组试验设置 6 个平行试件，结果取平均值，变异系数控制在允许范围内。

5. 水泥稳定砾石基层防拱胀设计与施工控制措施

为了有效应对水泥稳定砾石基层拱胀病害的发生，本文从原材料控制、低水泥剂量大粒径水稳砾石设计、路面隔断层设置与施工控制等方面提出水泥稳定砾石基层防拱胀设计与施工控制措施，并从设计、施工等多个方面采取预防措施。主要的防治措施可以从设计阶段的原材料控制、混合料设计、水稳基层结构设计以及施工阶段的施工进度管理四个关键方面进行深入探讨。这些措施的实施能够有效提高水稳基层的稳定性、耐久性和抗拱胀性能，降低因温度变化和盐分迁移等因素引发的拱胀风险。

5.1. 原材料控制

基层中的水泥水化产物与硫酸钠产生体积膨胀反应是导致其发生拱胀的主要原因之一。盐分一部分来自于包含于施工用水、集料中的盐分，另外一部分来自于路基向上迁移。相关研究表明，水泥稳定砾

石试件经 0.4%硫酸钠溶液浸泡后，其 7 d 无侧限抗压强度、劈裂强度和弹性模量均会升高，说明硫酸钠对水泥稳定砾石早期强度有一定的增强效益。但 60~90 d 之后的长期强度会显著降低，主要原因是硫酸钠在长龄期水稳基层中发生结晶与化学变化，硫酸根离子与基层中的铝酸钙与氢氧化钙反应生成钙矾石与二水石膏(CaSO₄·2H₂O)，引发基层体积膨胀与强度衰减，膨胀应力导致基层形成裂缝甚至引发拱胀。而氯盐仅仅会产生少量物理结晶与少量冻胀，对基层影响较小。因此，施工过程中必须对原材料进行严格的质量控制，特别是要控制集料与拌合水中的硫酸钠含量，以确保水稳基层的长期稳定性与耐久性。本文针对不同的含盐量对于混合料拱胀的影响进行研究，见表 2。

Table 2. Effect of salt content on the coefficient of expansion
表 2. 含盐量对于膨胀系数的影响

含盐量(%)	温度膨胀系数(×10 ⁻⁶ /°C)						
	1	4	7	14	28	60	90
0	17.81	10.76	11.62	11.96	12.00	12.02	12.04
0.2	18.44	11.00	12.01	12.48	12.66	12.69	12.75
0.4	19.65	11.73	12.69	13.50	13.66	14.25	14.33
0.8	21.61	14.14	15.21	15.82	16.26	16.49	16.64

随着盐含量的变化，水稳基层试件的膨胀量呈现出明显的规律性。无论试件处于低龄期还是高龄期，含盐量越大的试件其膨胀量均越大。这一现象表明，盐分对水稳基层试件的膨胀性能具有显著影响。随着盐含量的增加，试件内部的盐分析出和与水泥水化产物的反应加剧，导致试件在温度变化时表现出更大的膨胀量。

此外，集料的矿物成分和膨胀系数是抗拱胀性能的关键因素。膨胀系数小、破碎面多的集料能减少空隙，提高结构强度和稳定性，显著降低拱胀风险。对于膨胀系数较大或破碎面较少的集料，则需优化水泥剂量等设计参数以提升抗拱胀性能。

5.2. 低水泥剂量大粒径水稳砾石设计

降低水泥剂量是减少膨胀性的重要措施，同时还能提高基层在侵蚀后的长期强度。然而，低水泥剂量可能导致混合料强度难以满足规范要求。为弥补这一不足，可以通过增大集料粒径和振动压实法来提升力学强度。

本文采用的超大粒径水稳砾石级配见表 1。在级配合理的情况下，提升水泥稳定砾石中的集料粒径，有助于提高力学强度。研究表明[20]，增大水泥稳定碎石的集料粒径(如最大粒径达到 53 mm)，可以通过粗集料之间更好的嵌挤作用显著提升力学强度，同时减少所需水泥剂量。

相比传统的重型击实法，振动击实更能真实模拟现场碾压条件。通过垂直振动技术，材料的密实度和耐久性得以显著提高。这种技术通过有效分散土壤颗粒和填充空隙，使基层材料更加稳定，减少了膨胀和强度衰减问题。

为了研究水泥稳定砾石振动压实、静压压实两种压实成型方式对于强度的影响，以水泥掺量 3%为例，采用表 2 的超大粒径水稳砾石级配，使用振动压实、静压压实两种方式成型试件，分析其在抗压强度上的优劣性，不同压实方式下的力学性能对比见表 3。

Table 3. Comparison of mechanical properties of different compaction methods
表 3. 不同压实方式力学性能对比

指标	成型方法	试件强度测试值(MPa)						平均值	标准差	变异系数
		1	2	3	4	5	6			
7 天抗压强度	VVTM	8.82	8.41	8.53	8.91	8.56	8.79	8.67	0.197	2.27
	静压法	6.21	6.03	5.93	5.82	6.25	6.39	6.11	0.215	5.23
7 天劈裂强度	VVTM	0.912	0.869	0.861	0.831	0.884	0.897	0.876	0.029	3.27
	静压法	0.712	0.662	0.732	0.625	0.669	0.643	0.691	0.037	9.52

可以看出振动法对于水泥稳定砾石强度增加有明显效果。振动能量使砾石颗粒克服摩擦力重新排列，孔隙率降低 3%~5%，密实度更高。

由上文分析可知，水泥水化产物与硫酸钠产生体积膨胀反应是引发基层拱胀的主要原因。因此，在混合料中预留一定的空隙率用以容纳膨胀的体积，在一定程度上也可以减弱拱胀。本文针对三种经典级配类型的膨胀系数进行分析，如表 4 所示。

Table 4. Effect of gradation on the coefficient of expansion
表 4. 级配对于膨胀系数的影响

级配类型	温度膨胀系数($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)						
	1	4	7	14	28	60	90
GM	19.65	11.73	12.69	13.50	13.66	14.25	14.33
XM	22.48	13.85	15.59	17.25	17.11	17.71	17.97
GK	12.76	10.00	10.97	11.30	11.35	11.52	11.73

其中 GM 代表骨架密实结构，XM 代表悬浮密实结构，GK 代表骨架孔隙结构。

在 1~90 d 龄期内，XM 级配的膨胀量始终最大，GM 级配次之，GK 级配的膨胀量最小，这是由于 XM 级配试件整体粒径最小，结构最为密实，在同样的温度条件下，骨料和水泥石膨胀对四周的结构施加的力更大；GK 级配由于空隙率较高，试件内部变形空间更大，在温度变化的情况下，试件内部较大的空隙能有效容纳部分形变，从而降低整体的变形。由此证明混合料内部预留的孔隙率可以减弱拱胀。

5.3. 阻盐隔断层设置

为了防止盐分向基层渗透，在基层和路基之间可以设置隔断层。隔断层可以设置在路基的某一深度，以阻断毛细水的上升和盐分的迁移。常见的隔断层材料包括两布一膜和风积沙等。这些材料能有效防止下层土体中的盐分向上渗透，从而保护上层土体不受盐渍土病害的影响。应将阻盐隔断层设置于路基顶面，铺设前应控制路基与基层表面平整度。如采用碎石砂砾隔断层，应按设计要求全层一次性摊铺完成并进行整平，使用履带推土机或 8~10 t 的双钢轮压路机稳压两遍，之后用 12 t 以上的振动压路机，由路基两侧向中间碾压。采用两布一膜隔断层应沿路线纵向全断面铺设，紧贴下承层不允许有褶皱。膜上第一层排水层或保护层填料应采用轻型推土机或人工摊铺，运料车应倒行卸料或人工倒运；摊铺后的填料宜采用履带推土机或 8~10 t 的双钢轮压路机稳压 2 遍随后摊铺的路基填料应与第一层填料一起碾压并达到同样的压实度。铺设前应清除路基表面尖锐石粒，防止刺破土工膜。

5.4. 施工控制

5.4.1. 施工温度控制

施工温度对水泥稳定砾石基层的拱胀特性具有显著影响。低温施工条件下，随着夏季高温的到来，水稳基层更易产生较大的拱胀位移和纵向膨胀应力，从而加剧路面的拱胀破坏。鉴于此，合理选择施工时间(即施工温度)对于路面施工而言至关重要。为避免低温环境对施工的不利影响，应采取以下措施：

(1) 优先选择夏秋季节进行施工，这些季节的温度条件较高，有利于提高施工质量和减小温度应力。尽量避免在冬季进行水稳基层施工，因冬季温度普遍较低，冬季至夏季的水稳基层温度跨度更大，将产生更大的温度应力。

(2) 在南疆等日温差较大的地区，除考虑季节因素外，还应特别关注每日的温度变化。具体而言，尽可能确保在温度达到或超过 10℃ 时进行基层施工，避开早晚温度较低的时间段进行施工，以确保施工过程中的温度条件满足要求。

5.4.2. 离析控制

在工程实践中发现，增大粒径虽然增加了基层抗拱胀性能，但施工过程也增加了离析程度。图 2 展示了基层摊铺时的离析现象。离析的发生，会导致粗集料或细集料集中分布，结构强度与承载能力下降；离析易导致水分渗入基层内部，导致基层耐久性与水稳定性降低；细集料集中区域的含水量较高，干燥收缩更显著，产生裂缝与反射裂缝的风险增加；离析区域的混合料可压实性差异大，导致基层表面凹凸不平，路面平整度与行车舒适性恶化。



Figure 2. Basic separation
图 2. 基层离析

(1) 控制集料质量以及级配

基层施工时采用的砾石碎石往往取决于当地的石材资源，石料质量可能存在差异，同时可能在取料时存在堆放石料不规范产生混料的情况。同时由于筛网规格不同，导致各集料级配标准不一致，带来筛分后混合集料级配混乱。采用超大粒径砾石导致粗集料用量相对增多，细集料较少，粗集料表面的水泥较难发挥粘结效果。

对于集料质量、性能等进行严格把控。若石料来自不同石料厂，需对石料进行检测确认符合要求；按照网格化堆料，应保证料堆之间有明显间隙，不存在混料现象；统一筛孔尺寸，针对超大粒径砾石进行合适的配合比设计，控制粗细集料比例；严格控制实验室配比与现场施工配比一致。

针对易离析特点采用 SCSG-50 骨架密实级配，见下表 5。该级配整体粗集料所占的比例比较小，细集料占比相对较大，更利于粗集料相互嵌挤，细集料进行填充，从而获得更佳的路用性能。

Table 5. SCSG-50 gradation range
表 5. SCSG-50 级配范围

类型		通过以下筛孔/mm 的质量百分率/%							
		53	37.5	19	9.5	4.75	2.36	0.6	0.075
SCSG-50	级配上限	100	75	64	45	36	25	11	5
	级配下限	100	67	57	35	28	18	7	2

控制 4.75 mm 通过率在 28%到 36%之间, 混合料内部能形成强有力的力链结构, 抵抗混合料在下落过程中的离散趋势。

(2) 优化拌合作业

粗集料由于粒径大于细集料, 其下料效率及速度往往也低于细集料, 容易出现下料比例失衡。拌和机拌合时往往采用传送带运输集料, 由于粗细集料质量及表面形状的差异, 粗集料易受传送带运输速度以及传送带斜角等因素, 在自身应力的作用下产生离析。拌和时间不足, 粗细集料未能充分混合, 混合料均匀性不足。存在超大粒径砾石, 拌和时容易破碎从而影响混合料粗细集料比例。

拌和过程中需控制粗细集料下料速度, 避免粗细集料比例失衡。控制传送带运行速度以及传送带斜角, 防止粗集料滚落下滑; 并在传送带末端设置挡板, 保证充分的拌和时间, 在出料口上方添加旋风叶或挡板, 减少粗细集料分布不均匀。

(3) 控制装料及运输环节

混合料向运料车中倾倒时由于倾倒高度过高, 粗集料与细集料的黏附状态在重力作用以及受到接触运料车时带来的冲击作用影响下容易被打破, 产生离析现象。装料过程中运料车定点装料, 导致车中混合料呈锥体状堆积, 粗集料易沿锥体滑落呈散落状态, 细集料则集中于锥体尖部。运输过程中水分蒸发导致混合料表面变干, 降低黏附性, 这种变干的混合料在摊铺时由于黏附性不足易产生离析。

图 3 为运料车装料时的情景。下料斗向车厢装料时, 料斗底部距离车厢底部高差不应大于 2 m, 装车时车辆应避免定点装料, 应保持前后移动, 按前后中的顺序分三次呈“品字型”装料, 减少粗细集料离析。运输过程中应向车厢内部喷洒适量水, 同时使用帆布对车厢进行遮盖, 减少车厢内部混合料水分蒸发, 粘结性降低产生离析; 运料车行驶时应尽量保证匀速行驶, 减少颠簸、急停急起, 避免混合料在运输途中由于颠簸等产生离析。



Figure 3. The material transport vehicle is loading the goods
图 3. 运料车装料

(4) 规范优化摊铺作业

摊铺机工作前需先进料，进料时往往粗集料首先聚集落入摊铺机进料斗，导致在进料斗中粗细集料不均匀；摊铺机使用两侧翻板进行收料时也会导致粗集料的二次聚集，图 4 为运料车向摊铺机内倾倒混合料，图 5 展示了混合料在摊铺机集料斗内产生的离析现象。摊铺机送料一般采用刮板输送以及螺旋布料器进行分料处理，在螺旋布料器分料时若螺旋叶片转动速度过快，易将粗集料直接铺设在基层表面，产生离析现象；若供料不足增加螺旋转速，细集料会通过螺旋孔隙直接掉出，而粗集料会随着螺旋转动被分至两侧，产生离析。

减小运料车向摊铺机倒料时运料车厢的倾倒角度，以 45° 为宜。防止倾倒过程中粗集料集中过多滑落；粗集料集中于侧板时应尽量减少收斗，倾倒三车混合料左右进行收斗，若发现侧板粗集料表面发白发干时应废弃该类型粗集料。



Figure 4. The material carrier pours the material into the paver
图 4. 运料车向摊铺机倒料



Figure 5. Aggregating hopper of the paver
图 5. 摊铺机集料斗

采用 2 台或多台摊铺机并机摊铺时，摊铺机型号、磨损程度宜相同，且应具有良好的抗离析能力，图 6 为摊铺机工作时的情景；摊铺机分料箱前端宜增设橡胶挡板、钢板或铁链等防离析措施，且挡板底部离地高度宜小于 5 cm，图 7 为摊铺机加装的挡板；前挡板刮板两端安装塑料或橡胶挡板等，以防止两

端混合料自由滚落；螺旋布料器应保持匀速转动。起到二次搅拌作用；需对摊铺机摊铺速度进行控制，针对超大粒径水稳砂砾基层摊铺时应控制摊铺速度为 1 m/min。



Figure 6. Paver
图 6. 摊铺机



Figure 7. The baffle of the paver
图 7. 摊铺机挡板



Figure 8. Coarse aggregate segregation
图 8. 粗集料离析

摊铺后应随时消除粗细集料离析现象，图 8 为粗细集料离析现象。对于粗料“窝”和粗集料“带”，应添加细集料并拌和均匀；对于细集料“窝”，应添加粗集料并拌和均匀。将严重离析部位挖除后应用符合要求的混合料填补。

(5) 优化压实作业

压实作业是确保道路长期服役性能的核心环节，良好的压实作业能够最大程度减小基层内部孔隙率，增强基层力学性能以及预防路基病害。

压实作业分为三个阶段，应按照不同阶段的任务，对于碾压设备及次数进行规定。针对超大粒径水稳砂砾基层碾压施工提出如下方案：初压时，采用胶轮压路机在前、双钢轮压路机在后紧跟摊铺机后碾压，碾压不少于 2 遍，碾压速度宜为 3 km/h~5 km/h，图 9 为胶轮压路机，图 10 为双钢轮压路机。



Figure 9. Rubber-tired roller

图 9. 胶轮压路机

复压时，采用单钢轮振动压路机先强振不低于 4 遍、再弱振不少于 2 遍，碾压速度宜为 3 km/h~5 km/h，轮迹重叠 1/2 轮宽；终压时，宜采用胶轮压路机碾压消除微裂纹，双钢轮压路机碾压消除轮迹，并以消除微裂纹或轮迹为停压标准，碾压速度宜为 3 km/h~5 km/h 图 11 为多种压路机联合碾压的情景。碾压作业应在水泥初凝前完成，并达到规定压实度，基层表面无明显轮迹和微裂纹。碾压完成后及时进行覆盖、洒水养生，保证其表面在养生期内始终湿润，养生 7 天至上层结构层施工前封闭交通。



Figure 10. Double-steel-wheel roller

图 10. 双钢轮压路机



Figure 11. Combined rolling
图 11. 联合碾压

(6) 工程实际离析问题分析

针对可能出现的离析问题，采用抗离析措施进行现场施工摊铺后，通过试验路现场取样，分析级配变化，并与未采取抗离析措施的进行对比，从而判断出采取抗离析措施后，试验路是否出现离析过大的问题。摊铺机摊铺过程中，分析路面横向，以及基层截面深度离析情况，根据路面宽度，截取五个点，进行均匀程度分析，进行筛分试验，现场采样如图 12 所示。根据路面宽度，选取五个点位，记为 A_i ($i = 1、2、3、4、5$ ， i 值越小，越靠近道路中心)。



Figure 12. On-site sampling diagram
图 12. 现场取样图

将不同点位的混合料进行烘干处理，然后进行筛分，筛分结果如表 6 所示。

Table 6. Screening results of samples with anti-segregation measures
表 6. 采取抗离析措施样品筛分结果

点位	通过以下筛孔/mm 的质量百分率/%				
	53	37.5	19	9.5	4.75
A_1	100	69	67	47	31
A_2	100	73	63	42	33
A_3	100	67	59	39	34
A_4	100	76	66	46	32
A_5	100	74	61	39	33
均值	100	71.8	63.2	42.6	32.6
$C_v/\%$	0	6.1	4.8	9.2	9.9

按照相同方法对于未采取抗离析措施的试验路进行现场取样并进行筛分，得到筛分结果如表 7 所示。

Table 7. Screening results of samples without anti-segregation measures
表 7. 未采取抗离析措施样品筛分结果

点位	通过以下筛孔/mm 的质量百分率/%				
	53	37.5	19	9.5	4.75
A ₁	100	62	70	49	29
A ₂	100	75	62	43	27
A ₃	100	68	55	40	34
A ₄	100	76	66	44	35
A ₅	100	81	59	40	36
均值	100	72.4	62.4	43.2	32.2
C _w /%	0	10.3	9.4	8.6	12.3

通过以上步骤，可以对混合料是否存在离析过大的问题进行客观评估和判断，并对比分析得出采用抗离析措施是否有效。通过实验数据的综合分析揭示混合料的级配特征和离析现象之间的关系，为进一步的工程应用提供参考和指导。

从表 6 可以得知，SCSG-50 混合料筛分变异系数随着粒径的变化也在变化，表明混合料出现了离析状况，但根据表中数据分析，37.5 mm、19 mm、9.5 mm、4.75 mm 筛孔通过率的变异系数在 10%之内，尽管存在一定程度的混合料离散现象，但并未对混合料的整体分布产生明显的影响。从表 7 可以看出各档混合料均出现了离析现象，且各档变异系数均在表 6 的基础上产生了不同程度的增加，其中 37.5 mm、4.75 mm 筛孔通过率均超过 10%，对混合料整体分布产生了明显影响，离析现象严重。

综上所述，采用 SCSG-50 级配，在混合料拌合、装卸运输、摊铺以及压实中采取抗离析措施可以抑制离析现象产生，为超大粒径水稳砂砾基层材料的可靠性和稳定性提供了充分保障。

6. 讨论

本文提出的综合防治方案从材料设计、结构阻断到施工控制进行了系统优化，室内试验与初步工程应用表明其在抑制拱胀方面具有良好潜力。然而，该方案在实际工程中的全面推广仍需考虑以下因素。

6.1. 方案优势

从原材料硫酸盐控制、低水泥剂量设计，到隔断层设置与精细化施工，形成了多层次的防御体系。室内试验明确了含盐量、级配类型、压实方法对膨胀系数与力学性能的影响规律，为设计提供依据。本文提出的系统化抗离析施工控制措施，经现场验证可有效改善超大粒径混合料的均匀性。

6.2. 潜在局限性与挑战

低水泥剂量与预留空隙虽能抑制膨胀，但可能对早期强度及长期水稳定性、抗冻性产生不利影响，尤其在重载或严寒地区需谨慎评估。大粒径集料、振动压实与抗离析工艺等对施工设备、人员技能及管理要求更高，可能增加施工成本与工期。优质低膨胀集料、隔断层材料与振动压实设备等将增加初期投资，需进行全寿命周期经济性分析。方案针对西北干旱盐渍土地区开发，在其他气候土质条件下的效果与适用性需进一步验证。

6.3. 优化建议与应用权衡

在不同工程条件下，应依据当地盐分、温度、交通荷载等因素，权衡各项措施的优先级与参数(如水

泥剂量、隔断层类型与位置、级配选择)。建议在应用本方案的路段建立长期性能观测系统,收集拱胀变形、裂缝发展、强度衰减等数据,验证方案的长期有效性。在更多工程实践与数据积累的基础上,可逐步形成适用于不同区域的设计与施工指南,促进技术的规范化推广。

7. 结论

针对我国西北干旱荒漠地区公路水泥稳定基层沥青路面普遍出现的拱胀病害,本研究结合拱胀成因、现有防治措施及优化设计方法,系统分析了拱胀病害的诱因与应对策略,并提出了切实可行的主动防治措施。

(1) 拱胀病害成因分析

拱胀病害主要由温度应力和盐胀共同作用引起,尤其是在干旱荒漠地区,极端高温和硫酸盐的化学反应是病害的核心驱动因素。温度应力来源于极端气温变化及长期累积的温差,而硫酸盐结晶和化学反应引发基层膨胀和强度衰减,是导致路面拱胀的重要机制。

(2) 现有防治措施的局限性

被动防治措施如胀缝和消胀槽等,虽可在一定程度上释放应力,但未能从根源上解决拱胀病害问题,且需频繁维护。主动防治措施多局限于材料和施工方法,缺乏系统性的优化设计方案和理论支持。

(3) 优化设计与施工控制

① 原材料控制:严格控制集料和拌合水中的硫酸盐含量,优选膨胀系数小、破碎面多的集料,以减少膨胀性并提高基层的抗拱胀性能。

② 混合料优化设计:降低水泥剂量,通过增大集料粒径和采用振动压实法(VTM)提升力学强度。

③ 阻盐隔断层设置:采用隔断层(如两布一膜或风积沙)阻止盐分迁移,并通过倒装层减少温度应力,增强基层稳定性。

④ 施工控制:合理选择施工时间,避免在冬季或日间温差大的条件下施工,优先选择夏秋季节;采取从集料质量与级配控制、拌合工艺优化、装料运输规范、摊铺流程改进到压实工艺优化的系统性抗离析施工措施。

本文明确指出硫酸盐侵蚀与极端温度双因素耦合驱动拱胀机制,并从原材料进行源头控制,在混合料设计过程中进行严格控制优化,设置隔盐阻断层进行结构阻断到精细施工,形成了闭环管理。研究结果为干旱盐渍土地区路面耐久性设计提供了重要的技术支撑,后续需结合长期路用性能观测,进一步完善设计与施工指南。

基金项目

新疆交通运输厅 2022 年度交通运输行业科技项目(2024-ZD-001)、沥青路面拱胀破坏机理及防治对策研究、新疆交通设计院公司科研基金(KY2022080901)。

参考文献

- [1] 王选仓,朱世煜,张梦媛,等.大温差荒漠区水泥稳定砂砾材料拱胀的宏-微观研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2022,41(4):87-95.
- [2] 赵昕,沙爱民,洪斌.半刚性基层拱胀现象的力学分析[J].公路交通科技,2008,25(4):42-46.
- [3] 张宏,张海龙,王智远.沙漠区沥青混凝土路面横向隆起现象的力学分析[J].公路交通科技,2017,34(7):8-13.
- [4] 黄河清.西部地区某高速公路水泥稳定碎石基层拱胀原因分析[J].工程与建设,2017,31(1):79-80,86.
- [5] 姚爱玲,王军伟,李志涛,等.内蒙古额济纳旗水稳碎石基层沥青路面拱起开裂的原因分析[J].公路工程,2018,43(6):56-61.

-
- [6] 姜涛. 路面半刚性基层拱胀问题研究[J]. 湖南交通科技, 2018, 44(4): 1-3.
- [7] 唐林玲. 沥青路面拱胀开裂仿真分析及处治措施[J]. 四川水泥, 2023(10): 212-214.
- [8] Little, D.N., Nair, S. and Herbert, B. (2010) Addressing Sulfate-Induced Heave in Lime Treated Soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **136**, 110-118. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0000185](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0000185)
- [9] Rollings, R.S., Burkes, J.P. and Rollings, M.P. (1999) Sulfate Attack on Cement-Stabilized Sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **125**, 364-372. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1090-0241\(1999\)125:5\(364\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1090-0241(1999)125:5(364))
- [10] 吴一凡. 高速公路水泥稳定砂砾基层拱胀及处治[J]. 交通世界, 2023(35): 104-106.
- [11] 谢红战. 沙漠戈壁地区水泥稳定碎石基层沥青路面拱胀机理分析及处治建议[J]. 公路工程, 2019, 44(5): 180-187.
- [12] 程力. 基于 CT 扫描试验的水泥稳定基层拱胀机理探究[J]. 中国公路, 2021(9): 109-111.
- [13] 王鹏程, 叶阳升, 尧俊凯, 等. 硫酸盐侵蚀条件下无砟轨道路基上拱特性研究[J]. 铁道学报, 2021, 43(6): 135-140.
- [14] 阿布力孜·艾海提. 水泥稳定基层防拱胀结构试验分析[J]. 中国公路, 2022(4): 112-113.
- [15] 张梦媛, 王选仓, 丁龙亭, 等. 大温差荒漠区路面拱胀及路基盐分迁移规律研究[J]. 公路交通科技, 2021, 38(8): 50-58, 66.
- [16] 彭真, 孙晓伟, 李树海. 西北荒漠地区半刚性基层病害分析及防治措施[J]. 施工技术, 2017, 46(S2): 965-967.
- [17] 陈贺宇, 崔少平. 预防水泥稳定碎石基层路面起拱开裂技术[J]. 建筑技术开发, 2022, 49(20): 121-124.
- [18] 程力. 水泥稳定基层防拱胀措施探究[J]. 中国公路, 2021(7): 108-109.
- [19] 王宏. 沙漠戈壁地区水泥稳定碎石基层沥青路面拱胀调查与防治措施[J]. 公路, 2019, 64(3): 266-274.
- [20] 蒋应军, 王煜鑫, 周传荣, 等. 垂直振动成型 CTB-50 水泥稳定碎石抗压强度增长规律及预测模型[J]. 硅酸盐通报, 2023, 42(8): 3045-3054.