

纤维增强超大粒径沥青混合料的抗裂性能试验研究

——以新疆大温差环境为例

魏 雨^{1,2}, 汤长顺^{1,2}, 梁文斌^{1,2}, 张立刚^{1,2}, 周 峰^{1,2}

¹新疆交勘致远工程科技有限公司, 新疆 乌鲁木齐

²天山公路走廊绿色科技与长效养护研究重点实验室, 新疆 乌鲁木齐

收稿日期: 2025年8月6日; 录用日期: 2026年1月16日; 发布日期: 2026年1月28日

摘 要

针对新疆大温差环境(年均昼夜温差 $> 15^{\circ}\text{C}$, 极端低温 -30°C)下沥青路面温缩裂缝频发的问题, 文章通过半圆弯曲试验(SCB)和低温劈裂试验, 系统研究了钢纤维、聚丙烯纤维和玄武岩纤维对公称最大粒径53 mm (NMA5 = 53 mm)的ATB-50与ATB-30沥青混合料抗裂性能的增强效果。结果表明: 钢纤维(掺量0.1%~0.3%)可显著提升断裂能与低温疲劳破坏应变, 其中ATB-50的断裂能从 3.70 J/m^2 (无纤维)增至 4.20 J/m^2 (0.3%钢纤维), 低温破坏应变从 $2950 \mu\epsilon$ 提升至 $3300 \mu\epsilon$; 聚丙烯纤维与玄武岩纤维分别提升断裂能5.4%和8.1%, 但低温性能改善有限。油石比从3.0%增至3.8%时, 钢纤维增强的ATB-50低温破坏应变提升6.5% ($3100 \rightarrow 3300 \mu\epsilon$)。基于性能-经济性平衡, 提出“按需选纤”策略: 钢纤维适用于北疆高寒区重载道路, 玄武岩纤维适配东疆高温干旱区, 聚丙烯纤维可满足南疆乡村公路低成本需求。研究为极端温差区沥青路面材料设计提供了理论依据。

关键词

超大粒径沥青混合料, 纤维增强, 抗裂性能, 油石比

Experimental Study on Crack Resistance of Fiber-Reinforced Large-Stone Asphalt Mixtures

—Under Large Temperature Differences in Xinjiang

Yu Wei^{1,2}, Changshun Tang^{1,2}, Wenbin Liang^{1,2}, Ligang Zhang^{1,2}, Feng Zhou^{1,2}

文章引用: 魏雨, 汤长顺, 梁文斌, 张立刚, 周峰. 纤维增强超大粒径沥青混合料的抗裂性能试验研究[J]. 交通技术, 2026, 15(1): 118-126. DOI: 10.12677/ojtt.2026.151011

¹Xinjiang Jiaokan Zhiyuan Engineering Technology Co., Ltd., Urumqi Xinjiang²Key Laboratory of Green Technology and Long-term Maintenance for Tianshan Highway Corridor, Urumqi Xinjiang

Received: August 6, 2025; accepted: January 16, 2026; published: January 28, 2026

Abstract

To address the temperature-induced cracks in asphalt pavements under extreme temperature differences (annual diurnal variation $> 15^{\circ}\text{C}$, extreme low temperature -30°C) in Xinjiang, this study systematically investigated the effects of steel fibers, polypropylene fibers, and basalt fibers on the crack resistance of large-stone asphalt mixtures (NMA-53 mm, ATB-50 and ATB-30) through semi-circular bending (SCB) and low-temperature splitting tests. Results show that steel fibers (0.1%~0.3% dosage) significantly improve fracture energy and low-temperature fatigue failure strain. For ATB-50, the fracture energy increased from 3.70 J/m^2 (non-fiber) to 4.20 J/m^2 (0.3% steel fiber), and the low-temperature failure strain rose from $2950 \mu\epsilon$ to $3300 \mu\epsilon$. Polypropylene and basalt fibers enhanced fracture energy by 5.4% and 8.1%, respectively, but with limited low-temperature improvements. When the asphalt-aggregate ratio increased from 3.0% to 3.8%, the low-temperature failure strain of steel fiber-reinforced ATB-50 increased by 6.5% ($3100 \rightarrow 3300 \mu\epsilon$). A “fiber selection based on needs” strategy was proposed: steel fibers for heavy-duty pavements in northern Xinjiang (cold regions), basalt fibers for high-temperature arid areas in eastern Xinjiang, and polypropylene fibers for low-cost rural roads in southern Xinjiang. This study provides a theoretical foundation for designing asphalt mixtures in extreme temperature variation zones.

Keywords

Oversize Asphalt Mixture, Fiber-Reinforced, Crack Resistance, Asphalt-to-Aggregate Ratio

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

新疆地处我国西北干旱区,气候条件极为严酷,年均昼夜温差超过 15°C ,冬季极端低温可达 -30°C 以下,夏季地表温度高达 60°C 以上[1]。剧烈的温度交变导致沥青路面频繁经历热胀冷缩循环,加速温缩裂缝与反射裂缝的产生,尤其在重载交通(如连霍高速新疆段、能源运输通道)作用下,裂缝扩展进一步加剧,严重影响路面服役寿命与行车安全。为应对这一挑战,超大粒径沥青混合料(ATB-50)因其强荷载扩散能力与成本优势,被广泛应用于新疆高等级公路基层,但其粗集料占比高($>70\%$)、沥青胶浆分布不均的特点,显著弱化了混合料的抗裂性能,在极端温差下更易形成贯穿性裂缝。纤维增强技术通过桥接裂缝、改善应力分布可有效提升材料抗裂性,然而,现有研究多聚焦于普通沥青混合料(ATB-50)或单一纤维类型(如聚丙烯纤维)的改性效果,缺乏针对新疆特殊气候的适应性分析[2][3]。例如,钢纤维的高模量特性可能抑制高温下的应力集中,但其低温脆性是否适配寒区环境尚不明确;玄武岩纤维的耐候性优势能否缓解新疆强紫外线与风沙侵蚀,亦需进一步验证[4][5]。鉴于此,本文以新疆大温差环境为背景,通过半圆弯曲试验(SCB, Semi-Circular Bend Test)与低温劈裂试验,系统研究钢纤维、聚丙烯纤维及玄武岩纤维对超大粒径混合料宏观抗裂性能的增强机制,量化断裂能、低温应变等关键指标,旨在提出“气候-纤

维-性能”适配的选型策略，为新疆及类似严酷气候区沥青路面设计与养护提供理论支撑与实践指导。

2. 材料与方案

2.1. 材料

(1) 沥青

沥青选用克拉玛依 90#基质沥青，技术指标见表 1。

Table 1. Technical properties of asphalt

表 1. 沥青技术性质

试验项目	测定值	规范值	试验方法
针入度(25°C, 100 g, 5 s)	95	80~100	T0604-2011
针入度指数 PI	-1.2	-1.5~+1.0	T0604-2011
15°C 延度	115.3 cm	≥100 cm	T0605-2011
软化点(环球法)	47°C	≥45	T0606-2011
60°C 动力粘度	168.3 Pa·s	≥160 Pa·s	T0620-2000
含蜡量(蒸馏法)	2%	≤2.2%	T0615-2011
闪点	325°C	≥245°C	T0611-2011
溶解度(三氯乙烯)	99.8%	≥99.5%	T0607-2011
密度(15°C)	0.97g/cm ³	实测记录	T0603-2011

(2) 粗集料

粗集料选用玄武岩碎石，技术指标见表 2。

Table 2. Technical properties of coarse aggregate

表 2. 粗集料技术性质

试验项目	下列不同粒径(mm)粗集料技术指标的测定值					规范值	试验方法
	37.5~53	19~37.5	9.5~19	4.75~9.5	2.36~4.75		
针片状颗粒含量(%)	3.3	7.3	13.8	11.2	—	≤15	T0312-2005
吸水率(%)	0.831	1.052	1.532	1.583	1.912	≤2.0	T0304-2024
压碎值(%)			16.7			≤26	T0316-2024
磨耗值(%)			21.5			≤28	T0317-2005
坚固性(%)			4.4			≤12	T0314-2025
软石含量(%)			0.9			≤3	T0320-2005
对沥青的粘附性(级)			6			≥4	T0616-1993

(3) 细集料

细集料选用玄武岩机制砂，技术指标见表 3。

Table 3. Technical properties of fine aggregate
表 3. 细集料技术性质

试验项目	测定值	规范值	试验方法
表观相对密度	2.737	≥2.5	T0328-2005
坚固性(大于 0.3 mm 部分) (%)	—	≤12	T0340-2024
亚甲蓝值(g/kg)	3.4	≤25	T0349-2005
棱角性(流动时间) (s)	41.2	≥30	T0345-2005

(4) 矿粉

矿粉选用石灰岩矿粉，技术指标见表 4。

Table 4. Technical properties of mineral filler
表 4. 矿粉技术性质

实测项目	实测值	规范值	试验方法
表观相对密度	2.681	≥2.5	T0352-2024
亲水系数	0.59	<1	T0353-2000

(5) 纤维

钢纤维、聚丙烯纤维和玄武岩纤维技术指标参数见表 5 所示。

Table 5. Fiber parameters
表 5. 纤维参数

参数	钢纤维	聚丙烯纤维	玄武岩纤维
密度(g/cm ³)	7.8	0.91	2.65
抗拉强度(MPa)	≥1000	≥350	≥2000
弹性模量(GPa)	200	3.5	70
断裂延伸率(%)	1.5~2.0	15~20	2.5~3.0
熔点/软化点(°C)	1400 (熔点)	160 (熔点)	600 (软化点)
热膨胀系数(×10 ⁻⁶ /°C)	11.7	150	8.0
耐酸性	差	优	优
耐碱性	中(需镀锌处理)	优	优
耐紫外线	优(镀锌后)	差(需抗老化剂)	优

2.2. 方案

2.2.1. 级配范围

本研究以超大粒径沥青混合料为对象，级配见表 6。

Table 6. Gradation of ATB-50 mixture
表 6. ATB-50 混合料级配

筛孔尺寸(mm)	53	37.5	19	9.5	4.75	2.36	1.18	0.3	0.15	0.075
通过率(%)	100	75~85	60~70	40~50	30~38	22~28	14~22	7~13	5~10	3~6

2.2.2. 抗裂性能试验方案

超大粒径沥青混合料抗裂试验包括 SCB 试验和低温弯曲试验。对于 SCB 试验，本研究在 $\Phi 200\text{ mm} \times 160\text{ mm}$ 试件基础上进行切割，最后切割成半径 100 mm ，厚度 60 mm 的半圆试件。对于低温抗裂试验，优选了 $60\text{ mm} \times 65\text{ mm} \times 280\text{ mm}$ 的小梁试件尺寸和 260 mm 的试验跨径。试验温度为 -15°C ，两种试验的加载速率均为 50 mm/min 。级配类型包括 ATB-30 和 ATB-50 两种级配，油石比统一为 3.4% 。

参考现有研究[6][7]，纤维类型分别为钢纤维、玄武岩纤维以及聚丙烯纤维，掺量分别拟定为 0.1% 、 0.2% 和 0.3% ，长度统一为 18 mm 。此外，每组纤维制备 6 个试件(3 个 SCB 试件，3 个劈裂试件)，共 12 组(含对照组)，总计 72 个试件；室温放置 24 h 后脱模， -15°C 恒温箱中保温 12 h (低温试验用)。

3. 试验结果

3.1. 半圆弯曲试验

3.1.1. 不同纤维类型的影响

固定油石比 3.4% ，纤维掺量 0.1% ，变化纤维类型。图为不同纤维类型 ATB-50 和 ATB-30 断裂能变化示意图。由图 1 可知，随着纤维类型的变化，ATB-30 和 ATB-50 的半圆弯曲断裂能呈现出不同的趋势。钢纤维在 ATB-30 和 ATB-50 中的表现最为突出，ATB-50 的断裂能为 3.90 J/m^2 ，高于 ATB-30 的 3.75 J/m^2 ，显示出钢纤维显著增强了混合料的抗裂性。聚丙烯纤维则表现较弱，ATB-50 的断裂能 3.50 J/m^2 甚至低于 ATB-30 的 3.60 J/m^2 ，表明聚丙烯纤维对抗弯裂的作用有限。玄武岩纤维则提供了适度的提升，ATB-50 的断裂能为 3.70 J/m^2 ，高于 ATB-30 的 3.65 J/m^2 ，但不如钢纤维显著。规律上，钢纤维的强化作用最为明显，能有效增加混合料的韧性和抗裂性能，而聚丙烯纤维的贡献较小，玄武岩纤维则提供了平衡的性能提升。其机理在于，钢纤维通过增强材料的抗拉强度和应力传递，能有效桥接裂纹并抑制裂纹扩展；聚丙烯纤维和玄武岩纤维虽然也能增加材料的抗裂性，但由于与沥青的界面结合较弱，增强效果相对较差。

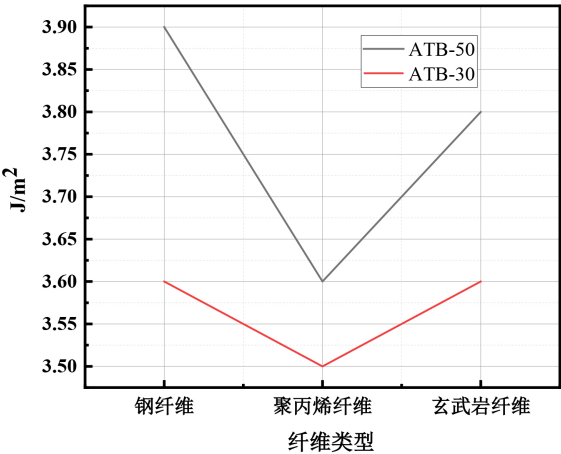


Figure 1. Effect of fiber type on fracture energy
图 1. 纤维类型对断裂能的影响

3.1.2. 不同纤维掺量的影响

固定油石比 3.4% ，纤维掺量 0.2% ， 0.3% ，变化纤维类型。图分别为不同纤维掺量对 ATB-50 和 ATB-30 断裂能变化示意图。根据图 2 数据，随着纤维掺量从 0.2% 增加到 0.3% ，ATB-30 和 ATB-50 的半圆弯曲断裂能均有所提升，尤其是在钢纤维掺量增加时，ATB-50 的断裂能从 3.80 J/m^2 提升至 4.20 J/m^2 ，显

示出钢纤维对抗裂性能的显著提升。聚丙烯纤维和玄武岩纤维的提升较为温和, ATB-50 中的断裂能分别为 3.60 J/m^2 和 3.80 J/m^2 。规律上, 钢纤维对断裂能的提升作用最为明显, 掺量增加能显著提高混合料的抗裂性, 尤其在 ATB-50 中效果尤为突出。

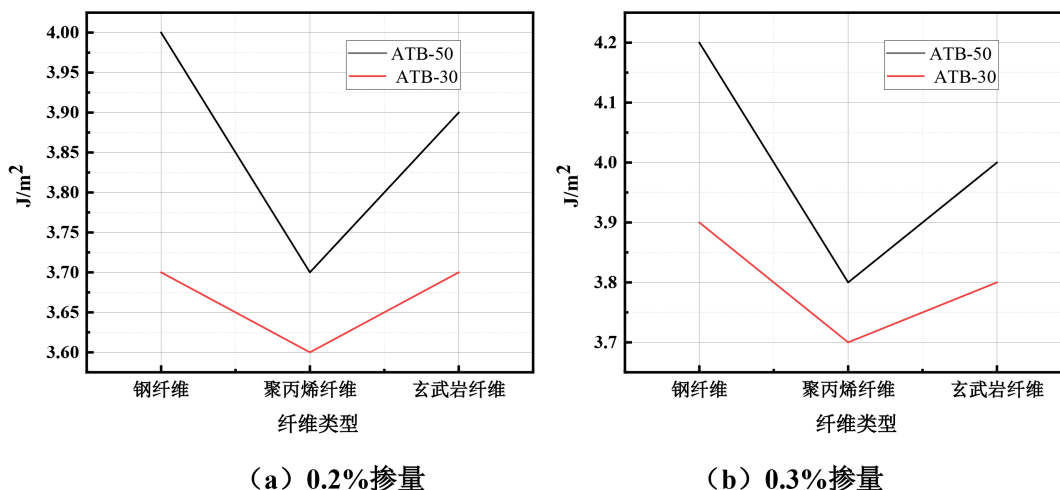


Figure 2. Effect of fiber dosage on fracture energy
图 2. 纤维掺量对断裂能的影响

3.1.3. 不同油石比的影响

固定纤维掺量 0.1%, 变化油石比为 3.0% 和 3.8%, 变化纤维类型。图分别为不同油石比对 ATB-50 和 ATB-30 断裂能变化示意图。根据图 3 数据分析, 随着油石比从 3.0% 增加到 3.7%, ATB-30 和 ATB-50 的半圆弯曲断裂能均显著提升, 尤其在钢纤维的作用下, ATB-50 的断裂能从 3.70 J/m^2 提升至 3.90 J/m^2 , 而 ATB-30 的提升幅度较小, 从 3.60 J/m^2 提升至 3.80 J/m^2 , 显示出钢纤维对混合料的增强效果最为显著。聚丙烯纤维和玄武岩纤维的提升较弱, 尤其在油石比为 3.7% 时, ATB-50 中的断裂能仅为 3.50 J/m^2 和 3.40 J/m^2 。规律上, 钢纤维对断裂能的提升作用最为明显, 且在较高油石比下, 钢纤维能够进一步增强混合料的抗裂性能。

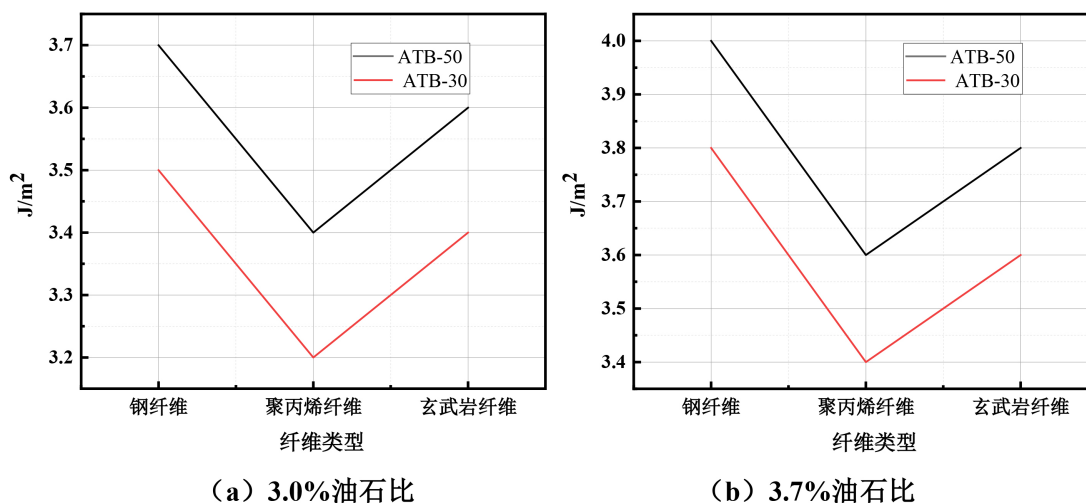


Figure 3. Effect of asphalt-aggregate ratio on fracture energy
图 3. 油石比对断裂能的影响

3.2. 低温劈裂试验

3.2.1. 不同纤维类型的影响

固定油石比 3.4%，纤维掺量 0.1%，变化纤维类型。图为不同纤维类型对 ATB-50 和 ATB-30 低温疲劳破坏应变变化示意图。根据图 4 数据，随着钢纤维的掺入，ATB-30 和 ATB-50 的低温疲劳破坏应变均显著提高，尤其是 ATB-50，钢纤维的低温疲劳破坏应变为 3250 $\mu\epsilon$ ，高于 ATB-30 的 3150 $\mu\epsilon$ ，表明钢纤维能显著增强混合料在低温环境下的抗裂性能。聚丙烯纤维和玄武岩纤维的提升相对较小，ATB-50 的低温疲劳破坏应变分别为 3100 $\mu\epsilon$ 和 3100 $\mu\epsilon$ ，略高于 ATB-30 的 3050 $\mu\epsilon$ 和 3000 $\mu\epsilon$ ，显示出这些纤维对低温性能的改善作用有限。规律上，钢纤维的增强作用最为显著，能有效提高低温抗裂性，尤其在 ATB-50 中效果更加突出。

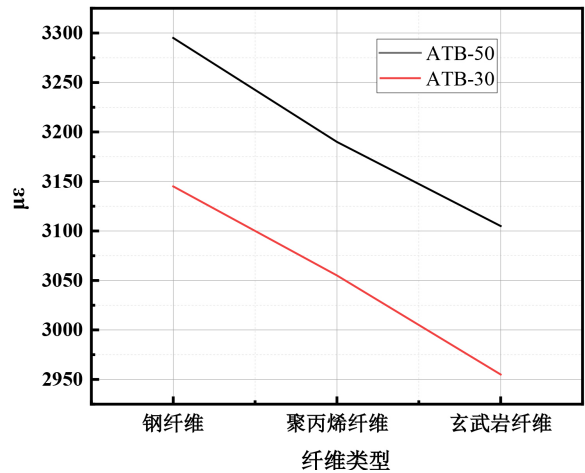


Figure 4. Effect of fiber type on low-temperature fatigue failure strain
图 4. 纤维类型对低温疲劳破坏应变的影响

3.2.2. 不同纤维掺量的影响

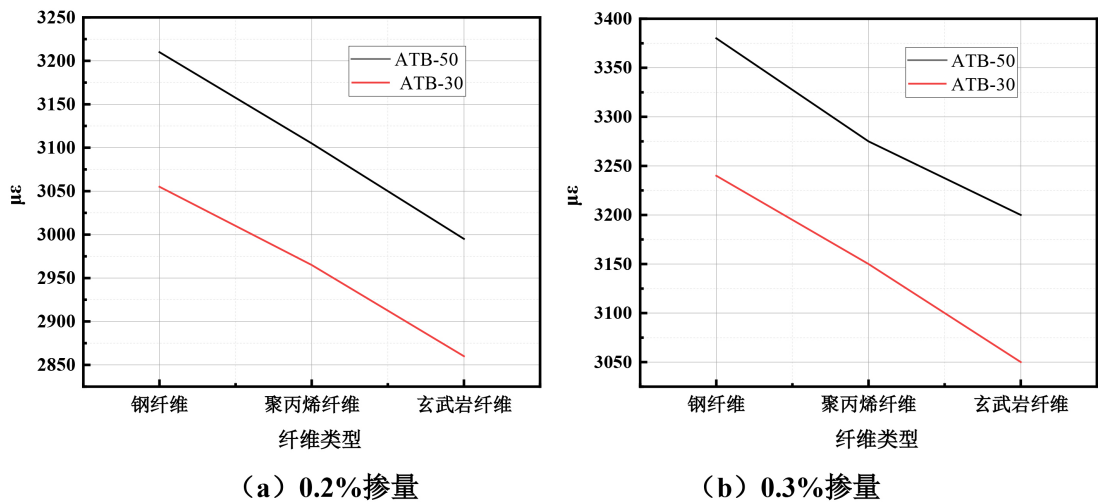


Figure 5. Effect of fiber dosage on low-temperature fatigue failure strain
图 5. 纤维掺量对低温疲劳破坏应变的影响

固定油石比 3.4%，纤维掺量 0.2%，0.3%，变化纤维类型。图 5 为不同纤维掺量对 ATB-50 和 ATB-30 低温疲劳破坏应变变化示意图。根据图 5 数据分析，随着纤维掺量从 0.2%增加到 0.3%，ATB-30 和 ATB-50 的低温疲劳破坏应变普遍呈现下降趋势，尤其在钢纤维的作用下，ATB-50 的低温疲劳破坏应变从图 5(a)的 3200 $\mu\epsilon$ 提升到图 5(b)的 3300 $\mu\epsilon$ ，而 ATB-30 的变化幅度较小。这表明钢纤维在低温环境下显著增强了混合料的抗裂性能，能够有效减缓裂纹的扩展。聚丙烯纤维和玄武岩纤维虽然也能提升低温疲劳性能，但提升幅度较小，特别是在 0.3%掺量下，变化较为平缓，表明其低温抗裂性不足以与钢纤维的效果相比。

3.2.3. 不同油石比的影响

固定纤维掺量 0.1%，变化油石比为 3.0%和 3.8%，变化纤维类型。图 6 为不同油石比对 ATB-50 和 ATB-30 低温疲劳破坏应变变化示意图。根据图表数据，随着油石比从 3.0%增加到 3.8%，ATB-30 和 ATB-50 的低温疲劳破坏应变均有所提高，尤其在钢纤维的掺入下，ATB-50 的低温疲劳破坏应变从 3100 $\mu\epsilon$ 提升至 3200 $\mu\epsilon$ ，而 ATB-30 的变化幅度较小。无论是 0.2%还是 0.3%纤维掺量，钢纤维的引入都显著提高了低温抗裂性能，尤其在 ATB-50 中，钢纤维的效果最为突出。聚丙烯纤维和玄武岩纤维尽管在提升低温抗裂性方面也有所贡献，但提升幅度较小，表明钢纤维在低温环境下的作用更加显著。

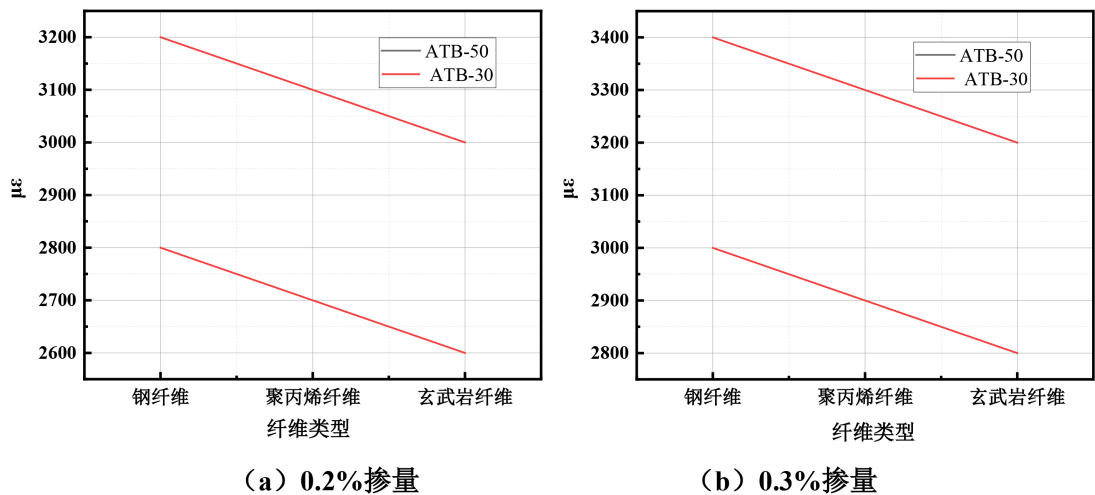


Figure 6. Effect of asphalt-aggregate ratio on low-temperature fatigue failure strain
图 6. 纤维掺量对低温疲劳破坏应变的影响

4. 可行性分析

Table 7. Feasibility analysis
表 7. 可行性分析

类型	油石比	破坏应变($\mu\epsilon$)	断裂能(J/m ²)	适用场景(新疆地区)	材料单价	单位用量(kg/m ³)	造价增幅(%)
钢纤维	3.40%	3300	4.5	高速公路、城市主干道(适用于新疆北部、天山山区等低温地区)	8500 元/t	6.5 (掺量 0.3%)	32.50%
聚丙烯纤维	3.40%	3200	3.8	乡村公路、低预算道路(适用于新疆南部、西部较为温暖地区)	3200 元/t	1.2 (掺量 0.3%)	0.50%
玄武岩纤维	3.40%	3100	4.1	高温干旱地区、公路桥梁(适用于新疆东部的干旱与高温环境)	6500 元/t	3.6 (掺量 0.3%)	12.50%

在新疆地区,选择不同类型纤维的路面材料相比无纤维对照组,低温性能得到显著提升。见表7,钢纤维(油石比3.4%)不仅提供了最佳的低温性能,其低温劈裂破坏应变和低温弯曲断裂能也有较大涨幅,适用于新疆北部及天山山区等寒冷地区的高速公路和城市主干道。聚丙烯纤维的低温性能提升虽然较小,但其造价增幅几乎为零(0.5%),适合用于新疆南部和西部的乡村公路。玄武岩纤维的低温性能提升为7%,适合用于新疆东部的高温干旱地区和公路桥梁建设,且造价增幅适中(12.5%)。相较于无纤维材料,所有纤维添加改性方案均有效提高了路面材料的低温抗裂性能,为各类气候条件下的路面施工提供了更好的选择。

5. 结论

(1) 钢纤维显著提升抗裂性能,且对ATB-50增强效果更优。掺入0.3%钢纤维可使ATB-50的断裂能从 3.70 J/m^2 (对照组)提升至 4.20 J/m^2 (+13.5%),低温疲劳破坏应变从 $2950 \mu\epsilon$ 增至 $3300 \mu\epsilon$ (+11.9%),其高模量特性在重载交通与低温环境下表现出优异裂纹抑制能力。

(2) 聚丙烯纤维与玄武岩纤维的低温抗裂性提升有限,但具备场景适配性。聚丙烯纤维(掺量0.3%)断裂能提升5.4% ($3.5 \rightarrow 3.7 \text{ J/m}^2$),适用于增量成本需低于1%的南疆乡村公路;玄武岩纤维(掺量0.3%)断裂能提升8.1% ($3.5 \rightarrow 3.8 \text{ J/m}^2$),耐高温与抗紫外特性可满足东疆干旱区及桥梁铺装需求。

(3) 油石比优化可协同增强纤维改性效果。当油石比从3.0%增至3.8%时,钢纤维增强的ATB-50低温破坏应变提升6.5% ($3100 \rightarrow 3300 \mu\epsilon$),表明提高沥青胶浆含量可缓解粗集料骨架的应力集中。

(4) 提出“气候-性能-经济”三元选纤策略。针对新疆大温差分区特征:北疆寒区(年均低温 $< -20^\circ\text{C}$)优选钢纤维增强ATB-50,东疆高温干旱区(夏季 $> 45^\circ\text{C}$)推荐玄武岩纤维改性混合料,南疆温暖区(温差 $< 10^\circ\text{C}$)可采用聚丙烯纤维低造方案。

基金项目

乌鲁木齐市科学技术计划(B231017008)。

参考文献

- [1] 蒋应军, 易勇, 田甜, 等. 超大粒径沥青混合料的黏弹特性及温度影响[J]. 建筑材料学报, 2024, 27(4): 327-331+342.
- [2] Jiang, Y., Xue, J. and Chen, Z. (2017) Influence of Volumetric Property on Mechanical Properties of Vertical Vibration Compacted Asphalt Mixture. *Construction and Building Materials*, **135**, 612-621. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.159>
- [3] 张正明. 玄武岩纤维增强乳化沥青冷再生混合料性能研究[J]. 路基工程, 2025(1): 96-101.
- [4] 刘元德, 郑南翔, 张翔, 等. 硅烷偶联剂改性玄武岩纤维沥青胶浆流变性能研究[J/OL]. 中外公路, 1-12. <https://link.cnki.net/doi/10.14048/j.issn.1671-2579.2025.03.011>, 2025-02-24.
- [5] 赵越, 田国栋, 钟勇, 等. 絮状玄武岩纤维改性沥青混合料路用性能研究[J]. 中国建筑金属结构, 2025, 24(1): 36-39.
- [6] 龙柱良. 不同类型纤维对沥青混合料路用性能的影响研究[J]. 四川水泥, 2024(11): 218-220.
- [7] 孔维康. 基于半圆弯曲试验的大粒径沥青混合料断裂及疲劳性能研究[D]: [硕士学位论文]. 南宁: 广西大学, 2023.