

大温差地区掺玄武岩纤维低标号沥青 混合料路用性能研究

樊兴华, 薛振华

(陕西铁路工程职业技术学院, 陕西 渭南 714000)

摘要:针对新疆大温差地区的地理气候特征,通过DSR试验、BBR试验测试50#基质沥青、玄武岩纤维—50#沥青、90#基质沥青的高温性能、低温性能、疲劳性能,并基于沥青胶浆性能优选出较佳的纤维掺量;通过车辙试验、小梁弯曲试验、疲劳试验,测试3种沥青混合料的路用性能;结合沥青胶浆试验及SEM试验分析玄武岩纤维对低标号沥青混合料低温抗裂性能的改善机理。试验结果表明:掺加玄武岩纤维对50#低标号沥青混合料的高温、低温、疲劳性能具有显著的改善作用。

关键词:大温差地区;低标号沥青;玄武岩纤维;路用性能;改善机理

新疆地域广袤,气候差异大,年最低气温约为 -20°C ,最高气温约为 60°C ,且随着国家“一带一路”倡议等项目的开展,新疆地区道路交通量越来越大,重载交通占比逐年提高。目前常用的70#、90#沥青路面在重载交通、高低温极端气候的作用下,容易产生车辙破坏、低温开裂、疲劳破坏等损害,降低了沥青路面的使用寿命,增加了道路的维修、养护成本。

郭寅川等研究表明:低标号沥青混合料具有良好的抗车辙性能和经济效益,可以在新疆高温抗车辙地区推广使用低标号沥青混合料;但低标号沥青混合料的低温抗裂性能较差;李霖等研究发现:30#低标号沥青混合料具有良好的高温稳定性,与SBS沥青混合料接近,优于70#沥青混合料;邹桂莲对沥青胶浆的流变行为进行了研究,发现基质沥青的标号越低,其高温性能越好,低温性能越差;孙雪伟等发现低标号沥青混合料的水稳定性、低温抗裂性能远低于高标号沥青混合料。国内外研究现状表明:低标号沥青具有良好的高温抗车辙性能,但其低温抗裂性能较差,新疆大温差地区具有丰富的沥青资源,如能改善低标号沥青的低温抗裂性能,扬长避短,将低标号沥青应用于大温差地区,不但能提高沥青路面的使用寿命、降低养护成本,还能充分利用低标号沥青资源。

吕阳研究表明:掺加玄武岩纤维后,高模量沥青混合料的高温、低温稳定性、疲劳性能均得到大幅度提

高,且随着温度的提高,沥青混合料的抗车辙性能衰减程度变缓;覃潇对比分析了木质素纤维、聚酯纤维、玄武岩纤维沥青胶浆的性能,发现木质素纤维沥青胶浆抗裂性能较差,聚酯纤维沥青胶浆高温流变性能较差,玄武岩纤维沥青胶浆综合性能最佳;李慧萍通过试验研究发现:玄武岩纤维长度为6 mm,掺量为0.35%时,对沥青混合料路用性能的改善作用最佳。玄武岩纤维价格低廉、与沥青相容性强,对沥青混合料的路用性能具有良好的、全面的改善作用,其改善效果得到了广泛的研究和应用,如采用玄武岩纤维改善低标号沥青的路用性能,不但能弥补低标号沥青混合料低温性能的缺陷,还能发挥低标号沥青混合料抗车辙能力强的优点。

针对新疆大温差地区交通量大、重载交通占比多等道路交通特征及气候干旱、温差大等地理气候特征,该文通过掺加玄武岩纤维来改善低标号沥青混合料的路用性能,为低标号沥青混合料在大温差地区的推广应用提供指导。

1 原材料与试验方案

1.1 原材料

沥青的技术指标如表1所示,集料压碎值为13.3%,表观密度为 2.63 g/cm^3 ,磨耗值为12.3%,矿

粉的表观密度为 2.68 g/cm³,塑性指数为 2.2,沥青及集料的技术指标均满足 JTG F40—2004《公路沥青路面施工技术规范》的要求。

表 1 沥青主要技术指标

测试项目		单位	50 [#] 沥青	90 [#] 沥青
针入度(25℃)		0.1 mm	52.6	94.4
延度(10℃,5 cm/min)		cm	25.9	111
延度(5℃,5 cm/min)		cm	—	66
软化点		℃	62.1	51.3
密度(25℃)		g/cm ³	1.031	1.003
质量损失		%	0.18	—0.35
TFROT 后	残留针入度比(25℃)	%	73.9	53.2
	残留延度(10℃, 5 cm/min)	cm	8.7	59

其中,在测定 50[#] 沥青的 5℃ 延度时,沥青试样直接发生脆断,这表明 50[#] 沥青的低温性能较差。

玄武岩纤维的技术指标如表 2 所示。

表 2 玄武岩纤维的技术指标

长度/ mm	密度/ (g·cm ⁻³)	弹性模 量/GPa	断裂延 伸率/%	抗拉强 度/MPa
9	2.62	105	3.3	3 300

表 3 沥青的 DSR 试验结果

纤维掺 量/%	基质沥 青标号	70℃			76℃			82℃		
		$G^*/$ kPa	$\delta/$ (°)	$(G^*/\sin\delta)/$ kPa	$G^*/$ kPa	$\delta/$ (°)	$(G^*/\sin\delta)/$ kPa	$G^*/$ kPa	$\delta/$ (°)	$(G^*/\sin\delta)/$ kPa
3	50 [#]	2.35	81.93	2.37	1.80	84.77	1.80	1.39	85.68	1.39
6	50 [#]	2.52	80.48	2.56	1.95	83.35	1.95	1.46	83.86	1.47
9	50 [#]	2.47	81.82	2.49	1.97	84.77	1.97	1.33	84.89	1.33
12	50 [#]	2.29	82.35	2.31	1.70	84.77	1.70	1.20	85.80	1.20
0	50 [#]	2.12	83.18	2.13	1.42	85.44	1.42	0.81	85.98	0.81
0	90 [#]	1.77	85.21	1.78	0.96	87.17	0.96	0.24	88.34	0.24

即沥青抵抗变形的能力越弱;复数剪切模量 G^* 越大,沥青的黏弹性变形越低,沥青的累积变形越小;车辙因子($G^*/\sin\delta$)越大,沥青抗车辙性能越强。由表 3 可知:整体而言,随着纤维掺量的增大,沥青胶浆的 G^* 先增大后减小, δ 先减小后增大,车辙因子先增大后减小。掺加纤维后,沥青胶浆的高温抗车辙性能显著增强,这是因为玄武岩纤维对沥青具有很强的吸附作用,纤维掺入沥青中,提高了纤维—沥青胶浆的刚度,导致纤维—沥青胶浆的复数剪切模量增大;纤维具有较强

1.2 试验方案

通过 DSR 试验、BBR 试验测试 50[#] 基质沥青胶浆、玄武岩纤维—50[#] 沥青胶浆、90[#] 基质沥青胶浆的高温、低温、疲劳性能,并基于沥青胶浆性能优选出较佳的纤维掺量。纤维掺量取 3%、6%、9%、12%(占沥青质量的百分比),纤维长度取 9 mm。

新疆地区年均温差较大,年最低气温为 -20℃,最高气温为 60℃,降雨量少,道路交通量越来越大,重载交通占比逐渐增大。针对新疆地区的道路交通环境和地理气候特点,通过车辙试验、低温弯曲试验、疲劳试验对掺玄武岩纤维沥青混合料的路用性能进行研究,试验方法参见 JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》。

2 沥青胶浆试验结果及分析

2.1 高温性能试验

通过 DSR 试验分别测试沥青胶浆的复数剪切模量(G^*)和相位角(δ),并计算其车辙因子($G^*/\sin\delta$),DSR 试验频率为 10 Hz,试验温度为 70、76、82℃,试验结果如表 3 所示。

相位角 δ 越大,表明沥青胶浆黏性成分比例越大,

的弹性,掺入纤维后,纤维—沥青胶浆抵抗变形的能力增强。50[#] 基质沥青胶浆的车辙因子显著高于 90[#] 基质沥青胶浆,这表明 50[#] 低标号沥青的高温抗变形能力远强于 90[#] 基质沥青。纤维掺量为 6%时,其高温性能最好。

随着温度的增高,沥青胶浆的车辙因子均逐渐减小,沥青胶浆的车辙因子随温度的变化趋势见图 1。

由图 1 可知:以车辙因子随温度的变化速率来看,90[#] 沥青对温度的变化最为敏感,表明相对于 50[#] 沥

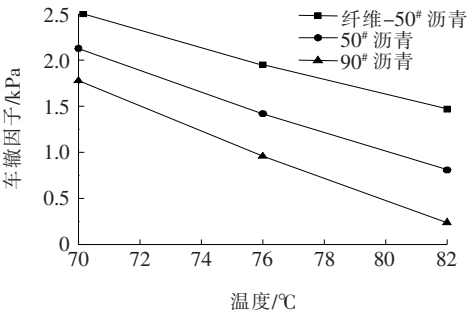


图 1 车辙因子随温度的变化趋势(纤维掺量为 6%)

青,随着温度的提高,90# 沥青的抗车辙性能越来越差。掺加纤维后,纤维—沥青胶浆的车辙因子变化速率显著降低,表明纤维的吸附、稳定作用,显著地改善了沥青的高温抗变形能力。

2.2 低温性能试验

通过 BBR 试验测定沥青胶浆的劲度模量 S 和蠕变速率 m (荷载作用 60 s 处劲度模量曲线的斜率),试验温度为 -6 、 -12 、 -18 、 -24 °C,试验结果见表 4。

随着温度的降低,沥青的蠕变劲度模量逐渐增大,

表 4 BBR 试验结果

纤维掺量/%	基质沥青标号	-6 °C		-12 °C		-18 °C		-24 °C	
		S/MPa	m	S/MPa	m	S/MPa	m	S/MPa	m
3	50#	69.3	0.427	130.3	0.366	211.5	0.298	—	—
6	50#	66.4	0.463	129.1	0.389	193.2	0.317	319.0	0.251
9	50#	65.9	0.449	121.5	0.375	189.6	0.325	276.0	0.276
12	50#	67.8	0.418	125.2	0.358	203.1	0.313	293.0	0.263
0	50#	72.6	0.381	143.4	0.330	231.7	0.273	—	—
0	90#	56.1	0.447	119.4	0.381	179.2	0.332	253.2	0.294

沥青胶结料的低温抗裂性逐渐降低,进而导致沥青混合料产生低温开裂。蠕变速率表征沥青的应力松弛能力,蠕变速率越大,沥青胶浆的应力松弛性能越好,其抗裂性能也越佳。由表 4 可知:整体而言,随着玄武岩纤维掺量的增大,纤维—沥青胶浆的劲度模量先减小后增大,蠕变速率先增大后减小,纤维掺量为 6%、9% 时,纤维—沥青胶浆的低温抗裂性较好,纤维—沥青胶浆的 PG 等级为 PG-28。纤维增强了纤维—沥青胶浆的应力消散能力,从而提高其低温抗裂性能。50# 基质沥青的 PG 等级为 PG-22,90# 基质沥青的 PG 等级为 PG-28,50# 基质沥青的低温性能远低于 90# 基质沥青,且温度越低,其低温性能相差越大,越容易产生低温开裂。

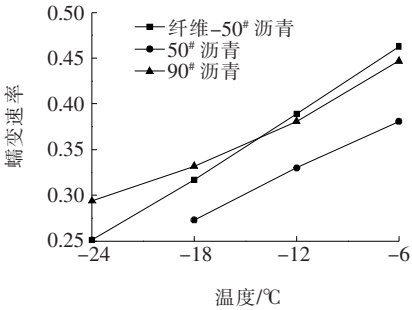


图 2 蠕变速率随温度的变化(纤维掺量为 6%)

蠕变速率 m 随温度的变化趋势如图 2 所示。

由图 2 可知:随着温度的降低,沥青的蠕变速率也逐渐减小,掺加纤维后,纤维—沥青胶浆的蠕变速率显著增强;温度较高时,纤维—沥青胶浆的蠕变速率大于 90# 沥青,随着温度的降低,纤维—沥青的蠕变速率逐渐低于 90# 沥青,这表明掺加纤维可以提高沥青的低温性能上限,但温度过低时,沥青本身的低温黏弹性决定了其低温性能下限,纤维起到的作用减弱。

2.3 疲劳性能试验

沥青胶浆的疲劳试验结果如表 5 所示,试验温度

表 5 沥青胶浆的疲劳试验结果

纤维掺量/%	基质沥青标号	不同温度(°C)的($G^* \sin \delta$)/MPa				
		25	20	15	10	5
3	50#	1.184	1.956	2.387	4.001	5.789
6	50#	0.934	1.676	2.224	3.719	5.312
9	50#	1.096	1.711	2.016	3.866	5.511
12	50#	1.064	1.865	2.279	3.917	5.730
0	50#	1.482	2.232	2.692	4.246	6.156
0	90#	1.612	2.518	3.041	4.135	6.368

取 25~5 °C,频率为 10 Hz。

疲劳因子($G^* \sin \delta$)可以表征沥青的疲劳性能, $G^* \sin \delta$ 越大,表示重复荷载作用下,沥青的能量损失速度越快,而重复加载过程中的能量损失与沥青混合

料的疲劳寿命具有正比关系,因此疲劳因子越小,沥青及其沥青混合料的抗疲劳性能越强。由表5可知:随着玄武岩纤维掺量的增大,纤维—沥青胶浆的疲劳因子先降低后增大,掺加纤维可以有效改善纤维—沥青胶浆的抗疲劳性能,纤维掺量为6%时,其疲劳性能最好。整体而言,50#基质沥青的疲劳性能优于90#基质沥青,这是由于50#沥青的劲度模量较大,在承受同样的荷载时,50#沥青产生的变形较小。

3 沥青混合料试验结果及分析

3.1 配合比设计

由沥青胶浆试验可知,玄武岩纤维掺量为6%(占沥青质量的百分比)时,纤维—沥青胶浆具有较佳的性能,通过马歇尔试验,得出对应的玄武岩纤维沥青混合料的纤维掺量为0.35%(占沥青混合料总质量的百分比)。

沥青混合料的设计级配如图3所示。其中,50#沥青混合料、掺纤维50#沥青混合料、90#沥青混合料的油石比分别为4.50%、4.55%、4.45%。

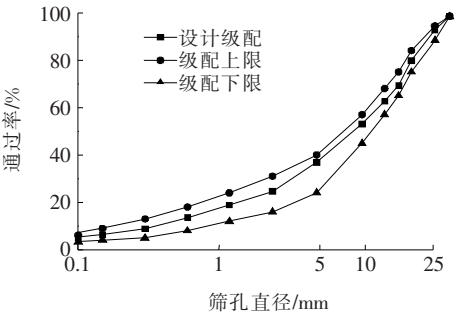


图3 AC-25 沥青混合料级配

3.2 高温稳定性试验

车辙试验结果如表6所示,试验温度为60℃。

表6 车辙试验结果

纤维掺量/%	基质沥青标号	动稳定度/(次·mm ⁻¹)
0.35	50#	5 441
0	50#	4 523
0	90#	3 712

由表6可知:掺加纤维后,沥青混合料的动稳定度大幅度增加,掺纤维50#沥青混合料的动稳定度较50#基质沥青混合料增大了20.3%,较90#沥青混合料增大了46.6%;掺纤维50#沥青混合料的高温稳定性远高于90#沥青混合料。纤维在沥青混合料中的乱向分布所形成的空间网状结构起到了加筋、桥接作用,增大了沥青混合料的内摩阻力,从而提高了沥青混合

料的动稳定度;50#沥青具有较强抵抗变形和恢复变形的能力,在高温下不易软化,故不易出现车辙变形。因此,针对新疆大温差地区夏季高温车辙病害严重的情况,掺玄武岩纤维低标号沥青可以大幅度降低车辙病害的发生。

3.3 低温稳定性试验

小梁弯曲试验结果见表7,试验温度为-20℃。

表7 沥青混合料低温稳定性试验结果

纤维掺量/%	基质沥青标号	弯拉强度/MPa	弯拉应变/ $\mu\epsilon$	劲度模量/MPa	弯曲应变能/(kJ·m ⁻³)
0.35	50#	7.6	3 131	2 844	9 553
0	50#	5.8	2 107	3 232	6 638
0	90#	7.3	2 839	2 967	8 871

由表7可知:掺加纤维后,50#沥青混合料的低温抗裂性大幅度改善,甚至超过了90#沥青混合料,掺纤维50#沥青混合料的弯拉应变较50#基质沥青混合料增大了48.6%、弯曲应变能增大了43.9%,掺纤维50#沥青混合料的弯拉应变较90#沥青混合料增大了10.3%、弯曲应变能增大了7.7%。

3.4 疲劳性能试验

疲劳试验结果如表8所示,考虑到重载交通的因素,试验应力比取0.5、0.7。

表8 沥青混合料的疲劳寿命试验结果

纤维掺量/%	基质沥青标号	不同应力比时的疲劳寿命/次	
		0.5	0.7
0.35	50#	12 967	3 594
0	50#	9 631	2 732
0	90#	8 523	2 869

由表8可知:掺纤维50#沥青混合料的疲劳寿命高于50#、90#基质沥青混合料,应力比为0.5时,掺纤维50#沥青混合料的疲劳寿命较50#沥青混合料提高了34.6%,应力比为0.7时,疲劳寿命提高了31.6%。玄武岩纤维具有较强的抗拉强度,在沥青混合料的疲劳破坏过程中,纤维起到了消解应力、阻止疲劳裂缝扩展的作用,进而增大了沥青混合料的疲劳寿命。50#沥青混合料的疲劳寿命与90#沥青相近,应力比为0.5时,50#沥青混合料的疲劳寿命较90#沥青混合料提高了13%;应力比为0.7时,疲劳寿命降低了4.8%。这是因为50#沥青中黏性成分较少,沥

青脆性较强,在承受较大荷载时,沥青中更容易产生微裂缝,因此应力比较大时,50[#] 沥青混合料的疲劳寿命低于 90[#] 沥青混合料。

由沥青混合料的路用性能试验可知,低标号沥青混合料具有较强的高温稳定性和疲劳性能,但低温抗裂性能较差,难以适应新疆大温差地区的气候条件,而掺加玄武岩纤维后,低标号沥青混合料的低温稳定性得到了大幅度的提升。

4 玄武岩纤维对低标号沥青混合料低温抗裂性能的改善机理分析

结合沥青胶浆试验及沥青混合料路用性能试验结果,通过 SEM 试验分析掺加玄武岩纤维对低标号沥青混合料低温性能的改善机理,玄武岩纤维沥青混合料及普通沥青混合料的 SEM 照片如图 4、5 所示。

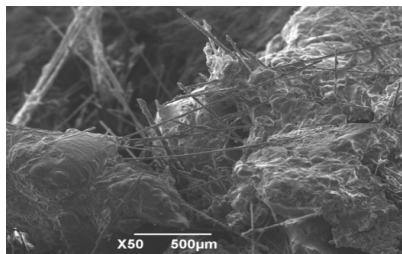


图 4 纤维—沥青混合料的 SEM 照片

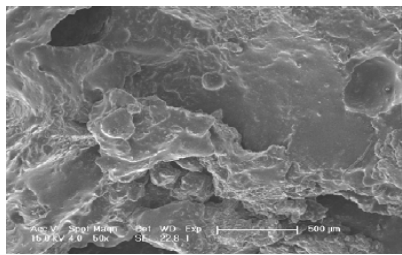


图 5 普通沥青混合料的 SEM 照片

由图 4、5 可知:玄武岩纤维在低标号沥青混合料中呈现乱向分布,相互桥接而形成空间网状结构,吸附了大量的沥青,而普通沥青混合料中沥青和集料较为分散,集料表面吸附的沥青较少。

随着温度的降低,沥青材料的蠕变劲度模量增大、蠕变速率减小,沥青中累积的低温应力导致沥青材料逐渐产生低温微裂缝,在荷载作用下,微裂缝进一步扩展,导致沥青混合料开始产生裂缝。玄武岩纤维的弹性模量较高,断裂延伸率较大,均匀散布在沥青混合料中的玄武岩纤维与混合料共同受力,与沥青胶结料形成复合柔性材料,增大了混合料的弹性模量和柔韧性,

提高了混合料抵抗变形的能力,起到了消解应力的作用;横跨在微裂缝两侧的纤维还起到桥接作用,约束低温微裂缝的扩展,阻止裂缝过快地地形成贯通性裂缝。

此外,玄武岩纤维抗拉强度较大,裂缝的进一步扩展需要将纤维拉断或拔出,而纤维的损伤断裂过程需要消耗大量的能量,因此在低标号沥青中掺加玄武岩纤维能够大幅度地提高沥青混合料的应变能密度,增大低标号沥青混合料的低温抗裂性能。

5 结论

(1) 50[#] 沥青胶浆的高温性能、疲劳性能均优于 90[#] 沥青胶浆,低温性能低于 90[#] 沥青胶浆,掺加纤维后 50[#] 沥青胶浆的高温性能、低温性能、疲劳性能均高于 90[#] 沥青胶浆,且纤维—沥青胶浆性能随温度变化的敏感性降低。玄武岩纤维掺量为 6% 时,对沥青胶浆性能的综合改善作用最佳。

(2) 掺加玄武岩纤维后,50[#] 低标号沥青混合料的高温、低温、疲劳性能均大幅度提高。

(3) 玄武岩纤维掺量为 0.35% 时,玄武岩纤维—50[#] 沥青混合料的各项路用性能优于 90[#] 沥青混合料。在新疆大温差地区推广应用玄武岩纤维低标号沥青混合料,可以有效地减少车辙、低温开裂、疲劳开裂等病害。

参考文献:

- [1] 韩冰,舒诚,陈杰,等.高模量沥青结合料研究进展[J].筑路机械与施工机械化,2019(7).
- [2] 贺薇,张志祥,关永胜.国产 AH-50 沥青性能指标的试验比较研究[J].石油沥青,2013(5).
- [3] 罗俊.原油对低标号沥青性质及其混合料路用性能的影响研究[D].华南理工大学硕士学位论文,2015.
- [4] 郭寅川,陈乔森,申爱琴,等.低标号沥青在新疆高温抗车辙地区的应用研究[J].硅酸盐通报,2018(10).
- [5] 李霖,王书杰,陈果.低标号沥青混合料的路用性能[J].交通标准化,2014(15).
- [6] 邹桂莲,徐剑,胡金龙.基于沥青胶浆试验研究低标号沥青混合料设计原则[J].公路交通科技,2014(10).
- [7] 孙雪伟,李饶.低标号沥青在高模量沥青混合料中的应用研究[J].石油沥青,2016(3).
- [8] 杨琳.基于低标号沥青与岩沥青掺配技术高模量沥青混合料耐久性试验研究[J].公路工程,2016(4).
- [9] 邹桂莲,李文娟,徐剑.低标号沥青胶浆低温流变行为研究[J].中外公路,2014(6).

季冻地区路用水泥混凝土抗盐冻性能试验研究

曹沈阳¹, 包得祥²

(1. 甘肃省兰州公路管理局, 甘肃 兰州 730000; 2. 甘肃省交通规划勘察设计院股份有限公司)

摘要:为提高季节性冰冻地区水泥混凝土路面的抗盐冻性能,在混凝土中分别掺入纳米 CaCO_3 、钢纤维、粉煤灰、引气剂以及改变水灰比,进行盐冻条件下的冻融循环试验及冻融前后的弯拉强度试验,试验时盐溶液为浓度3%的NaCl溶液,冻融循环试验总次数为200次。测得不同冻融循环次数下混凝土的弯拉强度损失、质量损失和相对动弹模量,并进行横向对比分析。研究表明:掺入1%纳米 CaCO_3 、1%钢纤维、0.01%引气剂及水灰比降为0.38时,均可明显改善混凝土的抗盐冻性能,混凝土弯拉强度分别提高9.7%、12.9%、3.3%和8.1%;掺入15%粉煤灰使混凝土弯拉强度降低9.7%,但抗盐冻性能改善明显。因而建议在季冻地区交通荷载等级为极重和特重的水泥混凝土路面中,在尽量加入引气剂、降低水灰比的基础上,优先考虑掺入纤维、纳米材料,不建议掺入粉煤灰。

关键词: 道路工程; 水泥混凝土路面; 抗盐冻; 纤维; 纳米材料; 粉煤灰

1 引言

水泥混凝土路面具有耐久性好、强度高、水稳定性及高温稳定性良等优点,被广泛应用于道路路面建设中,尤其是乡村道路。目前,中国水泥混凝土路面以普通水泥混凝土路面为主,该路面设置了大量的纵、横向接缝,是整个路面的薄弱部位,在季节性冰冻地区接缝位置常出现唧泥、脱空、错台、开裂等病害,大大影响了行车舒适性,缩短了路面使用寿命。与此同时,接缝的存在使水分更易进入路面结构内部,在春融、秋冻时节,路面混凝土材料将经受冻—融循环作用,若抗冻性能较差,其强度、耐久性将经受严峻的考验,易产生脱空、剥落等病害,大大影响行车舒适性,明显缩短了路面使用寿命,可见混凝土材料的抗冻性能对路面十分重要。尤其是下雪天气路面结冰时,为保证行车安全,

需要在路面上撒布除冰盐,更加速了路面破坏速度。

冻融条件下,水泥混凝土的破坏速度主要受两大因素的影响,一是冻融环境;二是水泥混凝土的抗盐冻性能。大量研究证明:盐冻条件下混凝土的破坏速度远大于一般水冻条件下混凝土的破坏速度。对破坏机理进行研究发现:①盐具有除湿作用,可明显缩短混凝土的饱水时间,加大混凝土的饱水程度;②盐溶液在加速凝结冰融化的过程中,将从混凝土中吸收大量的热量,导致混凝土结构内部形成温度梯度,产生温度应力,大大加速了混凝土的冻融破坏。

为提高混凝土抗盐冻性能,国内外学者开展了大量研究,研究水泥掺量、盐溶液浓度、外加剂、环氧树脂、矿物掺合料、纳米材料等对混凝土抗盐冻性能的影响。研究发现:当盐溶液浓度为2%~4%时,冻融循环作用下混凝土破坏速度最大;在水泥混凝土中,掺入引气剂、减水剂、纤维、矿物掺合料(粉煤灰、硅灰、超细

- *****
- | | |
|---|--|
| [10] 吕阳. 掺玄武岩纤维的高模量沥青混合料性能试验研究[D]. 扬州大学硕士学位论文, 2016. | [13] 刘向杰. 玄武岩纤维沥青混合料路用性能研究[J]. 中外公路, 2018(5). |
| [11] 覃潇, 申爱琴, 郭寅川. 玄武岩纤维沥青胶浆性能试验研究[J]. 建筑材料学报, 2016(4). | [14] 杨进, 肖鹏飞. 高模量低标号沥青抗车辙性能研究[J]. 石油沥青, 2013(3). |
| [12] 李慧萍, 王福满, 李晨. 玄武岩纤维对沥青混合料性能影响分析研究[J]. 中外公路, 2016(4). | [15] 冯师蓉. 沥青玛蹄脂粘弹性特性的DSR试验研究[D]. 郑州大学硕士学位论文, 2007. |

收稿日期: 2020-09-20(修改稿)

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(编号: CHD2016ZD014)

作者简介: 曹沈阳, 男, 硕士, 高级工程师. E-mail: 331355498@qq.com