

# 冻融作用下沥青混合料中骨料级配的差异分析

马宏岩<sup>1</sup>, 林铭彬<sup>2,3</sup>, 侯亚丽<sup>4</sup>

(1.福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350116; 2.福建联合石化公司技术与规划部;  
3.厦门大学 化学化工学院; 4.河南省城乡规划设计研究总院有限公司交通规划分院)

**摘要:**在季节性冻土地区,沥青路面反复经历冻融循环作用,极易出现开裂、坑槽、拥包等病害,其中以横向开裂最为显著。沥青的黏弹性能和骨料的级配特征是影响沥青混合料抗冻融能力的关键因素。目前,大量研究集中在沥青低温性能评价和沥青混合料低温性能研究方面,忽视了骨料级配在冻融前后的差异。该文通过现场调查和室内试验,分析了骨料级配与沥青混合料开裂情况的相关性。研究结果表明:在沥青满足设计要求的情况下,粗集料含量越少(级配曲线越靠近上限值),沥青路面的低温开裂越严重。严格控制骨料的施工配合比及抗压强度是保证沥青路面低温性能的关键。

**关键词:**沥青混合料;冻融作用;低温开裂;骨料级配

## 1 引言

在季节性冻土地区,随着大气温度的季节性变化,沥青路面反复经历冻融循环作用,极易出现开裂、坑槽、拥包等病害,其中以横向开裂最为显著。沥青路面的开裂直接降低了公路的稳定性和耐久性,一方面为水土等杂质渗入基层结构提供通道,引起路基软化和冻胀融沉等次生病害的发生;另一方面,降低了道路结构的承载能力和行车舒适程度,制约了公路的服务水平,缩减道路的服务寿命。因此,冻融作用下沥青混合料的耐久性和稳定性研究是道路工程领域备受关注的研究热点。

在冻融循环作用下,沥青混合料表现出典型的黏弹特性,低温开裂与材料性能、温度、降温速率等因素直接相关。在过去的几十年内,广大研究人员通过开发试验手段和计算模型来描述和预估沥青混合料的低

温开裂,在一定程度上改善了沥青路面的抗裂性能,但仍旧没有彻底解决这一问题。沥青的温缩特性、黏附能力以及骨料的级配特性都是影响沥青混合料低温抗裂性能的重要因素。目前,大量的研究仍集中在沥青和沥青混合料低温性能的研究上,忽视了骨料级配在冻融前后的变化,且没有对骨料级配与沥青混合料低温抗裂性能的关系进行深入的剖析和探讨。

该文以实际沥青路面在若干次冻融循环作用后的骨料级配为对象,通过现场调查和室内试验,对比沥青混合料在冻融作用后的骨料级配与设计级配的差异,分析冻融作用下沥青混合料骨料级配偏差值与开裂指数的相关性。

## 2 病害调查与现场取样

建(三江)虎(林)高速公路位于黑龙江省东部,年均最低气温低于 $-30^{\circ}\text{C}$ ,是典型的季节性冻土地区。

- \*\*\*\*\*
- [2] 杨维荣,叶伟,杨波.重晶石矿渣在水泥稳定碎石基层中的应用研究[J].公路交通技术,2016(6).
- [3] 姚珺,赵野,钡渣石灰协同作用处理含磷废水的研究[J].环境科学与技术,2010(1).
- [4] 唐英,荣酬,张晓刚,等.毒重石尾矿钡渣制取高纯氯化钡的研究[J].无机盐工业,2013(12).
- [5] 刘攀,张煜,王艳书,等.盐酸浸取钡渣中钡离子工艺路线

研究[J].广东化工,2014(22).

- [6] 孔祥杰,张金喜,等.沥青路面抗车辙性能影响因素研究[J].中外公路,2016(3).
- [7] 张争奇,赵战利.矿料级配对沥青混合料低温性能的影响[J].长安大学学报:自然科学版,2005(2).
- [8] 王广明.高等级公路沥青混凝土路面施工工艺系统控制[J].中外公路,2014(5).

收稿日期:2018-12-28(修改稿)

作者简介:马宏岩,女,博士,讲师.E-mail:mhyhit@163.com

该文依托黑龙江省建虎高速公路,对沥青路面实际的低温开裂情况进行现场调查,并钻取典型路段的结构芯样。进而,在室内对现场得到的沥青结构芯样进行级配分析,研究骨料级配与设计级配的偏差值与路面开裂指数间的相关性。

2.1 开裂状况调查

建虎高速公路主线为沥青路面结构(图 1),全长 204.331 km。铺筑用沥青混合料的沥青标号为 PG 70—28,25℃针入度为 70(0.1 mm),5℃延度为 42 cm,软化点为 81.2℃。尽管沥青的低温性能满足最低温度的设计要求,但调查发现该公路仍旧存在大量的低温开裂问题,说明单纯考虑沥青材料无法确保沥青路面的低温抗裂能力。

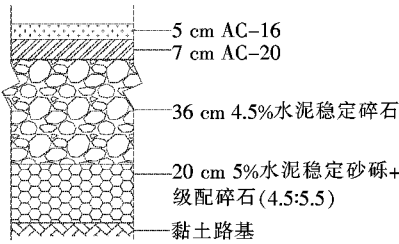


图 1 建虎高速公路主线沥青路面结构组合

建虎高速公路于 2009 年 5 月开工,2011 年 10 月竣工通车,通车后的第一个冬天便出现了大量的横向裂缝,最大裂缝宽度达 8 mm。2012 年 5 月 9 日,技术人员对建虎高速公路 C5、C6 标段进行了开裂状况调查,调查结果见表 1。

表 1 各路段低温开裂情况汇总

标段	分组	桩号	裂缝数量/条	开裂间距/m	开裂指数/[条·(100 m) <sup>-1</sup> ]
C5	1 <sup>#</sup>	K116+400~K116+600	11	20	5
	2 <sup>#</sup>	K123+270~K123+480	5	50	2
	3 <sup>#</sup>	K123+530~K123+670	4	50	2
	4 <sup>#</sup>	K123+700~K123+850	4	50	2
	5 <sup>#</sup>	K123+900~K124+120	12	20	5
C6	6 <sup>#</sup>	K143+000~K143+125	6	25	4
	7 <sup>#</sup>	K148+430~K148+610	10	20	5
	8 <sup>#</sup>	K152+450~K152+680	0	>100	0

表 1 中,开裂指数是指每 100 m 间距内出现的横向裂缝数量,开裂指数越大,说明路面的开裂越严重,材料的抗裂性能越差。根据调查得到的开裂指数将 8 组结构芯样按抗裂性能进行排序为:8<sup>#</sup>>2<sup>#</sup>≈3<sup>#</sup>≈4<sup>#</sup>>6<sup>#</sup>>1<sup>#</sup>≈5<sup>#</sup>≈7<sup>#</sup>。由排序可将 8 组芯样的开裂程度划分为 4 个等级:① 1<sup>#</sup>、5<sup>#</sup>、7<sup>#</sup> 为第一等级;② 6<sup>#</sup> 为第二等级;③ 2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>、4<sup>#</sup> 为第三等级;④ 8<sup>#</sup> 为第四等级。

2.2 结构芯样处理

面层与基层间的界面黏结作用使得结构芯样的下表面凹凸不平,而芯样顶面也即路面表面的粗糙度较大,因此需要在试验室内对结构芯样进行切割打磨,得到表面平整的圆柱体试件(图 2)。由图 2 可知:处理后的试件可清晰辨出裂缝在上下面层间的扩展情况。

组号 1<sup>#</sup> 结构芯样处理后的表面形态见图 3。

由图 3 可以看出:① 整体结构密实,空隙分布均匀;② 上面层顶面有一条微小裂缝,宽度约 3 mm;③

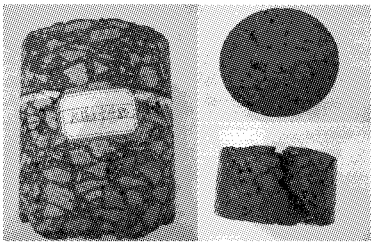


图 2 沥青路面结构芯样处理前后对比

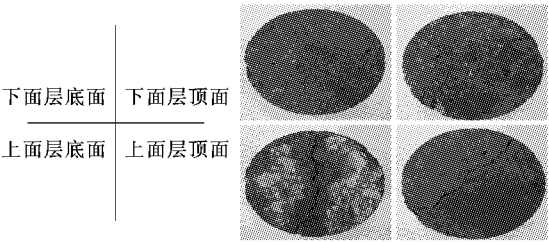


图 3 第 1 组路面结构芯样

下面层顶面可见一条约 2 mm 宽裂缝,沿深度方向贯穿整个结构。由于该组芯样对应的开裂指数为 5 条/100 m,开裂情况较严重。综上可知:路面结构形态与开裂指数间具有较好的相关性。按此方法依次对其余 7 组结构芯样进行形态评估,分析结果见表 2。

沥青路面出现的低温裂缝越多、裂缝宽度越大,开裂指数越大,材料的低温性能越差。参照表 2 按表面开裂的严重程度对 8 组芯样进行排序为:上面层:7<sup>#</sup>

>5<sup>#</sup>>1<sup>#</sup>>6<sup>#</sup>>2<sup>#</sup>≈3<sup>#</sup>>4<sup>#</sup>≈8<sup>#</sup>;下面层:7<sup>#</sup>>5<sup>#</sup>>1<sup>#</sup>>6<sup>#</sup>>3<sup>#</sup>>2<sup>#</sup>≈4<sup>#</sup>≈8<sup>#</sup>。可见:各组芯样的排序关系与开裂程度的排序关系基本一致,说明结构芯样的表面形态(开裂程度)与开裂指数具有较好的相关性。

2.3 空隙率的差异分析

采用表干法测试路面结构的空隙率,分析实测空隙率与设计空隙率的关系,结果见图 4。

表 2 各组路面结构芯样表面形态汇总

组号	开裂指数/ [条·(100 m) <sup>-1</sup> ]	上面层	下面层
1 <sup>#</sup>	5	顶面裂缝宽约 3 mm、底面宽约 5 mm	顶面裂缝宽约 2 mm,底面无裂纹
2 <sup>#</sup>	2	个别试件顶面可见微小裂纹	无裂缝
3 <sup>#</sup>	2	有微小裂纹	个别试件可见宽 2 mm 裂缝
4 <sup>#</sup>	2	无裂缝	无裂缝
5 <sup>#</sup>	5	顶面无裂纹、底面有宽约 7 mm 裂缝	宽约 6 mm 裂缝
6 <sup>#</sup>	4	顶面裂缝宽约 1 mm、底面宽约 3 mm	顶面 1 条微裂纹、底面无裂纹
7 <sup>#</sup>	5	顶面 2 条、底面 1 条微裂纹	宽约 10 mm 裂缝,结构破碎
8 <sup>#</sup>	0	无裂缝	无裂缝

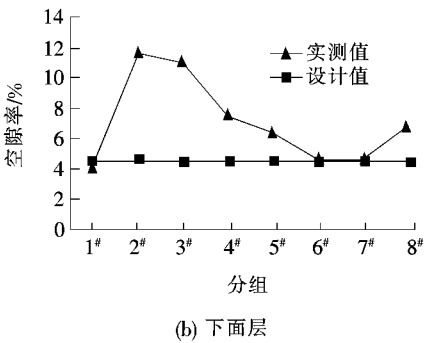
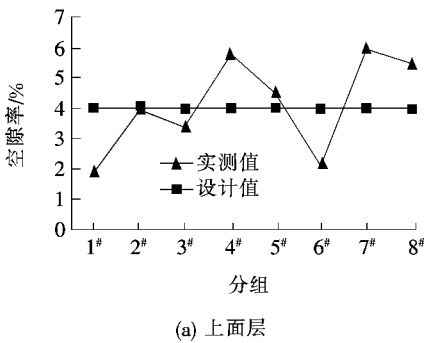


图 4 结构芯样空隙率对比

由图 4 可知:① 沥青路面在若干次冻融循环作用后的实际空隙率与设计空隙率偏差较大;② 上面层空隙率在设计空隙率(4%)附近波动,波动范围为 2%~6%;③ 下面层空隙率普遍高于设计空隙率(4.5%),最大空隙率为 12%。

沥青混合料空隙率的波动在一定程度上反映了骨料级配的差异性,由此可推测:8 组沥青结构芯样骨料级配的均匀性较差。因此,需进一步分析骨料级配在冻融作用下的变化情况,及其与路面开裂状况间的内在关系。

3 骨料级配的差异分析

沥青混合料中粗、细集料的比例关系是影响材料性能的关键因素。粗细集料的分界点按照 1/4 最大粒径对应的标准粒径确定。由图 1 可知:上下面层结构的材料类型分别为:AC-16 和 AC-20;因此,上下面层中粗细集料的分界筛孔分别为 2.36 mm 和 4.75 mm。该文以粗集料的百分比(即 100%与粗细集料分界筛孔累计通过率的差)为指标,表征粗、细集料的比例关系,分析不同层位结构冻融前后粗集料百分比的

偏差值与开裂指数间的关系。

3.1 上面层级配的差异分析

采用 infraTast 20—110 型沥青分析机对沥青结构芯样进行抽提和筛分处理,得到各组结构芯样的骨料级配,见表 3。

由表 3 可知:① 各组芯样的骨料级配均明显偏离于设计级配;② 参照 2.36 mm 筛孔的累计通过率可知,结构芯样的粗集料含量普遍低于设计值(表 4)。

按照粗集料含量偏差的绝对值进行排序为:5# >

1# > 7# > 6# > 2# > 4# > 3# > 8#。

与前文 4 个等级一一对应,证明:芯样的开裂程度与级配偏差的绝对值成正比。

3.2 下面层级配的差异分析

表 5 为下面层结构芯样的级配曲线对比图,其中粗细集料分界点为 4.75 mm。

由表 5 可知:下面层骨料级配的变异性较上面层更为突出。粒径大于 4.75 mm 的粗集料含量均低于设计值(表 6)。

表 3 沥青路面上面层级配

各层级配	通过下列筛孔(mm)的质量百分率/%										
	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
设计级配	100	95.8	85.0	72.5	43.1	29.2	19.4	12.8	8.6	6.6	5.2
1#	100	100	96.0	90.3	73.8	48.0	34.2	23.8	16.9	11.8	8.6
2#	100	100	99.7	96.3	72.2	44.7	30.4	18.8	16.8	10.1	6.4
3#	100	100	96.8	86.6	69.6	42.9	28.0	11.7	8.7	1.5	0.3
4#	100	100	97.8	90.3	64.7	44.1	31.1	18.6	16.3	9.5	6.0
5#	100	100	100	97.7	77.2	49.1	35.9	23.7	21.1	12.7	7.8
6#	100	100	99.4	94.6	74.1	47.3	34.3	22.6	14.6	9.1	6.0
7#	100	100	100	93.3	69.2	47.7	33.1	21.7	19.4	11.8	7.7
8#	100	100	98.8	92.5	63.6	40.7	26.7	14.6	5.1	1.2	0

表 4 上面层粗集料含量偏差分析

组号	实际值/%	偏差值/%	组号	实际值/%	偏差值/%
1#	52.0	-18.8	5#	50.9	-19.9
2#	55.3	-15.5	6#	52.7	-18.1
3#	57.1	-13.7	7#	52.3	-18.5
4#	55.9	-14.9	8#	59.3	-11.5

注:设计值为 70.8%。

按照粗集料含量偏差的绝对值进行排序为 1# > 7# > 5# > 6# > 3# > 2# > 4# > 8#。

与前文 4 个等级一一对应,证明:芯样的开裂程度与代表粒径级配偏差的绝对值成正比。

基于上述分析可知:沥青混合料中粗集料含量越少,低温开裂现象越严重。导致沥青混合料中骨料偏细的原因有两方面:① 施工监控不严,现场配合比不达标;② 强度不足、压碎值不合格的粗集料在外载作

表 5 沥青路面下面层级配

各层级配	通过下列筛孔(mm)的质量百分率/%										
	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
设计级配	93.1	87.4	78.0	67.7	42.9	29.1	19.4	12.7	8.5	6.6	5.1
1#	100	92.7	90.1	84.1	66.4	48.2	32.2	21.7	13.7	9.1	5.6
2#	100	92.2	85.9	76.0	54.6	24.0	12.9	8.8	6.1	4.4	3.4
3#	100	87.0	83.3	75.3	58.1	40.6	27.2	18.1	11.1	7.3	4.9
4#	100	88.3	80.3	73.0	53.8	23.2	10.6	6.4	4.0	2.6	2.0
5#	100	88.5	82.5	77.5	61.5	42.1	29.5	20.2	12.5	7.9	4.8
6#	100	95.2	86.5	79.0	60.6	39.5	25.1	15.2	13.4	7.6	4.7
7#	100	95.4	92.0	84.8	64.4	39.4	28.4	17.3	15.1	7.8	4.6
8#	100	96.4	86.7	72.3	49.4	21.1	11.2	7.8	5.6	4.4	3.4

表 6 下面层粗集料含量偏差分析

组号	实际 值/%	偏差 值/%	组号	实际 值/%	偏差 值/%
1#	33.6	-23.5	5#	38.5	-18.6
2#	45.4	-11.7	6#	39.4	-17.7
3#	41.9	-15.2	7#	35.6	-21.5
4#	46.2	-10.9	8#	50.6	-6.5

注:设计值为 57.1%。

用下破碎为细集料。虽然无法确定沥青混合料级配不合格的原因,但可以确定的是,骨料级配的差异性是降低沥青混合料低温性能的内在因素。

4 结语

通过现场调查和室内试验证明,冻融作用前后沥青混合料骨料级配的变异程度与低温开裂指数间具有较好的相关性。沥青路面的开裂程度与冻融前后级配偏差的绝对值成正比。在沥青满足设计要求的情况下,粗集料含量越少(骨料级配曲线越靠近上限值),沥青混合料的低温抗裂性能越差,沥青路面的低温开裂越严重。严格控制施工配合比和矿质骨料的强度是保证沥青混合料低温抗裂性能的关键。

参考文献:

[1] Li, X. and Marasteanu, M.O.The Fracture Process Zone in Asphalt Mixture at Low Temperature[J].Engineering Fracture Mechanics,2010,77(7):1 175-1 190.

[2] Behnia, B., Dave, E.V., Ahmed, S., Buttlar, W.G., et al.Effects of Recycled Asphalt Pavement Amounts on Low - Temperature Cracking Performance of Asphalt Mixtures Using Acoustic Emissions [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board,2011,2 208(1):64-71.

[3] 马宏岩. AASHTO 沥青路面低温开裂预估模型的验证与改进[D].哈尔滨工业大学硕士学位论文,2011.

[4] 冯德成,郑天鸣,高畅. 沥青路面低温开裂预估模型及其适用性分析[J].公路交通科技,2007(3).

[5] Li, X. and Marasteanu, M.O.Using Semi Circular Ben-

ding Test to Evaluate Low Temperature Fracture Resistance for Asphalt Concrete[J].Experimental Mechanics, 2010,50(7):867-876.

[6] Anderson, D.A., Lapalu, L., Marasteanu, M.O., et al. Low-Temperature Thermal Cracking of Asphalt Binders as Ranked by Strength and Fracture Properties[J].Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board,2001,1 766(1):1-6.

[7] Marasteanu, M. O., Li, X., Clyne, T. R., et al. Low Temperature Cracking of Asphalt Concrete Pavement[Z]. Minnesota Department of Transportation, Minneapolis, MN., MN/RC-2004-23.

[8] Dave, E.V., Song, S.H., Buttlar, W.G.et al.Reflective and Thermal Cracking Modeling of Asphalt Concrete Overlays[Z].Proc. Advance Characterization of Pavement and Soil Engineering Materials,2007:1 241-1 252.

[9] 葛折圣,黄晓明,许国光.用弯曲应变能方法评价沥青混合料的低温抗裂性能[J].东南大学学报:自然科学版, 2002(4).

[10] Soares, J.B., Freitas, F. and Allen, D.H.,.Crack Modeling of Asphaltic Mixtures Considering Heterogeneity of the Material [J]. Transportation Research Record, 2003,1 832:113-120.

[11] 张东,黄晓明,赵永利.沥青混合料抗裂性能评价指标对比研究[J].建筑材料学报,2012(2).

[12] 刘栋,李立寒.沥青混合料抗裂性能评价指标的试验研究[J].建筑材料学报, 2012(4).

[13] Ye, J., Liao, J and Yang, C. Influence of Fine Aggregate on Initial Shrinkage of High Performance Concrete [J].Journal of Chongqing University (in Chinese),2009 (2):168-172.

[14] Sousa, P., Kassem, E., Masad, E., et al.New Design Method of Fine Aggregates Mixtures and Automated Method for Analysis of Dynamic Mechanical Characterization Data [J]. Construction and Building Materials, 2013,41:216-223.

[15] Zou, Y. and Boley, C.Compressibility of Fine-Grained Soils Subjected to Closed-System Freezing and Thaw Consolidation[J].Mining Science and Technology,2009, 19(5):631-635.