文章类型：论文|刊号（ISSN）：2630-4651 /（中图刊号）：860GL005

寒区沥青路面纹理构造与覆冰机理细观仿真研究

姚茂连
中国十九冶集团有限公司
DOI:10.12238/btr.v8i4.4723

[摘　要] 为研究环境因素条件下,沥青纹理构造特征在覆冰机理中的作用。本文以凝液层理论对寒区覆冰沥青路面进行研究,采用ABAQUS有限元仿真、三维重构CC(Context Capture)和Matlab、Python对不同纹理构造特征以及冰层厚度、温度对沥青路面进行覆冰机理仿真分析。结果表明：以粘聚力单元分析的受力响应符合冰层与沥青路面的破坏形式,覆冰层的破坏发生在冰层内部;在低温条件下,覆冰厚度与冰层和路面之间的粘结效应呈负相关；路面纹理构造特征指标凹凸比、构造深度在共同组合可满足非覆冰季节路面抗滑要求,在冬季覆冰路面最不利环境因素下又能实现冰层的自主破冰。
[关键词] 寒区；纹理构造；粘结效应；覆冰机理；细观仿真
中图分类号：TF573　文献标识码：A

Microscopic simulation study on texture structure and icing mechanism of asphalt pavement in cold region

Maolian Yao
China Nineteen Metallurgical Group Co., LTD.

[Abstract] To investigate the role of asphalt pavement texture characteristics in ice formation under environmental conditions, this study employs the liquid congealing layer theory to analyze ice formation mechanisms in cold-region asphalt pavements. Through ABAQUS finite element simulation, 3D reconstruction CC (Context Capture), and Matlab/Python programming, we conducted simulations examining texture features, ice thickness, and temperature effects on pavement ice formation. Results indicate that cohesive unit analysis accurately predicts ice-vehicle interaction failure patterns, with ice layer degradation occurring internally. Under low-temperature conditions, ice thickness shows a negative correlation with interlayer adhesion. The pavement's texture parameters—specifically the convex-concave ratio and structure depth—meet non-icing season anti-skid requirements while enabling self-healing ice breakdown under winter ice conditions.
[Key words] cold region; texture structure; bonding effect; icing mechanism; micro simulation

引言

寒区冬季积雪在自然环境和人为因素的作用下形成具有黏附性质的路面覆冰,使得路面抗滑性能下降。

对于冰雪路面产生的粘结现象,学者Koji、Matsumotoa、Petrenko、Peng提出冰的冻粘特性与其分子键、表面能、化学键产生的冻粘效应有关[1-4],学者Jellinek[5]提出的凝液流动模型考虑了温度等直接因素,更符合寒区覆冰道路的研究,基于此,吴永畅[6]基于冻粘强度数据变异性及断裂界面稳定性,通过参数优化,提出了凝液层理论和毛细粘附模型。谭忆秋[7]以蓄盐沥青为主要研究对象,不同沥青路面种类和不同温度为变量,对其进行冻粘拉拔强度影响,研究了级配与集料尺寸对粘结力的影响。陈华鑫[8]通过拉剪试验研究AFAC的冰粘附特性和冰路面粘附机理,研究了冰路面粘附强度受温度、路面质地、洗涤干燥周期和抗冻填料添加量的影响。吴琴[9]对比了不同载体在抗冻时间、冰厚条件下对冻结强度的影响。以上研究者都忽略了路面纹理构造特征对于粘结效应的影响。

现有的界面形态研究主要为非路面材料,包括玻璃、Q235钢、铝合金、橡胶等的冻粘特性[10-11],基于温度、表面粗糙度[12]、冰点、亲疏水性。虽然少数研究也证明界面形貌对路面结构性能的影响[13],但这些研究仅讨论了沥青路面的表面能与抑冰效果相关的问题,目前学术界从细观尺度上研究路面与冰层的冻粘强度较少,难以复现粘附特征的覆冰路面与冰雪层之间的界面形态,研究结果不能达到金属、塑料等基材冻粘特性研究的准确性。综上所述,本文考虑界面形态对于覆冰机理的影响,研究中基于凝液层理论,利用3D重构技术、ABAQUS有限元、Python,建立冻粘强度模型,对不同纹理构造、覆冰厚度、温度对覆冰沥

青路面进行粘附机理模拟，研究不同路面构造及环境因素对沥青路面覆冰机理的影响。

1 细观数字模型的建立

1.1冰雪沥青路面

冬季降落在沥青路面上的雪在车辆行驶过程中车辆与路面摩擦产生热量交替，当橡胶轮胎与冰雪路面摩擦温度在零度以上时，少部分冰雪融化，一部分压实冰雪与路面薄冰粘附于路面，一部分冰雪以自由水的形式存在于沥青混合料的空隙中和路面表面构造中，当夜晚温度降低，车流量减少时，自由水开始冻结，薄冰与路面开始从宏观结合再到微观结合，冰层与路面黏附性增强，随着温度越来越低和下雪量的增加，路面覆冰厚度开始增加、覆冰路面的范围扩大，当薄冰未及时消除，随后形成一整幅路面结冰。考虑路面与冰层之间的黏附作用，路面细观模型主要采用粘聚力模型。通过预置裂纹边(面)的方式来模拟二维(三维)裂纹，将两者存在黏附界面状态采用Cohesive单元-粘性单元表示，建立冰层与路面粘聚力接触模型，进行覆冰机理分析[14-16]。对于模拟胶层、胶接接触面力学行为，粘性行为可以进行胶结截面的渐进分析、复合材料的分层失效。本研究采用线弹性模型。根据损伤模型进行判断，考虑损伤起始准则和损伤演化规律。

1.2几何模型

本研究采用 Abaqus有限元软件，采用弹性本构模型建立覆冰沥青路面结构层、黏液层、冰层之间细观有限元模型模拟，路面结构自上而下设定为0.4cm厚覆冰层+4cm沥青路面，中间接触面采用cohesive粘聚力单元[17]。冰层在行车荷载作用下，轮压为0.7MPa，模型底部水平和垂直方向完全约束，模型四周水平方向完全约束。

2 结果分析

2.1环境影响分析

表1 材料弹性模量

类别/温度	泊松比 MPa					泊松比
	0℃	-5℃	-10℃	-15℃	-20℃	
冰	1800	2300	3800	4500	5300	0.33
沥青路面	2600	3000	3240	3900	4600	0.3

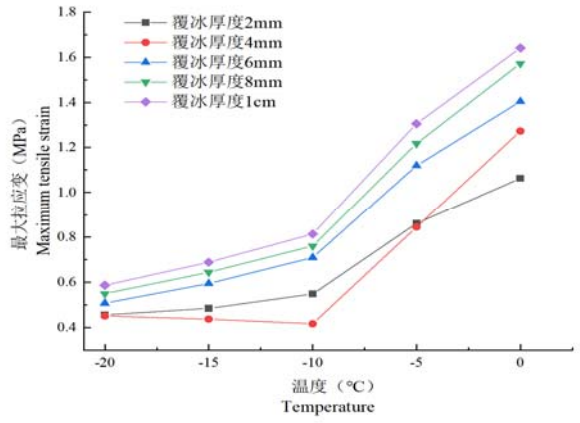

图1 环境因素影响分析

通过改变覆冰厚度和温度来模拟冬天覆冰道路的受力情况。路面结构各层材料在不同温度下的弹性模量如表1所示。分别对0～-20℃范围内冰层的受力进行分析计算，设计温度间隔取5℃，冰层厚度变化范围取2mm～1cm，设计冰层厚度间隔取2mm，计算结果如图1所示。

从图1可以看出，在0～-10℃范围内，拉应变值变化幅度较大，最大拉应变与温度呈正相关；与覆冰层厚度负呈正相关，表明冰层越薄越不容易破碎，在冰层温度和厚度共同影响下在温度为-10℃，冰层厚度4mm条件下路面与覆冰层粘结效应最大，路面状况处于最不利。

2.2路面纹理状况分析

低温条件下路面覆冰与路面产生粘结效应，而路面纹理构造让路面覆冰与路面存在相互“嵌咬”的现象，故此，为了研究不同的纹理构造特征在低温环境下产生的粘结效应和破冰效果，从纹理构造特征的获取和形状的选取出发，模拟路面覆冰与路面之间的“互粘-嵌咬”效应，明确沥青路面纹理构造对路面覆冰与路面的粘结作用的影响。

2.3纹理构造特征获取

为了采集高精度的路面数据，基于倾斜摄影技术和定位技术[18-22]，通过三维重构软件CC(Context Capture)和Matlab创建分析模块与数字化处理的实时识别系统，获取路面纹理参数平均构造深度-MTD、沥青路面凸起构造体积占总构造体积之比-凹凸比。选取某市东北区域三个试验路段，各选取5个测点进行实验，道路参数基本相同。

温度选取-10℃，厚度选取4mm，由于三角形所形成的构造形状容易使冰层产生应力集中，而梯形上表面和下表面接触面都是平整，较三角形、椭圆形多一个底面的接触面，同一范围内接触面积增多，从而路面与冰层粘接面积加大，嵌咬能力增强，在相同受力情况下，应变最小[23-25]。

2.4多因素组合分析

为了研究在低温环境下构造形状和构造深度的分布导致冰层破碎的情况，将构造特征指标凹凸比和构造深度共同作为变量分析。温度为-10摄氏度、厚度为4mm，构造形状以三角形为主的组合形状进行模拟分析构造特征的破冰效果。

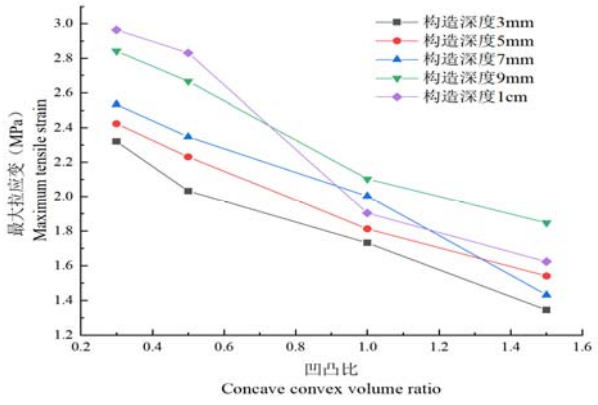

图2 纹理构造特征对沥青路面覆冰机理结果分析

模拟结果如图2所示当凹凸比固定不变时，构造深度与拉应变呈负相关，构造深度增加，冰层内部应变减小。在道路覆冰时想要通过合理分布沥青纹理构造特征来实现自主破冰，未覆冰季节保持良好的抗滑性能时，可选择凹凸比在0.3～0.5，构造深度在0.7cm～1cm的沥青路面，此时冰层内部最大拉应变均大于冰极限拉应变2.2MPa，冰层开始破碎，路面抗滑性能增加，与沥青超薄磨耗层在纹理构造深度为1cm时的抗滑性能最优的结论相同[23-24]，故此，在进行寒区沥青超薄磨耗选材时，可以采用多棱角的集料以及凹凸比来组合设计，增加各种路况下以及不同季节路面的抗滑性能，降低路面维护成本。

3 结论

基于凝液层理论，利用ABAQUS有限元、Python，建立冻粘强度模型，联合三维重构CC(Context Capture)和Matlab获取不同纹理构造特征进行覆冰机理模拟，研究冰层厚度、温度、不同纹理构造特征对沥青路面覆冰机理的影响。得出以下结论：

(1)采用粘聚力单元实现冰层与路面的嵌咬-粘结效应的复现，从细观上研究了覆冰路面的粘接效应，冰层的破坏发生在冰层内部而非冰层与路面的结合处和冰层表面。

(2)覆冰厚度与温度交替控制覆冰与路面之间的粘结作用，在温度为-10℃，冰层厚度4mm条件下路面与覆冰层粘结效应最大，路面状况处于最不利。通过对比温度和厚度仿真结果，在0～-10℃范围内，拉应变值与覆冰层厚度呈负相关，冰层越薄越不容易破碎；以-20℃为临界点，当温度在小于等于临界点时，以厚度为主导变化的粘结效应开始变为温度统一控制。

(3)覆冰与路面的接触面与粘结效应呈正相关、与最大应变呈负相关。合理的纹理构造特征既能实现自主破冰又满足路面的抗滑要求，可减少清雪工作对路面的损害，降低维护成本，为寒区抗滑路面设计提供了新的参考方向。

[参考文献]

[1]Matsumoto K,Kobayashi T.Fundamental study on adhesion of ice to cooling solid surface[J]. International journal of refrigeration,2007,30(5):851-860.

[2]Makkonen L.Ice adhesion-theory, measurements and countermeasures[J].Journal of Adhesion. Science and Technology,2012,26(4-5):413-445.

[3]Petrenko V F,Peng S.Reduction of ice adhesion to metal by using self-assembling monolayers.(SAMs)[J].Canadian journal of physics,2003,81(1-2):387-393.

[4]Penn L S,Meyerson A.Ice-pavement bond prevention: fundamental study[R]. Washington, DC, USA: Strategic Highway Research Program,National Research Council,1992.

[5]Jellinek H H G.Ice adhesion[J].Canadian journal of physics,1962,40(10):1294-1309.

[6]吴永畅.基于凝液层理论的冰-路冻粘强度表征模型研究[D].长安大学,2020.89-113.

[7]谭忆秋,孙嵘蓉,郭猛,等.蓄盐沥青混合料除冰雪性能研究[J].中国公路学报,2013,26(01):23-29.

[8]Chen H,Wu Y,Xia H,et al. Anti-freezing asphalt concrete: ice-adhesion performance[J].Journal of Materials Science,2018,53(7):4781-4795.

[9]吴琴,曹林涛,张杰.不同因素对路表冰层冻粘强度的影响分析[J].交通科技,2014(02):74-76.

[10]赵毅,秦旻,文凯琪,等.沥青路面超疏水抗凝冰材料研究进展[J].材料导报,2021,35(01):1141-1153.

[11]丁金波.结冰表面冻粘特性的试验研究[D].上海交通大学,2012.32-41.

[12]唐珊.表面特性对冰粘附强度影响的研究[D].广州大学,2014.70-73.

[13]万义强.振动除冰雪机理和除冰雪效率研究[D].北京理工大学,2015.13-21.

[14]Dugdale D S.Yielding of steel sheets containing slits [J].Journal of the Mechanics and Physics of Solids,1960,8(2):100-104.

[15]Barenblatt G I.The mathematical theory of equilibrium cracks in brittle fracture[J].Advances in Applied Mechanics,1962,7:55-129.

[16]王国刚,穆静静,周红伟,等.覆冰垂直粘结强度的测试研究[J].工程热物理学报,2012,33(02):282-284.

[17]金敬福,丛茜,杨晓东.常用工程材料的冻黏特性及冻黏界面破坏形态[J].吉林大学学报(工学版),2005(05):486-489.

[18]陈嘉颖,黄晓明,郑彬双,等.基于近景摄影测量技术的沥青路面纹理实时识别系统[J].东南大学学报(自然科学版),2019,49(05):973-980.

[19]谭忆秋,肖神清,熊学堂.路面抗滑性能检测与预估方法综述[J].交通运输工程学报,2021,21(04):32-47.

[20]Ding S,Wang K C P,Yang E,et al.Influence of effective texture depth on pavement friction based on 3D texture area [J].Construction and Building Materials,2021,287:123002.

[21]林国涛,孙增奎,肖斌,等.综合无人机、GIS、BIM技术的道路设计研究[J].公路,2021,66(03):23-26.

[22]杨健文.基于改进SIFT算法的倾斜影像匹配研究[D].中国矿业大学,2019.20-25.

[23]石宜清,邵景干,李文凯.玄武岩纤维高黏降噪型OGFC-10超薄磨耗层性能研究[J].河南科学,2021,39(11):1753-1758.

[24]冯志强.超薄磨耗层温拌橡胶沥青混合料性能研究[J].公路,2021,66(11):14-20.

[25]王雪莹.道路冰雪与路面粘附特性及除雪机理研究[D].吉林大学,2019.16-17.

作者简介：

姚茂连(1994--),女,汉族,中国四川人,研究生,助理工程师,研究方向：道路交通。