

DOI:10.16356/j.1005-2615.2020.04.016

测试结冰界面切向冻粘强度的新方法

周峰¹, 刘畅^{1,2}, 赵克良¹, 周光明², 蔡登安², 李康桥², 林显巧¹

(1. 上海飞机设计研究院, 上海, 201210; 2. 南京航空航天大学机械结构力学及控制国家重点实验室, 南京, 210016)

摘要: 提出一种测试结冰界面切向冻粘强度的新方法。设计了新型的拼接式结冰装置, 进行圆柱形结冰杆表面的结冰, 再通过压缩试验完成切向冻粘强度测试。在上述工作基础上进一步地研究了多个试验因素对切向冻粘强度的影响。试验结果表明: 随着接触面积或者冻结时间的增加, 切向冻粘强度均呈现先增大后稳定的趋势; 随着加载速率的增大, 切向冻粘强度值呈现先增加后减小的趋势; 在 $-5\sim-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间, 切向冻粘强度与冻结温度近似为线性关系。

关键词: 结冰装置; 结冰界面; 切向; 冻粘强度

中图分类号: V216.1

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2020)04-0639-05

A Novel Method for Measuring Shear Freezing Adhesion Strength of Ice Interface

ZHOU Feng¹, LIU Chang^{1,2}, ZHAO Keliang¹, ZHOU Guangming², CAI Dengan²,
LI Kangqiao², LIN Xianqiao¹

(1. Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai, 201210, China; 2. State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: A novel method to measure the shear freezing adhesion strength at the ice interface was presented in this paper. A new splicing-type freezing device was designed to complete the freezing process on the surface of the cylindrical ice pole, and the compression experiment was carried out to test the shear freezing adhesion strength. The influence of several experimental factors was further studied on the basis of the above work. Test results show that the shear freezing adhesion strength firstly increases and then stabilizes with the increase of the contact area and the freezing time while the strength firstly increases and then decreases with the increase of the loading rate. The shear freezing adhesion strength changes approximately linearly with the freezing temperature between $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Key words: freezing device; ice interface; shear; freezing adhesion strength

零度以下, 两物体接触界面间的水冻结会形成冻粘现象。冻粘对煤炭运输^[1-2]、公路交通^[3-5]、航空飞行^[6-10]等均会造成不利影响。寒冷天气下, 煤炭与矿车的冻粘极大降低了其运输效率; 冰雪与路面的冻粘极易引发交通事故。在航空领域, 处于地面结冰条件的飞机, 需要在航前完成复杂的结冰检查

和防除冰操作; 而飞行过程中, 高空水汽在飞机翼面的积聚, 会降低飞机的气动和操稳特性, 因而受到航空界的广泛关注。

冻粘强度是冻粘问题的重要研究方向之一。根据力的分解原理, 冻粘强度可以分为切向和法向冻粘强度。出于除冰考虑, 切向冻粘强度是冻粘强

收稿日期: 2020-04-08; **修订日期:** 2020-05-31

通信作者: 周光明, 男, 教授, 博士生导师, E-mail: zhougm@nuaa.edu.cn。

引用格式: 周峰, 刘畅, 赵克良, 等. 测试结冰界面切向冻粘强度的新方法[J]. 南京航空航天大学学报, 2020, 52(4): 639-643. ZHOU Feng, LIU Chang, ZHAO Keliang, et al. A novel method for measuring shear freezing adhesion strength of ice interface[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2020, 52(4): 639-643.

度研究的热点。冻粘强度受结冰温度、界面特性、化学因素等多方面影响,目前尚无有效数值预测手段,以试验研究为主。Lippman通过圆柱形结冰杆在封闭结冰腔内完成结冰,再通过拉拔试验测试切向冻粘强度^[11]。该类方法最大的问题在于,刚性封闭的结冰腔使得结冰过程中的体积膨胀对冻粘界面造成挤压和破坏,挤压作用会增加摩擦力,而界面破坏会损伤冻粘界面。挤压和界面破坏的综合作用使得最终测出结果并非单纯的粘附强度,因此这类试验方法得到试验结果普遍分散性较大。另一类测试方法^[12-13]是在平板试件上结冰,通过切向加载使得冰与界面脱离以测定切向冻粘强度。该类方法装置复杂,操作烦琐,容易在加载过程中引入不必要的弯矩。

本文对已有的圆柱形结冰杆方案进行改良,提出拼接式结冰装置方案,并通过冻胀仿真说明了该方法相比于原方法的优越性。在完成结冰试验后,通过压缩试验进行切向冻粘强度测试,并研究了接触面积、加载速率、冻结时间、冻结温度等因素对切向冻粘强度的影响。本文的研究可为冻粘强度的测试提供一定的借鉴。

1 试验

1.1 测试原理

本文试验方案的主要原理是将贯穿冰块的圆柱形结冰杆进行压脱以测定切向冻粘强度,试验装置如图1所示。

从图1中可以看出,切向冻粘强度装置主要由结冰杆、结冰腔、底板组成。其中结冰杆为铝合金材质,其直径为10 mm,带有压头,可实现压缩加载。圆柱形的结冰腔设计为拼接式,即由两个半圆筒通过低温润滑脂拼接而成。低温润滑脂具备疏水和低温下不结冰的特性,可以起到密封结冰腔的作用,且对冰块的膨胀无阻碍。底板和结冰腔之间也通过低温润滑脂密封,两者组合起来共同组成盛水容器便于结冰,另外在加载时,底板还起到支撑作用。结冰装置实物如图2所示。

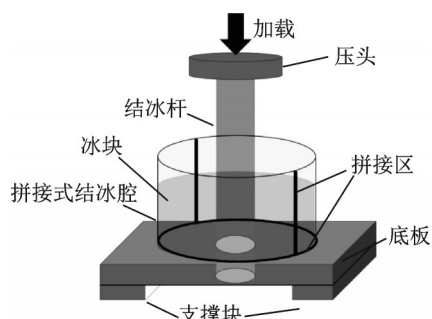


图1 试验装置示意图

Fig.1 Diagram of test equipment

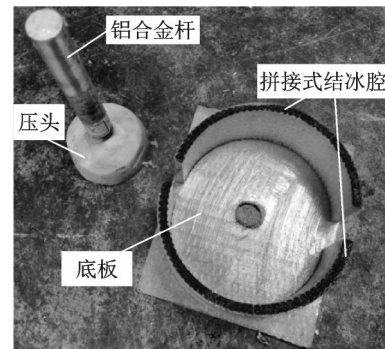


图2 试验装置实物

Fig.2 Actual test device

1.2 设计特点

拼接式结冰腔设计是本文试验方案的一大特点,通过冻胀机理性仿真可以清楚地展现拼接式结冰腔设计的优点。采用稳态热-力耦合计算,研究温差 1°C 下,拼接式结冰腔与封闭式结冰腔对界面的挤压作用,结果如图3所示。结果显示封闭式结冰装置界面冻胀压力具备相当大的数值,而拼接式结冰装置界面冻胀力为0。因此采用封闭式结冰装置一方面很可能对结冰表面造成挤压破坏,另一方面,较大的挤压作用力会提高冰和结冰杆之间的摩擦力,使得最终切向冻粘强度试验的结果中摩擦力占比较高,所得强度不是单纯的冻粘强度。而拼接式结冰腔使得水相变时可以在结冰表面自由膨胀,因而避免了对界面的挤压作用。

传统封闭式结冰装置设计改良为拼接式装置难点在于,拼接装置既要保证密封性以防止

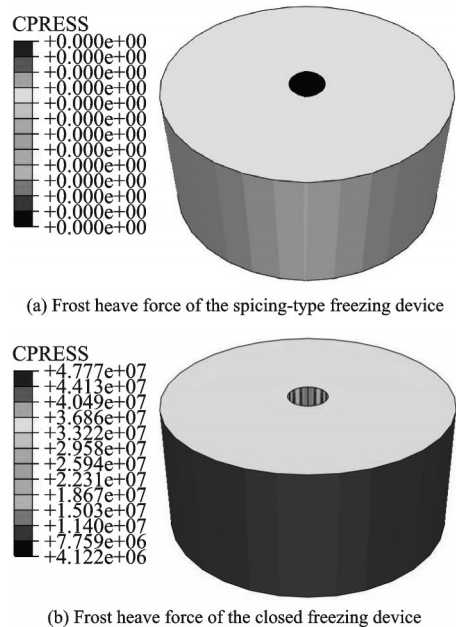
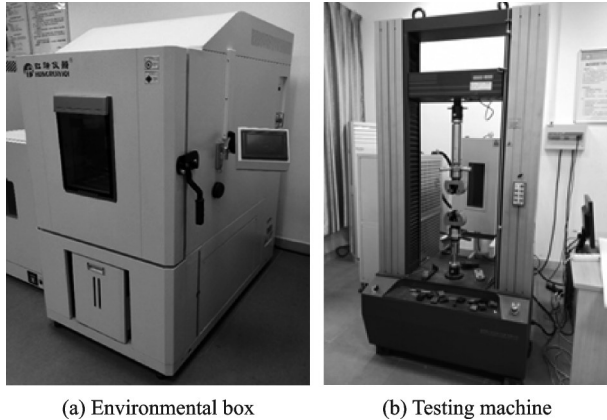


图3 不同结冰装置界面冻胀压力对比

Fig.3 Comparison of frost heave force between different icing devices

漏水,又不能对装置施加过强的约束。本文研究引入低温润滑脂对拼接区进行密封,低温润滑脂自身的黏性既保证了密封性又不会限制冰体膨胀。

本文设计的结冰装置简易,可在环境箱中批量结冰。完成结冰后的加载试验在基础力学试验机上进行。环境箱和加载试验机如图 4 所示。



(a) Environmental box (b) Testing machine

图 4 切向冻粘强度试验设备

Fig.4 Test devices for ice shear adhesion strength measurement

1.3 测试步骤

试验流程主要包括结冰试验和切向冻粘强度测试试验,每个工况进行 4 组重复性试验,试验结果取均值。具体步骤如下:

(1) 试验准备。在结冰杆的表面标记出有效接触的工作区域,然后用砂纸打磨其表面,并进行粗糙度检测,保证每组结冰杆表面粗糙度一致。

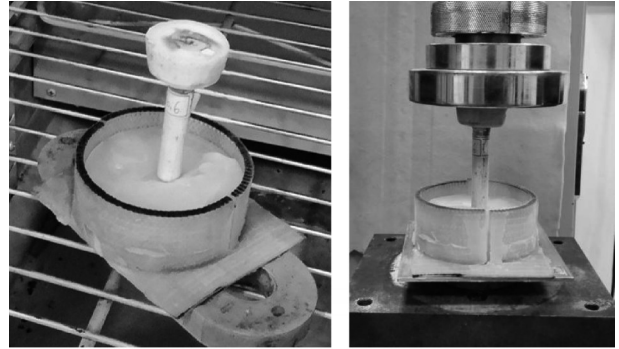
(2) 结冰试验。将结冰杆插入底板圆孔,然后用低温润滑脂将结冰腔和底板进行拼接;将装置放置到环境箱中,用水平尺调整结冰杆位置至压头水平;往结冰腔中注水至预定水量,再设置结冰温度和时间,启动环境箱降温。

(3) 冻粘强度测试。待结冰完成后,取出结冰装置,放置到试验机上进行加载并测定切向冻粘强度,加载环境为室温。

主要试验操作如图 5 所示。



(a) Surface treatment (b) Horizontal alignment



(c) Icing complete (d) Loading test

图 5 测试步骤

Fig.5 Test procedures

2 结果分析与讨论

2.1 接触面积敏感性分析

切向冻粘强度试验中冰与结冰杆的冻粘粘接的受力类似于灌浆套筒与钢筋的连接,影响粘接界面受力分布的关键参数之一是接触面积。保持其他参数不变,研究接触面积对切向冻粘强度的影响。针对本文试验方案,试验冻结时间为 3 h,结冰温度为 -25°C ,接触面积通过调整结冰杆浸水长度控制,结冰杆浸水长度分别取 2.5、5、10、15、20、25 和 30 mm。

图 6 给出了切向冻粘强度随接触面积的变化趋势。从图中可以看出,随着接触面积的增大,切向冻粘强度先是增大,而后趋于稳定。该结果表明,当接触面积达到某一值后,该参数对切向冻粘强度影响可以忽略。根据该结论,该类试验方案在设置接触面积时应该取足够大的值,对于本文方案,取结冰杆浸水长度为 30 mm。

图 6 中同时给出了拼接式结冰装置和封闭式结冰装置试验结果的对比,两种装置在各项试验参数一致情况下进行对比试验。从图中可以看出,拼接式结冰装置可有效克服封闭式结冰装置所得结

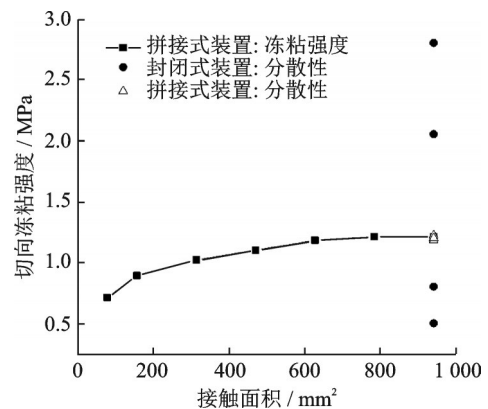


图 6 不同接触面积下的切向冻粘强度

Fig.6 Shear freezing adhesion strength with various contact areas

果分散性大的缺陷,验证了前期试验设计的分析结论。

2.2 加载速率敏感性分析

强度试验中,加载速率是影响试验结果的潜在因素之一。保持其他参数不变,研究加载速率对切向冻粘强度的影响。针对本文试验方案,试验冻结时间为3 h,结冰温度为 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$,结冰杆浸水长度为30 mm,加载速率在1~5 mm/min之间取5个点进行测试。

图7给出了切向冻粘强度随加载速率的变化趋势。从图中可以看出,随着加载速率的增大,切向冻粘强度在小幅度范围内呈现先增加后减小的趋势,加载速率在2 mm/min左右时,测得的切向冻粘强度最大。加载速率为1 mm/min时,由于加载时间稍长,加载金属棒热传导引起结冰界面变化导致切向冻粘强度略低。加载速率小于3 mm/min时,切向冻粘强度结果差别不大,当加载速率增加到5 mm/min时,切向冻粘强度测定值偏小。由于结冰界面的脱离具有突然性,过快的加载速率容易导致试验机对极限强度的捕捉精度不足,对于本文方案,取加载速率为2 mm/min。

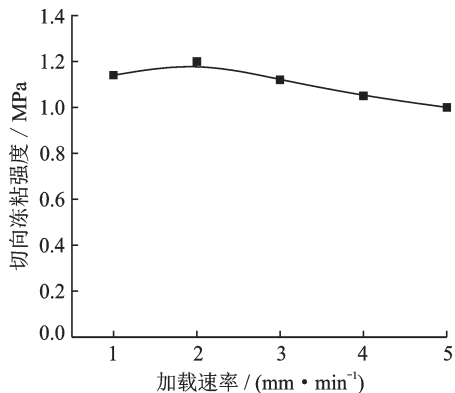


图7 不同加载速率下的切向冻粘强度

Fig.7 Shear freezing adhesion strength at different loading rates

2.3 冻结时间敏感性分析

随着冻结时间的改变,水发生相变的区域会有所不同,冰体整体的冻结紧密度也不一样。保持其他参数不变,研究冻结时间对切向冻粘强度的影响。针对本文试验方案,加载速率为2 mm/min,结冰温度为 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$,结冰杆浸水长度为30 mm,冻结时间在1~3.5 h之间取6个点进行测试。

图8给出了切向冻粘强度随冻结时间的变化趋势。从图中可以看出,随着冻结时间的增加,切向冻粘强度呈现先增加后趋于稳定的趋势。这主要是因为,当结冰时间达到一定值后,可保证水充分相变,即完全“冻透”,此后继续增加结冰时间,将

对冰的冻结状态影响甚微,相应的冻粘强度趋于稳定。本文结论与文献[13]结论一致。另外,不同冻结温度对冻结时间的要求也有所不同,在本文研究的温度范围内,统一取冻结时间为5 h可保证结果的稳定性。

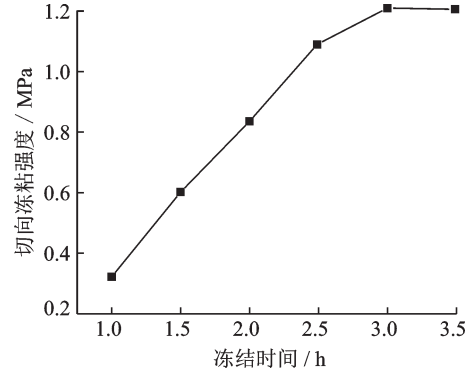


图8 不同冻结时间下的切向冻粘强度

Fig.8 Shear freezing adhesion strength at different freezing time

2.4 冻结温度敏感性分析

切向冻粘强度-冻结温度曲线是该领域研究的重点。保持其他参数不变,研究冻结温度对切向冻粘强度的影响。针对本文试验方案,试验冻结时间为5 h,结冰杆浸水长度为30 mm,加载速率为2 mm/min,冻结温度在 $-5\sim-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间取6个点进行测试。

图9给出了切向冻粘强度随冻结温度的变化趋势。从图中可以看出,在 $-5\sim-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,切向冻粘强度与冻结温度近似为线性关系。需要指出的是,本文试验为环境箱中静态结冰的试验结果,测定值高于冰风洞中水滴撞击结冰的冻粘强度^[14],这主要是因为动态水滴撞击结冰不易形成致密的结冰界面,且冰层中空隙较多,导致动态情况的冻粘强度较小。由于静态冻粘强度相比于动态情况更临界,通过对比动、静态切向冻粘强度结果,可以选择相对高的结冰温度设计地面静态结冰和除冰

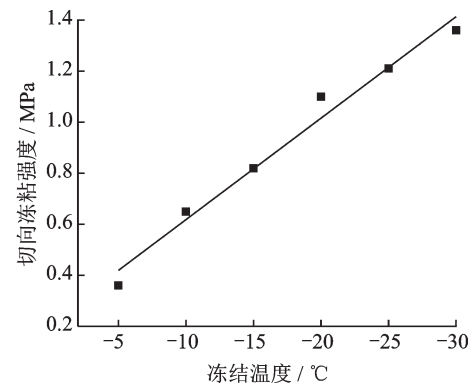


图9 不同冻结温度下的切向冻粘强度

Fig.9 Shear freezing adhesion strength at different freezing temperatures

试验,既保证试验结果的安全裕度又缩短了结冰时间,提高试验效率。

3 结 论

本文针对结冰界面的切向冻粘强度测试,提出拼接式结冰方案和压缩测试方案,并根据该方案开展了切向冻粘强度特性研究,主要结论如下:

(1) 拼接式结冰装置不会限制水相变的体积变化,避免对结冰界面的挤压,可有效克服封闭式结冰装置所得结果分散性大的缺点。

(2) 随着接触面积的增大,切向冻粘强度呈现先增加后稳定的趋势,该类试验应确保接触面积足够。

(3) 随着加载速率的增大,切向冻粘强度呈现先增加后减小的趋势,该类试验加载时应避免过大的加载速率。

(4) 随着冻结时间的增大,切向冻粘强度呈现先增加后趋于稳定的趋势,该类试验应确保足够的冻结时间。

(5) 在 $-5\sim-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,切向冻粘强度与冻结温度近似为线性关系,且静态结冰的冻粘强度结果明显高于冰风洞中水滴撞击结冰的冻粘强度。

参考文献:

- [1] 王春华,许瀚文,郝志勇,等.煤冻粘强度与水润滑动摩擦因数的关系[J].机械强度,2016,38(6):1211-1215.
WANG Chunhua, XU Hanwen, HAO Zhiyong, et al. Relation of coal freezing adhesive strength with water-lubricating coefficient of kinetic friction[J]. Journal of Mechanical Strength, 2016, 38(6): 1211-1215.
- [2] 肖林京,孙慧,李振华.煤炭储运设备的粘煤机理及影响因素分析[J].煤炭工程,2011(3):105-107.
XIAO Linjing, SUN Hui, LI Zhenhua. Analysis of adhesive coal mechanism and influencing factors of coal storage-transport equipments[J]. Coal Engineering, 2011(3): 105-107.
- [3] PEREZ A P, WAHLIN J, KLEINPASTE A. Effect of surface roughness and chemistry on ice bonding to asphalt aggregates[J]. Cold Regions Science and Technology, 2015, 120(120): 108-114.
- [4] DAN H C, HE L H, ZOU J F, et al. Laboratory study on the adhesive properties of ice to the asphalt pavement of highway[J]. Cold Regions Science and Technology, 2014(104/105): 7-13.
- [5] 曹敏,陈廷坤,丛茜,等.表面形态对结冰附着强度的影响[J].吉林大学学报(工学版),2013,43(5):1314-1319.
CAO Min, CHEN Tingkun, CONG Qian, et al. Influence of PMMA surface morphology on ice adhesion strength[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2013, 43(5): 1314-1319.
- [6] LYNCH F T, KHODADOUST A. Effects of ice accretions on aircraft aerodynamics[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2001, 37(8): 669-767.
- [7] TRAN P, BRAHIMI M T, PARASCHIVOIU I, et al. Ice accretion on aircraft wings with thermodynamic effects[J]. Journal of Aircraft, 1995, 32(2): 444-446.
- [8] JAMIESON J R, RAY M D. Advanced warning ice detection system for aircraft: DE60313406[P]. 2008-01-17.
- [9] POKHARIYAL D, BRAGG M, HUTCHISON T, et al. Aircraft flight dynamics with simulated ice accretion[C]//Proceedings of the 39th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Nevada, America: AIAA, 2001.
- [10] CHUNG J, REEHORST A, CHOO Y, et al. Navier-Stokes analysis of flowfield characteristics of an ice-contaminated aircraft wing[J]. Journal of Aircraft, 2000, 37(6): 947-959.
- [11] LIPPMAN J A. Method for determination of adhesion of ice:US2720106A[P]. 1955-10-11.
- [12] DONG W, DING J, ZHOU Z X. Experimental study on the ice freezing adhesive characteristics of metal surfaces[J]. Journal of Aircraft, 2014, 51(3): 719-726.
- [13] 金敬福.材料冻粘特性及矿车冻粘规律试验研究[D].长春:吉林大学,2004.
JIN Jingfu. Experimental research on material freezing adhesive characteristic and tramcar freezing adhesive law[D]. Changchun: Jilin University, 2004.
- [14] ZHU C X, ZHU C L, ZHAO W W, et al. Experimental study on the shear adhesion strength between the ice and substrate in icing wind tunnel[J]. Journal of Mechanics, 2018, 34(2): 209-216.

(编辑:夏道家)