



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 114739902 A

(43) 申请公布日 2022. 07. 12

(21) 申请号 202210326778.6

(22) 申请日 2022.03.30

(71) 申请人 成都流体动力创新中心

地址 610072 四川省成都市青羊区二环路
西二段75号

(72) 发明人 黄永杰 倪章松 易贤 柳庆林
王梓旭 张颖 潘攀

(74) 专利代理机构 重庆恩洲知识产权代理事务
所(特殊普通合伙) 50263
专利代理师 兰渝宏 熊传亚

(51) Int. Cl.

G01N 19/04 (2006.01)

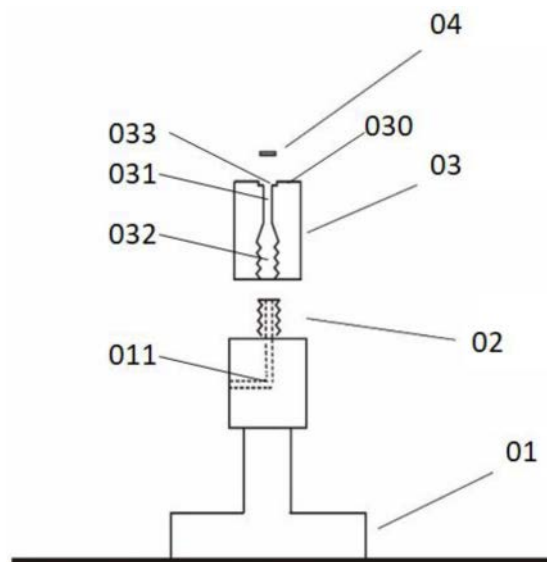
权利要求书2页 说明书7页 附图3页

(54) 发明名称

材料表面动态冰层拉伸粘附强度的测量装置及方法

(57) 摘要

本发明公开了一种材料表面动态冰层拉伸粘附强度的测量装置,其包括:工作平台、杯座、气芯和柔性载体,其中,所述气芯固定在所述工作平台上,且所述工作平台内设置有与所述气芯相连通的第一气道管路;所述杯座可拆卸地套设在所述气芯上,且所述杯座内设置有与所述气芯相连通,并贯穿所述杯座上的上表面的第二气路管道;所述柔性载体覆盖在所述第二气道管路出口处。本发明的测量装置杯座可更换为不同材料,以测量不同材料表面动态冰拉伸粘附强度。测量装置通过气流及柔性载体加载,可减缓或避免界面应力集中现象发生,从而更真实、准确地测量界面拉伸粘附强度。相应地,本发明还提供了一种材料表面动态冰层拉伸粘附强度的测量方法。



1. 一种材料表面动态冰层拉伸粘附强度的测量装置,其特征在于,包括:工作平台、杯座、气芯和柔性载体,其中,

所述气芯固定在所述工作平台上,且所述工作平台内设置有与所述气芯相连通的第一气道管路;

所述杯座可拆卸地套设在所述气芯上,且所述杯座内设置有与所述气芯相连通,并贯穿所述杯座上的上表面的第二气路管道;

所述柔性载体覆盖在所述第二气道管路出口处。

2. 根据权利要求1所述的测量装置,其特征在于,所述柔性载体为塑料垫片或树脂垫片;和/或,所述杯座采用蒙皮材料制成;和/或,所述杯座底部设置有可与所述气芯螺纹连接的气芯腔室,且所述气芯腔室的顶部与所述第二气路管道的入口相连通;和/或所述第二气道管路的出口处设置有与所述柔性载体配合的凹槽,所述柔性载体放置于所述凹槽内,并与所述上表面平齐。

3. 根据权利要求2所述的测量装置,其特征在于,所述凹槽的横截面圆环状;和/或,所述柔性载体呈圆形。

4. 根据权利要求3所述的测量装置,其特征在于,所述柔性载体的厚度与所述凹槽的深度相同。

5. 一种材料表面动态冰层拉伸粘附强度的测量系统,其特征在于,包括:负压装置,气流生成装置,跟权利要求1至4中任一所述的测量装置,以及第三气道管路和第四气道管路,其中,所述负压装置通过所述第三气道管路与所述测量装置中的第一气道管路相连通,所述气流生成装置通过所述第四气道管路与所述测量装置中的第一气道管路相连通。

6. 根据权利要求7所述的测量系统,其特征在于,所述负压装置为真空泵;和/或,所述气流生成装置为气压机。

7. 一种材料表面动态冰层拉伸粘附强度的测量方法,其特征在于,基于根据权利要求5或6所述的测量系统,相应地,所述测量方法包括步骤:

将所述测量系统中的测量装置放置于结冰环境中,且所述测量装置中的杯座的上表面与所述结冰环境中的来流方向相对,使得所述结冰环境中的过冷水滴/水蒸气在所述杯座的上表面生成动态冰层;

通过所述气流生成装置产生的气流推动所述柔性载体,使得所述柔性载体沿所述动态冰层的法向推动所述动态冰层,以在所述动态冰层与所述杯座的上表面之间的界面产生法向拉伸力;且

当所述动态冰层脱离所述测量系统中杯座的上表面时,根据所述气流产生装置当前的气流压力计算界面拉伸粘附强度。

8. 根据权利要求9所述的方法,其特征在于,所述界面拉伸粘附强度的计算公式为:

$$\sigma = \frac{p \cdot s'}{S},$$

其中,S为所述杯座上表面的面积;p为动态冰层脱落时气流生成装置所产生的气流压力,s'为气流生成装置所产生的气流作用于所述柔性载体的面积。

9. 根据权利要求9所述的方法,其特征在于,将所述测量装置放置于所述结冰环境之前,还包括步骤:

通过所述负压装置抽真空,使得所述测量装置中的柔性载体紧贴密封于所述杯座内的第二气道管路出口处。

10. 根据权利要求9所述的方法,其特征在于,还包括步骤:

重复上述各步骤,以进行多次测量,并根据多次测量得到的所述动态冰层脱离时的法向拉力计算界面拉伸粘附强度 σ :

$$\sigma = \frac{F_n'}{S} = \frac{(p_1*s' + p_2*s' + p_3*s' + \dots + p_N*s')/N}{S},$$

其中,S为所述杯座的上表面的面积;p为动态冰层脱落时气流生成装置所产生的气流压力,s'为气流生成装置所产生的气流作用于所述柔性载体的面积,N为测量的次数,N>1。

材料表面动态冰层拉伸粘附强度的测量装置及方法

技术领域

[0001] 本发明属于冰层界面力学性能测量技术领域,具体涉及一种动态冰层与基底材料表面拉伸粘附强度的测量装置及其测量方法。

背景技术

[0002] 表面结冰、结霜是指在低温环境(或结冰环境)下,由于水分凝固或水蒸气凝华而产生的一种冰层聚集粘附现象。例如汽车玻璃上的结霜、电力传输设备上的结冰;飞机机翼上的结冰,制冷设施和空调的结霜等。而材料表面结冰现象除了受温度这一重要因素影响之外,结冰表面的表面特性,特别是表面能的大小、表面对冰的附着力以及表面的疏水性对结冰现象有较大影响。

[0003] 飞行状态下,飞行器表面结冰会严重影响其空气动力性能。例如,飞机在穿越具有结冰气象条件的云层时,大气中的过冷水滴撞击飞机迎风表面,很容易在机翼、尾翼、进气道、风挡玻璃等部件形成结冰。冰层的积聚会导致飞机升阻特性和操作特性严重下降,对飞行安全造成极大影响。大量的案例表明,发动机进气口结冰、机翼结冰还可能导致飞机失事。为保证飞行安全,国内外大部分飞机均设计和安装不同的防除冰系统,热式(电热除冰、气热除冰)防除冰系统是目前国内外应用最广泛的飞机防除冰系统,机械式除冰方法凭借其能耗低、结构简单易于维护等优点同样在飞机防除冰领域占有重要的一席之地。

[0004] 研究表明冰层与飞机结构基底材料的粘附力越低,飞机防除冰技术越容易将飞机蒙皮表面的冰层去除。因此,准确测量冰层与基底材料界面的粘附性能,能够为飞机防除冰技术精准设计提供参考与数据支撑。

[0005] 冰层与基底材料界面的粘附性能包括剪切粘附强度与拉伸粘附强度。当前对冰层与基底材料界面粘附性能的实验测试方式的研究主要集中于界面剪切粘附强度测试,而冰层与基底材料界面拉伸粘附强度的研究较少。现有技术中对材料表面拉伸粘附性能研究时,通常是先将水置于容器中,然后将基板盖在装满水的容器表面,放入冰箱中进行结冰。在水结冰的过程中体积膨胀、与覆盖在其上的基板粘在一起,结冰完成后将其取出,倒置进行粘附力测试。例如,中国专利CN201420610062.X将冰和雪一起放置于盒子内,盖上基板,倒置后放入冰箱进行冰冻,后取出进行测试。又如,中国专利 CN201210115221.4公开了一种材料表面冰粘附强度法向力测试方法和装置,其通过向将沾有水的探头施加荷载,使其与材料表面接触,并在制冷温度下结冰后,对探头施加一定的法向拉伸力,使得冰层剥离,期间通过压力传感器来得到剥离过程中的最大法向力,并以此表征材料表面冰粘附力。也即现有技术中主要是针对材料表面形成的静态冰层的拉伸粘附力的测量,其存在以下问题:

[0006] 1) 上述测量方式都是针对在材料表面形成的静态冰层,而并没有针对材料表面形成的动态冰层的拉伸粘附强度提出相应的测量;

[0007] 2) 粘附力的大小与材料的形状和尺寸等有关,因此,上述测量方式并不能准确地表示材料表面冰层的拉伸粘附强度;

[0008] 3) 上述拉伸粘附力的测量方式采用机械拉伸的方式,测试过程中是刚性接触,即刚体对刚体,从而容易出现应力集中的情况。

[0009] 有鉴于此,当前亟需开展动态冰与基底材料界面拉伸粘附强度原位测量装置与方法的研究。

发明内容

[0010] 本发明的目的在于提供一种材料表面动态冰层拉伸粘附强度的测量装置、系统及方法,部分地解决或缓解现有技术中的上述不足。

[0011] 本发明的第一方面在于,提供一种材料表面动态冰层拉伸粘附强度的测量装置,其包括:工作平台、杯座、气芯和柔性载体,其中,所述气芯固定在所述工作平台上,且所述工作平台内设置有与所述气芯相连通的第一气道管路;所述杯座可拆卸地套设在所述气芯上,且所述杯座内设置有与所述气芯相连通,并贯穿所述杯座的上表面的第二气路管道;所述柔性载体覆盖在所述第二气道管路出口处。

[0012] 在本发明的一些示例性实施例中,所述柔性载体为塑料垫片或树脂垫片。

[0013] 在本发明的一些示例性实施例中,所述杯座采用典型的蒙皮材料制成。

[0014] 在本发明的一些示例性实施例中,所述第二气道管路的出口处设置有与所述柔性载体配合的凹槽,所述柔性载体放置于所述凹槽内,并与所述上表面平齐。

[0015] 在本发明的一些示例性实施例中,所述凹槽的横截面圆环状。

[0016] 在本发明的一些示例性实施例中,所述柔性载体呈圆形。

[0017] 在本发明的一些示例性实施例中,所述柔性载体的厚度与所述凹槽的深度相同。

[0018] 在本发明的一些示例性实施例中,所述杯座底部设置有可与所述气芯螺纹连接的气芯腔室,且所述气芯腔室的顶部与所述第二气路管道的入口相连通。

[0019] 本发明的第二方面在于,提供一种材料表面动态冰层拉伸粘附强度的测量系统,其包括:负压装置,气流生成装置,上述的测量装置,以及第三气道管路和第四气道管路,其中,所述负压装置通过所述第三气道管路与所述测量装置中的第一气道管路相连通,所述气流生成装置通过所述第四气道管路与所述测量装置中的第一气道管路相连通。

[0020] 在本发明的一些示例性实施例中,所述负压装置为真空泵。

[0021] 在本发明的一些示例性实施例中,所述气流生成装置为气压机。

[0022] 本发明的第三方面在于,提供一种材料表面动态冰层拉伸粘附强度的测量方法,所述测量方法基于上述测量系统,相应地,所述测量方法具体包括步骤:

[0023] 将所述测量系统中的测量装置放置于结冰环境中,且所述测量装置中的杯座的上表面与所述结冰环境中的来流方向相对,使得所述结冰环境中的过冷水滴/水蒸气在所述杯座的上表面生成动态冰层;

[0024] 通过所述气流生成装置产生的气流推动所述柔性载体,使得所述柔性载体沿所述动态冰层的法向推动所述动态冰层,以在所述动态冰层与所述杯座上表面之间的界面产生法向拉伸力;且

[0025] 当所述动态冰层脱离所述测量系统中杯座的上表面时,根据所述气流产生装置当前的气流压力计算界面拉伸粘附强度。

[0026] 在本发明的一些示例性实施例中,所述界面拉伸粘附强度的计算公式为: $\sigma = \frac{p*s'}{S}$,

[0027] 其中,S为所述杯座上表面的面积;p为动态冰层脱落时气流生成装置所产生的气流压力,s'为气流生成装置所产生的气流作用于所述柔性载体的面积。

[0028] 在本发明的一些示例性实施例中,将所述测量装置放置于所述结冰环境中之前,还包括步骤:

[0029] 通过所述负压装置抽真空,使得所述测量装置中的柔性载体紧贴密封于所述杯座内的第二气道管路出口处。

[0030] 在本发明的一些示例性实施例中,所述测量方法还包括步骤:重复上述各步骤,以进行多次测量,并根据多次测量得到的所述动态冰层脱离时的法向拉力计算界面拉伸粘附强度 σ :

$$[0031] \quad \sigma = \frac{F_n'}{S} = \frac{(p1*s' + p2*s' + \dots + pN*s')}{S},$$

[0032] 其中,S为所述杯座上表面的面积;p为动态冰层脱落时气流生成装置所产生的气流压力,s'为气流生成装置所产生的气流作用于所述柔性载体的面积,N为测量的次数,N>1。

[0033] 有益效果:

[0034] 相较于传统机械拉伸式测量方法,本发明的测量装置能够避免冰层自身在非界面处断裂产生的影响,从而可更真实、准确地实现动态冰层与基底材料之间的界面的拉伸粘附强度的原位测量;并且,相较于传统机械拉伸式测量方法中刚性接触的方式,采用柔性载体来传递气流冲击/气流压力,由于该柔性载体在气流冲击作用下可产生一定的柔性变形,因此,可使载荷更均匀,保证了动态冰层界面受载荷均匀,从而使得在杯座上形成的动态冰层能够整体脱落,避免了机械拉伸测量方法中,因应力集中导致冰层界面受载不均匀,进而造成冰层界面局部先脱落,再扩展至整个冰层脱落的现象,也即相较于传统的机械测量方式,本发明的测量结果更加准确、客观。

[0035] 本发明中杯座与气芯之间采用可拆卸的连接方式,使得可根据不同的测试需求更换不同基底材料制成的杯座,以测试动态冰层与不同基底材料,或者经不同加工工艺得到具有不同表面特性的同一基底材料之间的界面拉伸粘附强度,从而使得能够便捷、准确、客观、真实地测量动态冰层与不同基底材料表面的拉伸粘附强度。

附图说明

[0036] 为了更清楚地说明本发明实施例或现有技术中的技术方案,下面将对实施例或现有技术描述中所需要使用的附图作一简单地介绍。在所有附图中,类似的元件或部分一般由类似的附图标记标识。附图中,各元件或部分并不一定按照实际的比例绘制。显而易见地,下面描述中的附图是本发明的一些实施例,对于本领域普通技术人员来讲,在不付出创造性劳动性的前提下,还可以根据这些附图获得其它的附图。

[0037] 图1为本发明一示例性实施例的材料表面动态冰层拉伸粘附强度的测量装置的结构示意图;

[0038] 图2为本发明一示例性实施例的材料表面动态冰层拉伸粘附强度的测量系统置于

结冰环境的示意图；

[0039] 图3为本发明一示例性实施例的材料表面动态冰层拉伸粘附强度的测量方法的流程示意图；

[0040] 图4为本发明又一示例性实施例的材料表面动态冰层拉伸粘附强度的测量方法的流程示意图。

[0041] 01-工作平台,011-第一气道管路,02-气芯,03-杯座,030-上表面,031-第二气道管路,032-气芯腔室,033-凹槽,04-柔性载体,05-动态冰层,06-负压装置,07-气流生成装置,08-第四气道管路,09-第三气道管路,010-界面,012-共用气道管路,013-过冷水滴(或来流方向)。

具体实施方式

[0042] 为使本发明实施例的目的、技术方案和优点更加清楚,下面将结合本发明实施例中的附图,对本发明实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述。显然,所描述的实施例是本发明一部分实施例,而不是全部的实施例。基于本发明中的实施例,本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例,都属于本发明保护的范围。

[0043] 本文中,使用用于表示元件的诸如“模块”、“部件”或“单元”的后缀仅为了有利于本发明的说明,其本身没有特定的意义。因此,“模块”、“部件”或“单元”可以混合地使用。

[0044] 本文中,“动态冰”或“动态冰层”是指各种结冰环境(例如,风洞或高原高寒地区风口处等温度较低的自然环境)中,由运动状态的水分子(例如,过冷水滴或水蒸气等)在基底材料表面形成的不规则冰层。

[0045] 本文中,“静态冰”或“静态冰层”是指各种低温环境下,由静态(即非运动状态)的水分子(例如,液态水,或粘附在材料表面的一层水膜/水滴等)在基底材料表面形成的较规则冰层。

[0046] 本文中,“界面”是指动态冰层与材料表面相接触的面。例如,动态冰层与杯座顶部的上表面和柔性载体相接触的界面010,参见图2。

[0047] 本文中,“法向”是指垂直于动态冰层与材料表面相接触的界面的方向。

[0048] 本文中,“柔性载体”是指具有一定柔性,同时也具有一定刚性材料制成的垫片,只需要其满足:当其覆盖于第二气道管路出口上,且在抽真空作用下紧贴并密封该第二气道管路的出口,而在气流一定冲击作用下能够向外运动(或产生弹性形变),以推动杯座上形成的动态冰层即可。例如,塑料垫片,或者树脂垫片。

[0049] 本文中,“气芯”是指其内部设置有能够双向流通气流的通道,并且其能够实现工作平台和杯座可拆卸连接的部件。例如,当负压装置工作时,该气芯为气流提供流出杯座内第二气道管路的通道,而当气流生成装置产生气流时,该气芯为气流提供流入杯座内的第二气道管路的通道;同时,通过在其外部设置螺纹与杯座内的内螺纹相配合(当然也可采用其他的连接方式,例如,过盈配合等方式),从而实现将杯座与工作台可拆卸连接。

[0050] 参见图1,为本发明一示例性实施例的材料表面动态冰层拉伸粘附强度的测量装置的结构示意图。具体地,本示例性实施例的该测量装置包括:可放置在各种结冰环境中的工作平台01,由基底材料(如飞机典型蒙皮材料:铝合金、钛合金、复合材料等,或者车辆外壳材料等)制成的杯座03,固定在工作平台01上的气芯02,以及柔性载体04。

[0051] 其中,该工作平台01内设置有与气芯02相连通的第一气道管路011;该杯座03可拆卸地套设在气芯02上,且该杯底03内设置有与该气芯02相连通,并贯穿该杯座03顶部上表面030的第二气道管路031;上述柔性载体04则覆盖在该第二气道管路031出口处。

[0052] 在一些实施例中,该杯座03与气芯02之间采用螺纹连接,从而使得可更换不同基底材料制成的杯座03,以测试动态冰层与不同基底材料之间的界面拉伸粘附强度。具体地,该杯座03内靠近底部的位置设置一气芯腔室032,且该气芯腔室032的内壁上设置有可与该气芯02上的外螺纹相配合的内螺纹。

[0053] 更进一步地,在一些实施例中,为了测量经过不同加工工艺制得的具有不同表面特性的同一基底材料表面与动态冰层之间的界面拉伸粘附强度,还可对该杯座03的上表面进行预处理。例如,通过抛光、磨削、滚压、研磨等工艺得到具有不同粗糙度的上表面;或者,经过光刻蚀等工艺得到具有不同微观形貌的上表面。

[0054] 在一些实施例中,可通过在上述第二气道管路031的出口处设置与柔性载体04配合的凹槽033,且当该柔性载体04放置于该凹槽033内时,该柔性载体04远离该杯座的外表面与该杯座顶部的上表面030平齐。

[0055] 进一步地,为了更高的测量精度,在一些实施例中,该凹槽的横截面呈圆环状(由于凹槽底部中心为第二气道管路的出口,因此,该凹槽横截面呈圆环状);相应地,该柔性载体呈圆形,其尺寸大小适应于该凹槽,且其厚度与该凹槽的深度(或槽壁高度)相同,从而使得当将该柔性载体放置在该凹槽内时,该柔性载体04远离该杯座的外表面与该杯座顶部的上表面平齐。

[0056] 更进一步地,为了更高的测量精度,在一些实施例中,该杯座呈圆柱状,或者其他中心对称的形状,例如,正方体。

[0057] 参见图2,为本发明一示例性实施例的材料表面动态冰层拉伸粘附强度的测量系统的结构示意图。具体地,本示例性实施例的测量系统包括:负压装置06,气流生成装置07,上述实施例的测量装置,以及第三气道管路09和第四气道管路08,其中,负压装置06通过第三气道管路09与测量装置中的第一气道管路011相连通,而气流生成装置07通过第四气道管路08与测量装置中的第一气道管路011相连通。

[0058] 在一些实施例中,上述第三气道管路和第四气道管路可通过一个三通连接头连接至第一气道管路;当然,该第三气道管路和第四气道管路也可通过一段共用气道管路012连接至第一气道管路,参见图2。

[0059] 在一些实施例中,该负压装置06采用真空泵,即由该真空泵通过第三气道管路、第一气道管路和气芯将杯座内抽真空,使得柔性载体紧密贴敷于基底材料杯座上表面的圆形凹槽处,从而避免将该测量装置放置在结冰环境中后,结冰环境中过冷水滴在基底材料杯座内的第二气道管路(甚至气芯和第一气道管路内)结冰。

[0060] 在一些实施例中,气流生成装置07采用气压机,当杯座的上表面形成了动态冰层后,通过该气压机控制气道管路内的气流压力,以使得气道管路内的气流推动柔性载体向外运动,也即采用气流冲击动态冰层。具体地,可通过逐级增大气流压力,使得在气流冲击作用下塑料片推动动态冰层与基底材料在界面法向分离;当冰层界面受塑料片推力增大到粘附力临界值时,动态冰层脱落,从而实现冰层界面拉伸粘附强度的原位测量。

[0061] 相较于传统机械拉伸式测量方法,能够避免冰层自身在非界面处断裂产生的影

响,从而可更真实、准确地原位测量动态冰层与基底材料界面的拉伸粘附强度;并且,相较于传统机械拉伸式测量方法中刚性接触的方式(即刚体对刚体,例如,推拉杆和探头与动态冰层),本实施例中采用的是柔性载体,例如塑料片,由于其在气流冲击作用下可产生一定的柔性变形,因此,可使载荷更均匀,保证了冰层界面受载荷均匀,从而使得在杯座上形成的动态冰层能够整体脱落,避免了机械拉伸测量方法中,因应力集中导致冰层界面受载不均匀,从而造成冰层界面局部先脱落,再扩展至整个冰层脱落的现象,进而使得测量结果不够准确、客观的问题。

[0062] 具体实施时,可仅仅将上述测量装置放置在结冰环境或低温环境中以生成动态冰层,而将负压装置和气流生成装置放置在常温环境中,例如,仅仅将测量装置放置在结冰风洞中,且保证该测量装置中杯座的上表面与结冰风洞中的来流方向相对,而将负压装置和气流生成装置放置在结冰风洞外,其通过气道管路连接至测量装置即可,从而避免因低温环境对负压装置和气流生成装置的稳定性和可靠性造成影响,进而影响测量的精度。

[0063] 参见图3,为本发明一示例性实施例的材料表面动态冰层拉伸粘附强度的测量方法的流程示意图。具体地,本示例性实施例的测量方法包括步骤:

[0064] S301,通过负压装置抽真空使柔性载体紧贴密封于基底材料制成的杯座上表面的第二气道管路出口处。

[0065] S302,将测量装置放置于结冰环境中,且杯座位于结冰环境中的来流方向上(也即杯座的上表面与风洞来流方向相对),使得在结冰环境中的过冷水滴/水蒸气在杯座的上表面生成动态冰层。

[0066] 在一些实施例中,在动态冰层形成之前,该负压装置一直保持开启状态,从而使得柔性载体一直密封于第二气道管路出口处,避免在第二气道管路内结冰。

[0067] S303,通过气流生成装置产生的气流推动柔性载体向外运动,使得柔性载体沿动态冰层界面的法向推动动态冰层,从而在动态冰层界面产生法向拉伸力。

[0068] S304,当动态冰层脱离杯座上表面时,根据气流生成装置当前的气流压力计算界面拉伸粘附强度。

[0069] 在一些实施例中,可从0MPa开始逐级加载气流压力,使动态冰层发生法向运动趋势并最终脱落,记录最终界面脱落时气流压力 p 大小。

[0070] 在一些实施例中,每次增加幅值为0.1Mpa,或0.5Mpa等,具体增加幅值可根据实际情况选择,当然,单位时间内增加幅值越小,测量精度越高;而一定的加速速率下,可使得处于准静态加载的状态,进一步提高测量精度。

[0071] 在一些实施例中,界面拉伸粘附强度 σ 的计算公式为:

$$[0072] \quad \sigma = \frac{F_n}{S} \quad (1),$$

[0073] 其中, S 为杯座上表面的面积; F_n 为法向拉伸力,其计算公式为:

$$[0074] \quad F_n = p * s' \quad (2),$$

[0075] 其中, p 为动态冰层脱落时,气流生成装置当前产生的气流压力, s' 为气流作用于柔性载体的面积。

[0076] 由此可知,界面拉伸粘附强度 σ 的计算公式为:

$$[0077] \quad \sigma = \frac{p*s'}{S} \quad (3)。$$

[0078] 参见图4,在另一些实施例中,为了数据更加准确、客观,重复执行上述步骤,以进行多次测量,从而多次获取动态冰层脱落时的法向拉力 F_n ,然后,根据多次测量的法向拉力 F_n 计算得到气流压力的平均值 F_n' ;相应地,界面拉伸粘附强度 σ 的计算公式为:

$$[0079] \quad \sigma = \frac{F_n'}{S} = \frac{(p1*s'+p2*s'+p3*s'+\cdots+pN*s')/N}{S} \quad (4)。$$

[0080] 其中,N为测量的次数, $N>1$;p1、p2、p3、 $\cdots$ 、pN分别为第1、2、3、 $\cdots$ 、N次动态冰层脱落时,气流生成装置当前产生的气流压力。

[0081] 需要说明的是,在本文中,术语“包括”、“包含”或者其任何其他变体意在涵盖非排他性的包含,从而使得包括一系列要素的过程、方法、物品或者装置不仅包括那些要素,而且还包括没有明确列出的其他要素,或者是还包括为这种过程、方法、物品或者装置所固有的要素。在没有更多限制的情况下,由语句“包括一个 $\cdots$ ”限定的要素,并不排除在包括该要素的过程、方法、物品或者装置中还存在另外的相同要素。

[0082] 以上实施例仅用以说明本发明的技术方案,而非对其限制;尽管参照前述各实施例对本发明进行了详细的说明,本领域的普通技术人员应当理解:其依然可以对前述各实施例所记载的技术方案进行修改,或者对其中部分或者全部技术特征进行等同替换;而这些修改或者替换,并不使相应技术方案的本质脱离本发明各实施例技术方案的范围,其均应涵盖在本发明的权利要求和说明书的范围当中。

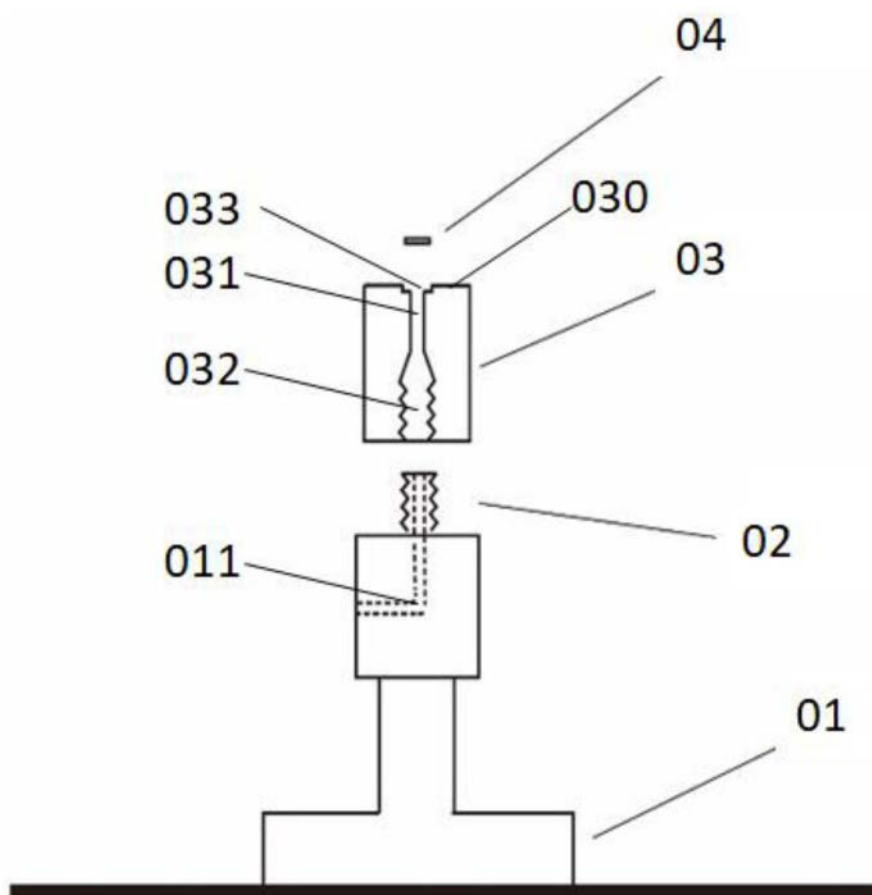


图1

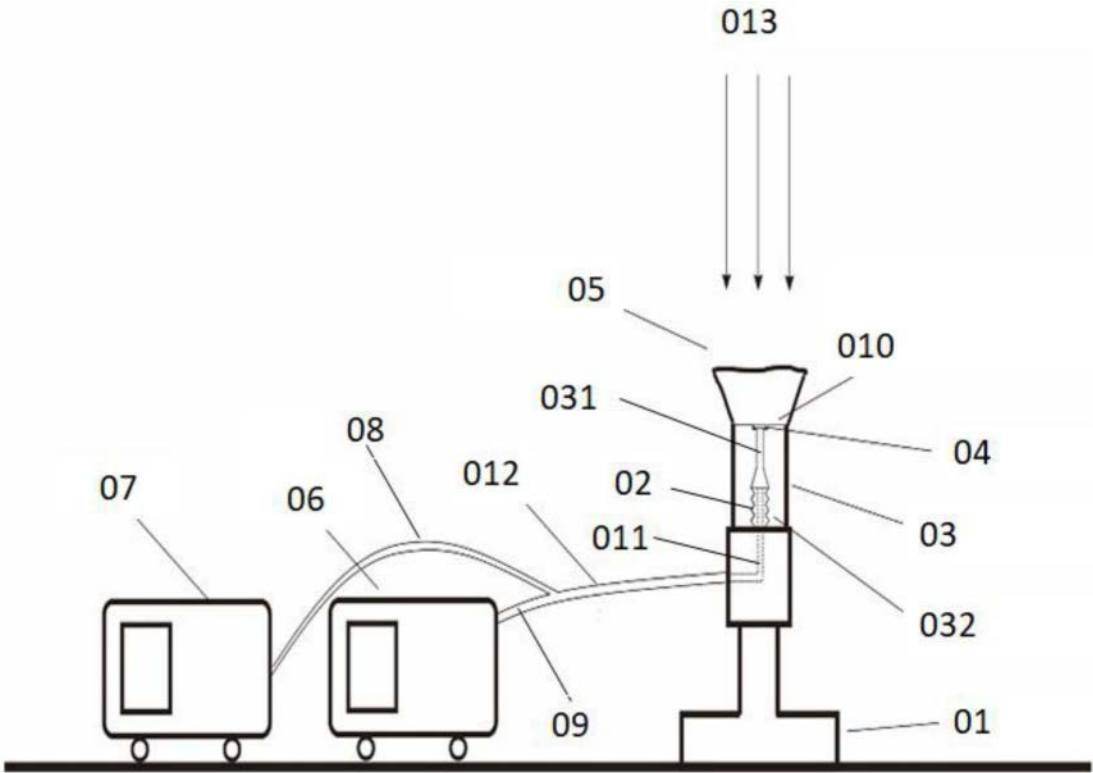


图2

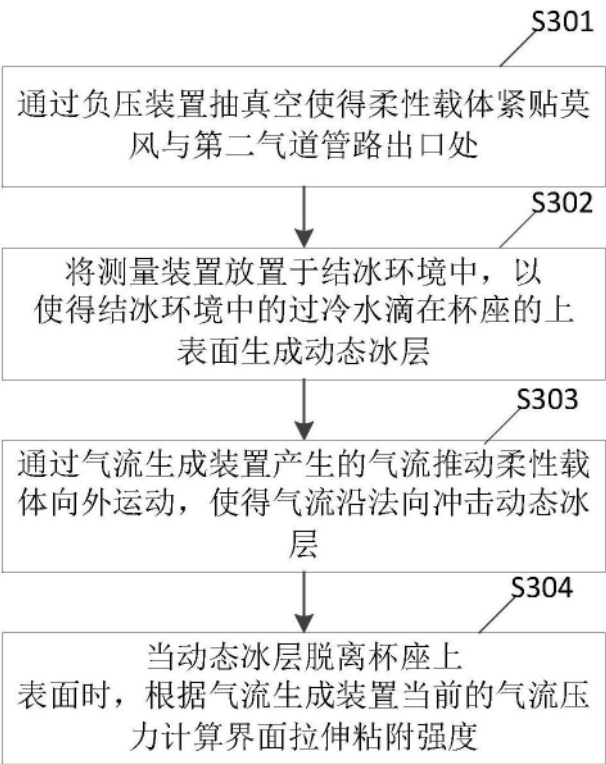


图3

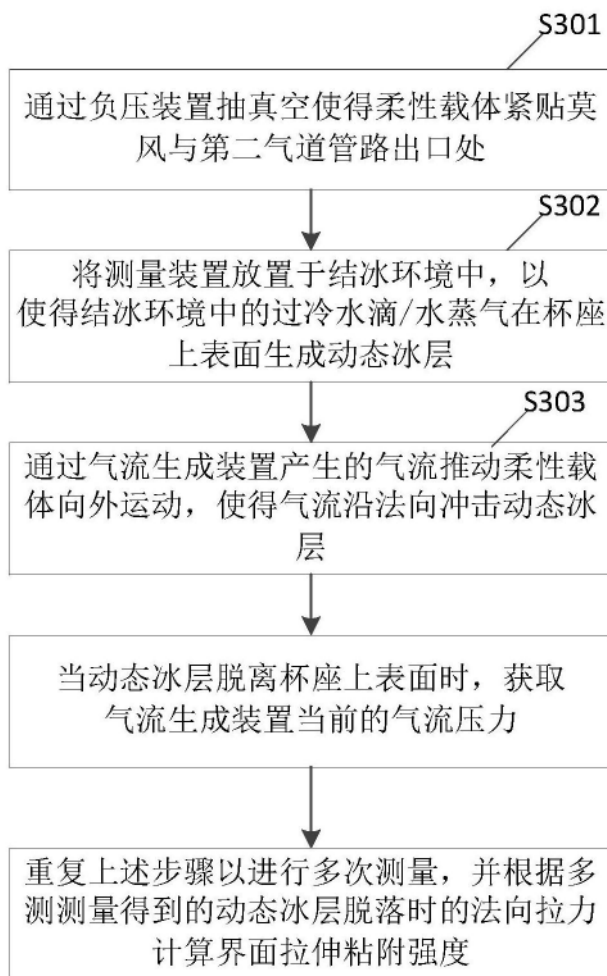


图4