

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2022.03.009

低温耐磨高承载复合材料座的研制与性能

黄河¹, 赖欢², 郑永¹, 谢绍祥¹, 王雨杭¹, 张亚新¹

(1. 株洲时代新材料科技股份有限公司, 湖南株洲 412007; 2. 中国空气动力研究与发展中心, 四川绵阳 621000)

摘要: 首先进行了低温耐磨材料选型, 在超高分子量聚乙烯、聚四氟乙烯、碳纤维增强耐磨材料、玻璃纤维增强耐磨材料等四种耐磨材料中, 通过性能对比优选聚四氟乙烯作为耐磨材料, 其次运用模压一体化成型方法将耐磨材料与耐低温复合材料复合研制了一种耐低温承载耐磨复合材料座。最后对产品进行各种性能测试, 低温下摩擦性能以及力学性能优异, 性能测试结果满足技术要求。产品界面强度优异, 经过 10 000 次低温承载疲劳试验后, 耐磨层与复合材料的抗拉载荷大于 7 kN; 产品模拟实际工况通过了 10 000 次低温承载摩擦疲劳试验, 且试验后质量、尺寸稳定, 耐磨层与复合材料粘接牢固。

关键词: 复合材料座; 耐低温承载耐磨; 抗拉载荷

中图分类号: TB32 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2022)03-0049-06

Preparation and Properties of Wear Resistant Composite Material Seat under Low Temperature and Load

Huang He¹, Lai Huan², Zheng Yong¹, Xie Shaoxiang¹, Wang Yuhang¹, Zhang Yaxin¹

(1. Zhuzhou Times New Material Technology Co., Ltd., Zhuzhou 412007, China;

2. China Aerodynamics Research & Development Center, Mianyang 621000, China)

Abstract : Firstly, the selection of wear resistant materials were took, polytetrafluoroethylene (PTFE) was selected as optimal wear resistant material by performance comparison from the four types of materials of ultra high molecular weight polyethylene, PTFE, carbon fiber reinforced wear resistant material and glass fiber reinforced wear resistant material. Secondly, a kind of low temperature bearing wear resistant composite seat was developed by combining wear resistant material with low temperature resistant composite material through compression molding. Lastly, the performances of the product was tested, which show excellent performance of wear resistant and mechanical properties under low temperature and load, all performance tests meet the technical requirements. The product shows excellent interface strength, and the tensile load between wear resistant layer and composite material is higher than 7 kN after 10 000 cycles of the low temperature load fatigue test. Furthermore, the product passes 10 000 cycles of the low temperature bearing friction fatigue test, which simulates actual working condition, after the test, the quality and size of product are stable, and the wear-resistant layer is firmly bonded with the composite material.

Keywords : composite material seat ; low temperature bearing and wear resistance ; tensile load

随着航空航天技术的飞速发展, 风洞试验成为飞行器研制的重要方法^[1-2], 马赫数和雷诺数被认为新一代先进航空飞行器的重要指标, 直接影响各飞行器设计性能的好坏。现有技术能在常规试验中精确模拟飞行马赫数, 但是最大可模拟雷诺数远低于实际飞行值^[3]。风洞试验的雷诺数模拟不足, 将会导致飞机焦点、最大升力系数和阻力系数等气动参数预测不准。模拟高雷诺数流场环境^[4-5], 从经济性

考虑主要采用低温运行模式以减小流场中的水汽含量。低温可以在试验过程中实现气流速度、总温和总压的独立调节, 它具有常温试验无法比拟的优点。所以, 对于大型飞行器的气动研究主要在低温深冷环境下进行测试。

深冷绝热技术^[6-8]是低温深冷技术领域的一项重要分支, 直接关系到深冷试验装置的安全运行。向试验装置喷入的液氮会通过吸收压缩机做功引入

通信作者: 黄河, 工程师, 主要从事先进功能材料研发

收稿日期: 2022-01-23

引用格式: 黄河, 赖欢, 郑永, 等. 低温耐磨高承载复合材料座的研制与性能[J]. 工程塑料应用, 2022, 50(3):49-54.

Huang He, Lai Huan, Zheng Yong, et al. Preparation and properties of wear resistant composite material seat under low temperature and load[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(3):49-54.

的热量、内部结构存储的热量及外界环境通过装置表面传入的热量,从而降低气流温度,保持试验流场所需温度的稳定,实现低温试验顺利运行。深冷回路内除了功能绝热层外,还包括隔热支撑座结构,起着隔热及应对内部段由于低温的收缩不一致导致的摩擦功能。因此,要求支撑座在低温下不仅具有较高力学性能、低热导率,同时具有低耐磨系数,一旦材料设计不合理,热导率或耐磨性能不满足工况要求,将造成深冷系统漏冷,导致深冷装置环境温度达不到要求;而且无法得到温差下的长度补偿可能致使零部件损坏,同时增大能量损耗,降低工作效率。因此开发一种既耐低温,又具有较高的绝热功能,同时兼具耐磨功能的支撑座是亟待解决的问题。

树脂基复合材料^[9-10]兼具高绝热及高力学性能^[11-12],由基体材料、增强材料组成^[9],其中增强材料主要承担载荷,基体材料则起着传递载荷的作用,具有轻质高强、热导率低、疲劳性能优良的特点。

笔者研究对象为某耐低温承载耐磨支撑座,其示意图见图1。耐低温承载耐磨支撑座为空心圆柱体结构,高50 mm,其技术要求为低温冲击韧性 $\geq 20 \text{ J/cm}^2$,摩擦系数 < 0.15 ,疲劳性能为垂直载荷7 kN,频率1 Hz,77 kN下10 000次疲劳试验后尺寸、质量稳定且产品无损坏。

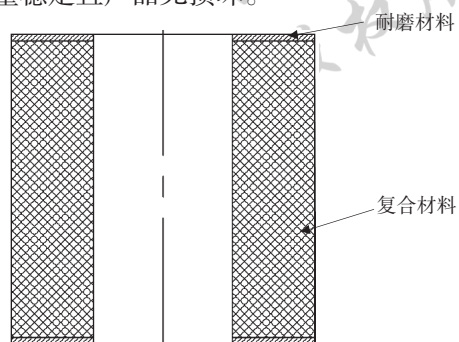


图1 复合材料支撑座结构

1 试验部分

1.1 主要原材料

环氧树脂 (EP): EP TJ307, 株洲时代新材料科技股份有限公司;

玻璃纤维布: 无碱 EW100, 陕西华特新材料科技股份有限公司;

聚四氟乙烯 (PTFE): GX120, 株洲时代新材料科技股份有限公司;

二硫化钼: FSSS 1.0 ~ 1.5 μm , 河北沁迈金属材料有限公司;

炭黑: MA100, 上海黎轩实业有限公司;

活化液: 0.05 mol/L 钠 - 萘活化液, 株洲时代新材料科技股份有限公司;

超高分子量聚乙烯 (PE-UHMW): CG30, 株洲时代新材料科技股份有限公司;

碳纤维增强耐磨材料: TZ023, 株洲时代新材料科技股份有限公司;

玻璃纤维增强耐磨材料: BZ005, 株洲时代新材料科技股份有限公司。

1.2 仪器及设备

傅立叶变换红外光谱 (FTIR) 仪: JYH-74 型, 美国 Nicolet 公司;

电子万能材料试验机: Z100 TEW 型, 德国 ZWick/Roell 集团;

差示扫描量热 (DSC) 仪: DSC1 专业型, 瑞士 METTLER 公司;

洛氏硬度计: XHR-150 型, 上海材料试验机厂;

微机控制摩擦磨损试验机: MMS-2A 型, 济南益华科技有限公司;

冲击测试仪: JB-W500 型, 济南文腾试验仪器有限公司;

热导率测试仪: DRX- II -300A 型, 湘潭华丰仪器制造有限公司;

热膨胀系数测试仪: PCY-D-III 型, 湘潭湘仪仪器有限公司;

疲劳试验机: 非标设备, 北京富力通达科技有限公司。

1.3 复合材料支撑座的制备

改性 PTFE 材料制备: 将 PTFE、二硫化钼、炭黑原料按质量比 8.5 : 1 : 0.5 配备耐磨粉料, 搅拌均匀, 再进行压制成型, 高温烧结后在新配活化钠 - 萘液中活化后待用。

成型工艺: 其工艺流程图如图2所示。运用模压成型方法, 将玻璃纤维布通过低温树脂槽, 用张力控制器对其施加张力, 制备耐低温复合材料预浸料^[13-14], 再与改性耐磨材料一体化成型, 固化成型后进行机械加工, 即得低温耐磨复合材料支撑座。

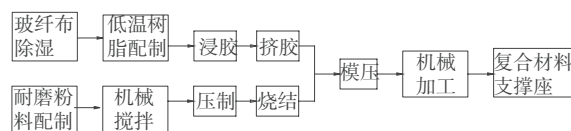


图2 低温耐磨复合材料座制备流程图

1.4 性能测试

纤维增强复合材料的压缩强度、压缩弹性模量

按照 GB/T 1448-2005 测试;

耐磨层材料摩擦系数、压缩强度按照 GB/T 3960-2016 测试;

FTIR 表征:采用 FTIR 仪按照 GB/T 6040-2002 测试 PTFE 活化前后的 FTIR 光谱;

层间剪切强度按照 GB/T 1450.1-2005 测试;

冲击性能按照 GB/T 1451-2005 测试;

线膨胀系数按照 GJB 332A-2004 测试;

热导率按照 GB/T 10294-2008 测试;

耐磨材料压缩强度、压缩弹性模量按照 GB/T 1041-2008 测试;

拉伸强度按照 GB/T 1040.1-2018 测试,测试速率 2 mm/min ;

温度疲劳试验后样件的界面强度按照 GB/T 1452-2005 测试;

耐磨层与复合材料层的界面强度按照 ASTM 2344-2016 测试;

样件的低温耐磨承载疲劳性能采用专用试验装置按照温度为 -160°C , 压载力为 7 kN, 频率为 0.4 Hz, 位移为 ± 3 mm, 循环 10 000 次测试。

2 结果与讨论

2.1 耐磨层材料选型

常用的耐低温耐磨材料有 PE-UHMW、PTFE、碳纤维增强耐磨材料、玻璃纤维增强耐磨材料等,性能对比见表 1^[15]。

表 1 耐磨材料性能对比

试样编号	材料类型	摩擦系数	压缩强度 /MPa	粘接性能
1 [#]	PE-UHMW	< 0.15	37	差
2 [#]	PTFE	< 0.2	41	活化后可粘接
3 [#]	碳纤维增强耐磨材料	< 0.25	850	优
4 [#]	玻璃纤维增强耐磨材料	< 0.3	497	优

可以看出, PE-UHMW, PTFE 的耐磨性能优于 3[#], 4[#] 材料, 而粘接性能、力学性能比 3[#], 4[#] 材料两种差。由于摩擦系数为关键指标, 因而选择 PE-UHMW, PTFE 作为备选耐磨材料。同时由于这两种耐磨材料力学性能一般, 在较大载荷下会发生一定变形, 产品采用纯耐磨材料不能满足技术要求。笔者通过耐磨材料与纤维增强复合材料进行复合, 由纤维增强复合材料提供承载功能保障, 耐磨材料提供耐磨功能。PTFE 粘接性能优于 PE-UHMW,

所以最终选用 PTFE 作为耐磨材料, 由于其 C—F 键能高, 表面能低, 具有不粘性, 必须通过活化处理引入羟基、羰基等活性官能团增大表面能。

将压制、烧结后的 PTFE 板在现配的钠-萘活化液中进行活化处理 5 min, 对未活化、已活化的 PTFE 板分别进行 FTIR 测试, 其谱图见图 3。对比可见, 在波数 1204 cm^{-1} 和 1737 cm^{-1} 处, 活化后的峰面积比未活化的小, 说明 C—F 键特征峰经活化后强度变弱; 相比未活化, 活化后的 1632 cm^{-1} (C=O 特征峰) 峰面积变大说明在活化过程中 C—F 键被打断, 引入了活性基团, 提高了表面活性, 有利于耐磨材料与纤维增强复合材料的粘接。

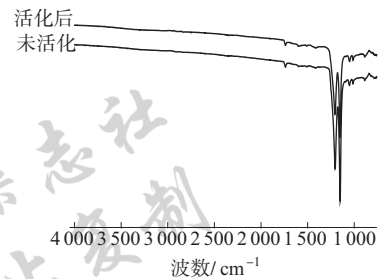


图 3 PTFE 活化前后 FTIR 谱图

2.2 低温力学性能

耐低温承载耐磨复合材料座由上下层耐磨材料与中间层纤维增强复合材料通过模压成型, 中间层提供力学强度及隔热性能。设置模压工艺参数为 $120^{\circ}\text{C}/3.5\text{ MPa}/2\text{ h}+140^{\circ}\text{C}/4.5\text{ MPa}/2\text{ h}+155^{\circ}\text{C}/5.5\text{ MPa}/2\text{ h}$, 考虑耐磨层材料的热导率小于纤维增强材料, 故设置三段式模压, 使产品在制备过程中温度、压力达到均衡, 得到性能最优的产品, 并对其进行了本体取样性能低温测试, 测试结果见表 2、表 3。

各项力学、热性能均满足技术要求, 说明开发

表 2 复合材料性能 (-196°C)

性能	测试标准	技术要求		测试结果	
		垂直布层	平行布层	垂直布层	平行布层
压缩强度 /MPa	GB/T	≥ 700	≥ 450	797	552
压缩弹性模量 /GPa	1448-2005	≥ 16	≥ 25.5	34	53
层间剪切强度 /MPa	GB/T 1450.1-2005	/	≥ 39	/	43
冲击韧性 /($\text{J} \cdot \text{cm}^{-2}$)	GB/T 1451-2005	≥ 25	≥ 20	52	41
热导率 /($\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$)	GB/T 10294-2008	≤ 0.35	≤ 0.45	0.31	0.41
线膨胀系数 / $\times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	GJB 332A-2004	≤ 25	≤ 11.5	23.2	8.4

表3 耐磨材料性能 (-196℃)

性能	测试标准	技术要求	测试结果
压缩强度 /MPa	GB/T 1041-2008	≥ 78	255
压缩弹性模量 /GPa		≥ 3	5.1
拉伸强度 /MPa	GB/T 1040.1-2018	≥ 58	69
热导率 / $[W \cdot (m \cdot K)^{-1}]$	GB/T 10294-2008	≤ 0.28	0.24
线膨胀系数 / $10^{-6}K^{-1}$	GJB 332A-2004	≤ 45	42

的低温树脂配方柔性段与刚性段部分配置合理,柔性段在低温下仍能形成应力松弛界面,具有较高吸收和分散冲击载荷的能力,使材料具备优良的低温韧性,同时刚性段的存在使材料具有较高的力学性能。由此可见,复合材料支撑座作为深冷装置的重要部件,具有可靠的力学性能。

2.3 界面粘接强度

产品在实际应用中需经受载荷冲击,低温下材料的脆性、线收缩量增大,耐磨层与中间层纤维增强复合材料界面可靠性需要进行验证^[16-17],确保在低温下载荷冲击的安全可靠。对试验件进行低温承载疲劳试验,试验参数为载荷 0~7 kN,频率 0.5 Hz,疲劳次数 10 000 次。图 4 为低温压载疲劳试验压载力-时间变化曲线。由图 4 可以看出,变化曲线比较平滑,未出现台阶、跳动等情况,说明作用在产品上的力均匀变化,产品最终状态与初始状态一致。观察疲劳后的产品,粘接界面牢固未见开裂、变形等缺陷。结果表明,产品具有高界面强度,可以经受 10 000 次低温压载疲劳。

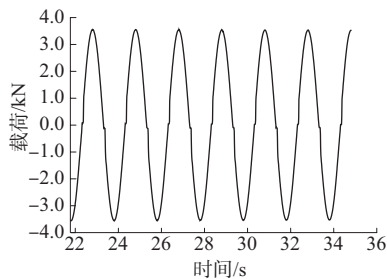


图4 低温承载疲劳试验曲线

为了精准表征上述疲劳试验之后产品的界面粘接强度,对其进行界面粘接强度试验,由于产品的耐磨层与复合材料层均为刚性材料,无法采用剥离的方法测试粘接强度,故采用金属头粘接上下耐磨层在万能拉力试验机上进行平拉强度试验的方法,平拉强度试验后的产品见图 5。可以看出,产品的耐磨层与中间复合材料未破坏,而是金属头与耐磨层脱落,试验结果表明平拉破坏载荷达到 7.88 kN,平拉强度达 2.17 MPa。进一步地考察常温下耐磨

层与复合材料层的界面强度。结果表明,破坏形式为复合材料层本体破坏,耐磨层与复合材料层未见损伤,说明该产品具有优异的界面强度。

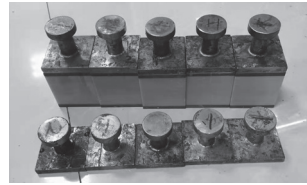


图5 平拉试验后的样件

2.4 温度疲劳性能

产品在实际应用中需经受低温-常温的温度冲击,为了验证产品在低温-常温下的耐温度疲劳性能,为此设计了专用试验工装如图 6 所示。模拟实际工况下的温度冲击。首先将产品置于试验工装下用扭力扳手拧螺栓使之受压不小于 7 kN,再将整体置于液氮下浸泡 20 min,此时产品达到低温平衡状态,最后放入 50℃烘箱静置 45 min,使产品达到常温平衡状态,循环 25 次,温度疲劳试验时间-温度曲线见图 7。

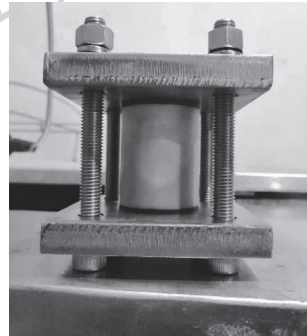


图6 试验样件及工装

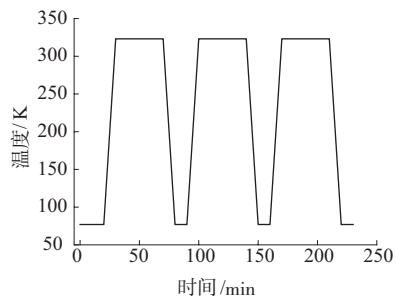


图7 温度疲劳试验时间-温度曲线

做完低温-常温的样件图如图 8 所示。可以看出样件均完好无损,界面未发生剥离或开裂,说明样件在严苛的温度冲击下具有优良的可靠性。分析原因是选型的耐磨材料、复合材料具有优异的低温性能,其次是耐磨材料与复合材料的线膨胀系数差异不大,在温度变化下的线性变形量小于允许变形量。

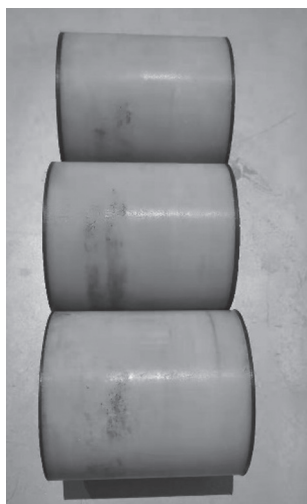


图8 温度疲劳试验后的样件

2.5 低温承载耐磨疲劳性能

为验证支撑座在实际工况(承载、低温、耐磨)下的可靠性,设计了低温承载耐磨疲劳试验。试验装置见图9,主要由试验台架与杜瓦罐组成。首先将产品安装在试验台架上,再开启冷却系统,此时试验装置缓慢冷却,冷量沿螺杆与套在螺杆上的碟簧传递至螺杆上部。在此过程中,螺杆一端处于低温状态,另一端温度相对较高,导致产生较大形变,进而产生应力向下挤压上层框架,底部试验件受正压力载荷。试验参数为压载力7 kN,频率0.4 Hz,位移 ± 3 mm,循环10000次。

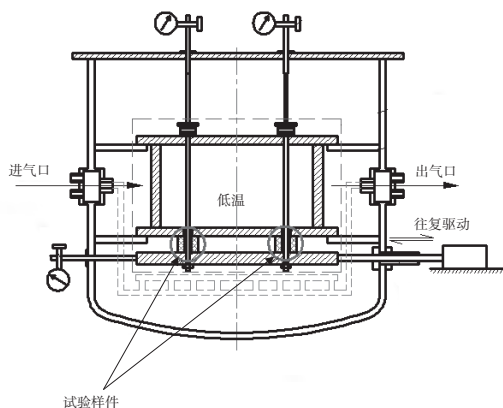


图9 低温承载耐磨疲劳试验

图10为产品疲劳试验温度-时间变化曲线。由图10可以看出,降温130 min后,试验样件温度降至 -160°C ,满足疲劳试验温度要求。随着疲劳试验次数(时间)的增加,各部分的温度始终保持稳定,10000次低温压载疲劳试验后,恢复常温后取出样件,观察样件状态:样件完好无损,各尺寸稳定,

且试验前后质量基本保持一致,耐磨层部分与中间部分粘接牢固。分析原因可能是耐磨层材料摩擦系数小,磨耗小,低温下线膨胀系数小;同时中间层复合材料耐低温, -160°C 低温下尺寸稳定。

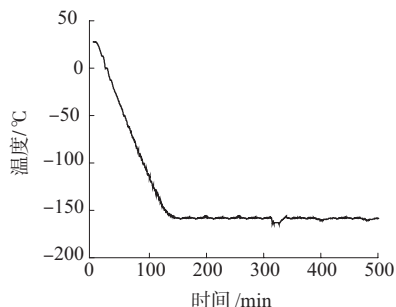


图10 疲劳试验温度-时间曲线

3 结语

(1) 综合研究了4种耐磨材料的耐磨、承载及粘接性能,根据试验结果选择聚四氟乙烯作为支撑座耐磨层材料;

(2) 通过材料选型试验,对支撑座中间层与耐磨层分别本体取样并进行低温性能测试,试验结果均满足技术要求;

(3) 考察了产品完成10000次低温压载疲劳试验后的界面强度,试验结果表明耐磨层与复合材料层的抗拉载荷 > 7 kN(界面未见损伤),中间层本体破坏,满足技术要求;

(4) 支撑座产品通过模拟实际工况的10000次低温承载耐磨疲劳试验,试验结果表明产品尺寸稳定,且试验前后质量保持一致,耐磨层部分与中间层部分粘接牢固,满足技术要求。

参考文献

- [1] 王旭东,陈叔平,毛红威,等. 低温风洞电动推杆热防护结构设计及传热分析[J]. 低温工程,2017(12):20-21.
Wang Xudong, Chen Shuping, Mao Hongwei, et al. Thermal protection structure design and heat transfer analysis of linear actuator in cryogenic wind tunnel[J]. Cryogenics, 2017(12):20-21.
- [2] 刘政崇. 风洞结构设计[M]. 北京: 中国宇航出版社,2005.
Liu Zhengchong. Wind tunnel construction design[M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2005.
- [3] 廖达雄,陶瑜,俞鸿儒,等. 新型空气低温跨声速原理性风洞研制[J]. 流体力学与测量,2000,14(3):66-72.
Liao Daxiong, Tao Yu, Yu Hongru, et al. The research of a new type of air cryogenic wind tunnel[J]. Experiments and Measurements in Fluid Mechanics, 2000, 14(3):66-72.
- [4] 张振,牛玲. 低温风洞的发展现状与关键技术[J]. 低温工程, 2015(2):57-62.

- Zhang Zhen, Niu Ling. Current status and key technologies of cryogenic wind tunnel[J]. Cryogenics, 2015(2):57-62.
- [5] 陈振华, 张伟, 高荣, 等. 液氮抽真空制冷的理论及试验[J]. 航空动力学报, 2019, 34(9):1 971-1 976.
- Chen Zhenhua, Zhang Wei, Gao Rong, et al. Theoretical and experimental studies of vacuum cooling of liquid nitrogen[J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 34(9):1 971-1 976.
- [6] 宋远佳, 廖达雄, 赖欢, 等. 低温风洞绝热系统的研究现状及其关键技术[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2019(7):63-68.
- Song Yuanjia, Liao Daxiong, Lai Huan, et al. Development and key technology of cryogenic wind tunnel insulation system[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2019(7):63-68.
- [7] 徐烈. 我国低温绝热与储运技术的发展与应用[J]. 低温工程, 2001(2):1-9.
- Xu Lie. The advance and application of cryoinsulation and cryostorage transportation technology in our country[J]. Cryogenics, 2001(2):1-9.
- [8] 席肖桐, 王珏, 郭璐娜, 等. 极低温制冷技术的发展与应用[J]. 低温与超导, 2019(6):1-10.
- Xi Xiaotong, Wang Jue, Guo Luna, et al. Development and application of ultra-low temperature technology[J]. Cryogenics & Superconductivity, 2019(6):1-10.
- [9] 刘宇. 深冷技术工艺及设备的最新进展[J]. 中国战略新兴产业, 2019(9):127-128.
- Liu Yu. The latest progress of cryogenic technology and equipment[J]. China's Strategic Emerging Industries, 2019(9):127-128.
- [10] 刘万辉. 复合材料[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2011:13-15.
- Liu Wanhui. Composite Materials[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2011:13-15.
- [11] 王国荣, 武卫莉, 谷万里. 复合材料概论[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2001:35-61.
- Wang Guorong, Wu Weili, Gu Wanli. Introduction to composite materials[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2001:35-61.
- [12] 王犇. 复合材料的应用与展望[J]. 中国新技术新产品, 2018(3):40-41.
- Wang Ben. Application and prospect of composite materials[J]. New Technology & New Products of China, 2018(3):40-41.
- [13] 夏兰君, 宁尚林, 毛建明. 环氧树脂的低温增韧改性研究[J]. 粘接, 2018(2):50-52.
- Xia Lanjun, Ning Shanglin, Mao Jianming. Study on low temperature toughening of epoxy resin[J]. Adhesion, 2018(2):50-52.
- [14] 王晓蕾, 王芳, 刘千立, 等. 超低温用碳纤维增强树脂基复合材料的性能研究[J]. 宇航材料工艺, 2018(5):34-38.
- Wang Xiaolei, Wang Fang, Liu Qianli, et al. Performance of ultra-low temperature carbon fiber reinforced resin based composites[J]. Aerospace Materials & Technology, 2018(5):34-38.
- [15] 王超. 复合材料粘接界面的力学性能研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
- Wang Chao. Research on adhesive interfacial mechanical properties of composites[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016.
- [16] 周先辉, 孙友松, 王万顺. 碳纤维织物/环氧复合材料油润滑下摩擦学性能[J]. 摩擦学学报, 2014, 34(3):333-340.
- Zhou Xianhui, Sun Yousong, Wang Wanshun. Tribological properties of carbon fabric/epoxy composite under oil lubrication[J]. Tribology, 2014, 34(3):333-340.
- [17] Suresha B, Ramesh B N, Subbaya K M, et al. Mechanical and three-body abrasive wear behavior of carbon-epoxy composite with and without graphite filler[J]. Journal of Composite Materials, 2010, 44(21):2 509-2 519.