

第二代高温超导带材焊接及力学性能研究

张永军^{1†}, 孙佳阳¹, 胡宏伟¹, 陆齐^{1,3}, 刘志勇^{1,2,3},
鲁玉明^{1,2,3}, 郭艳群^{1,2,3}, 菅洪彬¹, 豆文芝^{1,2,3}, 蔡传兵^{1,2,3†}

1. 上海上创超导科技有限公司, 上海 201401;

2. 上海大学物理系, 上海 200444;

3. 上海市高温超导重点实验室, 上海 200444

收稿日期: 2021-12-05; 接收日期: 2021-12-25

【摘要】 第二代高温超导已进入产业化初期, 尽管单根带材长度已达千米量级, 但由于千米级单根带材生产成品率偏低以及大型超导装置对带材长度实际需求远超出单根长度制备能力, 因此, 焊接技术成为高温超导大规模应用的关键技术之一. 接头电阻及其力学性能是评估焊接接头的重要技术指标. 本文提出了改进型接头和“隐形”接头两种制作方法, 并对其接头电阻以及力学性能进行了表征, 同时与常规搭接接头进行了对比分析. 结果发现, (1) 与常规搭接接头相比, 改进型和“隐形”接头的厚度分别降低了 15% 和 36%, 有效减小了焊接接头处和原带材厚度差异. (2) 超导面-超导面焊接, 获得接头电阻最小; 接头电阻随接头长度的增加而减小, 但幅度降低. (3) 常规搭接接头、改进型和“隐形”焊接接头均具有良好的轴向抗拉性能, 通过扭转和 8 天液氮浸泡后, 临界电流无衰退, 电阻保持一致. (4) 改进型和“隐形”接头的临界弯曲直径 (20 mm) 与原带材 (非接头处) 相当, 通过卷对卷传输法测试时接头无损伤, 而常规搭接接头的临界弯曲直径 (40 mm) 大于原带材, 在通过卷对卷测试时, 接头出现开裂甚至断开现象. 根据具体应用场景, 选择合适接头制作方式, 对推动第二代高温超导产业化具有重要意义.

关键词: 第二代高温超导, 焊接接头, 接头电阻, 力学性能

PACS: 74.72.-h, 74.25.F-, 74.90.+n

DOI: 10.13380/j.ltpl.2021.06.006

Study on Welding Joint and Its Mechanical Performance of 2G-HTS Tape

ZHANG Yongjun^{1†}, SUN Jiayang¹, HU Hongwei¹, LU Qi^{1,2,3}, LIU Zhiyong^{1,2,3},
LU Yuming^{1,2,3}, GUO Yanqun^{1,2,3}, JIAN Hongbin¹, DOU Wenzhi^{1,2,3}, CAI Chuanbing^{1,2,3†}

1. Shanghai Creative Superconductor Technologies Co., Ltd. (SCSC), Shanghai 201401, China;

2. Physics Department of Shanghai University, Shanghai 200444, China;

3. Shanghai Key Laboratory of High Temperature Superconductors, Shanghai 200444, China

Received date: 2021-12-05; accepted date: 2021-12-25

【Abstract】 At present, the second-generation high temperature superconductor (2G-HTS) has entered the initial stage of industrialization. On the one hand, even though the length of its single piece reaches up to 100 m, even 1000 m, the yield of production is low because of complex production processes. On the other hand, the practical demand for single piece tapes far exceeds its single preparation capacity in preparation of large superconducting devices. Therefore, Welding technology has become one of the key technologies for the large-scale application of the second-generation high temperature superconductor. Joint resistance and its mechanical properties are known as

[†] yjzhang0323@163.com; chuanbing_cai@vip.163.com

important technical indexes for evaluating welded joints. In this paper, two kinds of joints newly developed, improved joint (2 # -joint) and “invisible” joint (3 # and 4 # -joint), were prepared, and their joint resistance and mechanical properties were characterized. While the differences between the two joints above and conventional lap welding joints (1 # -lap joint) were analyzed. The results are as follows. (1) Compared with the conventional lap joint, the thickness of the improved and “invisible” joint is reduced by 15% and 36%, respectively. Through visual inspection, the difference of thickness between the “invisible” joint and the non-joint is reduced and not distinguished, which effectively improves the probability of mechanical damage in subsequent application; (2) The minimum joint resistance is achieved for YBCO side-YBCO side welding. For conventional welded joints, when the joint length is less than 2 cm, the joint resistance decreases linearly with the joint length; when the joint length is > 2 cm, the joint resistance decreases nonlinearly with the joint length; (3) The tensile strength of conventional lap joint, improved joint and “invisible” joint at room temperature is equivalent to that of non-joint tape. All of them have good axial tensile properties. After the experiment of torsion and 8-day liquid nitrogen immersion, superconducting performance did not decline and the joint resistance is consistent with the initial value (before torsion and immersion). (4) The critical bending diameter of the improved and “invisible” joints is 20 mm, which is equivalent to that of the non-joint tape. The critical bending diameter of the conventional lap joint is 40 mm, which is twice as much as that of the non-joint tape. When tested by reel-to-reel transport method, both the improved and “invisible” joints were not damaged and the conventional lap joint cracked. The former shows better bending performance than the latter. According to different application scenarios of superconductivity, selecting appropriate joint style plays an important role in promoting the application and industrial development of the second-generation high temperature superconductor (2G-HTS).

Keywords: 2G-HTS tape, Welding joint, Joint resistance, Mechanical performance

PACS: 74.72.-h, 74.25.F-, 74.90.+n

DOI: 10.13380/j. ltpl. 2021. 06. 006

Reference method: ZHANG Yongjun, SUN Jiayang, HU Hongwei, LU Qi, LIU Zhiyong, LU Yuming, GUO Yanqun, JIAN Hongbin, DOU Wenzhi, CAI Chuanbing, Low. Temp. Phys. Lett. **43**, 0354 (2021)

1 引言

由于具有高临界转变温度(T_c)、高临界电流密度(J_c)和高上临界磁场(B_{c2})等优异特性^[1-3],第二代高温超导(2G-HTS)带材在电力输电、交通运输、能源、医疗等^[4-6]领域具有广泛的应用前景。

2G-HTS带材在制备工艺上采用外延生长技术,其典型结构如图1所示,主要包括金属基带、缓冲层、超导层和银保护层,以及根据具体应用场景和需求,电镀铜稳定层和/或封装不同金属层。其中,基带主要起机械支撑作用,缓冲层起阻隔金属原子扩散至超导层和提供立方织构模板的作用,银层主要起保护和失超分流作用,铜稳定层在增强带材强度的同时,也增强了超导带材失超保护能力。

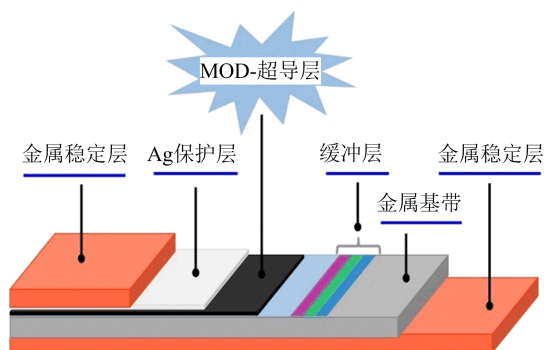


图1 2G-HTS带材的典型结构

第二代高温超导已进入产业化初期,其单根制备能力达百米,甚至千米量级,但生产工序多且复杂,从基带、缓冲层(包括 $Al_2O_3/Y_2O_3/MgO/LMO$ 层等)、超导层、Ag层到覆Cu层(包括电镀Cu和/或封装金属稳定层)的生产,且前道工序为后道工序基础,一道工序出现问题,将会影响最终产品的质量,导致单根长度成品率偏低;另一方面,在实际应用中,大型超导装备对高温超导带材单根长度的需求远超过当前2G-HTS带材实际单根生产能力,如带材与带材、线圈与线圈之间的连接等均需通过焊接来实现。因此,焊接技术^[7]成为二代高温超导大规模应用的关键技术之一。

2G-HTS带材焊接主要分为两类。第一类是超导焊接:是将两个超导面进行连接导通,其接头电阻可低至 $10^{-12}\Omega$ 以下,主要应用于磁共振成像系统等主磁体闭合线圈焊接。但其连接工艺复杂、对设备要求高,且需要特定的气氛条件和较高温度^[8,9],该技术目前尚处实验室研究阶段,实际应用还不成熟。而

作为第二类的有阻焊接,由于其接头电阻可控制在n Ω 级别,在实际应用中被普遍采用。

焊接接头电阻是有阻焊接的关键参数之一,目前对2G-HTS带材接头的研究主要集中在接头电阻^[7,10],通过调节焊接工艺(如焊料、温度、时间、压力等)来获得低电阻的目的。但在实际应用中,2G-HTS带材及其接头通常易受到拉伸、弯曲、扭绞以及复杂力学载荷等^[11]机械应力作用,这将导致超导带材临界电流发生不可逆退化,甚至损坏带材,直接影响到超导装备的应用安全性。因此对焊接接头力学性能的关注将会是一个重要的研究课题。

有阻焊接主要有机械压接、银扩散和钎焊法三种,而钎焊法操作简单、成本低廉,技术相对成熟,具有很强的可操作性,是目前国内外研究和应用中使用最广泛的制作方法。

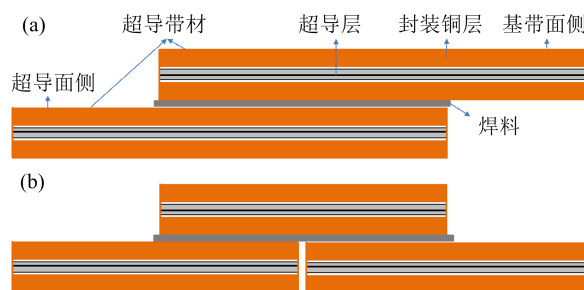


图2 焊接接头结构类型:(a)搭接接头结构型式;

(b)桥接接头结构型式

钎焊接头的结构主要有两种方式^[7,12],即搭接接头和桥接接头,如图2所示。2G-HTS带材在实际应用过程中,通常是封装后的成品带材通过搭接或桥接的方式进行焊接,其接头电阻可达 $10^{-9} \sim 10^{-8}\Omega$ 量级,满足商业化的应用^[7,12]。

从图2上看,接头处厚度大于原带材的2倍,造成接头处与原母带材厚度差异大,表面不平整,机械性能以及弯曲性能差,另外,由于焊接接头处较厚,焊接接头与原带材连接处宜在后续加工(如绕制等)过程中出现弯折,影响超导带材性能,带材越厚,影响越大。对后续超导装置的生产非常不利,如高温超导电缆和线圈的绕制等。

本文提出了改进型接头(2#)和“隐形”接头(3#和4#)两类焊接头的制作方法,如图3所示,对其厚度分布、接头电阻以及力学性能进行了表征,并同常规搭接结构焊接接头(1#,图2(a)所示)进行了比较,试图去解决接头处与原母带厚度差异大

以及力学性能差等问题。

2 实验方法

2.1 实验材料

表 1 实验用 2G-HTS 带材基本参数

超导芯带 宽/mm	厚度 /mm	宽度 /mm	I_c/A	n -值	封装材料 及厚度
4	0.38	4.8	130~150	30	紫铜/ 0.15 mm

采用上海上创超导科技有限公司(上创公司)生产的 SCST-W4 型号 2G-HTS 带材作为研究对象,其具体参数如表 1 所示,具体的制备工艺详见 2.2 节.上创公司采用 IBAD+MOD 技术路线,自主研发生产装备,已全部实现生产装备的国产化.其工艺特点是:(1)非高真空装备、原料利用率近 100%;(2)适宜批量制备,包括宽带;(3)易于组分控制和掺杂;(4)低沉本化学溶液制膜方法.该工艺在单根长度和宽度方向具有先天优势,非常适宜产业化发展.

2.2 焊接头制作及参数

为了研究比对,本文制作了 4 种(三类)焊接头类型.1#-搭接头为常规搭接接头,其结构如图 2(a),其基本步骤为:(1)除去带材表面氧化物和油污,保持表面干净;(2)超导带材超导面侧表面均匀涂抹助焊剂,再将均匀涂抹助焊剂的焊料片,放置在待焊两条超导带中间,最后将其放置在焊接台;(3)加热、加压焊接;(4)冷却,取出焊接接头.

通过改进型和“隐形”焊接头如图 3 所示,其具体参数见表 2 所示.2#-焊接头是两条封装带材之间的焊接,其工艺过程:首先将待焊接的两条封装带超导面侧的封装层进行剥离并剪掉,再将两封装带材剥离部位进行搭接焊接,形成图 3(b)所示的结构;3#-焊接头采用焊接和封装相结合的方法制作,首先将两条超导裸带(镀银带和/或镀铜带材)采用点焊连接,再将桥接的超导裸带焊接在点焊连接处,最后通过封装工艺实现焊接头的制作,其结构见图 3(c)所示;4#-焊接头制作工艺基本同 3#-焊接头,区别在于 4#-焊接头中超导裸带是连续的带材,不存在点焊连接.该制作工艺可以解决的问题是如果超导裸带在生产过程中出现性能低点,可以通过这样的方式补救.

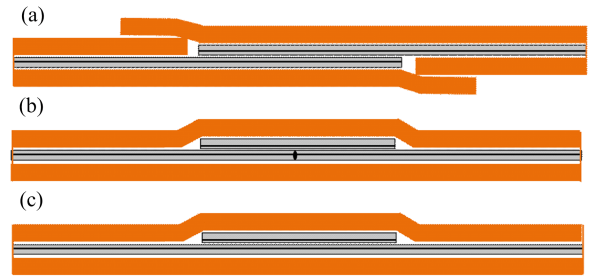


图 3 焊接头结构示意图:(a)2#-焊接头;
(b)3#-焊接头;(c)4#-焊接头

此外,从 3#和 4#-焊接接头制作和结构形式看,桥接带的厚度越小,接头处与非接头处的厚度差异就会也越小.由于 3#-焊接头制备中多了点焊点,因此 4#-焊接头在机械性能方面优于 3#-焊接头.后续主要侧重 3#-焊接头的测试,只要是 3#-焊接头测试数据,4#-焊接头也均满足要求.

表 2 1#、2#、3#和 4#-焊接头制作参数

	接头长 度/cm	焊料	备注
1#-搭接头	10	Sn-Bi	常规焊接接头
2#-焊接头	10	Sn-Pb	封装带材间焊接
3#-焊接头	10	Sn-Pb	焊接封装一体化工艺
4#-焊接头	10	Sn-Pb	焊接封装一体化工艺

2.3 抗拉强度及弯曲实验

焊接头抗拉强度测试委托中国科学院电工研究所进行.主要仪器设备是日本岛津电子万能试验机,型号为 AG-Xplus+250 mm,力传感器范围 0~20 kN,精度 200~2000 N 时最大为读数的 $\pm 0.3\%$,20~200N 时最大为读数 $\pm 0.5\%$;横梁移动速率 0.0005 mm/min~1000 mm/min,测试分辨率 1/48 μm ;电流范围 0~600 A.焊接头抗拉强度在室温下进行测试,为了进行对比分析,同时分别在室温和液氮温区,对非接头带材进行抗拉强度测试.

双弯曲实验采用的“塔轮”如图 4(a)所示.实验步骤如下:(1)首先将焊接头在液氮温区,采用四引线法(原理及示意图见 2.4 节)测试临界电流和电阻,之后回复室温.(2)在室温条件下,将回复室温的焊接头的接头部位在“塔轮”上进行弯曲,弯曲弧度大于 270° ,之后压直;再在同一“塔轮”直径上反方向进行弯曲,弯曲弧度大于 270° ,如图 4(a)所示,之

后压直。(3)将压直的焊接头再在液氮温区,采用四引线法测试临界电流和电阻,并于初始值(步骤(1)测试结果)进行对比,作归一化处理进行分析。

根据在高温超导电缆绕制应用场景要求进行扭转浸泡实验.具体实验步骤如下:(1)选取焊接接头样品总长度为 19 cm,其中接头处长度为 10 cm,先在液氮温度下,采用四引线法测试临界电流和电阻值,作为初始值;(2)如图 4(b)所示,接头处于焊接头样品的中间部位.将其一端固定,另一端进行扭转,首先向一侧扭转 90° ,复位,再向另一侧扭转 90° ,复位,如此重复 100 次.之后,将焊接头样品取下,在液氮温度下,采用四引线法测试临界电流和电阻值;(3)将该焊接头样品在液氮温度下进行浸泡,每浸泡 1 天后,取出回复室温,再在液氮温度下,采用四引线法测试临界电流和电阻值,并记录,之后再浸泡,测试,依次重复,共经历 5 次和 8 天浸泡。

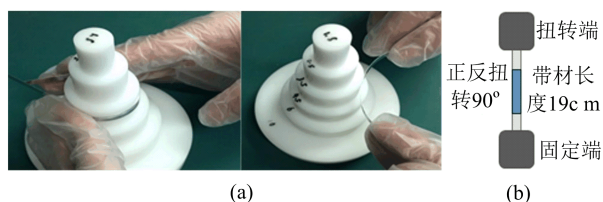


图 4 (a)焊接头双弯曲实验和(b)焊接头样品扭转示意图

2.4 焊接头 I_c 和接头电阻测试

为了对焊接接头 I_c 和接头电阻进行测试,搭建了四引线测试平台,该平台主要有以下部分构成:(1)直流源,为超导带材提供稳定的传输电流;(2)纳伏表,测试带材两端电压,判断失超和截至电压;(3)低温槽以及四引线组件(包括电流和电压引线电极),其作用分别是提供低温环境以及夹持和固定测试样品;(4)计算机,采集数据并显示结果。

四引线法测试原理是将固定焊接头样品的四引线组件浸泡在液氮中,在超导带材样品的两端输入随时间线性增大的直流电流,同时记录超导带材上的电压变化,得到 $U-I$ 曲线.在特定电压引线间距下,达到电场判据(E_c)对应的临界电压值(U_c)时的电流值即超导带材的临界电流(I_c).采用四引线法测试焊接头的 I_c 和接头电阻,典型的四引线测试结果如图 5 所示, $U-I$ 曲线直线部分的斜率即为焊接头的电阻。

对于临界电流和电阻的测试,如无特别说明,均是在液氮温度下进行测试。

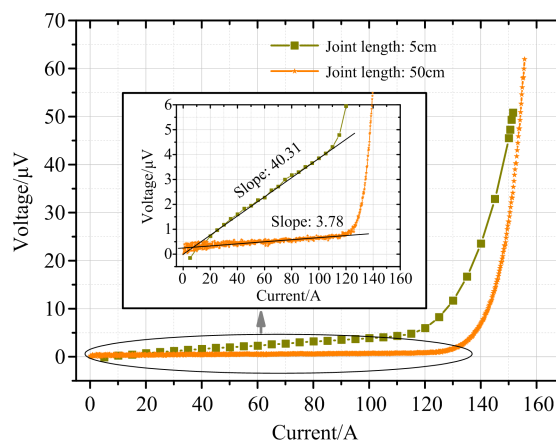


图 5 典型四引线法测试结果: $U-I$ 曲线,直线部分斜率即为电阻值

3 结果与讨论

3.1 焊接头厚度分布及横截面结构

焊接头制作工艺不同,造成焊接头处厚度存在差异.图 6 显示了 1#、2# 和 3#-焊接头厚度分布,从图上可以看出,1#-搭接接头厚度为非接头部位的 2 倍,与其相比,2#-焊接头厚度降低了 15%,3#-焊接头厚度降低了 36%。从外观来看,已无法目测区分 3#-焊接头部位与非接头部位的差别。

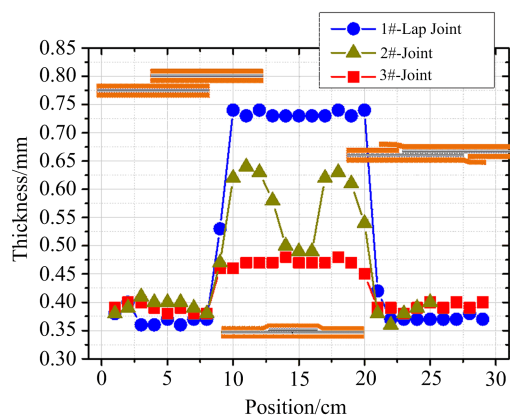


图 6 1#、2# 和 3#-焊接头处厚度分布及差异

从 3#-焊接头横截面结构(如图 7)可以看出,上封装铜层、下封装铜层和中间两层超导裸带层以及焊料,层与层之间结合紧密,和焊接效果良好.同时,对于 3#-焊接头,桥接带的厚度对焊接头的厚度具有决定性作用,当桥接带越薄时,接头处与非接头处差异越小,越有利于后续 2G-HTS 带材绕制等后续加工。

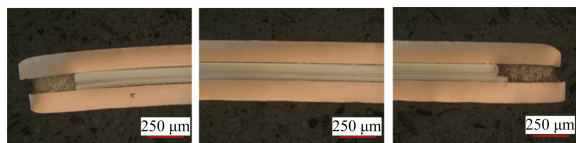


图7 3#-焊接头典型的横截面结构

3.2 焊接头电阻与焊接面、接头长度的关系

2G-HTS 带材结构是不对称的,如图1所示,自上而下依次为:覆Cu层(电镀Cu和/或封装Cu)-Ag层-超导层-缓冲层-基带层-Ag层-覆铜层(电镀Cu和/或封装Cu),为了方便起见,将带材上、下面侧分别记为超导层面侧和基带层面侧。

超导面-超导面、超导面-基带面和基带面-基带面焊接,获得的接头电阻不同.图8表示了焊接头电阻与焊接面之间的关系,当超导面-超导面进行焊接时,获得的接头电阻为 50.6 nΩ;当超导面与基带面、基带面与基带面进行焊接时,获得的接头电阻分别为 1340 nΩ 和 1270 nΩ,与超导面-超导面焊接电阻相比,增加了两个数量级.超导面与超导面进行焊接获得接头电阻最小,这与文献报道结果一致^[13],这主要是电流的传输路径不同造成的.因此,在实际应用中,必须要区分清楚超导面和基带面侧,否则焊接电阻将会呈量级增加,增加带材在应用中的损耗和制冷负担。

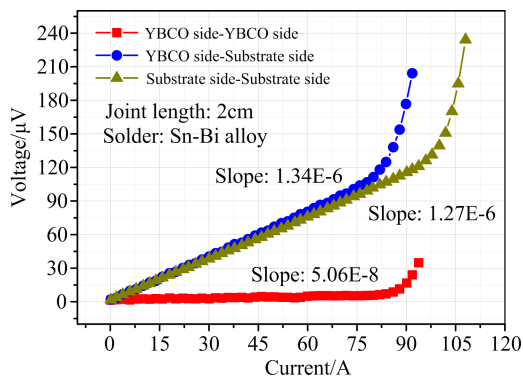


图8 焊接头电阻与焊接面的关系

图9表示了1#-搭接头和3#-焊接头制备中,焊接头电阻与接头长度的关系.对于1#-搭接头(图9(a)),当接头长度为1 cm,2 cm,5 cm和10 cm时,对应的接头电阻分别为:383 nΩ,39.7 nΩ,35.7 nΩ和24.8 nΩ,当接头长度继续增加到25 cm时,接头电阻为10 nΩ;当焊接头长度<2 cm时,接头电阻随接头长度的增加线性降低,满足欧姆定律;当

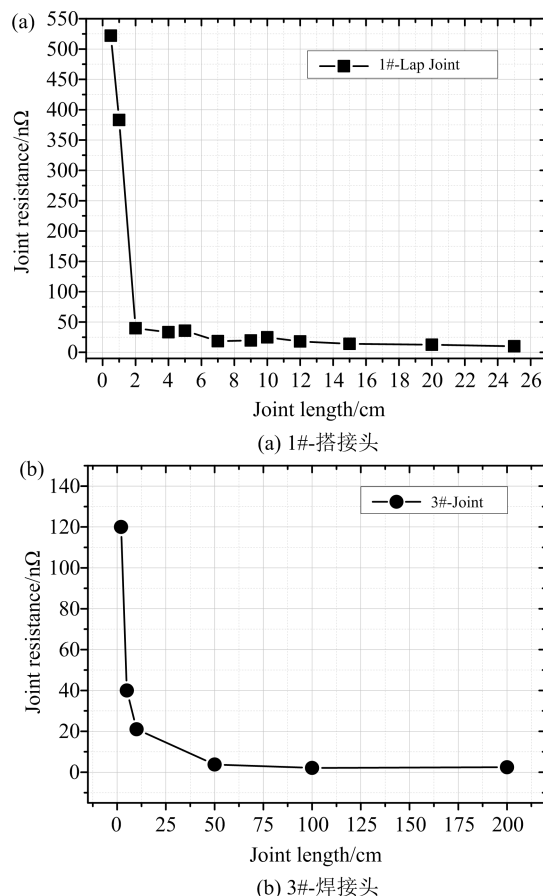


图9 焊接头电阻与接头长度关系:

(a)1#-搭接头;(b)3#-焊接头

焊接头长度>2 cm时,接头电阻随接头长度的增加而降低,降低幅度减小,呈非线性非关系,已不满足欧姆定律。

对于3#-焊接头(图9(b)),当焊接头长度为2 cm,5 cm和10 cm时,对应的焊接电阻分别为120 nΩ,40 nΩ和21 nΩ,当接头长度增加到100 cm和200 cm时,焊接头电阻分别为2.08 nΩ和2.45 nΩ,焊接头电阻随接头长度增加而降低,焊接头长度越大,降低幅度越小.当焊接长度>50 cm时,焊接头电阻基本保持不变,此时,通过增加接头长度来降低电阻是无意义的。

在超导带材钎焊技术中,低电阻是焊接头的一个重要技术指标,在实际应用中,它可以降低接头焦耳热,降低冷却介质的挥发(制冷损耗).根据二代带材的结构特征,焊接接头电阻计算公式如式(1)所示:

$$R = 2R_{\text{YBCO/Ag}} + 2R_{\text{Ag}} + 2R_{\text{Ag/P-Cu}} + 2R_{\text{P-Cu}} + 2R_{\text{P-Cu/Sn-Pb}} +$$

$$2R_{\text{Sn-Pb}} + 2R_{\text{Sn-Pb/L-Cu}} + 2R_{\text{L-Cu}} + 2R_{\text{L-Cu/Sn-Bi}} + R_{\text{Sn-Bi}} \quad (1)$$

其中,

$$R_{\text{Ag}} = \rho_{\text{Ag}} \frac{d_{\text{Ag}}}{S} \quad (2)$$

$$R_{\text{P-Cu}} = \rho_{\text{P-Cu}} \frac{d_{\text{P-Cu}}}{S} \quad (3)$$

$$R_{\text{Sn-Pb}} = \rho_{\text{Sn-Pb}} \frac{d_{\text{Sn-Pb}}}{S} \quad (4)$$

$$R_{\text{L-Cu}} = \rho_{\text{L-Cu}} \frac{d_{\text{L-Cu}}}{S} \quad (5)$$

$$R_{\text{Sn-Bi}} = \rho_{\text{Sn-Bi}} \frac{d_{\text{AgSn-Bi}}}{S} \quad (6)$$

式中, $R_{\text{YBCO/Ag}}$ 表示 YBCO 层和 Ag 层的界面电阻, R_{Ag} 表示 Ag 层电阻, $R_{\text{Ag/P-Cu}}$ 表示 Ag 层和电镀 Cu 层的界面电阻, $R_{\text{P-Cu}}$ 表示电镀 Cu 层的电阻, $R_{\text{P-Cu/Sn-Pb}}$ 表示电镀 Cu 层和 Sn-Pb 封装焊料的界面电阻, $R_{\text{Sn-Pb}}$ 表示 Sn-Pb 封装焊料的电阻, $R_{\text{Sn-Pb/L-Cu}}$ 表示 Sn-Pb 封装焊料与封装 Cu 层的界面电阻, $R_{\text{L-Cu/Sn-Bi}}$ 表示 Cu 层与 Sn-Bi 低温焊料的界面电阻, $R_{\text{Sn-Bi}}$ 表示 Sn-Bi 低温焊料的电阻. ρ 为电阻率, d 为厚度, S 为焊接面积, $S = w \times L$, L 为焊接长度, w 为带材宽度. 因此, 影响焊接接头电阻的主要因素是焊接长度、焊料种类以及焊接厚度等.

当采用的焊料和焊接带厚度一定时, 尽管增加焊接接头长度可以降低接头电阻, 但当焊接接头长度增加到一定阈值时, 接头电阻降低幅度很小, 这主要与电流在接头内部分布不均匀造成的^[14]. 此外, 焊接接头长度过长, 也会导致在应用中失超速度变慢^[15], 从而在接头处产生热点. 因此, 建议在保证焊接接头电阻允许的范围内, 尽量选择较小的焊接接头长度.

采用同规格 2G-HTS 带材, 实验研究结果发现, 在接头面积相同(焊接接头长度也相同)的条件下, 搭接接头的电阻明显小于桥接接头^[16], 从焊接接头结构(图 2 所示)来看, 桥接接头相当 2 个搭接接头串联, 电阻为 2 个搭接接头电阻之和, 即桥接接头的电阻为搭接接头的 4 倍^[17]. 由此可知, 采用搭接接头是减小接头电阻的有效方法.

在本研究工作中, 从焊接头的制备过程来看, 1#-搭接头为搭接形式, 而 3#-焊接头实为桥接头结构形式. 当接头长度为 2 cm 时, 1#-搭接头的电阻为 39.7 nΩ, 3#-焊接头电阻为 120 nΩ, 3#-接头

电阻为 1#-搭接头电阻的 3 倍; 当接头长度增加到 5 cm 和 10 cm 时, 1#-搭接头电阻分别为 35.7 nΩ 和 24.8 nΩ, 13#-焊接头电阻分别为 40 nΩ 和 21 nΩ, 两者焊接头电阻相当. 当焊接头长度阈值(本文为 2 cm)内, 接头长度起主要作用, 满足欧姆定律; 当接头长度超过阈值时, 电阻与长度呈非线性关系, 主要包括两方面原因, 一是电流在接头中的分布不均匀造成, 二是界面是产生电阻的一个重要原因^[18]. 相比较 1#-搭接头, 改进型和“隐形”结构焊接头有利于接头电阻的降低. 这主要与焊接头的制备技术有关, 1#-搭接头是由封装带材焊接制备, 而 3#-焊接头是超导芯带之间先进行焊接, 再封装制备, 电流在 1#-搭接头传输路径比 3#-焊接头经过的界面多, 因此, 当接头长度 > 5 cm 时, 具有桥接形式的 3#-焊接头与 1#-搭接头具有相当的焊接电阻.

3.3 焊接头抗拉性能

1#~4#焊接头室温抗拉强度见图 10 所示, 从图上可以看出, 焊接头的室温抗拉强度与同规格非接头 2G-HTS 带材的轴向抗拉强度相当, 另外 1#~4#焊接头在拉伸时断裂部位均非在焊接头, 实验结果表明在接头处具有良好的力学性能, 这与文献^[19-21]报道结果一致. 研究发现^[22], YBCO 带材搭接接头的断裂主要发生在超导层与缓冲层的界面处, 焊料与金属稳定层的结合力大于自身结构层间的结合力, 因此, 优化焊接工艺(包括结构形式、参数等)对提高焊接头力学性能具有重要意义.

抗拉强度体现的是在带材断裂时的轴向拉应力, 从图 10(a)可以看出, 2G-HTS 带材在液氮温区的轴向抗拉强度优于在室温的抗拉强度. 众所周知, 当高温超导带材断裂后, 超导性能完全消失. 然而, 2G-HTS 带材在实际应用过程中, 如图 10(b)所示, 随着应力/应变的增加, I_c 会出现衰退现象, 在到达断裂前超导性能可能已经衰退很严重. 因此, 为了确保 2G-HTS 带材在应用过程中保持设计的临界电流, 必须要限制应力/应变的值, 尤其是在受复杂应力工况下. 因此, 在液氮温区 2G-HTS 带材 I_c 与应力/应变的变化关系对实际的应用具有重要的指导意义. 通常, 规定当临界电流降低为原始值的 95% 时, 对应的应力和应变, 称为临界应力和临界应变^[23]. 临界应力/应变与覆铜层方式有关, 电镀铜 2G-HTS 带材的临界应变为 0.4%~0.6%^[23]; 而封

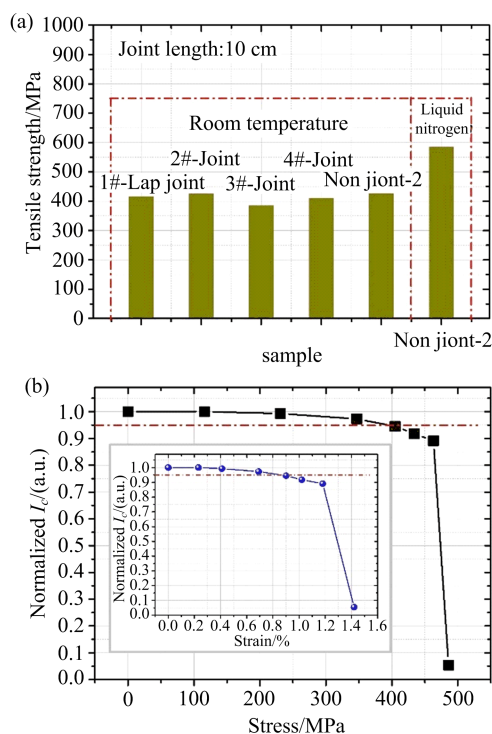


图 10 (a)1#-4# 焊接头抗拉强度和(b)液氮温区 2G-HTS 带材 I_c 与应力/应变关系

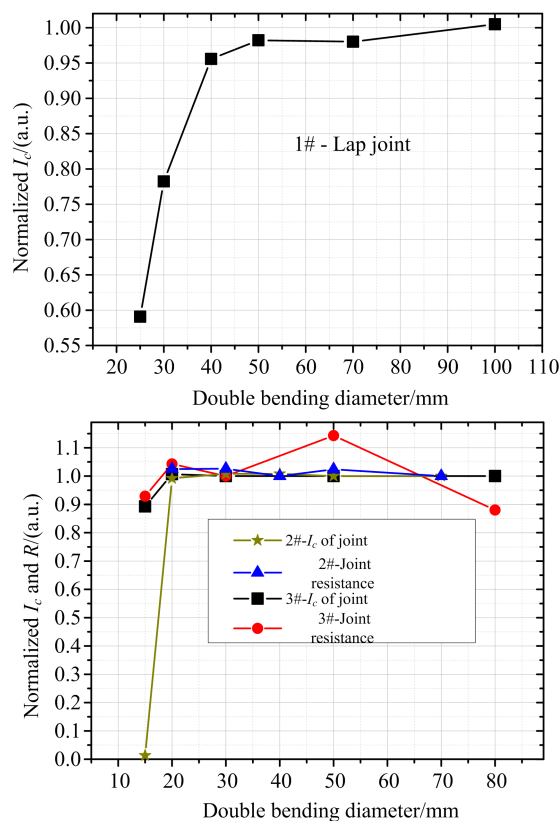


图 11 1#、2# 和 3#-焊接头双弯曲实验结果

装带材的临界应变为 $0.7\% \sim 0.9\%$ [24].

3.4 焊接头弯曲和扭转性能

2G-HTS 带材,不论是在磁体线圈应用,还是在制备电缆的应用过程中,弯曲和扭转是重要的性能指标.图 11 是 1#-搭接头、2#-焊接头和 3#-焊接头 I_c 随双弯曲直径变化的关系,将临界电流将为原始值的 95%时的双弯曲直径,称为临界弯曲直径,从图上可以看出,1#-搭接头的临界弯曲直径为 40 mm,而 2#和 3#-焊接头的临界弯曲直径小于 20 mm,与非接头 2G-HTS 带材的临界弯曲直径(如图 12 所示)相当,可见,改进型和“隐形”焊接头获得了更好的弯曲性能.

为了进一步验证 3#-焊接头的弯曲性能,将 3#-焊接头在直径为 3 cm 的圆柱上缠绕 5 圈后,复原,之后再反方向缠绕 5 圈后,复原后采用四引线法测试焊接头的 $U-I$ 曲线如图 13 所示,从图上可以看出,缠绕前后 $U-I$ 曲线几乎重合,缠绕前 3#-焊接头的 I_c 和电阻值分别是 144 A 和 29.8 nΩ;缠绕后 3#-焊接头的 I_c 和电阻值分别是 143 A 和 30.7 nΩ.

此外,对 1#、2#和 3#-焊接头分别进行了卷对卷测试,采用设备为动态传输法测试装备,实物图片如图 14 所示,发现,1#-搭接头在走带的过程中

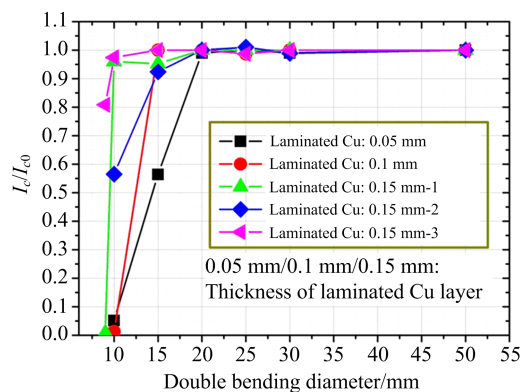


图 12 不同规格 2G-HTS 带材(非接头) 双弯曲直径对临界电流的影响

出现从接头处断开现象,并且重复多次均出现接头开裂或断开现象,该类接头无法采用卷对卷装备测试;而 2#和 3#-焊接头经过至少 3 次卷对卷重复测试,没有出现接头处断开现象,测试结果前后一致.测试后通过外观检查,测试前后外观一致,没有发生变化.一方面,因为卷对卷测试过程中,尽管装置的电极轮和导向轮直径(10 cm)大于焊接头的临界弯曲直径,由于金属在低温下出现脆性,1#-搭接头无法承受在液氮温度的弯曲变形而断开,而 2#

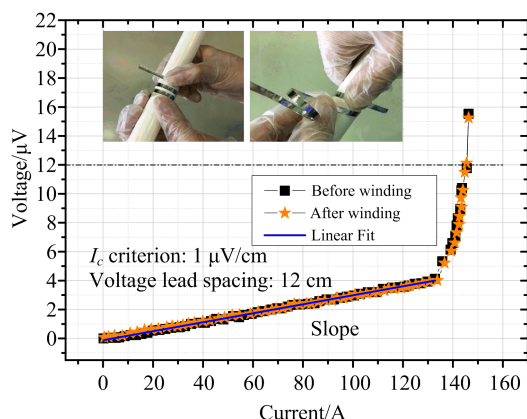


图 13 3#-焊接头在缠绕实验以及缠绕前后测试结果对比

和 3#-焊接头则未出现断开现象;另一方面,由于焊接头部位和原带材(非接头部位)结合处厚度差异比较大,易出现应力集中,易造成弯折和开裂.因此,改进型(2#)和“隐形”接头(3#)具有更优的弯曲性能.



图 14 上创公司卷对卷动态传输法测试装备实物图片

图 15 为焊接头在扭转浸泡后,临界电流和电阻的变化,从图中可以看出,扭转/浸泡 8 天后,外观无变化,无开裂、鼓包等现象;扭转/浸泡 8 天后,临界电流无退化,电阻 50~60 nΩ 波动.

4 结 论

本文提出了改进型接头和“隐形”接头两类制作方法,并对其接头电阻以及力学性能进行了表征,同时与常规搭焊接头进行了对比分析发现,改进型和“隐形”接头在厚度和弯曲性能等方面存在很大优

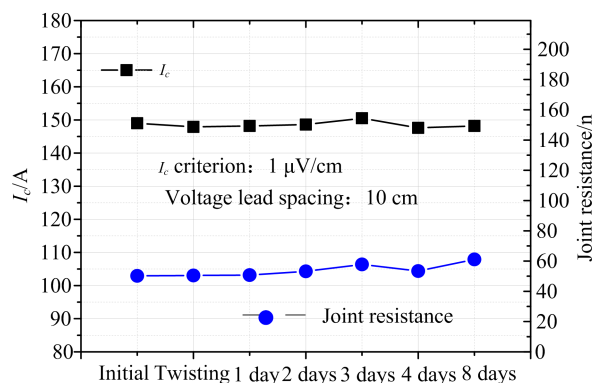


图 15 扭转和浸泡实验结果

势,结论可总结如下:

(1)与常规搭接头相比,改进型和“隐形”接头的厚度分别降低了 15%和 36%,有效减小了焊接头处和原带材厚度差异,避免了由于这种厚度差异在后续应用(如电缆绕制等)中造成的机械损伤.对于“隐形”接头,桥接芯带的厚度决定了焊接头的厚度,桥接芯带越薄,接头厚度越薄,当桥接芯带采用超薄膜替代时,焊接头和非接头部位厚度差异会更小,甚至相当.

(2)超导面-超导面焊接,获得接头电阻最小;接头电阻随接头长度的增加而减小,但幅度降低.对于常规搭接头(1#-搭接头),当接头长度 < 2 cm 时,接头电阻随接头长度的增加线性降低,满足欧姆定律;当焊接头长度 > 2 cm 时,接头电阻随接头长度的增加而降低,降低幅度减小,呈非线性非关系,已不满足欧姆定律.

(3)常规搭接头、改进型和“隐形”焊接头的室温抗拉强度与非接头部位相当,均具有良好的轴向抗拉性能,通过扭转和 8 天液氮浸泡后,临界电流无衰退,电阻保持一致.

(4)改进型和“隐形”接头的临界弯曲直径(20 mm)与原带材(非接头处)相当,通过卷对卷传输法测试时接头无损伤,而常规搭接头的临界弯曲直径(40 mm)大于原带材,在通过卷对卷测试时,接头出现开裂甚至断开现象.改进型和“隐形”焊接头具有更有的弯曲性能.

参 考 文 献

- [1] 蔡传兵,杨召,郭艳群,物理,49(2020),747
- [2] 蔡传兵,池长鑫,李敏娟,刘志勇,鲁玉明,郭艳群,白传易,陆齐,豆文艺,科学通报,64(2019),827
- [3] Judith L. MacManus-Driscoll and Stuart C. Wimbush, *Nat. Rev. Mater.*, **6**(2021),587
- [4] 郑健,宗曦华,韩云武,低温与超导:超导技术,48(2020),27
- [5] 张东,肖立业,林良真,电工电能新技术,39(2020),45
- [6] 周睿,吴涛,中国科学:物理学力学天文学,51(2021),047408
- [7] 王骁磊,袁文,张腾,包颖,低温与超导:超导技术,48(2020),41
- [8] Y. Park, M. Lee, H. Ann, Y. H. Choi, and H. Lee, *NPG Asia Materials*, **6**(2014), 98
- [9] Y. J. Park, M. W. Lee, Y. K. Oh, and H. G. Lee, *Supercond. Sci. and Technol.*, **27**(2014), 085008
- [10] S. L. Lalitha, *Cryogenics*, **86**(2017),7
- [11] 毛佳丽,硕士学位论文,兰州:兰州大学,(2021)
- [12] 杨淦淞,硕士学位论文,成都:西南交通大学,(2021)
- [13] D. K. Park, M. C. Ahn, H. M. Kim, H. G. Lee, K. S. Chang, S. J. Lee, S. E. Yang, and T. K. Ko, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **17**(2007), 3266
- [14] 潘耘昊,吴蔚,甄水亮,金之俭,低温与超导:超导技术,46(2018),35
- [15] 邱添,陈炜,师江涛,刘力源,张海洋,张勇,羊新胜,赵勇,低温物理学报,39(2017),50
- [16] K. S. Chang, H. C. Jo, Y. J. Kim, M. C. Ahn, and T. K. Ko, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **21**(2011), 3005
- [17] H. S. Shin and M. J. Dedicataria, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **20**(2010), 1541
- [18] N. Bagrets, K. P. Weiss, R. Nast, and R. Heller, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **28**(2018), 6600204
- [19] H. S. Shin, J. R. C. Dizon, S. S. Oh, and R. F. Bonifacio, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **19**(2009), 2991
- [20] W. Liu, X. Y. Zhang, Y. Liu, and Y. H. Zhou, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **24**(2014), 1
- [21] W. Liu, X. Y. Zhang, J. Zhou, and Y. H. Zhou, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **25**(2015), 1
- [22] R. P. Walsh, D. McRae, W. D. Markiewicz, J. Lu, and V. J. Toplosky, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **22**(2011), 8400406
- [23] Y. Zhang, D. W. Hazelton, R. Kelley, M. Kasahara, R. Nakasaki, H. Sakamoto, and A. Polyanskii, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **26**(2016), 8400406
- [24] K. Osamura, S. Machiya, Y. Tsuchiya, and H. Suzuki, *Supercond. Sci. and Technol.*, **23**(2010), 045020

超导磁体螺栓结合面低温振动特性研究^{*}

赵子锐, 马增贤, 崔杰, 冯峰[†]

清华大学深圳国际研究生院, 广东深圳 518055

收稿日期: 2021-11-28; 接收日期: 2021-12-24

【摘要】 振动特性对于超导磁体的各类工程应用具有重要意义, 螺栓法兰盘连接是超导磁体系统的一种常见的支撑结构类型, 然而螺栓结合面在低温条件下振动特性的相关研究目前尚少见报道. 本研究中设计加工了简化的连接结构, 在室温和液氮温度对其螺栓结合面进行振动特性的测试分析. 接下来, 采用集中质量法进行建模, 并利用振型、频率与质量矩阵、刚度矩阵的关系求解了不同螺栓预紧力情况下的刚度矩阵, 得到了系统总刚度和结合面刚度. 使用上述方法对振动测量数据计算发现, 该结构的系统总刚度与结合面刚度都随着预紧力增大而增大, 同时液氮低温条件可使系统总刚度和结合面刚度进一步增大.

关键词: 超导磁体, 螺栓结合面, 振动特性, 液氮温度

PACS: 84.71.Ba, 85.25.Am

DOI: 10.13380/j.ltpl.2021.06.007

Study on Vibration Characteristics under Low Temperature of Bolt Joint Interface of Superconducting Magnet

ZHAO Zirui, MA Zengxian, CUI Jie, FENG Feng[†]

Shenzhen International Graduate School, Tsinghua University, Shenzhen 518055, China

Received date: 2021-11-28; accepted date: 2021-12-24

【Abstract】 Vibration characteristics are of great significance to various engineering applications of superconducting magnets. Bolted flange connection is a common type of support structure for superconducting magnet systems. However, the relevant research on the vibration characteristics of the bolt joint interface under low temperature conditions has been rarely reported. In this study, a simplified connection structure was designed and processed, and the vibration characteristics of the bolt joint interface were tested and analyzed at room temperature and liquid nitrogen temperature. Next, the lumped mass method was used for modeling, and the stiffness matrix under different bolt preloads was solved by the relationship of the mode shape, frequency, mass matrix and stiffness matrix. The total stiffness of the system and the stiffness of the joint interface were obtained. By using the above method to calculate the vibration measurement data, it was found that the total stiffness of the system and the stiffness of the joint interface of the structure increased with the increasing of the preload. At the same time, the low temperature condition of liquid nitrogen could further increase the total stiffness of the system and the stiffness of the joint interface.

Keywords: Superconducting magnet, Bolt joint interface, Vibration characteristics, Liquid nitrogen temperature

^{*} 广东省自然科学基金(批准号:2020A1515011199)和深圳市基础研究(学科布局)项目(批准号:JCYJ20180508152128308)资助的课题.

[†] feng.feng@sz.tsinghua.edu.cn

PACS: 84.71.Ba, 85.25.Am

DOI: 10.13380/j.ltpl.2021.06.007

Reference method: ZHAO Zirui, MA Zengxian, CUI Jie, FENG Feng[†], Low. Temp. Phys. Lett. **43**, 0364 (2021)

1 引言

机械结构的振动特性研究在很多工程领域都有实际的应用,例如航空航天领域^[1,2]、轨道交通领域^[3]、电机领域^[4]等.振动特性的研究主要以预防振动或抑制振动为主,也有部分学者利用振动的特性进行辅助加工^[5].随着有限元技术的发展,对单一零件的振动特性研究已经非常成熟,而从机械结构研究现状来看,最重要的是机械零件之间的结合面建模.

结合面的理论研究主要是从 Hertz 接触理论^[6]开始,此研究指出接触应力场和接触体曲率半径、法向预紧力以及弹性模量之间的关系. Greenwood 等人^[7]研究了椭圆接触的数值处理方法, Swanson 等人^[8]研究了各向异性材料对赫兹接触的影响.影响赫兹接触的主要因素是结合面的材料属性(包含弹性参数、塑性参数等)、接触曲率、预紧力、表面粗糙度等,发生赫兹接触时,随着预紧力的增加,结合面的刚度也会增大.

粗糙表面结合面对系统整体振动特性的影响是最近几年主流的研究方向.国内外都有研究学者^[9,10]指出微观机理对宏观现象有着明显的影响,从微观表面来看,每个接触点都是两个圆柱面的接触,每个接触点都有接触刚度.最常见的处理方案是将局部连接等效为一个弹簧阻尼单元^[11,12],此方案将结合面的接触简化为单个弹簧单元(三向弹簧),适用于大多数情况,尤其是多个螺栓连接同一结合面时.但弹簧阻尼单元简化法偶尔会出现约束不足的问题,其主要原因是缺少转动自由度约束,在一些特殊模型中表现很差^[13].

吉村允孝等人^[14]通过实验和仿真的方法对一般的螺栓结合面进行了讨论,并可通过插值和单位面积刚度的方法直接获得结合面参数,不需要对每次应用的结合面进行建模测试.其他学者也在单位刚度的基础上进行了更加细致的工作,提出了均布弹簧单元方法^[15,16].此方法对于结合面有更好的描述,对部分扭转自由度的约束情况比有限弹簧模型更好,但建模的困难程度也更大,对节点的要求很高.此外,集中质量法^[17]也可用于结合面建模,这种方法可以将连续体结构简化为离散系统,将自由度降低至有限个,减少计算量.但使用集中质量法后,模态振动也会从无限多阶变为有限多阶,计算的准

确度有所降低.

随着高温超导材料的不断发展,超导体已经被实际应用于电力系统、轨道交通等领域.超导磁体工作在低温环境中,当系统发生振动时,一方面会引起摩擦产生热量,另一方面会导致系统的电磁场发生变化,这些都可能会使超导线圈局部过热进而导致失超.在超导领域,已有部分学者进行了振动相关的研究,但主要集中于线圈本身的振动,而对于系统结构相关的研究较少. Tsuchishima 等人^[18]通过实验的方法对线圈的振动进行了分析,对比计算了因为振动引起的热负载增加,同时发现线圈通电情况下热负载增加,这主要是线圈振动引起的涡流效应. Ogata 等人^[19]研究了线圈的振动模态,通过实验方法分析了振动的线圈低阶模态振型. Nemoto 等人^[20]对电机第一代高温超导带材线圈进行了电磁学和振动测试.目前,对于超导磁体中结合面振动特性的研究甚少.

螺栓法兰盘连接是机械结构中常用的一种支撑结构类型,螺栓沿法兰盘圆周均匀分布,能限制整个结合面的运动,通过对螺栓施加预紧力,可以保证零件之间的稳定连接.螺栓法兰盘连接具有结构简单、可靠性强、密封性好等优点,广泛应用于管道运输、航空航天等领域,是组成许多复杂结构的基本结构.超导磁体系统中也常用到螺栓法兰盘连接,尤其是处于动态工况的超导磁体,比如超导电机和超导磁悬浮等应用磁体系统,这类超导磁体通常受到周期性交变载荷的影响,零件之间需要螺栓法兰盘连接进行稳定的支撑.超导磁体的振动模态与磁体支撑结构的刚度直接相关,若支撑结构刚度设计不合理,超导磁体可能会产生共振,威胁运行稳定性.螺栓法兰盘连接是超导磁体系统的一种常见的支撑结构类型,然而螺栓结合面在低温条件下振动特性的相关研究目前尚少见报道.本研究对处于动态工况的超导磁体系统进行了简化,保留了关键的螺栓结合面,并在室温和液氮温度对简化模型进行了敲击实验,分析其振动特性.接下来,基于集中质量法和模态分析方法计算得到了系统总刚度,再通过矩阵的分块和组装进一步求解了结合面刚度.实验探究和理论建模的结果均显示:系统总刚度与结合面刚度都随着螺栓结合面预紧力增大而增大,液氮低温条件可使系统总刚度和结合面刚度进一步增大.

2 实验方法

2.1 实验装置

为分析螺栓结合面的低温振动特性,本研究设计加工了简化的连接结构.主要的设计原则为:1)保留磁体系统中的受力结构;2)保证磁体系统与简化模型的共振频率同量级、振型接近;3)保留关键结合面.简化模型分为铝合金方台和钛合金圆柱两部分,二者通过螺栓法兰盘连接,如图1所示.

为测试振动特性,使用了西门子公司 LMS Test. Lab 平台. LMS 测试使用锤激发模态测试和模态分析,采用单点激励多点拾振的方案.为了保证锤击的结果的准确性,采用了多次敲击平均值作为结果.为进行低温实验,基于 mp401 数据采集卡搭建了一套多通道低温温度测试系统.

2.2 螺栓预紧力对系统动刚度的影响

通过扭力扳手控制扭力,获取不同螺栓预紧力,通过十六点分布法对简化模型的振动特性进行研

究,结果如图2、图3所示,图中横坐标代表预紧力,纵坐标代表模态频率.可以发现随着预紧力的增大,各阶模态频率明显增大,最终趋于稳定.阻尼比结果如图4所示,图中纵坐标代表阻尼比.随着预紧力的增大,阻尼比明显下降,最终趋于稳定.其中重复实验表示重新安装螺栓和测试.

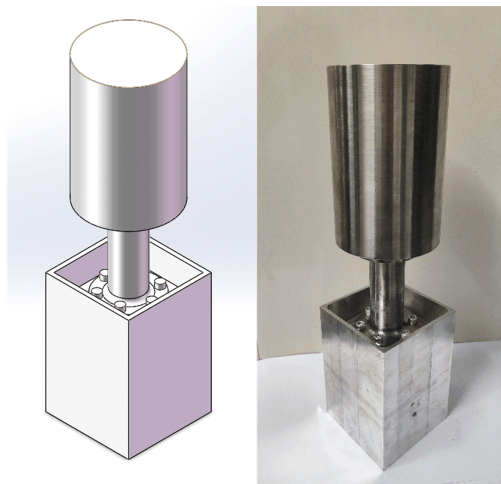


图1 动态工况超导磁体的简化模型

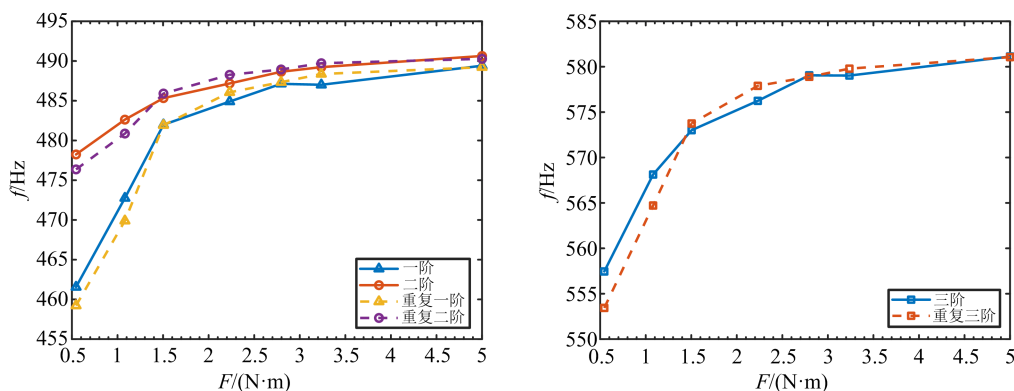


图2 一阶、二阶(左)和三阶(右)模态频率与预紧力的关系

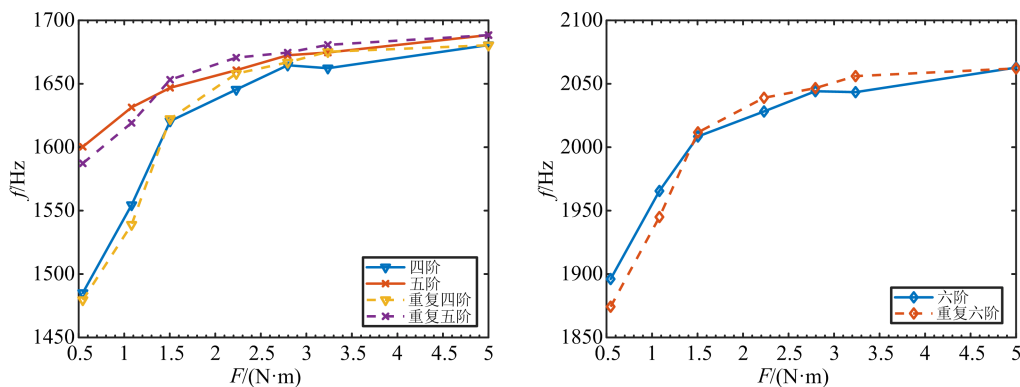


图3 四、五阶(左)和六阶(右)模态频率与预紧力的关系

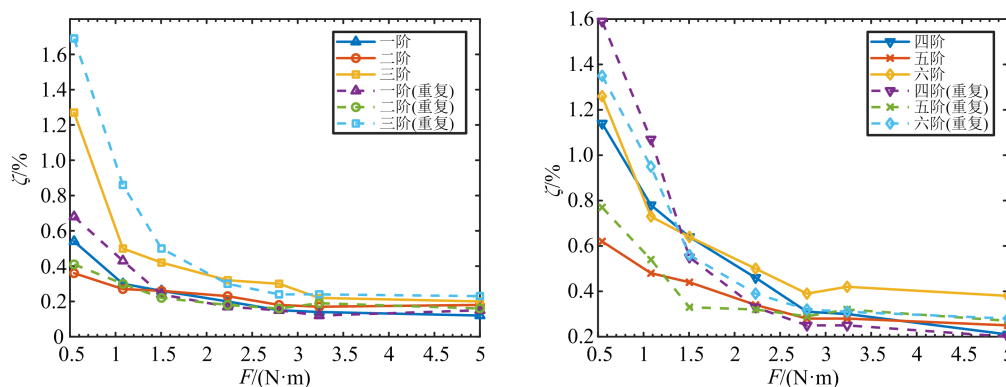


图4 阻尼比与预紧力的关系

2.3 低温对系统动刚度的影响

使用液氮对铝合金方台进行冷却,而钛合金圆柱部分与空气接触,通过 PT100 对六个关键点进行测温.整个实验冷却 3 h,然后采用悬挂方式进行敲击.为防止简化模型升温,对敲击过程进行了简化,只敲击铝合金方台底部一个角点的三个方向,敲击次数也减少为两次.同时在实验过程中维持铝合金

方台上部凹槽中有液氮,保证结合面和支撑柱温度基本与冷却过程一致.

通过对使用钛合金螺栓进行安装的简化模型进行低温特性测试,获得了其模态频率随预紧力和温度的变化规律,如图 5 所示.低温条件下,模态频率明显增大,说明系统总刚度增大.并且在低温条件下,随预紧力增大,模态频率更快趋于稳定.

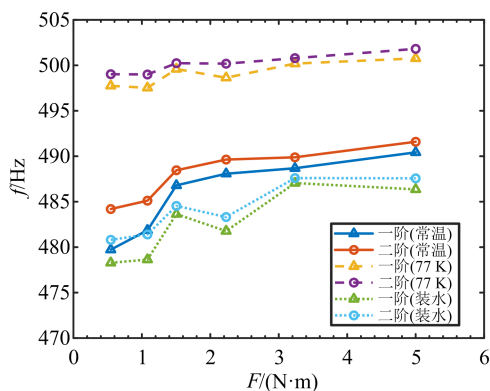


图5 钛合金螺栓安装的简化模型振动特性

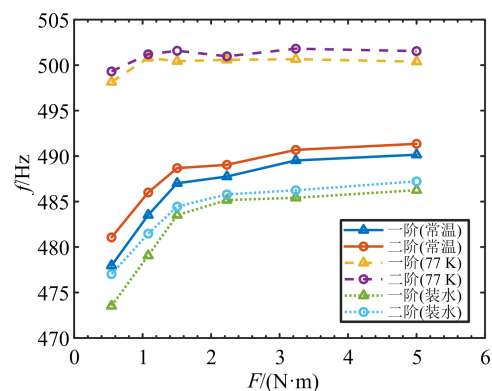


图6 铝合金螺栓安装的简化模型振动特性

为分析铝合金方台上部凹槽内液氮对振动特性的影响,室温下在铝合金方台凹槽内装满水并进行敲击实验,探究凹槽内液体对结构振动特性的影响.结果如图 5、图 6 所示,当铝合金方台凹槽内存在液体时,模态频率略微降低.随着预紧力增大,凹槽内液体对模态频率的影响减弱.

为探究螺栓材料对简化模型低温振动特性的影响,使用铝合金螺栓进行安装,并进行了低温振动特性测试,结果如图 6 所示.当螺栓材料由钛合金变为铝合金时,简化模型的模态频率略微提高,如图 7 所示,图中纵坐标 δ 代表两倍的相对偏差.

通过对比两种材料螺栓安装时的低温振动特性

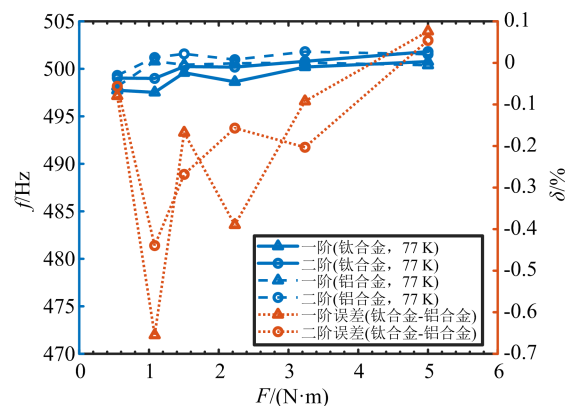


图7 不同材料螺栓安装的简化模型低温振动特性

可以发现,随着预紧力增大,模态频率先增大后趋于稳定,并收敛到同一数值.低温条件下,随着预紧力增大,模态频率更快趋于稳定,说明在低温条件下,预紧力对振动特性的影响减弱.

3 理论建模

3.1 简化模型的动力学模型

使用集中质量法,将简化模型的质量划分到两个节点上,两节点分别为铝合金方台和钛合金圆柱的质量中心,如图 8 所示.因为结构具有旋转对称性,所以只需要在 XY 平面进行建模.每个点具有四个自由度,即 x 方向的移动、 y 方向的移动、 z 方向转动以及 x 方向转动.

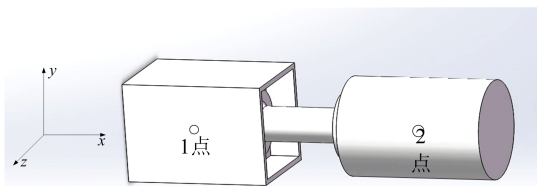


图 8 简化模型建模

对于此结构,定义其广义位移向量为:

$$X = [x_1 \quad y_1 \quad \varphi_1 \quad \theta_1 \quad x_2 \quad y_2 \quad \varphi_2 \quad \theta_2]^T \quad (1)$$

其中 x_1 为 1 点的 x 方向位移量, y_1 为 1 点的 y 方向位移量, φ_1 为 1 点的 x 方向转动量, θ_1 为 1 点的 z 方向转动量, x_2 为 2 点的 x 方向位移量, y_2 为 2 点的 y 方向位移量, φ_2 为 2 点的 x 方向转动量, θ_2 为 2 点的 z 方向转动量.

同理,定义广义力为:

$$F = [F_{x1} \quad F_{y1} \quad M_{\varphi1} \quad M_{\theta1} \quad F_{x2} \quad F_{y2} \quad M_{\varphi2} \quad M_{\theta2}]^T \quad (2)$$

其中 F_{x1} 为 1 点的 x 方向所受外力, F_{y1} 为 1 点的 y 方向所受外力, $M_{\varphi1}$ 为 1 点的 x 方向所受转动力矩, $M_{\theta1}$ 为 1 点的 z 方向所受转动力矩, F_{x2} 为 2 点的 x 方向所受外力, F_{y2} 为 2 点的 y 方向所受外力, $M_{\varphi2}$ 为 2 点的 x 方向所受转动力矩, $M_{\theta2}$ 为 2 点的 z 方向所受转动力矩.

简化模型的质量分布如图 9 所示.

通过集中质量法将铝合金方台和钛合金圆柱当作两个节点,其质量和转动惯量为节点的广义质量,则有:

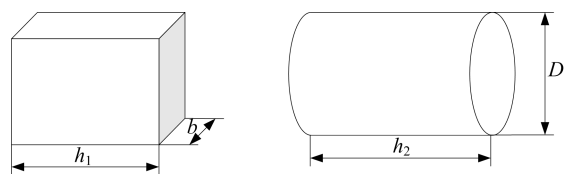


图 9 简化模型质量分布

$$\begin{cases} m_{x1} = m_1 \\ m_{y1} = m_1 \\ m_{\varphi1} = \frac{m_1}{6} b^2 \\ m_{\theta1} = \frac{m_1}{12} (h_1^2 + b^2) \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} m_{x2} = m_2 \\ m_{y2} = m_2 \\ m_{\varphi2} = \frac{1}{2} m_2 \left(\frac{D}{2} \right)^2 \\ m_{\theta2} = \frac{m_2}{12} \left(3 \left(\frac{D}{2} \right)^2 + h_2^2 \right) \end{cases} \quad (4)$$

其中 m_{x1} 为节点 1 的 x 方向质量, m_{y1} 为节点 1 的 y 方向质量, $m_{\varphi1}$ 为节点 1 的 x 方向转动惯量, $m_{\theta1}$ 为节点 1 的 z 方向转动惯量, m_{x2} 为节点 2 的 x 方向质量, m_{y2} 为节点 2 的 y 方向质量, $m_{\varphi2}$ 为节点 1 的 x 方向转动惯量, $m_{\theta2}$ 为节点 1 的 z 方向转动惯量. b 为铝合金方台正方形面边长, h_1 为铝合金方台的高度, D 为钛合金圆柱的直径, h_2 为钛合金圆柱高度. m_1 为铝合金方台质量,有 $m_1 = \rho_1 h_1 b^2$, m_2 为钛合金圆柱质量,有 $m_2 = \rho_2 \frac{\pi}{4} h_2 D^2$, ρ_1 为铝合金密度, ρ_2 为钛合金密度.

进一步可以表示出质量矩阵:

$$M = \begin{bmatrix} m_{x1} & & & & & & & \\ & m_{y1} & & & & & & \\ & & m_{\varphi1} & & & & & \\ & & & m_{\theta1} & & & & \\ & & & & m_{x2} & & & \\ & & & & & m_{y2} & & \\ & & & & & & m_{\varphi2} & \\ & & & & & & & m_{\theta2} \end{bmatrix} \quad (5)$$

3.2 结合面参数计算

基于模态分析方法,可以得到:

$$U^T M U = \overline{m} \quad (6)$$

其中 U 为实验获得的振型数据, $\bar{m}$ 为模态质量矩阵, 为对角阵.

$$U^T K U = \bar{k} \quad (7)$$

其中 $\bar{k}$ 为模态刚度矩阵, 为对角阵.

$$\bar{k} = \bar{m} \Omega \quad (8)$$

其中 Ω 为实验获得的模态频率矩阵, 为对角阵.

通过式(6)、式(7)、式(8)可以得到:

$$K_{1 \rightarrow 2} = M U \Omega U^{-1} \quad (9)$$

其中 $K_{1 \rightarrow 2}$ 为 1 节点和 2 节点的刚度矩阵, 即系统总刚度.

为了求解结合面的刚度, 将节点扩展到 4 个, 如图 10 所示. 添加了结合面两侧的节点 $1'$ 和 $2'$.

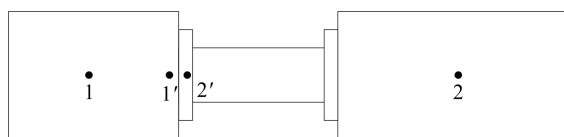


图 10 结合面参数求解

1 点与 $1'$ 点可认为刚体移动变换, 通过对刚度矩阵进行行变换和列变换可由 $K_{1 \rightarrow 2}$ 求得 $K_{1' \rightarrow 2}$, $K_{1' \rightarrow 2}$ 为 $1'$ 节点和 2 节点的刚度矩阵.

结合面矩阵 $K_{1' \rightarrow 2'}$ 不可逆, 需要将其进行分块:

$$K_{1' \rightarrow 2'} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{12}^T & K_{22} \end{bmatrix} \quad (10)$$

为保证矩阵阶数的一致性, 将 $K_{1' \rightarrow 2}$ 和 $K_{2' \rightarrow 2}$ 也进行分块:

$$K_{1' \rightarrow 2} = \begin{bmatrix} K_{\text{new},11} & K_{\text{new},12} \\ K_{\text{new},12}^T & K_{\text{new},22} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$K_{2' \rightarrow 2} = \begin{bmatrix} K_{0,11} & K_{0,12} \\ K_{0,12}^T & K_{0,22} \end{bmatrix} \quad (12)$$

其中 $K_{2' \rightarrow 2}$ 为 $2'$ 节点和 2 节点的刚度矩阵, K_{11} 、 K_{22} 、 $K_{\text{new},11}$ 、 $K_{\text{new},22}$ 、 $K_{0,11}$ 、 $K_{0,22}$ 为对称矩阵. 可以证明, 分块后的矩阵都是可逆的.

忽略质量矩阵问题, 通过刚度矩阵的组装可以得到:

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & 0 \\ K_{12}^T & K_{22} + K_{0,11} & K_{0,12} \\ 0 & K_{0,12}^T & K_{0,22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{1'} \\ X_{2'} \\ X_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{1'} \\ F_{2'} \\ F_2 \end{bmatrix} \quad (13)$$

其中 $X_{1'}$ 为 $1'$ 节点的广义位移向量, $X_{2'}$ 为 $2'$ 节点的广义位移向量, X_2 为 2 节点的广义位移向量.

$F_{1'}$ 为 $1'$ 节点的广义力向量, $F_{2'}$ 为 $2'$ 节点的广义力向量, F_2 为 2 节点的广义力向量.

因为 $2'$ 节点没有外力和惯性力, 所以其 $F_{2'}$ 恒为零. 求得结合面刚度矩阵 $K_{1' \rightarrow 2'}$, 其中需要利用 $K_{2' \rightarrow 2}$. 假设最大预紧力情况下的测试结果为结合面刚度远大于支撑柱刚度, 可以得到:

$$K_{2' \rightarrow 2} = K_{1' \rightarrow 2, \text{max}} \quad (14)$$

其中 $K_{1' \rightarrow 2, \text{max}}$ 为最大预紧力情况下的 $1'$ 节点和 2 节点的刚度矩阵.

将矩阵 $K_{1' \rightarrow 2}$ 带入, 联立可解得结合面刚度 $K_{2' \rightarrow 2}$:

$$\begin{cases} K_{22} = K_{0,12} (K_{0,22} - K_{\text{new},22})^{-1} K_{0,12}^T - K_{0,11} \\ K_{12} = -K_{\text{new},12} (K_{0,22} - K_{\text{new},22})^{-1} K_{0,12}^T \\ K_{11} = K_{\text{new},11} + K_{\text{new},12} (K_{0,22} - K_{\text{new},22})^{-1} K_{\text{new},12}^T \end{cases} \quad (15)$$

3.3 结合面参数识别

通过上述方法对简化模型的系统总刚度和结合面刚度进行了计算, 室温条件下 x 方向系统总刚度如图 11 所示, x 方向结合面刚度如图 12 所示, 图中纵坐标表示刚度. 进行了两次条件一致的实验, 通过对比确定实验的准确性.

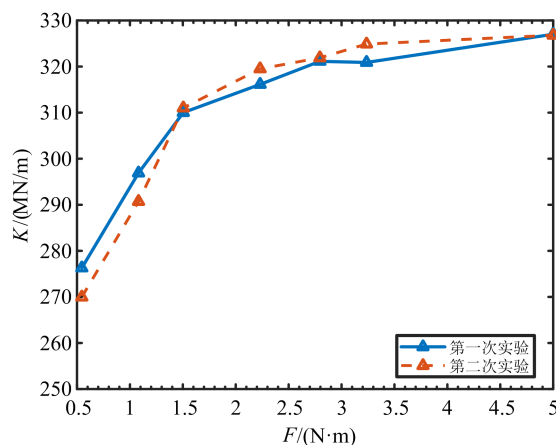
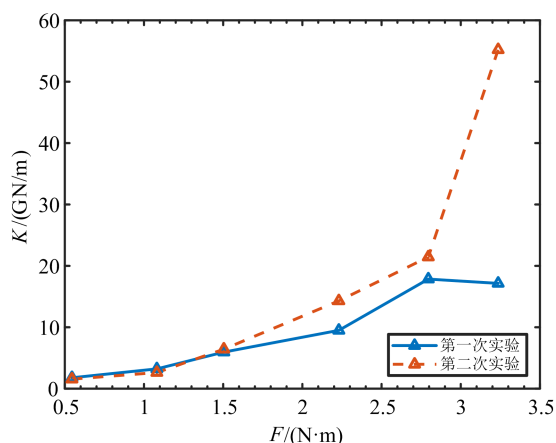
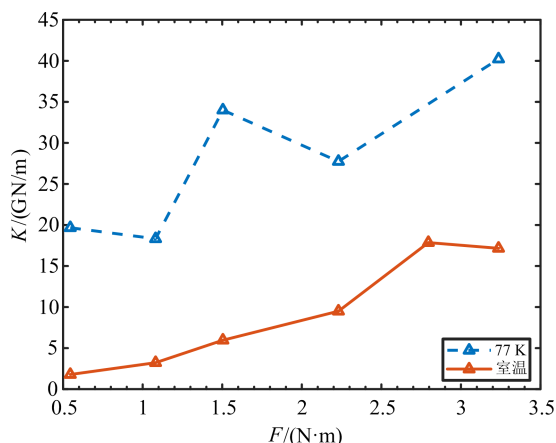


图 11 室温下简化模型的系统总刚度(x 方向)

计算结果与实验结果一致, 随着预紧力增大, x 方向系统总刚度和结合面刚度增大. 高预紧力情况下计算的结合面刚度误差较大, 这是因为预紧力较大情况下的结合面刚度已经远大于系统总刚度, 很难从系统总刚度的变化数据中分离出准确的结合面刚度数据.

低温条件下 x 方向结合面刚度的计算结果如图 13 所示, 低温条件下的结合面刚度远大于室温条

图 12 室温下简化模型的结合面刚度(x 方向)图 13 不同温度下简化模型的结合面刚度(x 方向)

件,并且低温对结合面刚度的提升效果随预紧力增大而减小.实验和理论结果均显示:液氮低温条件对螺栓结合面刚度具有显著的提升作用,这对超导磁体的动态应用具有重要的意义.动态磁体受周期性交变载荷的影响,当外部载荷的频率和磁体本身的模态频率接近时,磁体易发生共振,影响磁体的运行稳定性.在明确低温条件对螺栓结合面刚度的提升作用后,可以更合理地设计动态磁体的结构,避开磁体的工作频率,保障磁体长时间处于有效工作状态.

低温下结合面刚度提高最可能的原因是:低温敲击实验时长约 1~2 h,铝合金方台内的液氮气化.

由于螺栓结合面处温度极低,空气中水蒸气的饱和湿度迅速降低,水蒸气在螺栓结合面附近发生液化.液化的水蒸气部分进入到螺栓结合面内部,在低温下进一步结冰,体积发生膨胀,最终导致螺栓结合面的刚度在低温下大幅提高.低温敲击实验结束后拆卸零件时,可以明显看到螺栓结合面内部存在液态水.此外,螺栓材料和零件材料的热膨胀系数不同也可能导致结合面刚度在低温下发生变化.

4 结 论

本研究采用实验探究和理论建模的方法讨论了预紧力和低温条件对螺栓结合面振动特性的影响,具体结论如下:

(1)对不同螺栓预紧力、不同温度、不同材料螺栓进行了振动性能测试,发现随着螺栓预紧力的增大,系统总刚度和结合面刚度都有明显的提高,当螺栓预紧力由 $0.545 \text{ N} \cdot \text{m}$ 增大至 $5 \text{ N} \cdot \text{m}$ 时,简化模型一阶到六阶模态频率分别提高了 6.3%、2.8%、4.6%、13.3%、5.9%、9.4%.同时,液氮低温条件可以使结合面刚度和系统总刚度进一步增大,使用钛合金螺栓安装时,低温条件可使简化模型的一阶和二阶模态频率分别提高约 2.7% 和 2.5%.

(2)对实验测试结果的数据进行提取和处理,求解了集中质量法中的振型.对有过渡配合的螺栓法兰盘结合面的刚度进行了定量分析,结果显示:随着螺栓预紧力增大,系统总刚度和结合面刚度增大,当螺栓预紧力由 $0.545 \text{ N} \cdot \text{m}$ 增大至 $2.795 \text{ N} \cdot \text{m}$ 时, x 方向系统总刚度和结合面刚度分别提高了 17.8% 和 1079.4%.低温条件可使结合面刚度和系统总刚度进一步增大,当钛合金螺栓的预紧力为 $3.236 \text{ N} \cdot \text{m}$ 时,低温条件可以使 x 方向结合面刚度提升 134.4%.

课题组将进一步探究低温条件对结合面参数的影响机理,从实验和理论两方面分析液氮温度对系统振动特性的影响,此研究有望对高温超导电磁应用领域起到积极的借鉴作用.

参 考 文 献

- [1] 易浩然,代胡亮,武汉大学学报(工学版),54(2021),137.
- [2] 林蓬成,郑晓宇,李龙贤,林奇燕,金志磊,推进技术,42(2021),1636.
- [3] 杨新文,赵治钧,钱鼎玮,张昭,哈尔滨工业大学学报,53(2021),1636.

- (2021), 9.
- [4] 雷阳, 孔德同, 张中泉, 科技创新与应用, **53**(2021), 100.
- [5] 何祥磊, 苏宏华, 陈玉荣, 顾佳庆, 机械制造与自动化, **50**(2021), 180.
- [6] A. Avci, A. Yapici, and M. Uyaner, *Sci. Eng. Compos. Mater.*, **13**(2006), 103.
- [7] J. A. Greenwood, *Tribol. Int.*, **30**(1997), 235.
- [8] S. R. Swanson, *Int. J. Solids Struct.*, **41**(2004), 1945.
- [9] J. A. Greenwood, *Wear*, **261**(2006), 191.
- [10] 侯隆韬, 2020 硕士学位论文(大连:大连理工大学).
- [11] C. Xu, J. F. Zhang, Z. J. Wu, D. W. Yu, and P. F. Feng, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, **67**(2013), 1517.
- [12] 许超, 2014 博士学位论文(北京:清华大学).
- [13] H. L. Tian, B. Li, H. Q. Liu, K. M. Mao, F. Y. Peng, and X. L. Huang, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, **51**(2011), 239.
- [14] M. Yoshimura and A. Fukano, *J. Jpn. Soc. Precis. Eng.* (*Japan*), **45**(1979), 1418.
- [15] G. Szwengier, T. Godunski, and S. Berczynski, *Adv. Eng. Softw.*, **31**(2020), 149.
- [16] S. Shimizu, Y. Kabaya, H. Sakamoto, and K. Yamashita, 2012 *14th International Conference on Precision Engineering (ICPE 2012)* Hyogo, JAPAN, Nov 08-10, (2012) p451.
- [17] 国浩, 2015 硕士学位论文(北京:清华大学).
- [18] H. Tsuchishima, M. Terai, H. Yoshida, H. Watanabe, M. Yamaji, M. Matsuda, Y. Jizo, and T. Fujimoto, *Cryogenics*, **29**(1994), 479.
- [19] M. Ogata, T. Okino, K. Ikeda, T. Herai, M. Igarashi, and T. Furusawa, *Q. Rep. RTRI (Japan)*, **41**(2000), 79.
- [20] K. Nemoto, M. Terai, M. Igarashi, T. Okutomi, S. Hirano, K. Kuwano, S. Kusada, T. Yamashita, Y. Yanase, T. Kuriyama, T. Tosaka, K. Tasaki, K. Marukawa, S. Hanai, M. Yamaji, and H. Nakao, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **16**(2006), 1104.