

无磁杜瓦中三角形和梯形螺纹粘接接头的热应力比较

朱鸿梅¹, 乔宏旭², 徐 烈¹

(1. 上海交通大学 制冷与低温工程研究所, 上海 200030; 2. 淄博热力有限公司, 山东 淄博 255000)

摘 要: 用 ANSYS 软件对无磁杜瓦所用的三角形螺纹和梯形螺纹形式的粘接接头进行热应力分析和比较, 结果表明其应力分布非常相似。在杜瓦内筒下接头的胶层胶填角周围均有严重的应力集中。梯形螺纹粘接接头的米塞斯应力稍微大于三角形螺纹, 但差别非常小。

关键词: 低温; 无磁杜瓦; 热应力分析; 梯形螺纹

中图分类号: TU831.4

文献标识码: A

文章编号: 1006-7086(2006)03-0132-05

THERMAL STRESS ANALYSES AND COMPARISON OF TRIANGULAR AND TRAPEZOIDAL THREADED-ADHESIVE JOINTS APPLIED IN NON-MAGNETIC DEWAR

ZHU Hong-mei¹, QIAO Hong-xu², XU Lie¹

(1. Institute of Refrigeration and Cryogenics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China;

2. Zibo ReLi Co. Ltd., Zibo 255000, China)

Abstract: The thermal stress analyses of the triangular and the trapezoidal threaded-adhesive joints applied in the non-magnetic Dewar were conducted and compared using the ANSYS software. The results showed that their thermal stress distributions were very similar. The serious stress concentration occurred around the adhesive fillet at the adhesive free end of the lower threaded-adhesive joint of the inner shell. The von Mises stress of trapezoidal threaded-adhesive joints is slightly higher than that of triangular threaded-adhesive joints, but the difference is very minor.

Key words: cryogenic; non-magnetic Dewar; thermal stress analysis; trapezoidal thread

1 引 言

SQUID 已广泛应用于地磁探测、无损检测、SQUID 扫描电镜和卫星等领域, 无磁杜瓦可以提供 SQUID 正常工作所必需的低温无磁环境。无磁杜瓦中的粘接接头不仅要有很好的真空密封性, 还要求有足够的强度, 因此一般采用三角形螺纹和梯形螺纹粘接接头。由于胶粘剂和玻璃钢的热膨胀系数不同, 无磁杜瓦在低温(液氮或液氦温区)下使用时, 会产生严重的热应力, 并可能破坏粘接接头的真空密封性, 因而有必要对此进行研究。

目前针对高温下不同粘接接头的热应力研究较多^[1-6], 而低温下的研究很少, Mori 等^[7]测量了 23~160 metal- FRP 之间的单搭接接头的强度, 并进行了热应力分析。结果表明, 因热膨胀系数不同而引起显著的应力集中。ZHU 等^[8]对无磁杜瓦中的三角形螺纹粘接接头的热应力进行分析, 结果表明, 应力集中主要发生在内筒下接头的胶层自由端附近, 此外还讨论了液氮充满率及螺距对螺纹粘接接头应力分布的影响。除三角形螺纹外, 梯形螺纹也是无磁杜瓦接头经常采用的连接形式。因此作者将对这 2 种螺纹粘接接头进行热应力分

收稿日期: 2006-02-24.

基金项目: 国家 863 计划基金项目(2002AA306412)资助。

作者简介: 朱鸿梅(1974-), 女, 山西省孝义市人, 博士生, 从事低温储运设备及暖通空调方面的研究。

析, 并比较它们的应力分布及应力水平。

2 接头型式及热应力分析过程

图 1 给出了无磁杜瓦中三角形螺纹和梯形螺纹粘接接头的示意图, 其主要尺寸如表 1 所列。根据杜瓦工作的实际状态, 作者作如下假设:

(1) 因 2 种螺纹粘接接头的螺旋升角小于 2° ; 螺旋升角对载荷分布的影响可以忽略^[9], 因此简化为二维轴对称问题。

(2) 胶层厚度设为在径向和轴向均为 0.25 mm。胶填角的形状可理想化为一个等腰直角三角形, 其直角边为胶层厚度的两倍^[9]。为避免应力奇异, 在被粘物的边角处倒圆角(见图 1)。

(3) 低温下玻璃钢和胶层为弹性, 并考虑了玻璃钢的热和机械性能的各向异性。

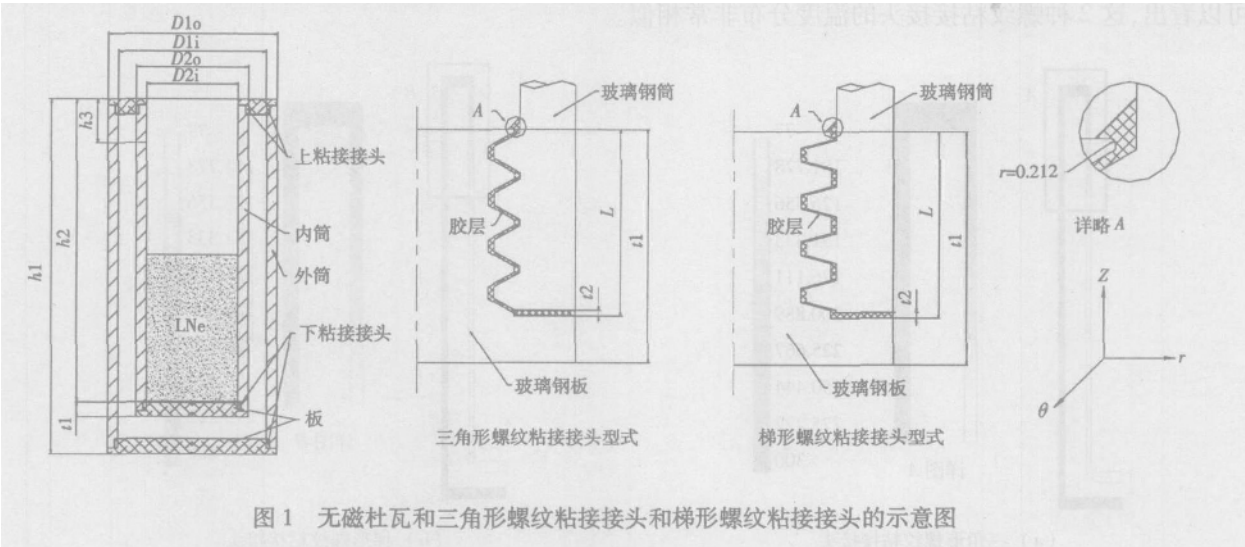


图 1 无磁杜瓦和三角形螺纹粘接接头和梯形螺纹粘接接头的示意图

表 1 杜瓦及接头的主要尺寸

名 称			尺寸 /mm	名 称			尺寸 /mm
外筒	内径	$D1i$	110	外筒高度	$h1$		405
	外径	$D1o$	122	内筒高度	$h2$		370
内筒	内径	$D2i$	60	杜瓦瓶塞高度	$h3$		70
	外径	$D2o$	70	板厚	$l1$		10

有限元方法是进行应力分析最得力的工具^[10, 11]。用 ANSYS 软件对无磁杜瓦中的螺纹接头进行热应力分析, 采用 8 节点四边形轴对称平面单元来模拟杜瓦的内、外筒和板及胶层。因应力集中主要发生在下接头胶层自由端, 因此对此处的网格进行加密。胶层和玻璃钢的主要物性参数如表 2 所列。

表 2 胶层和玻璃钢筒及板的主要物性参数

材料	弹性模量 /Pa	剪切模量 /Pa	泊松比	热膨胀系数 $/(\times 10^{-3} / ^{\circ}C)$	热导率 $/(W / m \cdot K)$
胶	3.33×10^9		0.34	5.5	0.190
玻璃 钢板	1.37×10^{10} (r)	2.16×10^9 (rz)	0.40	2.6	0.225
	6.86×10^9 (z)	2.16×10^9 (z θ)	0.20	4.0	0.075
	1.37×10^{10} (θ)	3.73×10^{10} (θr)	0.25	2.6	0.225
玻璃 钢筒	6.86×10^9 (r)	2.16×10^9 (rz)	0.40	4.0	0.075
	1.37×10^{10} (z)	3.73×10^{10} (z θ)	0.25	2.6	0.225
	1.37×10^{10} (θ)	2.16×10^9 (θr)	0.20	2.6	0.225

杜瓦在应力自由状态下, 初始温度为 300 K。热分析时的热边界条件为: 杜瓦内筒与液氮接触的内表面

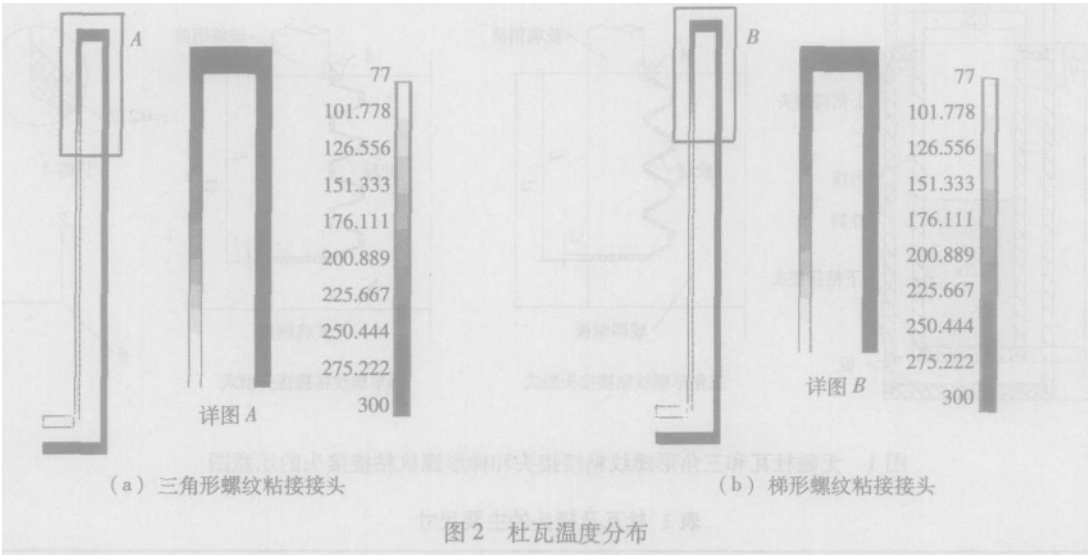
为 77 K, 杜瓦底部外表面温度为 300 K; 杜瓦内筒对应于氮气的部分及外筒置于空气的部分为第三类边界条件, 其对流换热系数根据文献[12]和[13]来计算; 其他部分为绝热的。

热分析所得的温度分布作为热载荷施加在杜瓦上; 因内、外筒之间为真空, 因而施加了大气压力。此外还考虑了液氮的质量所引起的静压力载荷。应力分析的边界条件为: 杜瓦底部外表面在 z 方向固定; $r=0$ 的表面上为对称边界条件。

3 结果与讨论

3.1 热分析讨论

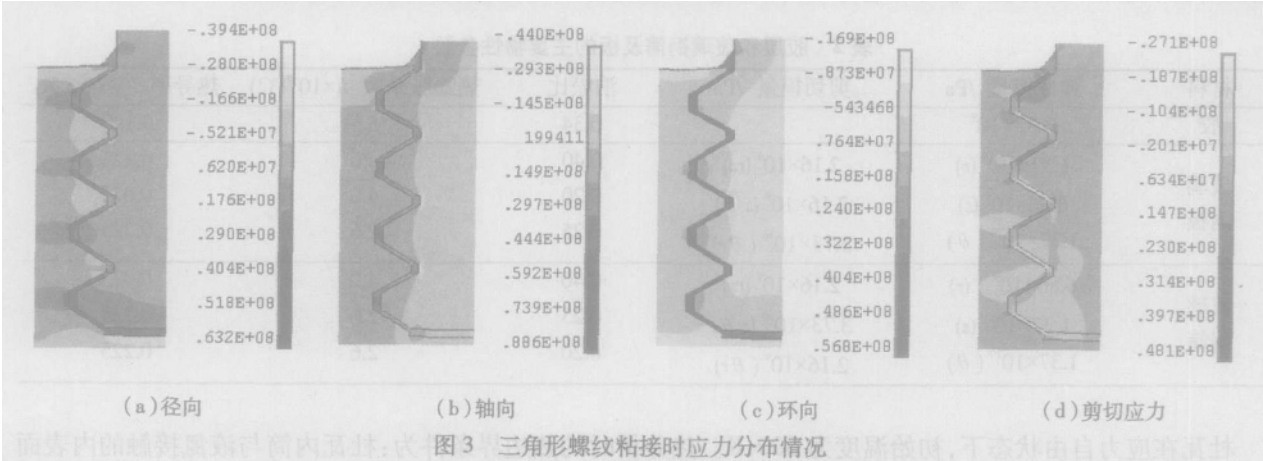
对杜瓦进行稳态热分析, 2 种螺纹粘接接头的温度分布如图 2 所示。在内筒下粘接接头处温度变化(初终温之差)很大, 最大温差达 223 K, 比上接头处的温差大得多。内筒上部的温度梯度较大。从图 2 (a)、(b)可以看出, 这 2 种螺纹粘接接头的温度分布非常相似。

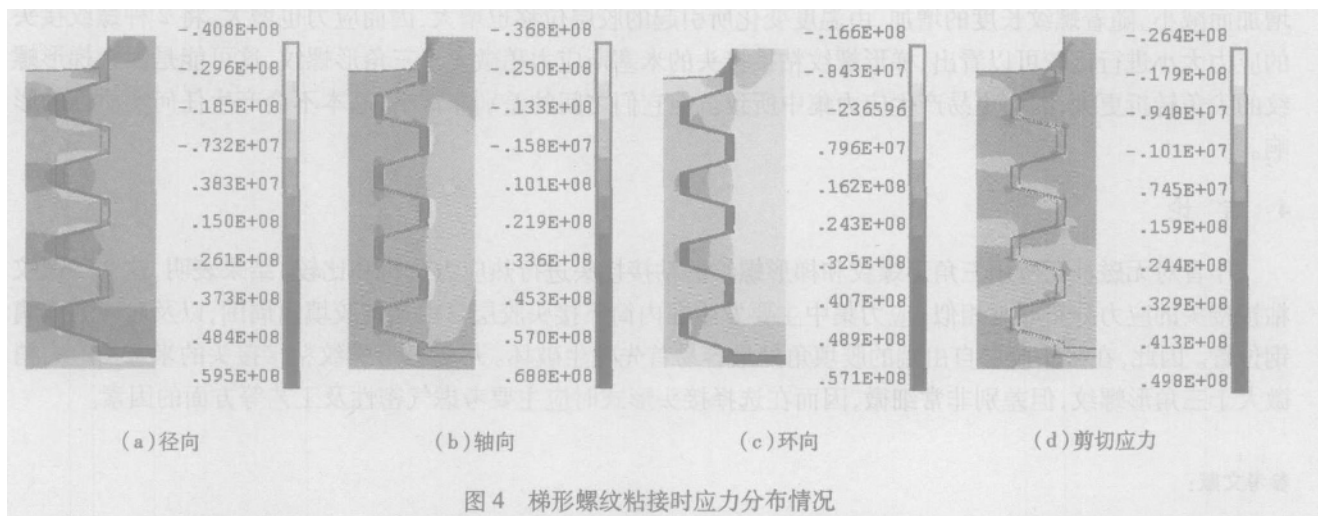


3.2 应力分布的比较

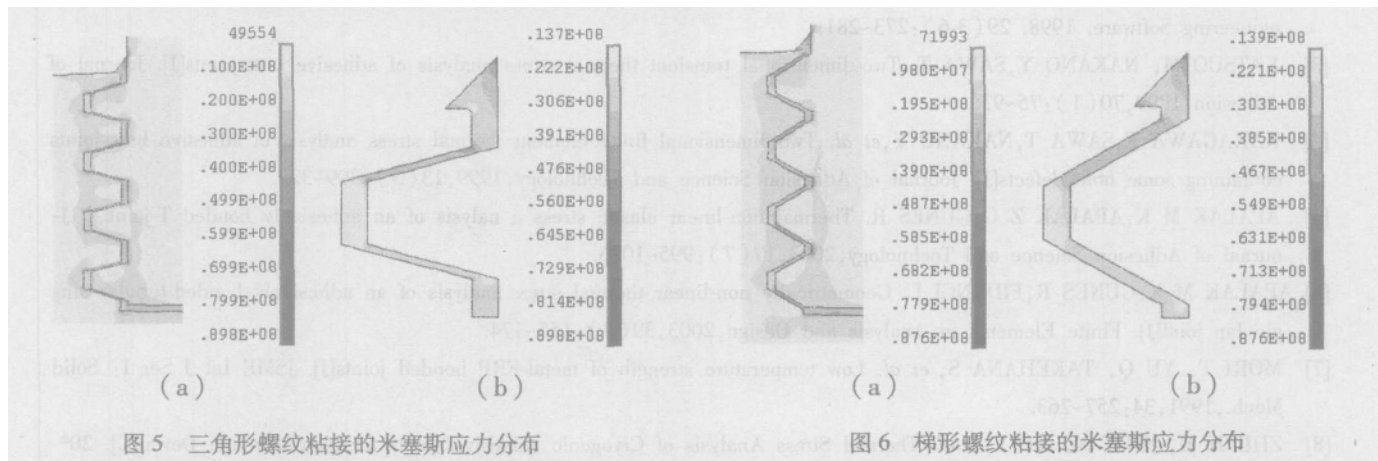
首先取螺纹长度为 8 mm、螺距为 2 mm, 并对三角形螺纹和梯形螺纹粘接接头进行热应力分析。因为内筒下接头的应力水平远高于其他接头, 所以以下主要针对内筒下接头进行分析。图中应力单位均为 Pa。

2 种螺纹粘接接头的不同应力分量的分布如图 3 和图 4 所示。从图中可见, 2 种螺纹粘接形式的应力分布非常相似, 轴向应力为主, 但径向应力、环向应力和剪切应力也比较大。所有应力分量的应力集中均主要发生在接头胶层自由端的胶填角周围。在内螺纹牙顶对应的胶层处轴向应力较高, 而在外螺纹牙底对应的胶层处环向应力较高。剪切应力在每个螺纹齿的上、下牙侧方向相反。



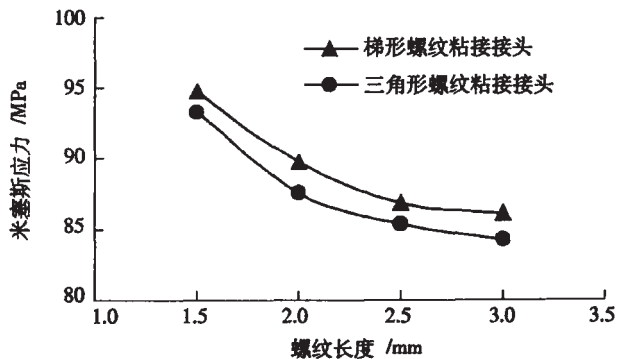
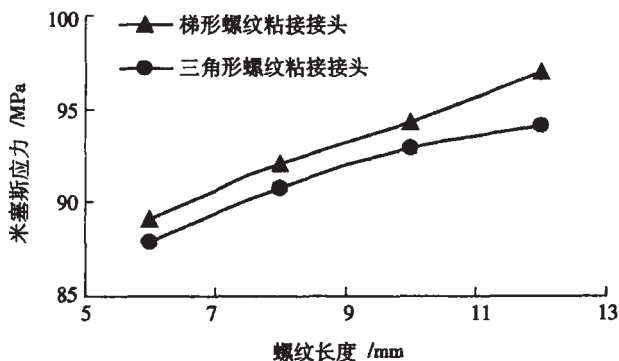


通常采用米塞斯应力来评价不同条件下的应力水平, 因此图 5 和图 6 给出了三角形螺纹和梯形螺纹粘接接头的米塞斯应力分布。应力集中同样发生在接头胶层自由端的胶填角周围, 此处对应的玻璃钢也有显著的应力集中。这 2 种螺纹接头的米塞斯应力分布也很相似。



3.3 比较不同螺纹长度和不同螺距应力水平

为了比较三角形螺纹和梯形螺纹粘接接头的热应力大小, 对螺纹长度为 6、8、10、12 mm 和螺纹螺距为 2 mm 的接头进行了应力分析, 其最大米塞斯应力如图 7 所示。另外, 还对 2 种螺纹形式在 1.5、2.0、2.5、3.0 mm 螺距和螺纹长度为 8 mm 的情况下进行了热应力分析, 其最大米塞斯应力在图 8 中给出。



由图 7 和图 8 可以看出, 2 种螺纹形式接头的最大米塞斯应力均随螺纹长度的增加而增加, 并随螺距的

增加而减小。随着螺纹长度的增加,由温度变化所引起的胶层位移也增大,因而应力也增大。将 2 种螺纹接头的应力大小进行比较可以看出,梯形螺纹粘接接头的米塞斯应力稍微大于三角形螺纹,这可能是因为梯形螺纹的尖角转折更大,因而更易产生应力集中所致。但它们之间的差别非常小,基本不会产生任何实质性的影响。

4 结 论

作者对无磁杜瓦所用三角形螺纹和梯形螺纹的粘接接头进行热应力分析和比较。结果表明,这 2 种螺纹粘接接头的应力分布非常相似。应力集中主要发生在内筒下接头胶层自由端的胶填角周围,以及对应的玻璃钢位置。因此,在接头胶层自由端的胶填角处最容易首先发生破坏。尽管梯形螺纹粘接接头的米塞斯应力稍微大于三角形螺纹,但差别非常细微,因而在选择接头形式时应主要考虑气密性及工艺等方面的因素。

参考文献:

- [1] APALAK M K, GUNES R. On non-linear thermal stresses in an adhesively bonded single lap joint[J]. Computers and Structures, 2002, 80(1) : 85-98.
- [2] RASTOGI N, SONI S R, NAGAR A. Thermal stresses in aluminum-to-composite double-lap bonded joints[J]. Advances in Engineering Software, 1998, 29(3-6) : 273-281.
- [3] KATSUO M, NAKANO Y, SAWA T. Two-dimensional transient thermal stress analysis of adhesive butt joints[J]. Journal of Adhesion, 1999, 70(1) : 75-93.
- [4] NAKAGAWA F, SAWA T, NAKANO Y, et al. Two-dimensional finite element thermal stress analysis of adhesive butt joints containing some hole defects[J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 1999, 13(3) : 309-323.
- [5] APALAK M K, APALAK Z G, GUNES R. Thermal non-linear elastic stress analysis of an adhesively bonded T-joint[J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2003, 17(7) : 995-1016.
- [6] APALAK M K, GUNES R, FIDANCI L. Geometrically non-linear thermal stress analysis of an adhesively bonded tubular single lap joint[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2003, 39(3) : 155-174.
- [7] MORI T, YU Q, TAKEHANA S, et al. Low temperature strength of metal-FRP bonded joints[J]. JSME Int J Ser I: Solid Mech., 1991, 34: 257-263.
- [8] ZHU H M, JIN T X, XU L, et al. Thermal Stress Analysis of Cryogenic Adhesive Joints for Non-Magnetic Dewar[C]. 20th International Cryogenic Engineering Conference, Beijing, China, 2004.
- [9] ZHAO H. Analysis of the load distribution in a bolt nut connector[J]. Computers and Structures, 1954, 53: 1465-1472.
- [10] 杨福全, 张天平, 刘志栋, 等. 复合材料气瓶的有限元建模与屈曲分析[J]. 真空与低温, 2005, 11(1) , 40-45.
- [11] 田昭昭, 姜万顺. 有限元分析技术在贮箱结构优化设计中的应用[J]. 真空与低温, 2005, 11(2) , 111-115.
- [12] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1998.
- [13] 杨世铭. 细长竖圆柱外及竖圆柱内的自然对流传热 [J]. 西安交通大学学报, 1980, 14(3) : 115-131.

敬告作者

为适应我国信息化建设需要,扩大广大作者学术交流渠道,本刊已加入《中国学术期刊(光盘版)》和“中国期刊网”以及《万方数据——数字化期刊群》,作者提成与本刊印刷版稿酬一次付清。如作者对此不同意,请来信说明,本刊将作适当处理。

本刊编辑部