

文章编号: 1672-8785(2025)05-0024-07

斯特林制冷机直线电机的磁钢固定实验与研究

李振雷 饶启超 韩蓬磊

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘 要: 作为红外探测器组件的重要组成部分, 斯特林制冷机的直线电机固定方式是影响组件可靠性的一个重要因素。磁钢固定的破坏力高于 10 kN 就会减少磁钢脱落的风险, 因此对斯特林制冷机直线电机在不同磁钢固定方式下的破坏力进行了研究。试验结果表明, 在纯胶粘或者纯焊接情况下, 涂满胶与焊接 1 圈时的最大破坏力接近(约为 6 kN), 均存在磁钢脱落风险。在两种方式相结合的情况下, 涂满胶水、6 点焊接时的破坏力为 11.18 kN, 满足磁钢固定要求; 焊接 1 圈时的破坏力达到 17.02 kN, 大大增加了可靠性。仿真数据与实验结果接近, 证明在胶水涂满情况下, 避免磁钢脱落的最低焊接条件为 6 点焊接, 低于 6 点焊接时则存在磁钢脱落风险, 造成制冷机撞缸异响。该结果为后续制冷机的可靠性设计提供了参考。

关键词: 直线电机; 磁钢; 可靠性; 胶粘; 焊接

中图分类号: TB66 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2025.05.004

Experiment and Research on Magnetic Steel Fixing of Stirling Refrigerator Linear Motor

LI Zhen-lei, RAO Qi-chao, HAN Peng-lei

(North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

Abstract: As an important component of the infrared detector assembly, the fixing method of the linear motor of the Stirling refrigerator is an important factor affecting the reliability of the assembly. If the destructive force of the magnetic steel fixing is higher than 10 kN, the risk of the magnetic steel falling off will be reduced. Therefore, the destructive force of the linear motor of the Stirling refrigerator under different magnetic steel fixing methods is studied. The test results show that in the case of pure gluing or pure welding, the maximum destructive force when the glue is fully applied and one-circle welding is used is close (about 6 kN), and there is a risk of magnetic steel falling off. In the case of combining the two methods, the destructive force when the glue is fully applied and the 6-point welding is used is 11.18 kN, which meets the requirements of magnetic steel fixing; the destructive force when one-circle welding is used is 17.02 kN, which greatly increases the reliability. The simulation data is close to the experimental results, which proves that when the glue is

收稿日期: 2024-10-30

作者简介: 李振雷(1996-), 男, 山东临沂人, 硕士, 主要研究方向为红外探测技术、制冷与低温技术。

E-mail: lee_zl123@163.com

fully applied, the minimum welding condition to avoid the magnetic steel falling off is 6-point welding. When the welding points are less than 6, there is a risk of magnetic steel falling off, causing the refrigerator to hit the cylinder and make an abnormal noise. This result provides a reference for the reliability design of subsequent refrigerators.

Key words: linear motor; magnetic steel; reliability; gluing; welding

0 引言

斯特林制冷机具有体积小、效率高、寿命长、可靠性强等优点,被广泛应用于军事和航空航天领域,特别是在空间红外探测器、低温超导等方面^[1-2]。为满足不同场景下的冷却需求,目前斯特林制冷机已演化出诸多类型,其中大部分是分置式制冷机。分置式斯特林制冷机与芯片、杜瓦共同组成了红外探测器组件。随着新一代红外探测器技术的快速发展以及应用领域的不断拓展,用户对制冷机适应能力提出了更严苛的要求。其中,制冷机的可靠性起到至关重要的作用^[3-4]。

随着红外技术的不断创新,很多学者针对分置式斯特林制冷机的可靠性进行了优化和分析。刘心广等^[5]介绍了国内空间斯特林制冷机的早期失效模式及其相应的筛选方法,并研究出了长寿命制冷机的寿命筛选方法,提高了制冷机的使用可靠性。张文君等^[6]针对长时间、自然对流散热条件下斯特林制冷机的使用要求,对散热器结构进行了优化,有效提升了制冷机在特殊工况下的适应能力及可靠性。辛光磊等^[7]对斯特林制冷机回热器进行了试验,研究了丝网数量和填充方式对制冷机性能的影响,确定了冷端布置 400 目丝网和热端布置少量 100 目丝网的混合丝网布置方式,可使回热器性能达到最佳水平。黄燕等^[8]从分置式斯特林制冷机微振动控制和隔振设计方面进行了研究,介绍了影响制冷机微振动的主要因素,并对整机隔振理论进行了分析。他们将理论与实践相结合,有效减小了制冷机的微振动,满足了探测器的使用要求。周伟楠等^[9]用柔性板弹簧对压缩机和膨胀机进行理论分析,发现偏心型圆渐开线板弹簧不仅具有较大的径轴向刚度

比和较高的可靠性,而且更利于线性压缩机在较高的频率下工作。

在实际应用中,电机是影响制冷机可靠性的一个重要因素。早期的分置式斯特林制冷机采用旋转马达驱动,后来发展为直线电机,进而采用双活塞对置直线驱动,使压缩机动子的动量得到了平衡。这样既简化了结构,又减小了振动和噪音,使制冷机的可靠性大幅提高。分置式斯特林制冷机通过用直线电机驱动压缩活塞在压缩气缸中往复运动来实现制冷,使用环境多为复杂且严苛的场景,因此直线电机固定方式是影响其可靠性的一个重要因素。本文主要对制冷机直线电机磁钢脱离失效理论进行了介绍,然后对不同磁钢固定方式下的破坏力进行了试验,并通过仿真与试验数据相互印证,得到了避免磁钢脱落风险的固定方式的最低条件,为后续制冷机的可靠性设计提供了参考。

1 磁钢脱离失效理论

分置式斯特林制冷机由压缩机和膨胀机组成,两者通过连接管连接。在压缩机中,直线电机驱动压缩活塞在压缩气缸中往复运动,使压缩气缸中的工质被交替压缩和膨胀。通过连接管将能量以压力波的形式传递至膨胀机,推动膨胀机中的排出器作往复运动。当压力波与排出器往复运动的速度之间满足一定的相位条件时,实现热量由膨胀机冷端传递至热端的泵送。图 1 为压缩机的内部构造图。

直线电机主要由线圈组件、磁钢组件、定子磁轭和机壳四部分组成,如图 2 所示。磁钢组件由磁钢骨架、动子磁极、磁钢粘接而成,其结构如图 3 所示。

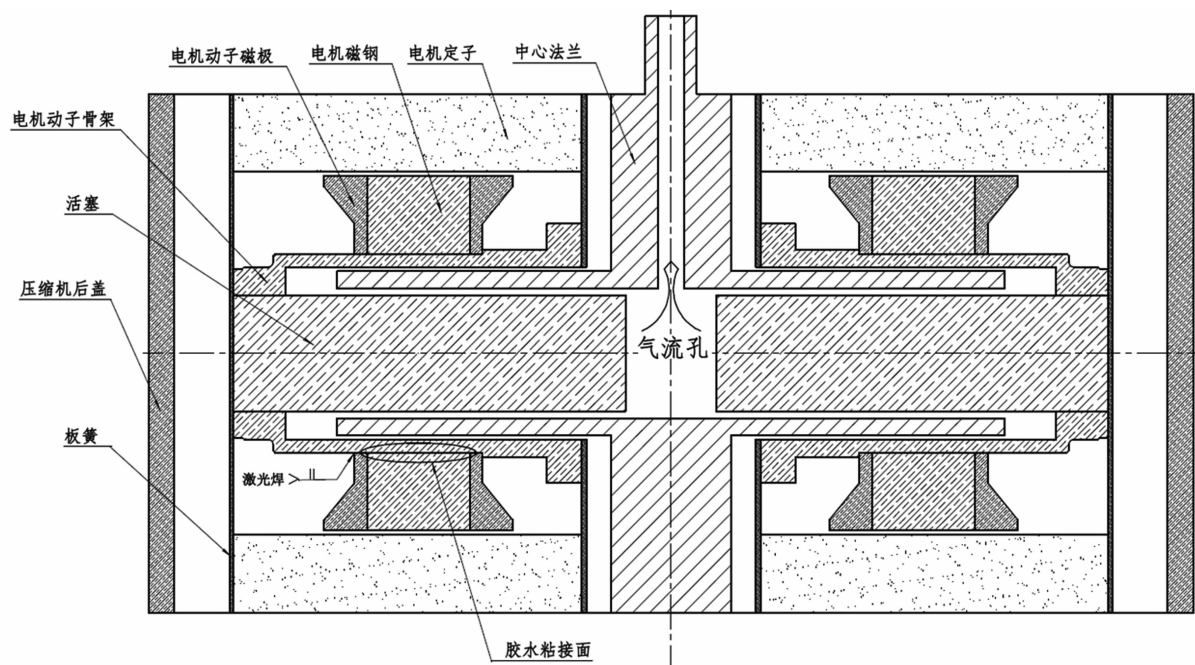


图 1 压缩机的内部构造图

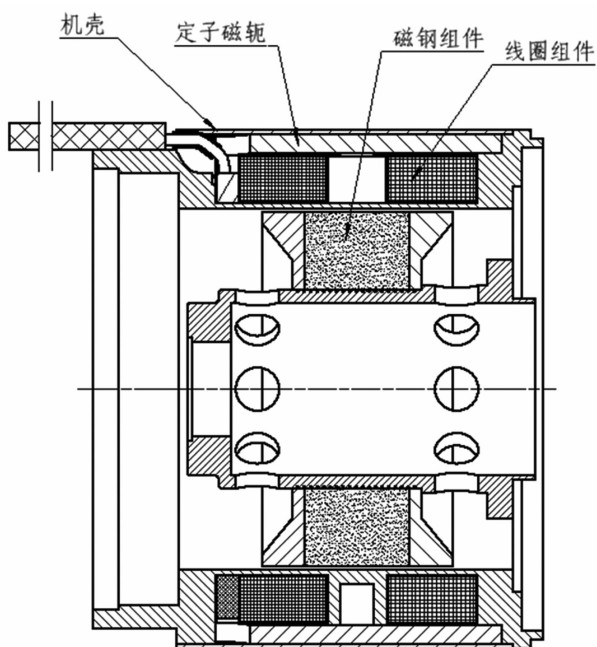


图 2 直线电机结构图

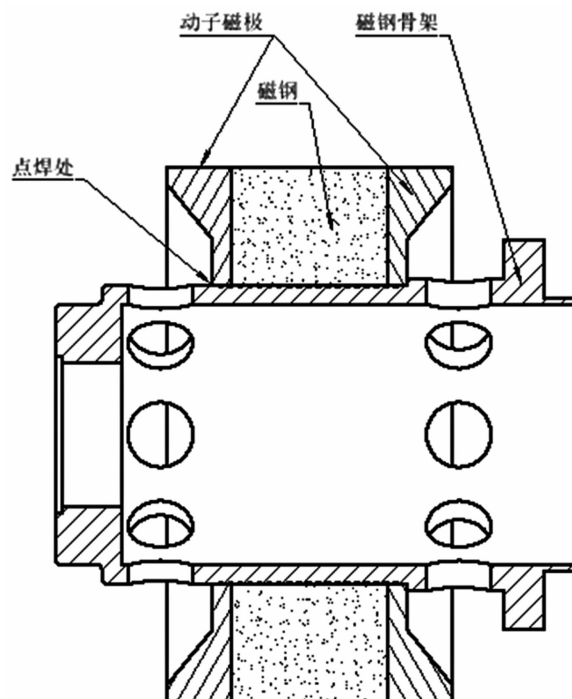


图 3 磁钢组件结构图

当磁钢、动子磁极与磁钢骨架之间的固定方式出现问题时，磁钢与磁钢骨架就会脱离，如图 4 所示。受电机结构影响，电机磁钢与电动机磁极组件向压缩机端盖方向偏移，电动机骨架、活塞组件向中心位置偏移，导致压缩机原有的轴向尺寸缩短。然而直线电机推力及行程并未发生改变。因此，给压缩机通电

后，当磁钢与磁轭组件的偏移位置超过一定距离时，活塞组件出现碰撞，导致制冷机振动异响；当磁钢与磁轭组件的偏移量超过更大距离时，活塞组件将逐渐阻挡压缩机输气孔(图 1、图 4 所示的气流孔)，导致制冷机性能下降甚至不制冷。

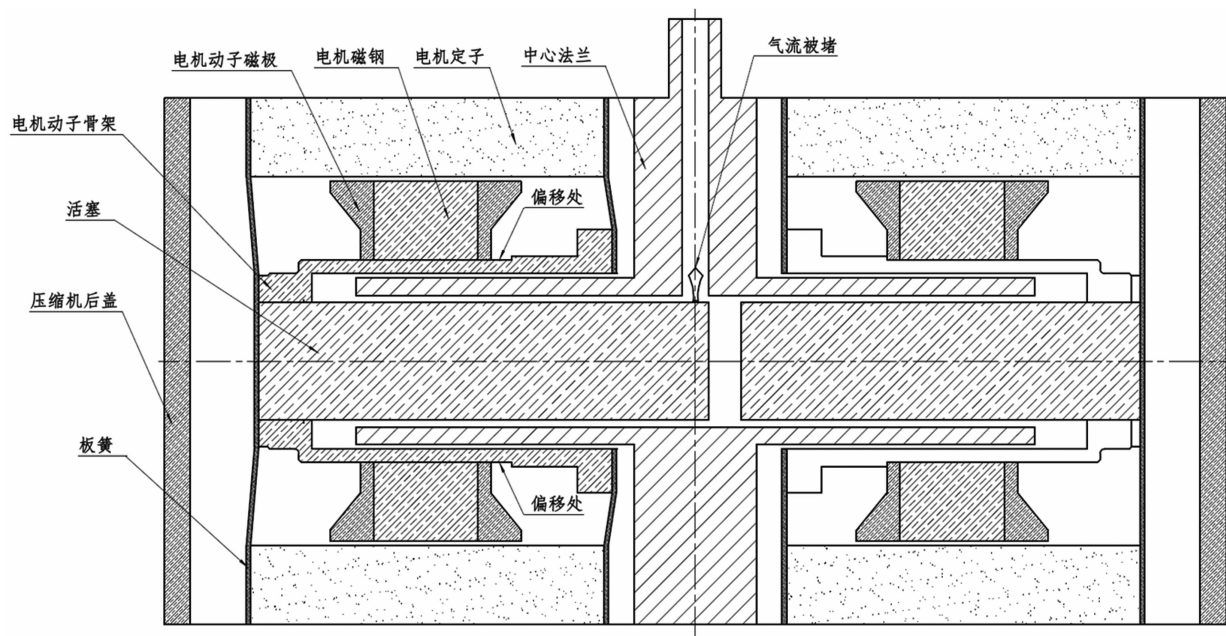


图 4 发生故障后的压缩机示意图

2 磁钢组件破坏力分析

2.1 破坏力试验

磁钢、定子磁极与磁钢骨架目前主要通过胶粘和焊接两种方式共同固定, 其破坏力需达到 10 kN 以上才能避免磁钢组件脱离。磁钢与磁钢骨架脱离也是由于磁钢组件粘接力和焊接阻挡作用力下降导致的。因此分别对胶粘、焊接以及两种方式相结合的方式进行了验证。

胶粘使用某型环氧胶, 其强度试验(室温/50%湿度)报告如表 1 所示。在纯胶粘过程中, 目前采用两种方式: 涂满胶(理论); 槽内少胶或者无胶。磁钢骨架外表面的储胶槽内无胶或者少胶, 造成粘接面积大大减少。所有配合面涂满胶的情况下基本能够保证储胶槽内存满胶, 粘接面大大增加。涂满时的胶量是少涂胶情况的四倍左右, 大大提高了粘接力。磁钢骨架粘接面积的理论值如表 2 所示。同时由于磁钢骨架胶面在装磁钢以及定子磁轭时无法保证对中, 因此也无法保证整个圆柱面的胶面厚度均匀, 导致胶薄的地方进一步降低胶的强度。储胶槽的作用就是保证圆柱面都有胶, 降低这种不均匀性, 同时形成固体胶键, 增强粘接力。

表 1 胶粘剂拉伸剪切试验测试报告

编号	搭接面 面积/mm ²	最大负荷/ N	拉伸剪切 强度/MPa
1	314.750	6057.174	19.241
2	316.764	6242.751	19.711
3	327.860	5544.231	17.592
4	327.600	5952.311	18.172
5	287.500	5282.431	18.370
平均值	314.89	5815.78	18.62 (>18 MPa, 合格)

为了进行对比, 将涂满胶和少涂胶的磁钢组件(无焊接状态)进行了破坏力试验(结果见表 3)。试验结果验证了以上胶粘作用的机理。涂满胶和少涂胶两种状态下的破坏力分别约为 6 kN 与 1 kN, 存在磁钢脱落风险。两组少涂胶磁钢组件的破坏力试验曲线如图 5 所示。

图 6 和图 7 分别为破坏后的涂满胶磁钢组件的磁钢骨架胶粘面和少涂胶磁钢组件的磁钢骨架粘接面的照片。可以看出, 涂满胶磁钢组件的磁钢骨架表面有一层胶膜, 而且由于储胶槽的原因有大量白色胶条; 少涂胶磁钢组件的磁钢骨架仅存在表面一层胶膜。

表 2 磁钢骨架的粘接面积

胶粘方式	磁钢骨架粘接面积计算方法	磁钢骨架粘接面积/mm ²	粘接最大胶量/mm ³
涂满胶 (理论)	$23 \times \pi \times 15 + (23^2 - 22.6^2) \times \pi \div 4 \times 2 \times 19$	1623.598	76.09
实际少涂胶 (槽内少胶或者无胶)	$23 \times \pi \times (15 - 19 \times 0.2)$	809.41 (除去储胶槽的面积)	16.18 (除去储胶槽的体积)

表 3 无焊接磁钢组件的破坏力试验结果

磁钢组件状态	粘接面直径/mm	粘接面轴向长度/mm	破坏力/kN	粘接强度/MPa
各配合面涂满胶	23	15	6.19	5.71
各配合面涂满胶	23	15	6.96	6.42
只在磁钢内表面涂胶	23	15	1.47	1.36
只在磁钢内表面涂胶	23	15	1.27	1.17



图 5 少涂胶磁钢组件的破坏力试验曲线

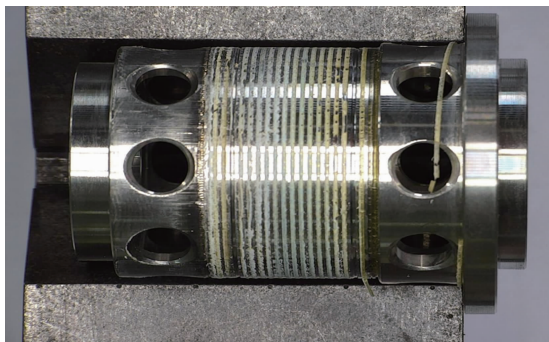


图 6 破坏后的涂满胶磁钢组件的磁钢骨架胶粘面

在纯焊接过程中，对三种焊接状态(6 个焊点、12 个焊点、焊点为 1 圈)下的磁钢组件进行了对比。其中具有 6 个焊点的磁钢组件如

图 8 所示。进行破坏力试验验证后的结果如表 4 所示。

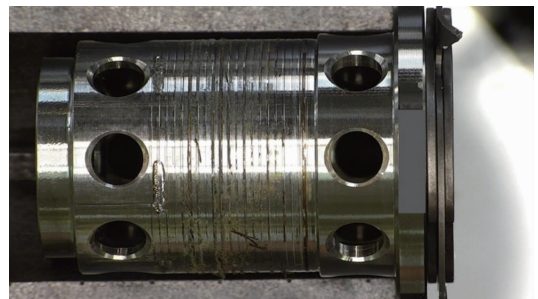


图 7 破坏后的少涂胶磁钢组件的磁钢骨架胶粘面



图 8 磁钢组件(6 点焊接)

表 4 纯焊接时的最大破坏力测试表

磁钢组件 焊接状态 (无胶)	试样直 径/mm	试样宽 度/mm	最大破 坏力/kN	压缩破坏 强度/MPa
6 点焊接	23.00	15.00	4.32	3.83
12 点焊接	23.00	15.00	6.36	5.87
焊接 1 圈	23.00	15.00	6.46	5.96

试验结果表明, 三种焊接方式中, 6 点焊接时的破坏力最小, 12 点焊接与焊接 1 圈时的破坏力最大且相互接近。三者的最大破坏力均小于 10 kN, 存在磁钢脱落风险。

为了进一步探究胶粘与焊接之间的相互影响效果, 选取上述实验中的几种状态进行交叉使用, 最终确定了不同状态下的最大破坏力(见表 5)。

表 5 胶粘与焊接破坏力试验结果

焊接方式	不涂胶水	胶水少涂 (已制品)	胶水涂满
	最大破坏力/kN		
不焊接	0	1.47、1.27	6.19、6.96
6 点焊接	4.32	6.54	11.18
焊接 1 圈	6.46	10.03	17.02

如表 5 所示, 磁钢组件在涂胶量不足时, 单面 6 点焊接的破坏力约为 6.54 kN; 而在同样涂胶量不足的情况下, 焊接 1 圈时基本能够达到 10 kN 左右。在胶水涂满的情况下, 6 点焊接时的破坏力为 11.18 kN, 满足磁钢固定要求; 焊接 1 圈时的破坏力达到 17.02 kN, 大大增加了可靠性。

综合上述试验数据, 为避免磁钢脱离失效, 工艺过程中磁钢组件胶粘时需保障胶量充足, 焊接点需在 6 点以上, 满焊最佳。

2.2 破坏力仿真

根据试验结果, 在胶水涂满状态下, 对磁钢无焊接、6 点焊接、焊接 1 圈时的破坏力进行仿真(结果见图 9)。胶水涂满、无焊接情况下的最大破坏力为 6.52 kN, 胶水涂满、6 点焊接情况下的最大破坏力为 12.93 kN, 胶水涂满、焊接 1 圈情况下的最大破坏力为 19.16 kN。仿真数据与实验结果接近, 证明在胶水涂满情况下, 避免磁钢脱落的最低焊接条件为 6 点焊接, 低于 6 点焊接时则存在磁钢脱落风险, 造成制冷机撞缸异响。

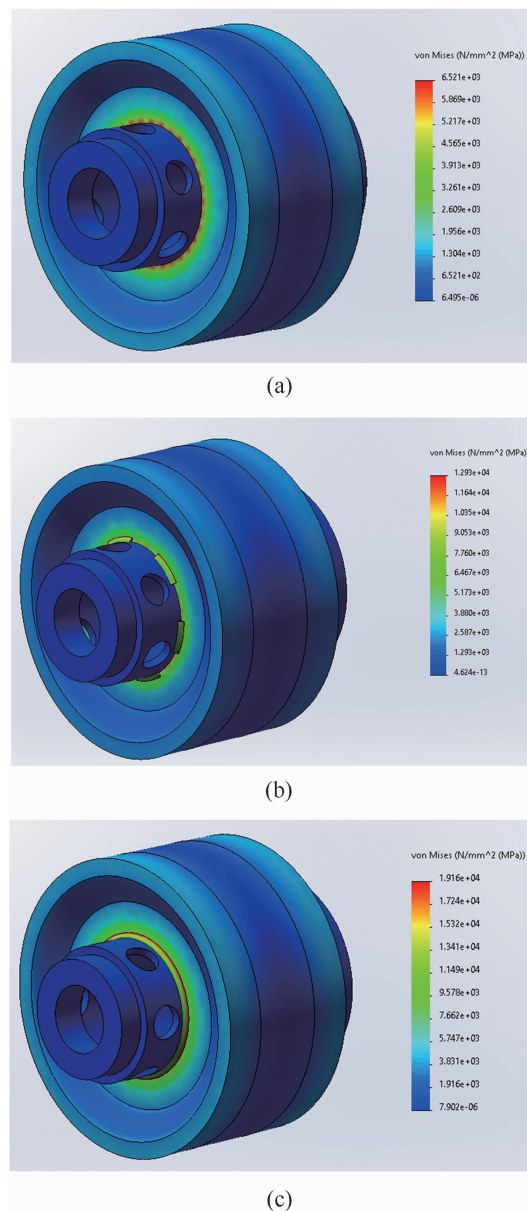


图 9 三种焊接方式的仿真结果: (a)无焊接; (b) 6 点焊接; (c)焊接 1 圈

3 结束语

在实际应用中, 直线电机是分置式斯特林制冷机的一个重要组成部分, 是影响制冷机可靠性的重要因素之一。磁钢固定的破坏力高于 10 kN 会减少磁钢脱落的风险。本文对斯特林制冷机直线电机不同磁钢固定方式下的破坏力进行了研究。试验结果表明, 在纯胶粘或者纯焊接情况下, 涂满胶与焊接 1 圈时的最大破坏力接近(约为 6 kN), 均存在磁钢脱落风险。

在两种方式相结合的情况下,涂满胶水、6 点焊接时的破坏力为 11.18 kN,满足磁钢固定要求;焊接 1 圈时的破坏力达到 17.02 kN,大大增加了可靠性。仿真数据与实验结果接近,证明在胶水涂满情况下,避免磁钢脱落的最低焊接条件为 6 点焊接,低于 6 点焊接时则存在磁钢脱落风险,造成制冷机撞缸异响。该研究结果有利于斯特林制冷机磁钢组件固定方法的改善,为后续制冷机的可靠性设计提供了参考。

参考文献

- [1] 张巍,迟国春,张国刚. 斯特林制冷机在红外系统中的应用 [J]. 激光与红外, 2006, **36**(12): 1106-1109.
- [2] 陈国邦,颜鹏达,李金寿. 斯特林低温制冷机的研究与发展 [J]. 低温工程, 2006, **28**(5): 1-10.
- [3] 任静,罗经纬,何世安. 分置式斯特林制冷机失效分析 [J]. 低温与超导, 2002, **30**(1): 1-5.
- [4] 饶启超,任博文,刘沛,等. 斯特林制冷机技术研究进展综述 [J]. 低温与超导, 2018, **46**(2): 19-24.
- [5] 刘心广,吴亦农,何力. 空间斯特林制冷机的可靠性筛选 [J]. 低温工程, 2006, **28**(6): 40-44.
- [6] 张文君,詹培,陶余钱,等. 斯特林制冷机热环境适应能力优化设计 [J]. 低温与超导, 2022, **50**(8): 64-68.
- [7] 辛光磊,任博文. 斯特林制冷机回热器的热损失理论分析及实验研究 [J]. 红外, 2020, **42**(3): 31-35.
- [8] 黄燕,王正,张铠. 分置式斯特林制冷机微振动抑制技术研究 [J]. 低温与超导, 2021, **49**(5): 14-18.
- [9] 周伟楠,朱海峰,陈雷,等. 微型斯特林制冷机用柔性板弹簧性能分析 [J]. 低温工程, 2019, **41**(6): 12-18.