

ZL114A 铸造铝合金电磁密封铆接工艺参数研究

檀甜甜¹ 景迪¹ 高亮² 臧建新¹ 韩剑¹

(1 首都航天机械有限公司, 北京 100076)

(2 中国航天科技集团有限公司, 北京 100076)

文 摘 为解决传统气动锤击干涉密封铆接质量一致性差、可靠性低的问题,开展电磁密封铆接工艺参数研究工作。以 ZL114A 铸造铝合金为典型材料,借助正交试验法以制孔精度、划窝形式和墩头形式为变量,以铆接后密封性能为指标开展试片级性能试验。结果表明:在 H8 底孔精度、凸形墩头和双角度窝条件下试片的漏率最低、密封性能最好,且划窝形式对密封性能的影响最大;同时漏率与干涉量检测进一步表明,在干涉量未达到自封铆接标准要求下,试片同样满足密封要求,从工程化应用角度考虑,特定情况下干涉量要求可放宽至 0.4%。

关键词 密封铆接,电磁铆接,制孔,工艺参数,密封性能

中图分类号:V462

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2025.03.011

Study on Processing Parameters of Electromagnetic Self-sealing Riveting on ZL114A Aluminum Alloy Structure

TAN Tiantian¹ JING Di¹ GAO Liang² ZANG Jianxin¹ HAN Jian¹

(1 Capital Aerospace Machinery Corporation, Beijing 100076)

(2 China Aerospace Science and Technology Corporation, Beijing 100076)

Abstract To solve the problems of poor quality consistency and low reliability of traditional pneumatic hammering interference sealing riveting, the research on the process parameters of electromagnetic sealing riveting was carried out. Taking ZL114A cast aluminum alloy as a typical material, the orthogonal test method was adopted with hole-making accuracy, notch form, and head form as variables and the performance of test pieces was tested based on the sealing performance after riveting. The results show that the leakage rate of the specimen is the lowest and the sealing performance is the best under the conditions of H8 bottom hole accuracy, convex head and double-angle notches, and the notch form had the greatest impact on the sealing performance. Further analysis of leakage rate and interference amount measurements shows that test specimens still meet sealing requirements even when the interference amount does not meet the self-sealing riveting standard requirements. Therefore, from an engineering application perspective, the interference amount requirement can be relaxed to 0.4% under specific conditions.

Key words Self-sealing riveting, Electromagnetic riveting, Drilling, Technology parameter, Sealing performance

0 引言

密封铆接大致分为干涉密封、涂胶密封、变形密封、混合密封等形式^[1]。目前,在航天领域密封铆接主要采用特种的自封铆钉经干涉铆接后成型,通过自封铆钉与钉孔之间形成过盈配合达到密封效果。由于工艺的特殊性,国内外学者对该领域的研究主

要集中在基础理论和工艺方法方面:20世纪90年代,航天部制定了自封铆接的技术要求,用于指导施工过程^[2];梁洪涛等提出了自封铆钉干涉铆接成型的工艺方法^[3];梁莹开展了基于金属成型与热处理工艺仿真软件 DEFORM-3D 的自封铆接工艺研究^[4]。应用方面,航空航天领域干涉密封铆接仍然停留在手

收稿日期:2023-12-13

第一作者简介:檀甜甜,1988年出生,硕士,高级工程师,主要从事先进铆接装配技术的研究工作。E-mail:jdxtytt@163.com

工气动锤击铆接的技术水平^[5]。干涉配合对制孔精度的严格要求与手工气动锤击铆接的不确定性一直是制约产品质量一致性及生产效率提升的瓶颈,亟需进行先进铆接工艺的研究及应用。

电磁铆接是将电磁能转换为机械能的一种新型铆接工艺,其施工过程中铆钉变形均匀,当钉孔间隙较大或夹层厚度较大时仍能实现干涉配合^[6]。近年来,电磁铆接技术的研究和应用逐步延伸到特种铆接过程中,以西北工业大学、南京航空航天大学为代表的高校,实现并验证了采用电磁铆接技术实现复合材料结构干涉配合铆接的可行性^[7-8],研究了无头铆钉等特殊结构铆钉及钛铌铆钉等特殊材料铆钉的电磁铆接性能^[9-11],并在自动化电磁铆接领域开展了积极探索^[12]。2021年,中国运载火箭技术研究院的相关团队进行了电磁密封铆接的初步尝试,从力学性能的角度验证了该工艺的可靠性^[13]。

为进一步填补自封铆钉干涉配合密封铆接在高可靠性工程化应用领域的空白,本文针对目前手工气动锤击密封铆接工艺质量一致性差、可靠性低的问题,基于典型材料开展电磁密封铆接工艺技术研究,探索电磁密封铆接制孔、制窝及墩头等重要工艺参数,拟为提升某重大装备研制质量奠定基础。

1 试验

1.1 原材料

原材料为铸造铝合金 ZL114A、变形铝合金 2A12。ZL114A 板材 150 mm×30 mm×5 mm,数量 9 块;2A12 板材 150 mm×30 mm×2 mm,数量 9 块;铝合金 LY10 铆钉,规格 4 mm×12 mm,数量 45 个。

1.2 试验件制备

试验件由 ZL114A 板材与 2A12 板材定位铆接组合成双层板,形式和铆接结构见图 1,参考典型产品的结构特点,密封面选取在 ZL114A 板一侧,试验件等间距制孔,采用航天用 LY10 铝合金材料自封铆钉进行铆接。

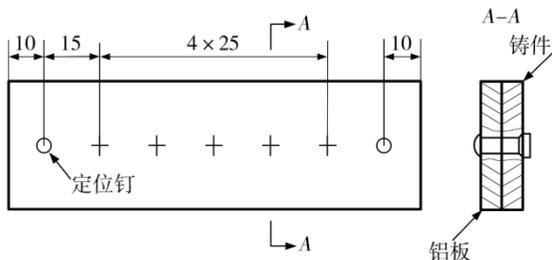
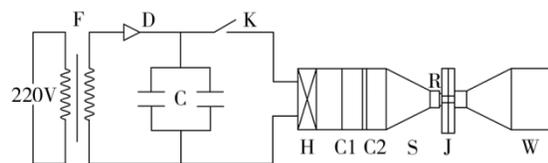


图 1 试片铆接结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of test piece riveting structure

铆接设备为 EI 公司 HH54 系统,其原理见图 2^[6]。该系统为一次性冲击成型设备,可通过快速更换铆宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2025 年 第 3 期

模,实现 $\Phi 4$ 、 $\Phi 5$ mm 铝合金自封铆钉的电磁铆接。



注:F—变压器;D—整流器;C—电容组;K—开关;H—缓冲元件;C1—线圈;C2—次级线圈;S—调制器;R—铆钉;J—试片;W—顶铁。

图 2 设备原理图

Fig. 2 Equipment schematic diagram

1.3 试验方法

(1)采用氦质谱检漏法检测试验件漏率。

(2)漏率检测后的试验件进行干涉量检测。采用整钉测量法,沿平行于铆钉轴线的方向锯开试验件,取出铆钉,用千分尺测量膨胀后的铆钉直径。按整钉测量要求,在靠近墩头、钉头及夹层两侧共测量 4 处,剖切及测量位置见图 3。

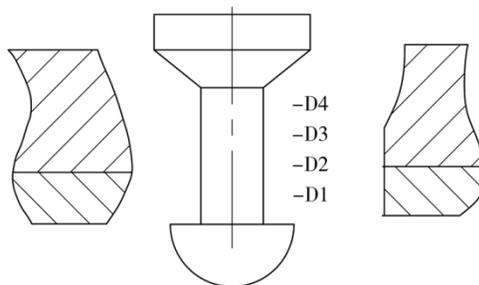


图 3 试片干涉量检测图

Fig. 3 Test piece interference measurement

1.4 性能表征

试验件的密封性能以试验件铆接区漏率作为定量评价指标,并对漏率检测后的试验件进行剖切,以干涉量检测结果佐证漏率考核结果。

2 试验过程及结果分析

2.1 正交试验设计

2.1.1 工艺参数的确定

通过总结工程经验,得出影响密封铆接性能的主要因素有:划窝形式、底孔精度和墩头形式,如表 1 所示。

表 1 密封性能试验工艺参数

Tab. 1 Sealing performance test process parameters

划窝形式	底孔公差等级	墩头形式
单角度窝	H8	凸形墩头
双角度窝	H9	鼓形墩头
不划窝	H10	-

不同的划窝形式如图 4 所示,其中双角度窝为自封铆接特有的一种划窝形式,即通过特殊刀具在钉孔入口形成 30° 、 82° 两个角度的钉窝^[3]。

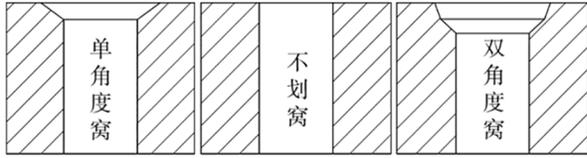


图4 划窝形式

Fig. 4 Scratching nest pattern

2.1.2 建立正交试验表

各因素水平情况如表2所示,按正交试验法,设可变因素数为3,每项因素的水平数为3,建立三因素三水平正交试验表。

表2 试验因素与水平

Tab. 2 Test factors and levels

水平	因素		
	A划窝形式	B底孔公差等级	C墩头形式
水平1	单角度窝	H8	凸形墩头
水平2	双角度窝	H9	鼓形墩头
水平3	不划窝	H10	凸形墩头(重复一次)

2.1.3 确定正交试验方案

选用 $L_9(3^3)$ 正交表进行方案设计,优选后的9种试验方案见表3。

表3 试验参数优选方案

Tab. 3 Test parameter optimization scheme

试验号	试验方案号	A划窝形式	B底孔公差等级	C墩头形式
1 [#]	A1B1C1	1(单角度窝)	1(H8)	1(凸形墩头)
2 [#]	A1B2C2	1(单角度窝)	2(H9)	2(鼓形墩头)
3 [#]	A1B3C3	1(单角度窝)	3(H10)	3(凸形墩头)
4 [#]	A2B1C2	2(双角度窝)	1(H8)	2(鼓形墩头)
5 [#]	A2B3C3	2(双角度窝)	3(H10)	3(凸形墩头)
6 [#]	A2B2C1	2(双角度窝)	2(H9)	1(凸形墩头)
7 [#]	A3B2C3	3(不划窝)	2(H9)	3(凸形墩头)
8 [#]	A3B1C1	3(不划窝)	1(H8)	1(凸形墩头)
9 [#]	A3B3C2	3(不划窝)	3(H10)	2(鼓形墩头)

2.2 密封性能试验结果及分析

对试片进行氦质谱检查,并以试片铆接区漏率作为定量评价指标。为减小随机误差,9种试验方案每种重复5组,再取平均值作为该项试验的最终结果进行分析。试验试片的制备如图5所示。实验数据见表4。

对氦质谱检查结果数据采用极差分析法进行分析。首先,计算各因素在每种水平下对漏率影响的总和 K ,计算公式为:

$$K = K_x^1 + K_x^2 + \dots + K_x^y \quad (1)$$

式中, K 为漏率总和, K_x^y 为因素 x 在第 y 个水平下的

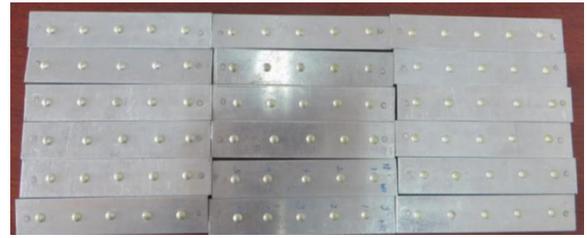


图5 电磁密封铆接试验试片

Fig. 5 Electromagnetic sealing riveting test specimen

表4 试验结果

Tab. 4 Test results

试验号	A划窝形式	B底孔公差等级	C墩头形式	漏率/ $10^{-7} \text{pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$
1 [#]	1(单角度窝)	1(H8)	1(凸形墩头)	0.03
2 [#]	1(单角度窝)	2(H9)	2(鼓形墩头)	0.05
3 [#]	1(单角度窝)	3(H10)	3(凸形墩头)	0.04
4 [#]	2(双角度窝)	1(H8)	2(鼓形墩头)	0.02
5 [#]	2(双角度窝)	3(H10)	3(凸形墩头)	0.03
6 [#]	2(双角度窝)	2(H9)	1(凸形墩头)	0.02
7 [#]	3(不划窝)	2(H9)	3(凸形墩头)	0.20
8 [#]	3(不划窝)	1(H8)	1(凸形墩头)	0.10
9 [#]	3(不划窝)	3(H10)	2(鼓形墩头)	0.30

试验漏率, x 为因素, y 为该因素的每种水平。对 K 值进行极差分析。极差分析数据见表5。

对试验数据进一步分析可得:

表5 试验结果极差分析表

Tab. 5 Test results range analysis table

因素	K_1	K_2	K_3	极差 R
A划窝形式	0.12	0.07	0.60	0.18
B底孔公差	0.15	0.27	0.37	0.07
C墩头形式	0.21	0.37	-	0.05

(1)对比 K_A^1, K_A^2, K_A^3 最优为 $K_A^2(0.07)$,即A因素在2水平下漏率总和最小,可得最优的划窝参数为双角度窝;对比 K_B^1, K_B^2, K_B^3 ,最优为 $K_B^1(0.15)$,可得最优底孔参数为H8;对比 K_C^1, K_C^2, K_C^3 ,最优的墩头形式为 K_C^1 ,即最优墩头参数为凸形墩头(凸形墩头试验次数为鼓形墩头的2倍,此处应将0.42修正为0.21,优于鼓形墩头0.37)。

(2)从极差分析的结果可得,因素A划窝形式的极差为0.18,因素B底孔直径的极差为0.07,因素C墩头形式的极差为0.05,因此,划窝形式对密封性能的影响最大。

分析其机理,干涉密封通过铆钉和铆钉孔形成干涉配合达到密封目的,而孔口制窝形式对于铆钉成型过程中的材料流向有非常重要的影响。

2.3 密封性能试验后的干涉量分析

为佐证试验结果,对漏率测试后的试验件进行了干涉量检测。采用相对干涉量法进行计算,即相对干涉量=(铆后钉径-铆前孔径)/铆前孔径×100%。满足自封铆钉铆接技术条件的干涉量应为0.5%~6%,测量结果及计算结果如表6所示。分析数据可得:

(1)铆接后铆钉干涉量沿靠近墩头向远离墩头侧递减,该规律与前期工程化应用过程中手工锤击铆接的干涉量检查结果一致;

(2)密封面不划窝或单角度窝的情况下铆接,只

能在靠近墩头侧形成合格干涉量,远离墩头侧无法形成合格干涉量。其中密封面不划窝情况下综合干涉量难以保证大于0.5%要求,单角度划窝情况下综合干涉量也仅能达到稍大于0.5%要求,其密封性能可靠性需进一步探究;

(3)密封面双角度划窝的情况下铆接,不仅会在墩头侧形成较大的干涉量,在整个钉长方向上的干涉量也能满足要求。验证了划窝形式对密封性能影响最大的结论,具体情况见图6;

(4)相比其他划窝形式,密封面双角度窝后进行电磁密封铆接,密封性能更可靠。

表6 电磁密封铆接后干涉量检验

Tab. 6 Results of the riveting interference-fit size after electromagnetic self-sealing riveting

试验号	试验方案	底孔 实测值/mm	不同测量部位铆后直径/mm				不同测量部位干涉量/%				平均干涉量/%
			D1	D2	D3	D4	D1	D2	D3	D4	
1#	A1B1C1	4.02	4.03	4.03	4.05	4.05	0.32	0.35	0.72	0.86	0.56
2#	A1B2C2	4.03	4.04	4.04	4.06	4.06	0.28	0.32	0.73	0.83	0.54
3#	A1B3C3	4.04	4.05	4.05	4.07	4.08	0.33	0.35	0.83	0.88	0.60
4#	A2B1C2	4.02	4.04	4.05	4.06	4.10	0.58	0.78	0.89	2.10	1.09
5#	A2B3C3	4.04	4.06	4.07	4.08	4.12	0.54	0.63	0.88	2.00	1.01
6#	A2B2C1	4.03	4.05	4.06	4.07	4.11	0.52	0.69	0.98	1.88	1.02
7#	A3B2C3	4.03	4.04	4.04	4.05	4.06	0.19	0.28	0.48	0.78	0.43
8#	A3B1C1	4.02	4.03	4.03	4.05	4.05	0.22	0.32	0.68	0.82	0.51
9#	A3B3C2	4.04	4.04	4.05	4.07	4.07	0.12	0.22	0.69	0.76	0.45

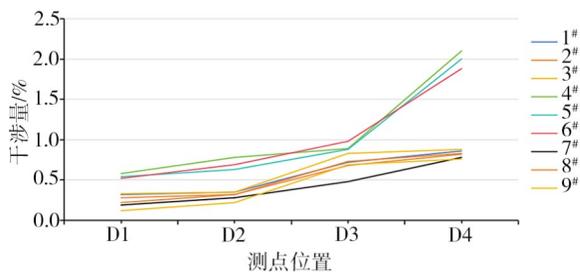


图6 电磁密封铆接后干涉量分析

Fig. 6 Analysis of the riveting interference-fit size after electromagnetic self-sealing riveting

3 结论

(1)对比双角度窝、单角度窝、不划窝三种划窝形式,最优的划窝参数为双角度窝;对比H8、H9、H10三种底孔精度,最优底孔参数为H8;对比凸形墩头和鼓形墩头,最优墩头参数为凸形墩头。从正交试验的方差分析结果可得,划窝形式对密封性能的影响最大,原因为划窝形式对铆接过程中材料组织的流向有重要影响。

(2)根据干涉量检测结果,密封面不划窝或单角度窝的情况下铆接,无论何种底孔直径、墩头形式,

均难以在整个钉长方向上形成可靠的干涉量;密封面双角度划窝的情况下铆接,会在墩头侧形成较大的干涉量,在整个钉长方向上的干涉量也能满足0.5%干涉量要求。验证了划窝形式对密封性能影响最大的结论,而且双角度窝形式下密封铆接稳定性和可靠性最高。

(3)干涉量检测结果进一步表明,在试片未达到自封铆接试片标准要求的干涉量情况下,氦质谱检漏的漏率也可达到密封要求。因此,从工程化应用角度考虑,干涉量的要求在特定情况下可以放宽至0.4%。

参考文献

[1] 陈先有,黄俊波. 直升机密封铆接技术[J]. 航空制造技术,2018(4):32-37.
CHEN X Y, HUANG J B. Helicopter seal riveting technology [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018 (4):32-37.
[2] 中华人民共和国航空工业部. 半圆头自封铆钉铆接技术条件[S],QJ1548—1988.
Ministry of Aviation Industry of the People Republic of China. Riveting technical specifications of round head self-sealing rivets[S], QJ1548—1988.

[3] 梁洪涛. 航天产品密封铆接工艺方法研究[J]. 航天制造技术, 2015(5): 19-22.

LIANG H T. Research on sealing riveting technology of aerospace products [J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2015(5): 19-22.

[4] 梁莹, 闫强. 基于 DEFORM-3D 的自封铆接工艺研究[J]. 航空制造技术, 2017(8): 72-74.

LIANG Y, YAN Q. Research on self-sealing riveting process by DEFORM-3D [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017(8): 72-74.

[5] 杨亚文, 李永策. 干涉铆接及其新的成型方法[J]. 沈阳航空工业学院学报, 1999(4): 19-22.

YANG Y W, LI Y C. Intervening concerted riveting and a new riveting method [J]. Journal of Shenyang Aerospace University, 1999(4): 19-22.

[6] 马兴海, 刘琦. 电磁铆接技术在航天产品上的应用[J]. 航天制造技术, 2009(4): 40-45.

MA X H, LIU Q. Application of electromagnetic riveting technology on aerospace products [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009(4): 40-45.

[7] CAO Z Q, CARDEW H. Interference-fit riveting technique in fiber composite laminates [J]. Aerospace Science and Technology, 2006, 10(4): 327-330.

[8] 盛熙, 曹增强. 复合材料的干涉配合铆接[J]. 机械科学与技术, 2004(4): 434-436.

SHENG X, CAO Z Q. Interference-fit riveting of composite structures [J]. Mechanical Science and Technology, 2004(4): 434-436.

[9] 王洁一, 曹增强. 基于手持式电磁铆接设备的无头铆钉干涉配合铆接工艺研究[J]. 机械科学与技术, 2019(8): 18-20.

WANG J Y, CAO Z Q. On headless rivet interference-fit riveting based on hand-held electromagnetic riveting equipment [J]. Mechanical Science and Technology, 2019(8): 18-20.

[10] 曹增强, 秦龙刚. 钛合金结构干涉配合铆接工艺研究[J]. 航空制造技术, 2015(10): 66-69.

CAO Z Q, QIN L G. Study on interference-fit riveting process on titanium alloy structure [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015(10): 66-69.

[11] ZHANG X, ZHANG M Y, SUN L Q. Numerical simulation and experimental investigations on TA1 titanium alloy rivet in electromagnetic riveting [J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2018, 18(3): 887-901.

[12] 仇继伟, 左杨杰. 针对飞机小曲率结构的半自动化电磁铆接系统设计[J]. 机床与液压, 2022(20): 135-141.

QIU J W, ZUO Y J. Semi-automatic electromagnetic riveting system design for small curvature structures [J]. Machine Tool and Hydraulics, 2022(20): 135-141.

[13] 李士宁, 高丽丽. 密封电磁铆接力学性能研究[J]. 航空精密制造技术, 2021(2): 58-67.

LI S N, GAO L L. Research on mechanical properties of sealed electromagnetic riveting [J]. Aeronautical Precision Manufacturing Technology, 2021(2): 58-67.