

7系列高强度铝合金铆钉结构优化试验研究

王洋*, 刘娅婷, 刘召鑫, 李建冬, 刘双蕾, 张兆

中国运载火箭技术研究院, 首都航天机械有限公司, 北京

收稿日期: 2024年1月30日; 录用日期: 2024年3月27日; 发布日期: 2024年4月7日

摘要

7系列高强度铝合金铆钉是未来取代2系列铝合金铆钉的重要连接件, 在航空、航天领域具有广阔的应用前景。结合当前航天领域大范围应用自动化技术的现状, 有必要对7系列高强度铝合金铆钉进行适应自动钻铆应用的结构改进。本文通过试验研究, 验证了结构改进后的铆钉在铆接过程中的适应性, 及其在力学性能方面的可靠性, 为新材料、新结构铆钉的标准制定和应用推广奠定了技术基础。

关键词

高强度, 铝合金, 铆钉结构, 优化试验, 研究

Experimental Study on the Structure Optimization of 7 Series High Strength Aluminum Alloy Rivet

Yang Wang*, Yating Liu, Zhaoxin Liu, Jiandong Li, Shuanglei Liu, Zhao Zhang

Capital Aerospace Machinery Co. Ltd., China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing

Received: Jan. 30th, 2024; accepted: Mar. 27th, 2024; published: Apr. 7th, 2024

Abstract

7 series high strength aluminum alloy rivet is an important connector to replace 2 series aluminum alloy rivet in the future, and has a broad application prospect in the aerospace field. Considering the current situation of large-scale application of automation technology in the aerospace field, it is necessary to improve the structure of 7 series high strength aluminum alloy rivet to adapt to the application of automatic drilling and riveting. Through experimental research, the

*通讯作者。

文章引用: 王洋, 刘娅婷, 刘召鑫, 李建冬, 刘双蕾, 张兆. 7系列高强度铝合金铆钉结构优化试验研究[J]. 机械工程与技术, 2024, 13(2): 53-62. DOI: 10.12677/met.2024.132006

adaptability of the improved rivet in the riveting process and its reliability in mechanical properties are verified, which lays a technical foundation for the standard formulation and application promotion of new materials and new structure rivets.

Keywords

High Strength, Aluminum Alloy, Rivet Structure, Optimization Test, Research

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

铆钉连接被广泛应用于航空航天领域。目前航天飞行器基体夹层铆接多采用 2 系列铝合金铆钉, 如 2A10 等。随着 7 系列高强铝合金的逐渐应用, 7050 制铆钉由于其较高的比强度、比刚度以及耐腐蚀性能等特点未来将逐步取代常规 2 系列铝合金铆钉, 作为 Al-Zn-Mg-Cu 系列高强铝合金已在高强、高应力腐蚀、高断裂韧度的飞机结构件被应用。同时, 现阶段自动钻铆技术应用提高了壳段的铆接质量和装配效率, 自动铆接设备实现铆钉的排钉、输送、夹持、插钉等工序的自动化。目前国内航天领域铆钉尾部为直边, 插钉入钉孔时易和钉孔边缘或者内壁干涉, 影响送钉成功率, 造成质量隐患, 同时送钉系统中的钉管使用一定时间后内壁会出现不规则磨损, 导致钉管卡钉[1]。

国内外相关领域广泛开展铆钉结构优化以改善自动化过程。如美国国家航天制定军用标准, 规制铆钉尾部制出相应倒角, 缓解了卡钉现象[2]。商飞制定标准 YSA659, 铆钉尾部采用大圆弧结构。航天领域对常用的 2 系列铝合金铆钉结构进行了优化试验研究, 验证了优化后的铆钉在改善自动钻铆性能方面的优越性。航天领域制定了 7 系列高强度铝合金材料的铆钉标准, 以期在型号上广泛推广应用。

本文为适应未来研制要求, 充分对接先进自动钻铆工艺, 开展新型 7 系列高强度铝合金铆钉适应自动钻铆应用的结构改进研究, 并通过试验验证了改进后铆钉的铆接适应性和强度可靠性, 为新技术、新材料的应用奠定了基础。

2. 7 系列高强度铝合金铆钉结构优化方案

航天一院在 7 系列高强度铆钉标准制定过程中, 部分继承了国外航空、航天倒角铆钉倒角制定原则 ($R_f \approx 0.3 d$) 并充分验证了手工铆接工况和自动铆接工况[3], 手工铆接方面, 由于 7050 铆钉强度较高, 较 2A10 铆钉抗拉强度高出约 100 MPa, 存在铆接成型困难问题, 因此通过成型力试验和成型仿真试验, 验证倒角后手工铆接成型力在强度允许范围内达到最小值, 降低手工铆接成型难度。自动铆接方面, 针对倒角后的铆钉开展了规格全系列自动插钉试验, 证实了所制定的倒角相较于直边铆钉卡钉率降低近 70%, 验证了 7 系列高强度铝合金铆钉结构优化方案, 并顺利通过了各类非破坏性检验, 如尺寸与公差、外观、表面粗糙度、标志、镀层种类等试验及各类破坏性检验, 如盐雾、霉菌、湿度、剪切、铆接、铆接拉脱力、自动铆接通过率、铆接安装适应性等试验[4]。7050 倒角的半圆头、100°沉头铆钉企业标准见图 1、倒角尺寸见表 1。

3. 改进型 7 系列高强度铝合金铆钉成型性能试验

由于 7050 铆钉强度较高, 存在铆接成型困难问题, 本文通过铆接 7050 铆钉在不同基体夹层材料试

片, 涉及头型有半圆头、100°沉头两种, 规格为 $\varphi 2.5$ 、 $\varphi 6$, 验证铆接成型性, 见图2。倒角尺寸 Rf 取自 7050 倒角铆钉标准, 见表1。为 Rf = 0.75、1.8。

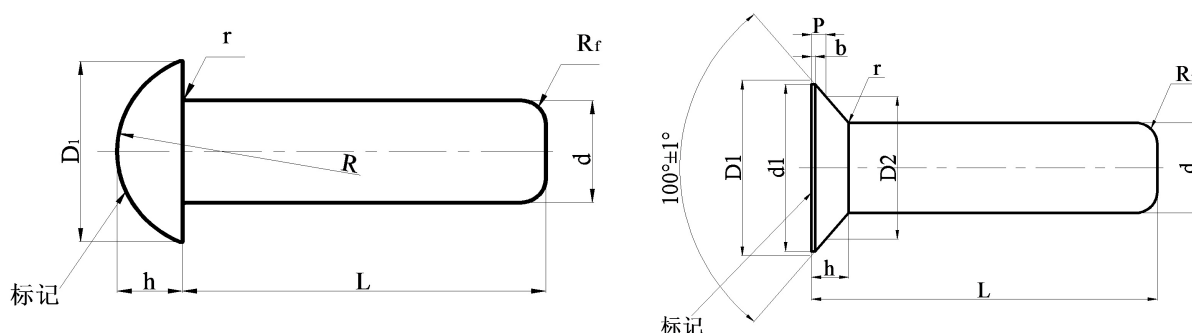


Figure 1. Schematic diagram of 7050 chamfer rivet standard

图 1. 7050 倒角铆钉标准示意图

Table 1. Standard chamfer size of 7050 (Rf) (unit: mm)

表 1. 7050 标准倒角尺寸 Rf (单位: mm)

铆钉公称直径		2.5	3	3.5	4	5	6
d	基本尺寸	2.5	3.0	3.5	4.0	5.0	6.0
	极限偏差			+0.10	0		+0.15 0
D1	基本尺寸	4.6	5.3	6.3	7.1	8.8	11
	极限偏差	±0.24			±0.29		±0.35
h	基本尺寸	1.6	1.8	2.1	2.4	3.0	3.6
	极限偏差			±0.20			±0.24
r max		0.2		0.3			
R	参考	2.5	2.9	3.4	3.8	4.7	6
	Rf ± 0.2	0.75	0.9	1	1.2	1.5	1.8



Figure 2. Specifications for 100° countersunk head $\varphi 2.5$ rivets and specifications for 100° countersunk head, semi-round head $\varphi 6$ rivets

图 2. 规格为 100°沉头 $\varphi 2.5$ 铆钉和规格为 100°沉头、半圆头 $\varphi 6$ 铆钉

7050 普通铆钉共涉及 $\varphi 2.5$ 、 $\varphi 3$ 、 $\varphi 4$ 、 $\varphi 5$ 、 $\varphi 6$ 五个规格, 选取最小和最大两个规格进行铆接验证试验, 其中铆钉长度结合前期研制产品确定为 $\varphi 2.5 \times 13$ 、 $\varphi 6 \times 28$ 。此外, 为验证不同头型铆钉铆接性能存在的差异, $\varphi 6$ 规格铆钉头型选取 100°沉头和半圆头两种。结合铆钉使用的实际工况, 铆接基体夹层材料选取复合材料 + 2A14-T6、铸铝 ZL205A-T6、2A14-T6、7050-T73 四种材料, 其中针对“复合材料 +

2A14-T6”的方案，铆接镢头应处于铝合金板一侧，钉头处于复合材料板侧。夹层厚度按照 GBn248-85《铆钉专用技术条件》中对应规格选用。采用单一变量的方法设计 7050 普通铆钉铆接验证方案[5]，共计 12 组，每组方案需试验件 8 件，具体验证方案见表 2。

Table 2. 7050 common rivet verification scheme (unit: mm)

表 2. 7050 普通铆钉验证方案(单位: mm)

方案	头型	规格	夹层材料				夹层厚度 mm	
			复合材料 + 2A14-T6	铸铝 ZL205A-T6	2A14-T6	7050-T7451		
方案 1	100°沉头	2.5 × 13	√				9 ± 0.2	
方案 2				√				
方案 3						√		
方案 4								√
方案 5	100°沉头	6 × 28	√				19 ± 0.2	
方案 6				√				
方案 7					√			
方案 8						√		
方案 9	半圆头	6 × 28	√				19 ± 0.2	
方案 10				√				
方案 11					√			
方案 12						√		

记录镢头高度、直径、铆钉铆接后有无损伤；镢头直径记录值取镢头直径的最大值与最小值的平均值；镢头高度不同位置测量 3 次取平均值。铆接结果见表 3，新材料 7050 铆钉铆接性能良好，成型均可控制在规范范围内，铆接后无裂纹。方案 1~方案 4 为 $\phi 2.5 \times 13$ (100°沉头)的 7050 材料倒角铆钉与复合材料 + 2A14-T6、铸铝、2A14-T6、7050-T7451 进行试片铆接试验，见图 3。方案 5~方案 8 为 $\phi 6 \times 28$ (100°沉头)倒角铆钉与复合材料 + 2A14-T6、铸铝、2A14-T6、7050-T7451 进行试片铆接试验，见图 4。方案 9~方案 12 为 $\phi 6 \times 28$ (半圆头)与复合材料 + 2A14-T6、铸铝、2A14-T6、7050-T7451 进行试片铆接试验，见图 5。

Table 3. Excerpt of riveting test result record table (unit: mm)

表 3. 铆接试验结果记录表节选(单位: mm)

试验方案	试验序号	铆钉规格	夹层材料	夹层厚度 (mm)	镢头直径 (mm)	镢头高度 (mm)	铆接后外观情况 放大检查
方案 1	1	2.5 × 13 (100°沉头)	复合材料 + 2A14-T6	9	3.7	1.3	无裂纹
	2			9	3.8	1.1	无裂纹
	3			9	3.6	1.2	无裂纹
	4			9	3.7	1.1	无裂纹
	5			9	3.6	1.1	无裂纹
	6			9	3.7	1.2	无裂纹
	7			9	3.7	1.4	无裂纹
	8			9	3.8	1.3	无裂纹
方案 12	89	6 × 28 (半圆头)	7050-T7451	19	9.3	3.3	无裂纹
	90			19	9.3	3.2	无裂纹

续表

方案 12	91	6 × 28 (半圆头)	7050-T7451	19	9.2	3.2	无裂纹
	92			19	9.2	3.3	无裂纹
	93			19	9.3	2.9	无裂纹
	94			19	8.8	3.1	无裂纹
	95			19	9.3	3.1	无裂纹
	96			19	9.1	3.2	无裂纹

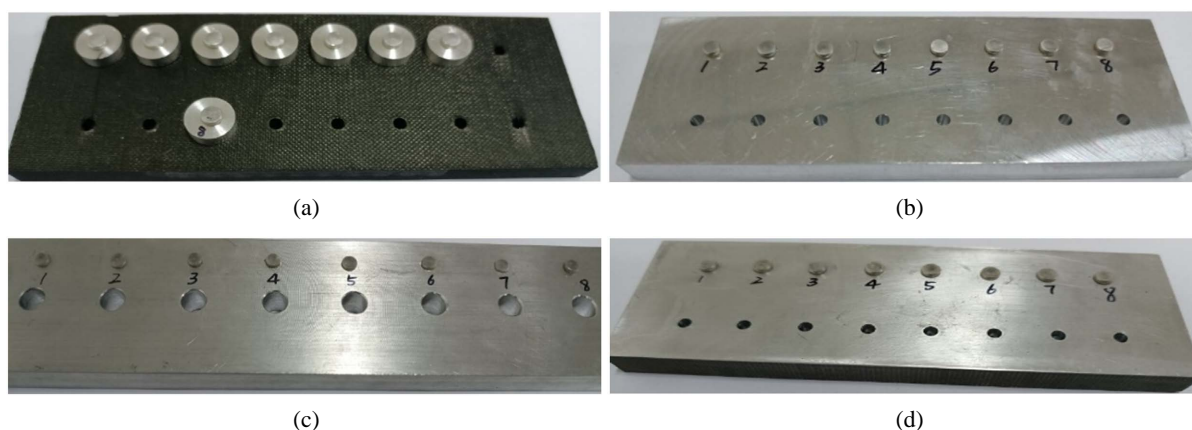


Figure 3. Scheme 1~Scheme 4 Appearance of test piece after riveting. (a) $\phi 2.5 \times 13$ (100°) riveted with composite material + 2A14-T6; (b) $\phi 2.5 \times 13$ (100°) riveted with cast aluminum ZL205A-T6; (c) $\phi 2.5 \times 13$ (100°) riveted with 2A14-T6; (d) $\phi 2.5 \times 13$ (100°) riveted with 7050-T7451

图 3. 方案 1~方案 4 铆接后试片外观。(a) $\phi 2.5 \times 13$ (100° 沉头)与复合材料 + 2A14-T6 铆接; (b) $\phi 2.5 \times 13$ (100° 沉头)与铸铝 ZL205A-T6 铆接; (c) $\phi 2.5 \times 13$ (100° 沉头)与 2A14-T6 铆接; (d) $\phi 2.5 \times 13$ (100° 沉头)与 7050-T7451 铆接

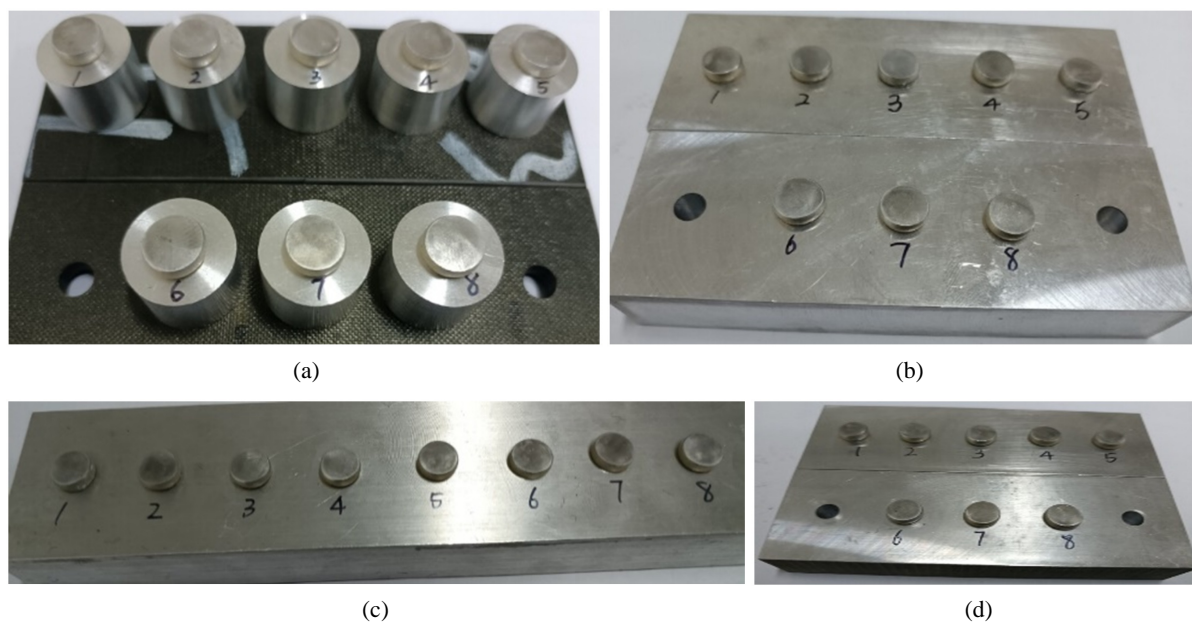


Figure 4. Scheme 5~Scheme 8 Appearance of test piece after riveting. (a) $\phi 6 \times 28$ (100°) riveted with composite material + 2A14-T6; (b) $\phi 6 \times 28$ (100°) riveted with cast aluminum ZL205A-T6; (c) $\phi 6 \times 28$ (100°) riveted with 2A14-T6; (d) $\phi 6 \times 28$ (100°) riveted with 7050-T7451

图 4. 方案 5~方案 8 铆接后试片外观。(a) $\phi 6 \times 28$ (100° 沉头)与复合材料 + 2A14-T6 铆接; (b) $\phi 6 \times 28$ (100° 沉头)与铸铝 ZL205A-T6 铆接; (c) $\phi 6 \times 28$ (100° 沉头)与 2A14-T6 铆接; (d) $\phi 6 \times 28$ (100° 沉头)与 7050-T7451 铆接

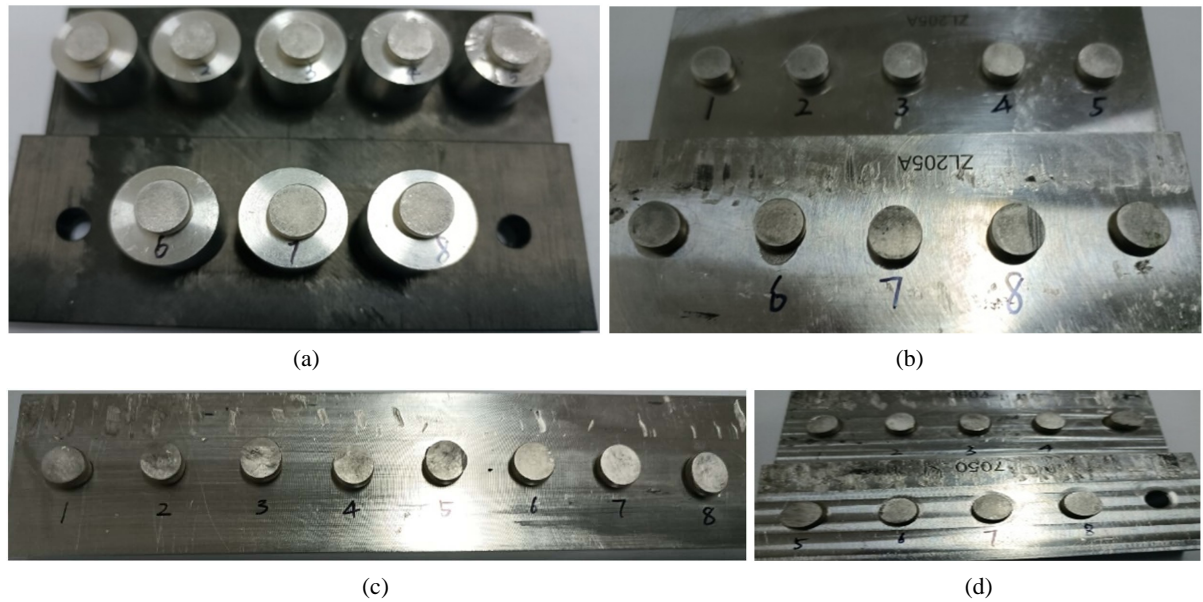


Figure 5. Program 9~Program 12 after riveting test piece appearance. (a) $\phi 6 \times 28$ (half) riveted with composite material + 2A14-T6; (b) $\phi 6 \times 28$ (half) riveted with cast aluminum ZL205A-T6; (c) $\phi 6 \times 28$ (half) riveted with 2A14-T6; (d) $\phi 6 \times 28$ (half) riveted with 7050-T7451

图 5. 方案 9~方案 12 铆接后试片外观。(a) $\phi 6 \times 28$ (半圆头)与复合材料 + 2A14-T6 铆接; (b) $\phi 6 \times 28$ (半圆头)与铸铝 ZL205A-T6 铆接; (c) $\phi 6 \times 28$ (半圆头)与 2A14-T6 铆接; (d) $\phi 6 \times 28$ (半圆头)与 7050-T7451 铆接

由此可以得出, 7050 倒角后铆钉铆接性能良好, 成型均可控制在规范范围内, 铆钉铆接后无裂纹, 与夹层适应性良好。

4. 改进型 7 系列高强度铝合金铆钉的自动铆接适应性验证

聚焦倒角 7 系列高强度铝合金力学性能的影响, 结合现有试验条件和能力, 合理设计试验方案以达到验证效果。根据铆钉长度与试片的适配性及铆钉直径规格使用的频率(图 6), 选定试验铆钉 $\phi 4 \times 16$ 7050 ($L = \delta + (1.2 \sim 1.4) d$), 试片夹层厚度 10 mm, 开展倒角铆钉成型对比试验、倒角铆钉力学性能对比试验。倒角根据表 1, 选定 $R_f = 1.2$ mm, 根据 7050 铆钉标准, 控制铆钉孔直径与铆钉铆成型直径及高度[6] [7], 见表 4。

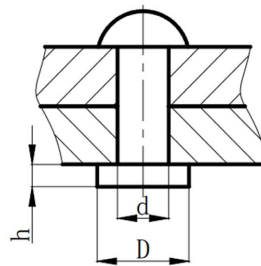


Figure 6. Rivet forming diameter and height

图 6. 铆钉成型直径和高度

倒角铆钉成型对比试验主要用于验证倒角后的铆钉成型性、成型尺寸、成型稳定性不受铆钉倒角的影响。对 20 个试片进行三级标记以区分试片, 分别为试验类型、倒角情况、试片编号, 并进行多媒体记

录。手工铆接墩头成型对比试验、自动铆接墩头成型对比试验均采用剪切试验试片进行试验，手工铆接试片采用试片铆接工装进行见图 7，自动铆接试片采用伺服压铆机进行[8]，见图 8。

Table 4. Rivet hole diameter, forming diameter and height size requirements (unit: mm)

表 4. 铆钉的铆钉孔直径、成型直径及高度尺寸要求(单位: mm)

铆钉直径 d		4
铆钉孔直径	基本尺寸	4.1
	极限尺寸	0~+0.12
铆成型直径 D	基本尺寸	6.0
	极限偏差	± 0.4
铆成型高度 h	基本尺寸	2.2
	极限偏差	± 0.4



Figure 7. Locate the riveting test piece manually

图 7. 采用试片铆接工装定位手工铆接试片



Figure 8. Riveting test piece was prepared by servo riveting machine

图 8. 采用伺服压铆机进行自动铆接试片制备

试验完毕进行数据记录，对比分析手工(或自动)铆接倒角(或不倒角)铆钉墩头高度、墩头直径、10倍放大镜观察墩头是否存在裂纹；试验后按照 20 个试片的三级标记进行多媒体记录，试验结果见表 5。

由此可以得出，无论手工铆接还是自动铆接，7 系列高强度铝合金铆钉倒角对铆接的成型性能不产生影响，自动铆接成型的收敛性优于手工铆接。

Table 5. Comparative test results of chamfered rivet forming (unit: mm)
表 5. 倒角铆钉成型对比试验结果(单位: mm)

试验类型	尾部结构	项目	试片 1	试片 2	试片 3	试片 4	试片 5	均值	方差
手工铆接墩头成型对比试验	倒角 R1.2	墩头高度	5.6	5.7	6.2	6.1	5.9	5.90	0.052
		墩头直径	2.5	2.1	1.9	1.8	2.6	2.18	0.102
		裂纹情况	无	无	无	无	无	\	\
	不倒角	墩头高度	6.4	5.6	5.6	5.8	6.2	5.92	0.050
		墩头直径	2.6	1.8	2.0	2.2	2.3	2.18	0.101
自动铆接墩头成型对比试验	倒角 R1.2	墩头高度	6	6.2	6.1	5.9	5.9	6.02	0.049
		墩头直径	2.1	2.2	2.0	2.4	2.2	2.18	0.100
		裂纹情况	无	无	无	无	无	\	\
	不倒角	墩头高度	6	6.1	6.1	5.8	6.2	6.04	0.046
		墩头直径	2.0	2.2	2.3	2.1	2.3	2.18	0.098
		裂纹情况	无	无	无	无	无	\	\

5. 改进型 7 系列高强度铝合金倒角铆钉力学性能对比试验

倒角铆钉力学性能对比试验主要用于验证倒角后的铆钉成型后力学性能不会发生减弱。对 40 个试片进行三级标记以区分试片, 分别为试验类型、倒角情况、试片编号, 并进行多媒体记录。手工铆接剪切力试片采用试片铆接工装定位铆接; 手工铆接拉脱力采用虎钳进行试片的定位; 自动铆接剪切力、自动铆接拉脱力试片采用伺服压铆机进行铆接。剪切、拉脱测试采用 Instron 5985 万能试验机进行[9], 见图 9, 剪切试验铆接试片见图 10、图 11, 剪切试验铆接试片见图 12、图 13。

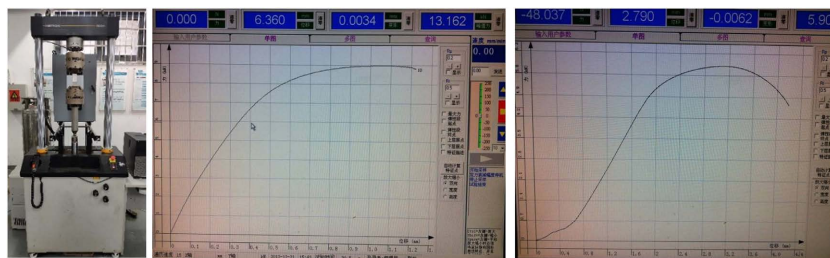


Figure 9. Instron 5985 universal testing machine
图 9. Instron 5985 万能试验机



Figure 10. Shear test riveting photograph
图 10. 剪切试验铆接照片

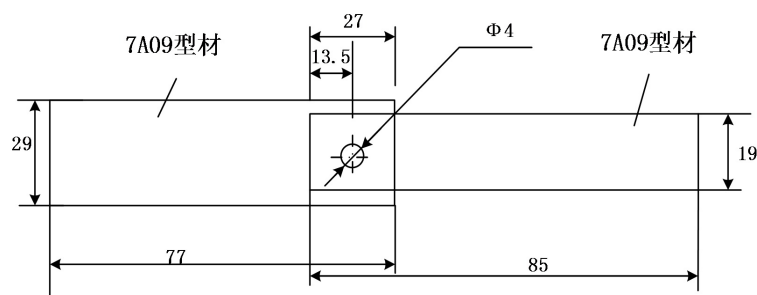


Figure 11. Shear test the specific size of the riveted test piece
图 11. 剪切试验铆接试片具体尺寸



Figure 12. Photo of riveting for pull out test
图 12. 拉脱试验铆接照片

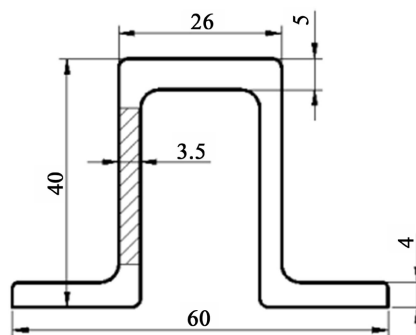


Figure 13. Pull out test the specific size of the riveted test piece
图 13. 拉脱试验铆接试片具体尺寸

试验完毕进行数据记录, 对比分析手工(或自动)铆接倒角(或不倒角)铆钉力学性能, 并分析失效模式, 进行多媒体记录, 试验记录见表 6。

Table 6. Comparative test results of mechanical properties of chamfered rivet (unit: kN)
表 6. 倒角铆钉力学性能对比试验结果(单位: kN)

试验类型	尾部结构	试片 1	试片 2	试片 3	试片 4	试片 5	均值	方差
手工铆接剪切力	倒角 R1.2	3.95	4.04	3.97	3.96	3.91	3.97	0.002
	不倒角	3.99	3.94	4.07	4.06	3.99	3.99	0.002
手工铆接拉脱力	倒角 R1.2	5.35	5.95	6.39	6.09	6.07	5.97	0.117
	不倒角	5.36	5.99	6.48	6.08	5.97	6.01	0.115

续表

自动铆接剪切力	倒角 R1.2	4.01	3.99	3.98	3.87	3.95	3.96	0.018
	不倒角	4.15	3.98	3.92	3.95	4.05	4.02	0.016
自动铆接拉脱力	倒角 R1.2	6.05	5.89	5.90	5.85	6.06	5.95	0.115
	不倒角	6.12	5.93	5.99	6.05	5.96	5.98	0.116

由此可以得出,无论手工铆接还是自动铆接,7系列高强度铝合金铆钉倒角对铆接的力学性能不产生影响,自动铆接力学性能的收敛性优于手工铆接。

6. 结论

本文为适应未来研制要求,充分对接先进自动钻铆工艺,开展新型7系列高强度铝合金铆钉适应自动钻铆应用的结构改进研究,可以得出以下结论:

- 1) 7050 倒角后铆钉铆接性能良好,成型均可控制在规范范围内,铆钉铆接后无裂纹,与夹层适应性良好;
- 2) 倒角对 7050 铆钉铆接的成型性能不产生影响,自动铆接成型的数值收敛性优于手工铆接;
- 3) 倒角对 7050 铆接的力学性能不产生影响,自动铆接力学性能的数值收敛性优于手工铆接。

本文所开展的研究为新材料、新结构铆钉的标准制定和应用推广奠定了技术基础。

参考文献

- [1] 高原. 计算机辅助飞机铆钉连接优化设计[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2022.
- [2] 庄志炜. 基于机器人视觉的铆钉检测与输送技术研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2021.
- [3] 石双江. 飞机钻铆铆钉的自动选配技术研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
- [4] 张启祥. 飞机壁板自动钻铆机送钉系统技术研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- [5] 汪乐. 双机器人协同电磁铆接技术研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
- [6] 赵泽. 自动钻铆机刚度及其对铆接质量的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- [7] 陈福玉. 航空铆接连接件疲劳寿命研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.
- [8] 蒋君侠, 张启祥, 朱伟东. 飞机壁板自动钻铆机气动送钉技术[J]. 航空学报, 2018(1): 45-49.
- [9] 檀甜甜. 弹箭体舱段自动钻铆用铆钉结构优化试验[J]. 航空精密制造技术, 2023(3): 31-35.