

特种成形

## 自然时效对 5A06 铝合金自冲铆接接头性能的影响

雷军乐<sup>1</sup>, 刘高宇<sup>1,2</sup>, 赵伦<sup>2</sup>, 雷乐<sup>2</sup>, 叶凯<sup>2</sup>, 卢杰豪<sup>2</sup>,  
李承旺<sup>2</sup>, 张亚平<sup>2</sup>, 宋振东<sup>2</sup>, 鲍丹阳<sup>2</sup>

(1. 桂林理工大学 机械与控制工程学院, 广西 桂林 541004; 2. 深圳职业技术大学 超声技术研究所, 广东 深圳 518055)

**摘要:** 为了研究自然时效对自冲铆接接头的影响, 采用 5A06 铝合金进行自冲铆接, 通过拉伸试验, 从宏观层面研究自然时效对于 5A06 铝合金自冲铆接接头性能的影响, 从微观层面分析了接头拉脱失效的形式和机理。结果表明: 经过一年的自然时效, 接头特有的机械内锁结构由于其应力的释放, 畸变程度降低, 接头的平均峰值载荷下降了 15.28%、平均失效位移上升了 58.37%、平均能量吸收提升了 55.92%。接头不同应力集中处的应力释放不均匀, 上、下板应力的集中释放速率不一致, 导致两组试验主要失效的部位不同。在经过一年自然时效处理后, 接头失效点处的韧窝分布更加密集, 形状更大且更深, 接头的脆性降低, 塑性增加。

**关键词:** 自冲铆接; 5A06 铝合金薄板; 自然时效; 静力学性能; 微观分析

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.04.017

**中图分类号:** TH131.1

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3940 (2024) 04-0125-06

## Influence of natural aging on properties of self-piercing riveting joint for 5A06 aluminum alloy

Lei Junle<sup>1</sup>, Liu Gaoyu<sup>1,2</sup>, Zhao Lun<sup>2</sup>, Lei Le<sup>2</sup>, Ye Kai<sup>2</sup>, Lu Jiehao<sup>2</sup>, Li Chengwang<sup>2</sup>,  
Zhang Yaping<sup>2</sup>, Song Zhendong<sup>2</sup>, Bao Danyang<sup>2</sup>

(1. College of Mechanical and Control Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China;

2. Institute of Ultrasonic Technology, Shenzhen Polytechnic University, Shenzhen 518055, China)

**Abstract:** In order to study the influence of natural aging on self-piercing riveting joint, the self-piercing riveting was conducted with 5A06 aluminum alloy. From the macroscopic level, the influences of natural aging on the properties of 5A06 aluminum alloy self-piercing riveting joint were studied by tensile experiment, and from the microscopic level, the mode and mechanism of pull-out failure for joint were analyzed. The results show that after one year of natural aging, the distortion degree of joint with the special mechanical interlock structure reduces due to the release of its stress. The average peak load of joint decreases by 15.28%, the average failure displacement increases by 58.37%, and the average energy absorption increases by 55.92%. The stress release at different stress concentration positions of joint are not uniform, the stress concentration release rates of the upper and lower sheets are different, which leads to different failure locations in the two groups of experiments. After one year of natural aging treatment, the distribution of dimples at the failure point of joint is denser, the shape is larger and deeper, the brittleness of joint decreases, and the plasticity increases.

**Key words:** self-piercing riveting; 5A06 aluminum alloy sheet; natural aging; static mechanical property; microscopic analysis

在“碳中和与碳达峰”目标的驱动下, 汽车行

业正朝着电动化和轻量化方向发展, 轻量化是汽车行业节能减排的关键所在<sup>[1]</sup>。铝合金由于其具有密度小、强度高、导电性良好、耐腐蚀性能好、加工性能好等特点, 被广泛应用于轻量化车身制造等方面<sup>[2]</sup>。由于传统的电阻电焊不能够直接有效地将铝合金等轻合金薄板材料进行连接, 为了满足对铝合金的连接需求, 自冲铆接 (Self-piercing Riveting, SPR) 技术得到快速发展<sup>[3-4]</sup>。

近年来, 大量研究发现, 自然时效对于金属连接接头和材料有着显著的影响。席忠民等<sup>[5]</sup>研究了挤压温度和时效制度对 6082 铝合金挤压型材自冲铆接开裂的影响, 发现提高挤压温度可以减

**收稿日期:** 2023-08-14; **修订日期:** 2023-11-20

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目 (12104324); 高层次人才科研启动项目 (6022310046K, 6024330003K); 深职大-新栋力超声波焊接技术研发中心项目 (602331009PQ); 深圳职业技术大学博士后出站后期资助项目 (6023271014K1); 广东省普通高校特色创新项目 (504-6020210006T); 深圳市优秀科技创新人才培养项目 (RCBS20210706092213010); 广西自然科学基金资助项目 (2022GXNSFAA035528)

**作者简介:** 雷军乐 (1982-), 女, 博士, 教授

**E-mail:** 40911409@qq.com

**通信作者:** 赵伦 (1988-), 男, 博士, 特聘副研究员

**E-mail:** zhaolun@szpu.edu.cn

少 6082 铝合金挤压型材表面的粗晶层厚度,从而减少铆接过程中的开裂现象。在保证成形参数最优的前提条件下,6082 铝合金接头效果最好的时效制度为 185 ℃/8 h。刘洋等<sup>[6]</sup>提出自冲铆接接头存在残余应力,机械连接疲劳失效主要是因为其产生微动磨损所导致的,通过去应力退火可以提高接头在高疲劳载荷下的疲劳寿命。魏翠琴等<sup>[7]</sup>研究了自然时效对 6005A-T4 铝合金搅拌摩擦焊接接头组织性能的影响,试验结果表明,自然时效后的材料与母材相比,其抗拉强度提升了 5.2%,伸长率提升了 9.7%,断口基本一致,韧窝尺寸较大、较深,与伸长率结果一致。张慧敏等<sup>[8]</sup>分析了焊后 30 min 和自然时效 8 个月两种情况下 6061-O 铝合金和 Ti6Al4V 合金异种金属超声焊接接头的维氏硬度、最大拉伸载荷和断裂能,结果表明,自然时效可以显著增大接头的最大拉伸载荷,但是接头的断裂能在时效后反而降低。Abderahmane D 等<sup>[9]</sup>研究了自然时效对 2024-T3 铝合金搅拌摩擦焊的拉伸性能及韧性的影响,试验结果表明,经过两年的自然时效,焊缝强度(机械抗力)提高了 9%,但由于伸长率较低,焊缝韧性下降了 19%。纪艳丽等<sup>[10]</sup>研究了自然失效及 Cu 含量对 6061 型铝合金塑性的影响,结果显示,随着自然失效的进行,合金的均匀塑性及总伸长率先上升后减小;添加 Cu 后,合金的均匀塑性得到了提高,但由于 Cu 的添加增大了动态应变时效对应变速率硬化的负贡献,因此,造成后均匀塑性下降。许建飞等<sup>[11]</sup>使用快速傅里叶变换分析了 6061 铝合金在不同自然时效下的波特文-勒夏特利埃效

应 (Portevin-Le Chatelier, PLC), 试验结果显示,自然时效不会改变材料的弹性模量,但 6061 铝合金的屈服强度和抗拉强度逐渐增大,应力跌落幅值逐渐减小。林森等<sup>[12]</sup>分析了 2A12 和 6061 航空铝合金自冲铆接接头的失效形式,其主要失效形式为拉脱失效。试验结果显示:钉脚的张开度以及铆钉材料径向流速和铆接的最大冲压载荷均与铆钉高度呈正相关性,随着铆钉高度的增加,接头的残余底量减小。李冰等<sup>[13]</sup>采用连续流变挤压成形技术,通过预热腔体及模具、降低挤压轮速度的方式来消除 7075 铝合金线材在挤压成形过程中的裂纹缺陷。试验结果表明,当材料通过预热腔体及模具处理后,材料组织更加均匀,第二相的偏聚减少,提高了材料塑性。

由于研究自然时效对于自冲铆接接头影响的报道很少,本试验通过制备两组自冲铆接接头,将其中一组接头施加一年自然时效,与不做任何处理的接头进行对比,并结合静力学、失效模式、微观组织进行分析,从宏观以及微观层面分析自然时效对自冲铆接接头的静力学性能的影响。

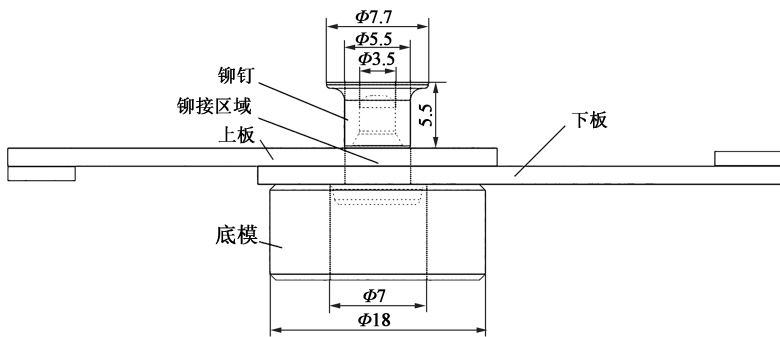
## 1 试验

### 1.1 自冲铆接试验

本试验选取 5A06 铝合金薄板作为连接板材,铝板尺寸为 110 mm×20 mm×1.5 mm。试验设备采用自冲铆接机器人,如图 1a 所示。铆钉和底模的尺寸如图 1b 所示。为了确保 SPR 接头的可靠性,本次试验所有铆接件均在同一型号设备、同一铆接参



(a)



(b)

图 1 自冲铆接机器人 (a) 和铆钉及底模尺寸 (b)

Fig. 1 Self-piercing riveting robot (a) and dimensions of rivet and die (b)

数下制备。采用在线检测系统观测连接过程中的载荷-位移曲线, 制备 20 个自冲铆接试样, 其中 10 个试样为原始试样, 简称为 TS-A 组; 10 个试样静置一年进行自然时效试验, 简称为 TS-B 组。

## 1.2 拉伸试验

对 TS-A 组和 TS-B 组接头进行拉伸试验, 并参照 GB/T 16957—2012<sup>[14]</sup> 深入探究其静力学性能。试验中, 采取在试样两端分别放置 20 mm 垫片的方式解决拉伸过程中试样两端出现受力不对称而导致附加扭矩的问题, 试验拉伸速率为  $5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。拉伸试验设备使用美国 MTS-CMT4304 型微机——控制电子万能试验机, 且在同一参数下进行。

## 2 结果与讨论

### 2.1 静力学性能分析

接头的载荷-位移曲线如图 2 所示。载荷-位移曲线可以分为 3 个阶段, 弹性变形阶段 I、塑性变形

阶段 II 和快速失效阶段 III。处于弹性变形阶段的试样主要体现为其机械内锁部分承受外部载荷后发生可逆变形。由图 2 可得, 在弹性变形阶段, 由载荷-位移曲线各点处的斜率可以明显看出, 两者的变化趋势并无明显变化, 这说明自然时效对材料弹性模量无明显影响; TS-A 组接头的弹性变形阶段的长度区间大于 TS-B 组接头, TS-B 组接头的屈服强度小于 TS-A 组接头, 这是因为: 铆接成形后, 接头应力集中处出现了应力松弛, 因板材本身的抗变形能力, 会不断对接头施加额外应力, 在这种初应力的长期影响下, 接头会产生局部塑性形变, 导致接头的静载强度降低、屈服强度降低。TS-B 组接头在塑性变形阶段的长度区间大于 TS-A 组接头, 并且在塑性变形阶段 TS-A 组接头的载荷-位移曲线带有明显尖峰和屈服的平台, 而 TS-B 组接头的载荷-位移曲线的尖峰消失, 基本形成拱顶型曲线形貌。TS-A 组接头的快速失效阶段小于 TS-B 组接头。

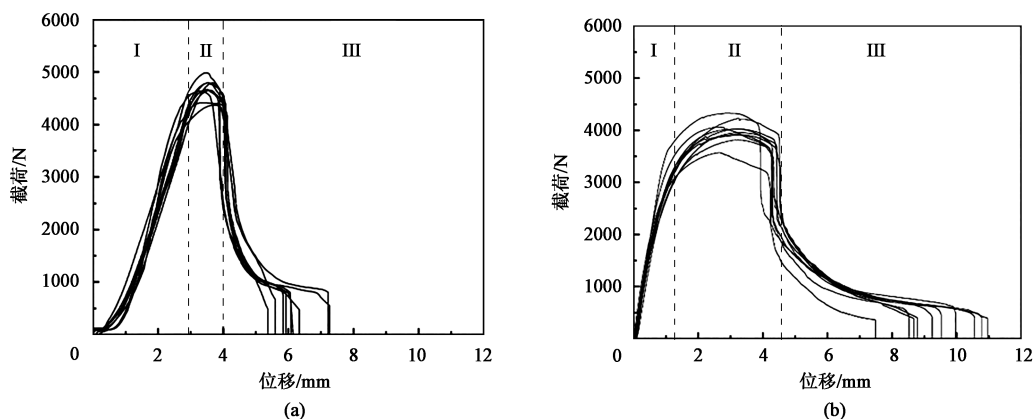


图2 接头的载荷-位移曲线

(a) TS-A (b) TS-B

Fig. 2 Load-displacement curves of joints

TS-A、TS-B 两组接头的平均峰值载荷、平均失效位移和平均能量吸收的数值如图 3 所示。由图 3a 看出, TS-B 组接头的平均峰值载荷 (3932.29 N) 比 TS-A 组接头 (4641.29 N) 下降了 15.28%。这主要是因为: 应力松弛造成接头丧失了进一步承受外载的能力, 在短时间内由于接头本身的蠕变是一个缓慢且微小的变化过程, 不会对接头承受载荷的能力有明显影响, 均是在长期的影响下, 接头自身弹性形变和塑性形变的总和不减, 部分弹性形变转换为塑性形变。TS-A 组接头的平均失效位移 (6.09 mm) 小于 TS-B 组接头 (9.66 mm), 如图 3b 所示, 试验结果显示一年自然时效后, 接头的平均失效位移上升了 58.37%。在一年的自然时效过程

中, 由于材料本身的组织变化以及接头内应力的释放, 畸变程度降低, 这使得其屈服强度降低、伸长率提升<sup>[15]</sup>。如图 3c 所示, TS-B 组接头的平均能量吸收量 (19.47 J) 相比于 TS-A 组接头 (12.49 J) 提升了 55.92%。能量吸收数值的大小决定了接头缓冲吸震性能的优劣, 由试验结果看出, 经过一年的自然时效后, 接头获得了更好的缓冲吸震能力。

### 2.2 失效分析

铆钉与板料相连的机械互锁部分是自冲铆接抵抗失效的主要部位, 而接头的应力集中于上板与铆钉的连接处。接头的失效形式统计如表 1 所示, 两组接头的主要失效形式均为拉脱失效, 造成接头拉脱失效的主要原因为: 铆接件内锁值太小, 导致其

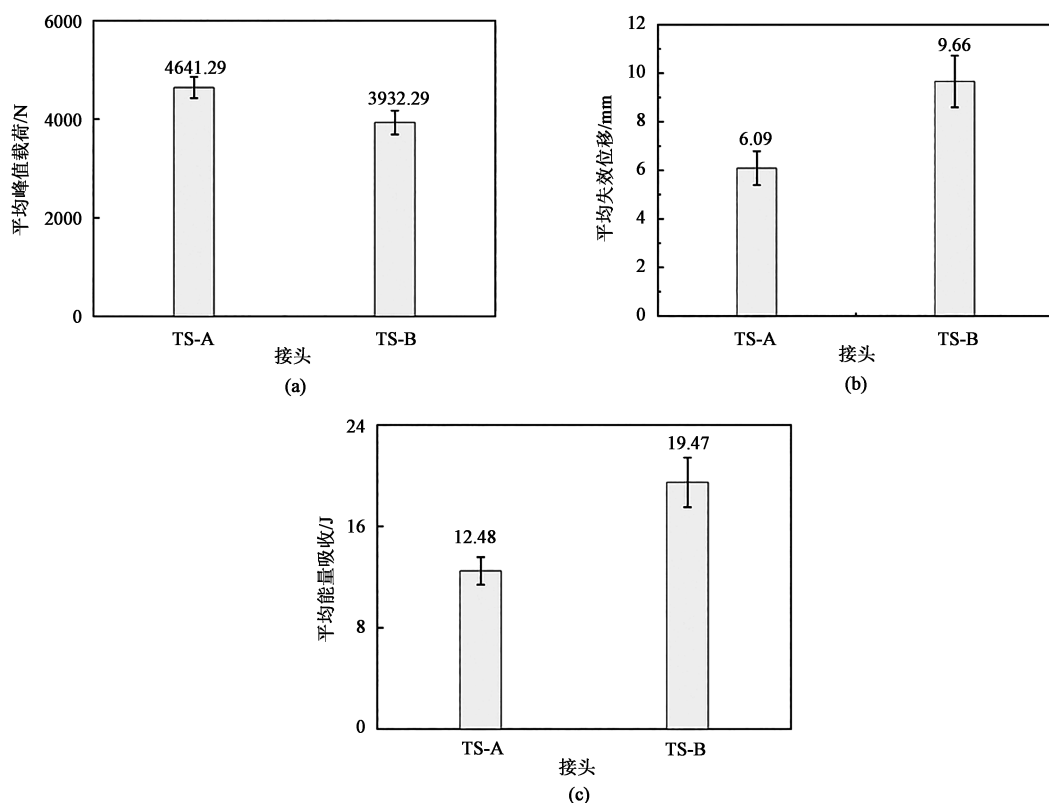


图 3 接头静力学性能参数均值  
(a) 平均峰值载荷 (b) 平均失效位移 (c) 平均能量吸收

Fig. 3 Average values of static mechanical parameters for joints  
(a) Average peak load (b) Average failure displacement (c) Average energy absorption

表 1 拉伸试验的接头失效模式数量统计结果 (件)  
Table 1 Quantitative statistics results of joint failure modes in tensile test (Piece)

接头	上板拉脱	下板拉脱	板材脆断
TS-A	2	8	0
TS-B	8	1	1

抵抗失效的能力弱。而造成上、下板拉脱的主要原因是上、下板应力集中处的应力程度不一致。

TS-A 组接头的失效部位主要为下板拉脱,产生这种现象的原因主要为:铆接后上板的应力集中小于下板,应力集中区域会使物体产生微小的疲劳裂纹,这些裂纹导致接头该部位的抗变形能力变弱。

TS-B 组接头的失效部位主要为上板拉脱,这是因为:一年的自然时效过程中,由于自冲铆接连接的特殊机械互锁结构,应力释放不均匀,导致上板的应力集中大于下板。

### 2.3 微观组织分析

为进一步研究应变时效对于 SPR 接头静力学的影响,分别对 TS-A 组、TS-B 组接头进行 SEM 分

析,如图 4 所示。从图 4a 和图 4b 可知,TS-A 组、TS-B 组接头均呈现脆性断裂和韧性断裂并存的形式,TS-A 组接头具有明显的断裂平台,TS-B 组接头则仅有部分解理台阶形貌特征,这说明两者在自然时效的过程中,材料的脆性降低。从图 4 可知,虽然两者的韧性断裂界面均呈现大量韧窝即微孔聚集形貌,但 TS-A 组接头的韧窝为撕裂韧窝,且其韧窝分布相对较分散,韧窝相对较小,而 TS-B 组接头的韧窝为撕裂韧窝、等轴韧窝共存的形式,韧窝分布相对紧凑,韧窝形状更大、更深,这说明材料在经过一年自然时效后,材料的塑性得到提升。产生撕裂韧窝的原因为材料在拉伸过程中受到的应力为切应力,而产生等轴韧窝的原因则为拉伸过程中受到的应力为正应力,由于 TS-B 组接头在拉伸的过程中发生的翘曲程度大于 TS-A 组,因此,TS-B 组接头呈现两种韧窝共存的形式。

## 3 结论

(1) 在一年静置自然时效的影响下,自冲铆接



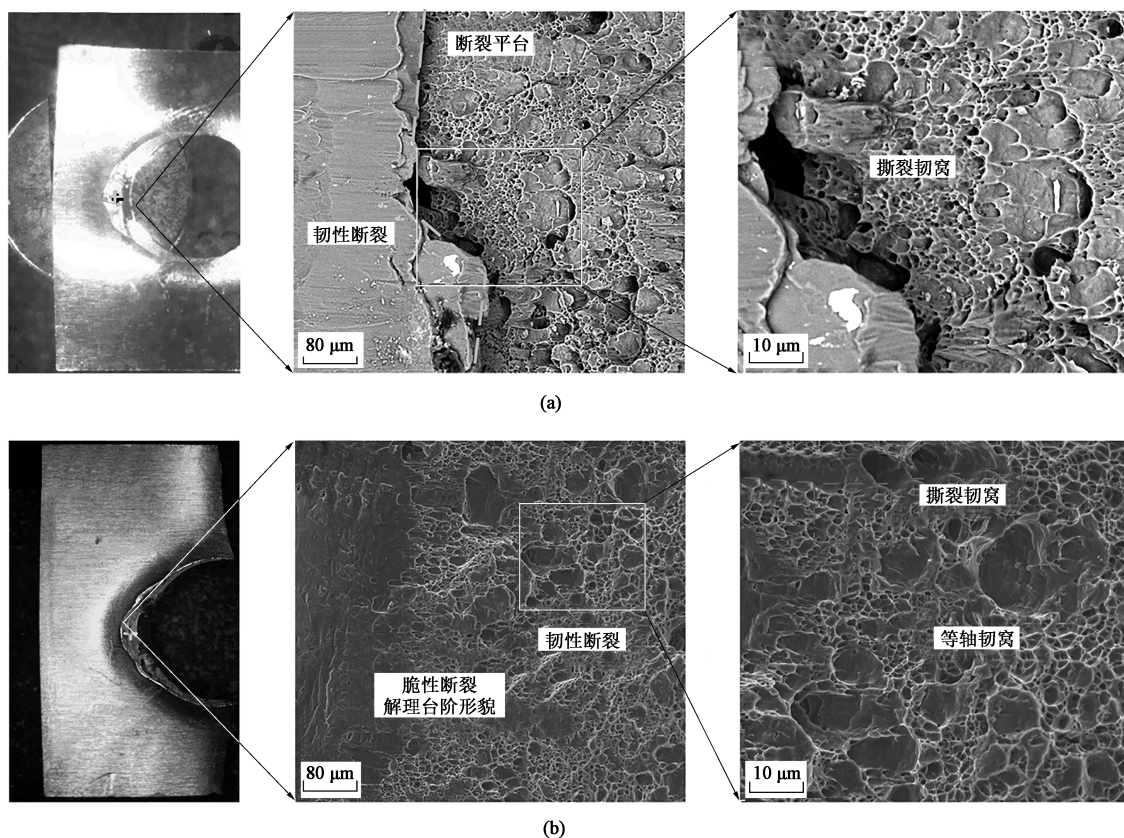


图4 接头失效微观组织

(a) TS-A (b) TS-B

Fig. 4 Failure microscopic structure of joints

接头的平均峰值载荷下降了 15.28%，平均失效位移上升了 58.37%，平均能量吸收提升了 55.92%。

(2) 一年的自然时效过程中，由于自冲铆接连接的特殊机械互锁结构，应力释放不均匀，导致上、下板应力集中释放速率不一致，两组接头的主要失效部位不同。

(3) 在经过一年自然时效的处理后，自冲铆接接头的脆性降低，塑性增加。

#### 参考文献：

- [1] 张立. “碳达峰、碳中和” UP 论坛综述 [J]. 城市规划学刊, 2021, (4): 6-9.  
Zhang L. The UP forum on peak carbon emission and carbon neutrality [J]. Urban Planning Forum, 2021, (4): 6-9.
- [2] 扶文生, 张先炼, 张青. 5083 铝合金自冲铆接成形机理与失效分析 [J]. 塑性工程学报, 2023, 30 (3): 91-98.  
Fu W S, Zhang X L, Zhang Q. Forming mechanism and failure analysis of self-piercing riveted of 5083 aluminum alloys [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2023, 30 (3): 91-98.
- [3] 赵伦, 林森, 甘增康, 等. 钛-铝异种合金自冲铆接接头力学性能与微观组织分析 [J]. 现代制造工程, 2023, (1): 77-82.

Zhao L, Lin S, Gan Z K, et al. Aluminum dissimilar alloys mechanical properties and microstructure analysis of self-piercing riveted joints of titanium [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2023, (1): 77-82.

- [4] 庞嘉尧, 张萃, 程伟. 铝合金疲劳性能研究进展 [J]. 特种铸造及有色合金, 2022, 42 (6): 717-726.  
Pang J Y, Zhang C, Cheng W. Research progress in fatigue behavior of aluminum alloy [J]. Special-cast and Non-ferrous Alloys, 2022, 42 (6): 717-726.
- [5] 席忠民, 李鑫, 李晓宇, 等. 挤压温度和时效制度对 6082 铝合金挤压型材自冲铆接开裂的影响 [J]. 汽车工程学报, 2020, 10 (5): 384-389.  
Xi Z M, Li X, Li X Y, et al. Effect of billet temperature and aging process on riveting cracking for 6082 aluminum extrusions [J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2020, 10 (5): 384-389.
- [6] 刘洋, 庄蔚敏, 施宏达. 自冲铆接头疲劳性能影响因素研究进展 [J]. 材料导报, 2019, 33 (11): 1825-1830.  
Liu Y, Zhuang W M, Shi H D. Influencing factors on fatigue performance of self-piercing riveted joints: A review [J]. Materials Reports, 2019, 33 (11): 1825-1830.
- [7] 魏翠琴, 曾望, 于连生, 等. 自然时效对 6005A-T4 搅拌摩擦焊接接头组织性能的影响 [J]. 特种铸造及有色合金, 2022, 42 (4): 477-481.

- Wei C Q, Zeng W, Yu L S, et al. Effects of natural aging on the microstructure and properties of 6005A-T4 friction stir welded joints [J]. Special-cast and Non-ferrous Alloys, 2012, 42 (4): 477-481.
- [8] 张慧敏, 赵玉津, 罗震. 自然时效对铝/钛超声波焊接接头的影响 [J]. 上海交通大学学报, 2016, 50 (12): 1885-1888.
- Zhang H M, Zhao Y J, Luo Z. Effect of natural aging on Al/Ti joints obtained by ultrasonic welding [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2016, 50 (12): 1885-1888.
- [9] Abderrahmane D, Boudjema B, Nadjat Z, et al. Effect of natural aging on the tensile properties and the toughness of friction stir welds of 2024-T3 aluminum alloy [J]. Journal of Advanced Joining Processes, 2023, 8: 100153.
- [10] 纪艳丽, 陈林, 郭世杰, 等. 自然时效及 Cu 对 6061 型铝合金塑性的影响 [J]. 轻合金加工技术, 2021, 49 (10): 28-32.
- Ji Y L, Chen L, Guo S J, et al. Influence of natural ageing and Cu on the ductility of 6061 Al alloys [J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2021, 49 (10): 28-32.
- [11] 许建飞, 符师桦, 黄锋, 等. 快速傅里叶变换分析 6061 铝合金在不同自然时效时间下的 PLC 效应 [J]. 试验力学, 2021, 36 (3): 340-349.
- Xu J F, Fu S H, Huang F, et al. Fast Fourier transform analysis on Portevin-Le Chatelier effect in 6061 Al-based alloy at different nature aging [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2021, 36 (3): 340-349.
- [12] 林森, 赵伦, 肖钢, 等. 航空铝合金自冲铆接头微观失效研究 [J]. 锻压技术, 2023, 48 (1): 121-127.
- Lin S, Zhao L, Xiao G, et al. Microscopic failure study on self-piercing riveting joints for aviation aluminum alloys [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48 (1): 121-127.
- [13] 李冰, 陈星合, 付博文, 等. 7075 铝合金线材连续流变挤压与双级时效热处理研究 [J]. 稀有金属, 2023, 47 (9): 1195-1203.
- Li B, Chen X H, Fu B W, et al. Continuous rheo-extrusion and double aging heat treatment of 7075 aluminum alloy wire [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2023, 47 (9): 1195-1203.
- [14] GB/T 16957—2012, 复合钢板 焊接接头力学性能试验方法 [S].
- GB/T 16957—2012, Clad steel plates—Mechanical technical tests on welded joints [S].
- [15] 王春燕, 介瑞华, 汪春梅, 等. 时效处理对 PSB830 高强度精轧螺纹钢力学性能的影响 [J]. 理化检验—物理分册, 2023, 59 (5): 1-4.
- Wang C Y, Jie R H, Wang C M, et al. Effect of aging treatment on mechanical properties of PSB830 high strength finish-rolled re-inforced bar [J]. Physical Testing and Chemical Analysis Part A: Physical Testing, 2023, 59 (5): 1-4.

## 欢迎订阅《锻压技术》杂志 (月刊)

国内外公开发行, 全国各地邮局均可订阅, 逾期末订上者可与编辑部联系邮购

《锻压技术》杂志 1958 年创刊, 中国机械工业联合会主管、中国机械总院集团北京机电研究所有限公司和中国机械工程学会塑性工程分会主办。本刊是全国锻压行业会刊, 全国中文核心期刊, 被国内外多个著名检索系统收录。突出技术内容, 注重技术和信息相结合, 全面反映锻压行业的技术进步和发展趋势。

**主要栏目:** 综述、锻造、板料成形、管材成形、挤压与拉拔、轧制、特种成形、装备与成套技术、模具、摩擦与润滑、加热与热处理、测试技术、节能技术、材料与成形性能、理论与实验研究、计算机应用、技术交流、标准化、行业信息等。

**读者对象:** 大专院校的师生, 金属塑性成形(锻压)领域的科研、设计、生产部门的工程技术人员以及中等以上文化程度的工人等。

本刊为月刊, 每月 25 日出版, 大 16 开本, 256 页。统一刊号: CN11-1942/TG。邮发代号: 2-322。

(一) 购买期刊: ● 每册定价: 25.00 元; ● 年定价: 300.00 元。

(二) 购买合订本: ● 1991-2011 年合订本 (每本包含全年 1-6 期杂志): 110 元/本;

● 2012-2013 年合订本 (每本包含全年 1-6 期杂志): 140 元/本;

● 2014-2018 年合订本 (上册) (包含上半年 1-6 期杂志)、2014-2018 年合订本 (下册)

(包含下半年 7-12 期杂志): 180 元/本。

直接通过编辑部订阅者, 请与杂志发行部负责人林玉彤联系。并按编辑部地址汇款, 款到后我们会定期寄给您刊物。

**邮局汇款信息:**

地址: 北京市海淀区学清路 18 号北京机电研究所有限公司 709 室

邮编: 100083

收款人: 《锻压技术》编辑部

附言处: 请注明“订阅《锻压技术》”

联系人: 林玉彤 电话: 010-62920652-804

E-mail: fst\_linyutong@163.com

《锻压技术》编辑部