

# 超声振动对钛合金铆钉压铆力的影响

## Influences of Ultrasonic Vibration on Riveting Force of Titanium Alloy Rivet

南京航空航天大学机电学院 黄志祥 陈文亮 姜丽萍 王珉

**[摘要]** 针对钛合金和大直径铆钉铆接困难的问题,在压铆工艺上引入超声振动激励装置。以NAS1097U5-6钛合金铆钉为对象,采用试验与仿真结合的分析手段。研究表明:超声振动技术能有效降低铆钉材料变形抗力20%,并随着振幅的增加其降低效果更明显,且未改变材料性能;通过仿真与试验数据的对比,认定了仿真分析手段的有效性,为后续超声振动辅助铆接工艺参数仿真研究奠定基础。

**关键词:** 超声振动 压铆力 钛合金铆钉

**[ABSTRACT]** To solve the forming difficulties of titanium-alloy and large-diameter rivet, ultrasonic vibration is introduced to pressure riveting process. The experiment and simulation analysis methods are used to NAS1097U5-6 titanium alloy rivet. The research shows that ultrasonic vibration can effectively reduce deformation resistance of the rivet material by 20 percentage, and the effect is more apparent with the increase of amplitude. Also the technology doesn't change the material property. Comparing with the experimental data, the simulation analysis can effectively apply to ultrasonic vibration aided riveting process and establish the foundation for future study of technical parameters.

**Keywords:** Ultrasonic vibration Riveting force Titanium alloy rivet

现代航空航天飞行器追求整机结构轻量化、长寿命安全服役以及低能耗运行等高性能综合需求,对机体新材料、新结构的使用和连接方式提出更高的要求<sup>[1-2]</sup>,如波音787中复合材料用量占结构重量的50%,F-22战机中钛合金用量占结构重量41%等。复合材料与钛合金的广泛应用导致了大量的钛合金等难成形铆钉材料的应用<sup>[3]</sup>。同时,大型飞机与运载火箭载荷的提升,越来越多使用大直径铆钉<sup>[4]</sup>。但是普通压铆下由于钛合金材料冷塑性差、应变率敏感、屈服比高,铆钉易出现变形开裂、难以持续等现象;大直径铆钉材料由于冷作硬化在变形后期成形困难,影响结构件铆接质量。因此,解决此类铆钉连接问题显得尤为重要。

电磁铆接是国内外现有解决钛合金和大直径铆钉

连接的工艺方法,通过高应变率下材料绝热剪切变形实现铆接过程。但是,由于电磁铆接铆模拔模角度的选取和铆钉成形速率大小等方面的影响,铆钉头部易出现剪切区,甚至剪切破坏<sup>[5-8]</sup>。铆接过程究其本质是铆钉材料在外力作用下发生塑性变形的过程。通过铆接过程压铆力计算分析,压铆力与材料的屈服强度、钉杆直径、镦头直径等成正比关系<sup>[9]</sup>。在镦头形成末期,由于位错的缠结、晶格畸变、晶粒拉长等原因,使得材料的屈服强度大幅度提升、塑性明显降低,此时要完成铆钉变形则需要更大的压力,且易出现裂纹。超声振动是一种改善材料变形机制、降低屈服强度、提高塑性极限的成形方法,已在切削、薄板弯曲、管材成形、拔丝、研磨和镦粗等方面有广泛应用<sup>[10-14]</sup>。已有研究表明在材料成形方向上施加一定的超声振动,通过振动能量的传递改变晶体内部位错滑移机制,降低材料变形抗力,减少加工硬化和开裂等现象,提高成形质量。

本论文通过在压铆工艺上引入超声振动辅助装置,采用试验与有限元仿真相结合的研究方法,分析超声振动辅助对铆接过程压铆力的影响。

### 1 超声振动辅助压铆平台设计

传统铆接以机械压铆或手工锤铆方式压缩铆钉材料形成镦头。超声振动辅助则将两者结合起来,如图1

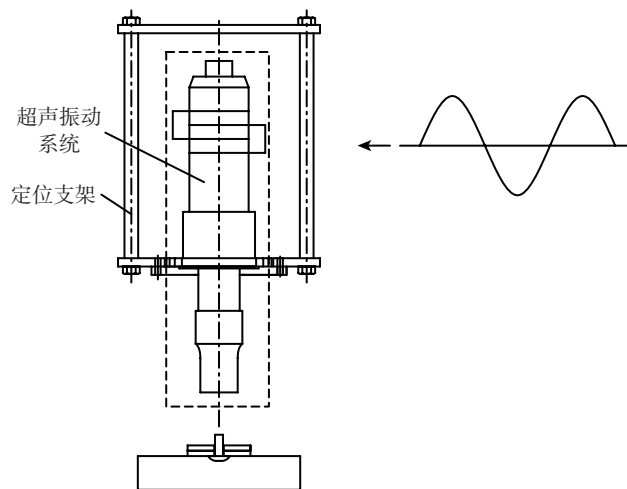


图1 超声振动辅助压铆工艺

Fig.1 Ultrasonic vibration aided pressure riveting process

所示,超声激振系统定位安装在传统压铆铆模位置,通过工具头高频微小振动锤击铆钉,使钛合金或大直径铆钉发生相应的塑性变形实现稳定的铆接结构。

超声振动系统是产生高频激振,保障能量传递的关键装置,由超声波发生器、换能器、变幅杆、工具头等部件组成。本文研究选用的超声波发生器输出功率1.5kW,工作频率20kHz;选用与功率频率相匹配的YP-5020-4Z柱形压电陶瓷换能器,直径50mm,输出振幅8 $\mu$ m。变幅杆设计必须依据所选择的频率与需求的振幅。本论文选用阶梯型变幅杆,材料为45号钢,大端直径 $D_1=54$ mm,小端直径 $D_2=32$ mm。根据相关理论分析<sup>[4]</sup>,当大端长度 $a$ 与小端长度 $b$ 都为1/4波长 $\lambda$ 时,放大系数 $M_p$ 达到最大,计算得 $M_p=2.85$ ,此时共振长度 $l=a+b=129$ mm,位移节点在变幅杆中心处,此处可作为超声振动系统的安装法兰位置。

为获得较大的振幅,变幅杆和工具头的共振频率必须与外激振频率相等,使之处于共振状态。变幅杆和工具头所做的模态分析见图2,表明两部件在频率20kHz左右做纵向振动,与振动系统所需振动方向一致,能够产生共振。超声振动系统安装后测得工具头端部输出振幅为20 $\mu$ m。

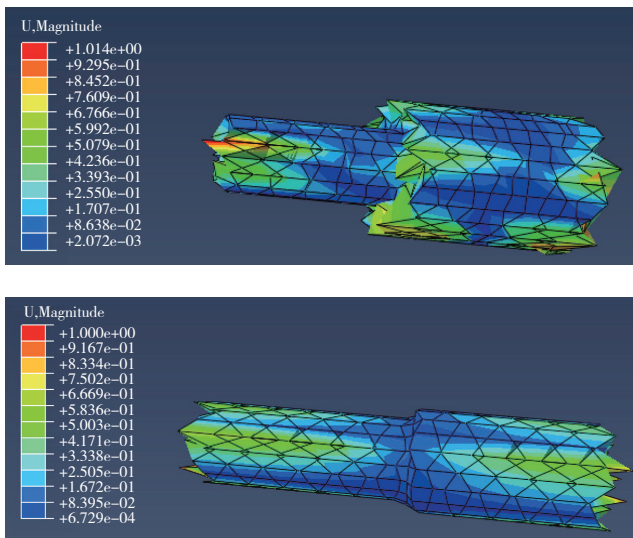


图2 模态分析图  
Fig.2 Modal analysis diagram

## 2 超声振动辅助对压铆力影响分析

采用ABAQUS软件对超声辅助压铆过程进行仿真分析,观察压铆力在振动辅助下变化情况,主要包括几何模型与有限元模型的创建、工艺参数的设定和仿真结果分析等。

### 2.1 几何模型

根据结构对称性,对铆钉和连接板只建立1/4模型,

超声振动系统简化成做超声简谐振动物头。铆钉直径为4mm,连接板孔径4.1mm,几何尺寸如图3所示。

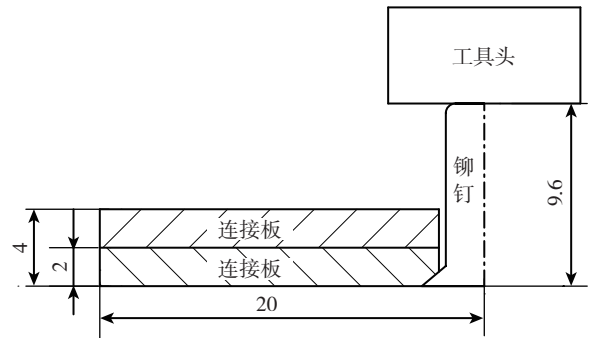


图3 几何模型  
Fig.3 Geometric model

### 2.2 材料属性

铆钉选用牌号NAS1097U5-6埋头钛合金铆钉,材料为Ti-45Nb;连接板材料选航空用铝合金2024-T3;工具头材料选择45号钢。这3种材料常温下物理性能如表1所示。

表1 常温下材料物理性能

材料	弹性模量/GPa	泊松比	密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )
Ti-45Nb	62	0.34	5700
2024-T3	73.1	0.33	2700
45 钢	205	0.3	7800

### 2.3 有限元模型

设置工具头上任意一点为参考点RP1,并以此点为耦合点设定工具头为解析刚体;在铆钉轴线上离底面5mm的位置设定一个参考点RP2,该参考点与铆钉和连接板形成运动耦合,上下连接板采用绑定约束。设定工具头与铆钉、铆钉与连接板为面-面接触对。划分网格

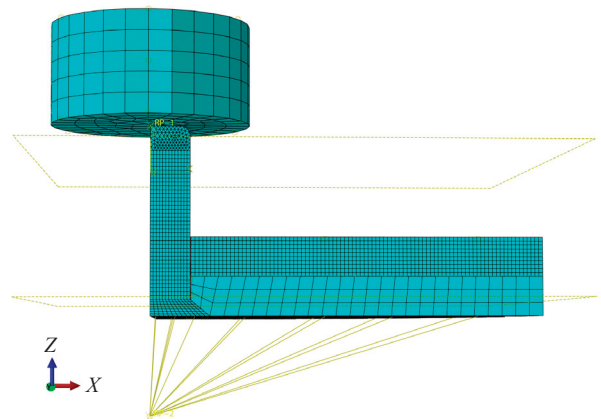


图4 有限元模型  
Fig.4 Finite element mode

时,铆钉和上连接板网格分布较密,以便得到准确的镢头模型和仿真数据,单元类型均为 8 节点六面体线性减缩积分单元模式( C3D8R ),如图 4 所示。

### 2.4 仿真过程

铆接过程采用动态显式分析方法控制铆接工艺参数,即通过设定分析步时长和 RP2 参考点运动速率实现对铆接过程压缩量的控制。常规铆接时,约束工具头所有自由度,RP2 带动铆钉和连接板作反向运动,直至达到规定压缩量时停止。超声振动辅助铆接时,约束工具头轴线方向外的所有自由度,在工具头轴线方向上叠加按正弦规律变化的位移载荷<sup>[15-18]</sup>,其正弦波函数表达式为:

$$S = A \sin(2\pi f(t))$$

式中,  $S$  为铆模位移, mm;  $A$  为铆模振幅, mm。当频率为 20kHz,振幅为  $20\mu\text{m}$  时,  $S = 0.02\sin 125600t$ 。

### 2.5 仿真结果分析

在相同加载速率和振幅下,仿真得到的不同镢头高度与相应压铆力数值如表 2 所示,超声振动确能明显降低材料的变形抗力,针对 NAS1097U5-6 钛合金铆钉,在超声频率 20kHz、超声振幅  $20\mu\text{m}$  时压铆力降低 20% 左右。仿真结果的 Mises 应力云纹图如图 5 所示(前者为常规铆接,后者为超声铆接),超声振动辅助下镢头处材料变形应力明显低于常规铆接,内部组织受力状态进一步印证了振动能降低塑性变形抗力的现象。

表2 仿真压铆力数值

位移 /mm	镢头高度 /mm	常规铆接力 /N	超声铆接力 /N	减少比例 /%
1.2	4.4	8114.84	6674.64	17.7
1.8	3.8	9471.08	7570.36	20.1
2.4	3.2	11119.92	8659.92	22.1
3.0	2.6	14209.6	11294.12	20.5

根据超声振动理论,工具头端部的能量正比于振幅的平方,能量的强弱对材料的变形有直接影响。超声频率为 20kHz 时,不同振幅对压铆力影响如图 6 所示,随着振幅的增加超声振动减弱材料变形抗力的效果越明显。

### 3 超声振动辅助铆接试验验证

根据铆接成形的特点与压铆力检测需要,设计了如图 7 所示的试验平台<sup>[19-20]</sup>,主要由电子万能试验机、试件工装、超声振动系统、支座等部分组成。试件工装用于定位连接件与铆钉,并固定在试验机的移动横梁上,超声振动系统通过支座固定在试验机底座上。根据上文设计,超声振动系统工作频率为 20kHz,振幅为

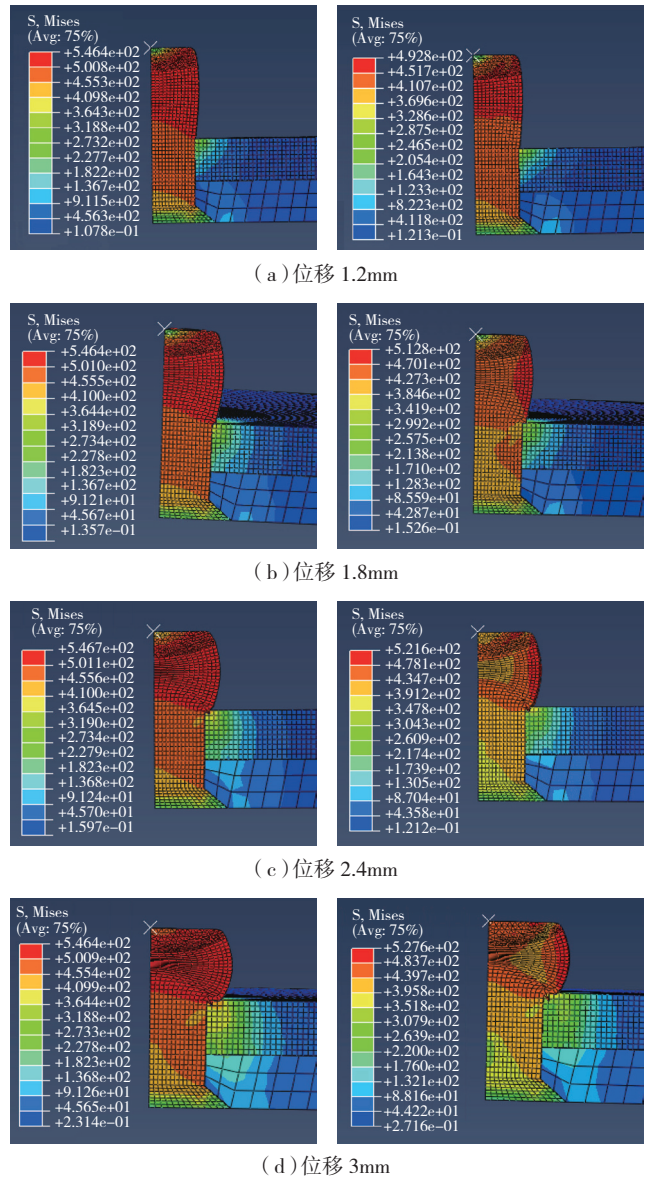


图5 Mises应力云纹图

Fig.5 Mises stress moire figure

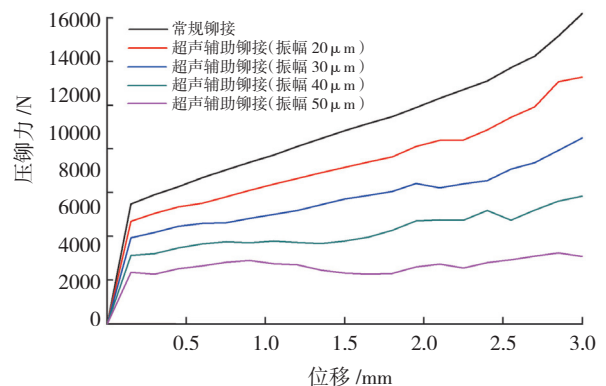


图6 不同振幅下压铆力变化曲线

Fig.6 Pressure riveting force curves under different amplitudes

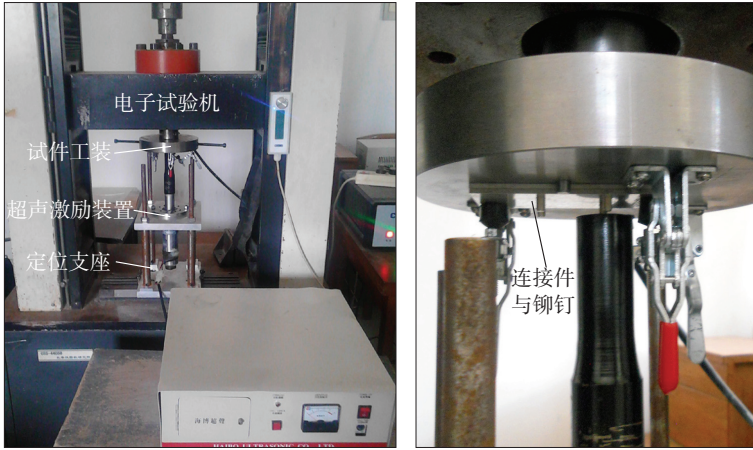


图7 超声振动辅助铆接试验平台

Fig.7 Experiment platform for ultrasonic vibration aided riveting

20 μm, 试验时超声振动系统工作条件、所用铆钉和连接板材料与仿真一致。

本试验分常规铆接和超声振动辅助铆接两种情形, 区别仅为铆接时是否开启超声振动。压缩位移分别为 1.2mm、1.8mm、2.4mm、3mm。试验时试件工装带动连接板与铆钉向工具头按 2mm/min 速度移动, 超声工具头类似锤铆方式铆接铆钉, 达到相应位移时停止铆接关闭超声波发生器, 记录压铆力数值。

钛合金铆钉压铆力随位移变化趋势如图 8 所示。在材料弹性变形阶段, 叠加超声振动对铆钉材料成形应

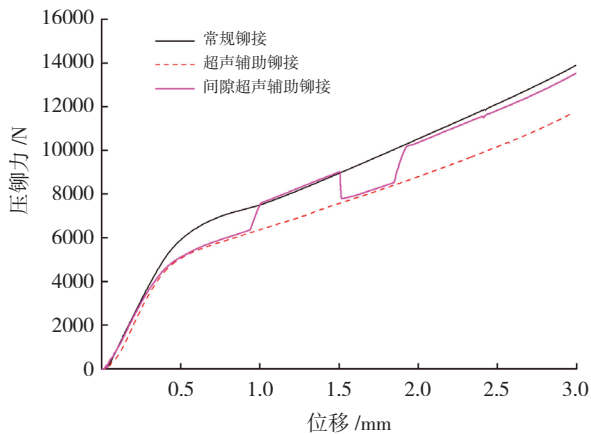


图8 钛合金铆钉压铆力变化曲线

Fig.8 Riveting pressure curve of titanium alloy rivet

表3 试验压铆力数据

位移/mm	镦头高度/mm	常规铆接力/N	超声铆接力/N	减少比例/%
1.2	4.4	8048.52	6405.06	20.4
1.8	3.8	9894.13	7779.99	21.4
2.4	3.2	11814.00	9100.15	23.0
3.0	2.6	13893.64	10692.00	23.0

力影响不大; 进入塑性变形阶段, 叠加超声振动能明显降低铆钉材料的变形抗力。间隙超声振动辅助铆接曲线处于全程静态和超声振动辅助铆接曲线之间, 并与这两条曲线基本吻合。停止振动辅助时压铆力以一定的斜率恢复到常规铆接曲线位置, 当叠加激振时, 铆接压力迅速下降。说明超声振动辅助仅仅改变了铆钉材料塑性变形的机制, 对材料本身的性能没有影响。

针对 NAS1097U5-6 铆钉, 如表 3 所示, 试验测得压铆力可降低 20% 左右。通过试验数据与仿真数据对比分析, 仿真数值最大误差为 5.88%, 仿真所得振动对压铆力的影响趋势与试验基本一致, 因此仿真结果是真实有效的。

在试验条件不具备时, 可通过仿真手段进行研究减少试验成本与工作量。

#### 4 结束语

本论文通过在压铆工艺中引入超声振动辅助装置, 采用仿真与试验研究手段, 得出以下结论:

(1) 超声振动能有效降低钛合金铆钉材料的变形抗力, 针对 NAS1097U5-6 钛钉振幅 20 μm 时压铆力降低 20% 左右, 并随着振幅的增加降低效果越明显;

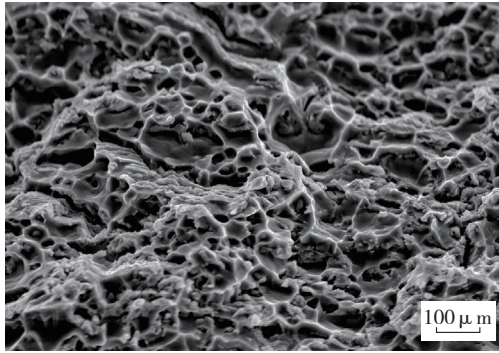
(2) 通过仿真与试验的对比分析, 仿真分析能够较准确反映出超声振动对材料变形的影响趋势, 相应位移值压铆力误差在 6% 以内, 仿真结果是有效的, 可以减少试验研究的成本与工作量;

(3) 该技术的应用可以降低铆接工艺装备吨位的需求, 为钛合金等难成形和大直径铆钉的连接提供新的工艺方法。

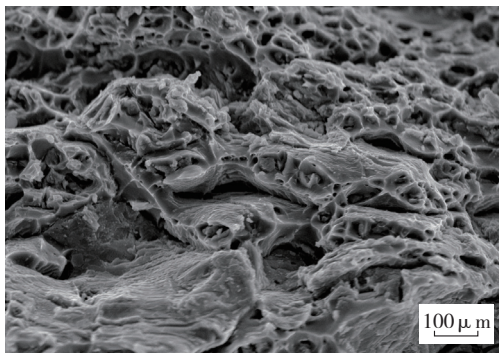
#### 参考文献

- [1] 杨乃宾. 新一代大型客机复合材料结构. 航空学报, 2008, 29(3): 596-604.
- [2] 黄张洪, 曲恒磊, 邓超, 等. 航空用钛及钛合金的发展及应用. 材料导报, 2011, 25(1): 102-107.
- [3] 张庆玲, 王庆如, 李兴无. 航空用钛合金紧固件选材分析. 材料工程, 2007(1): 11-14, 18.
- [4] 曹增强, 陶华, 余公藩, 等. 大直径应力波铆接. 新工艺新技术新设备, 1996(2): 27-28.
- [5] Electromagnetic Riveting. BCAC manufacturing development report. MDR 6-58021, 1970: 61.
- [6] Ghassaei S. A study on the improvement of the electromagnetic riveting process. University of Washington, 1985: 27.
- [7] Zieve P B. Low voltage electromagnetic riveter[D]. University of Washington, 1986: 5.

(下转第 87 页)



(a) 焊核区



(b) 热机影响区 / 热影响区

图6 补焊接头拉伸断裂试样不同区域的断口形貌

Fig.6 Fracture morphology of different areas for the repaired joint

小的再结晶等轴晶粒；补焊接头受热影响范围程度比较大，热机影响区组织发生粗化长大，甚至残留熔焊柱状晶或树枝状晶粒。

(2) 补焊接头第二相析出物分析结果得出：第二相析出物呈细小点状弥散分布于焊核区；热影响区 / 热机影响区域第二相析出物粗化长大，甚至呈网状结构分布于晶界，大大降低焊接接头的塑性。

(3) 补焊接头显微硬度测试结果显示，母材区硬度值最高，焊核区硬度值次之，热影响区 / 热机影响区最低。拉伸性能结果显示，补焊接头抗拉强度系数约为 65.53%，延伸率约为 5.5%。接头均断裂在热影响区附近，这与显微硬度测试结果相吻合。

(4) 补焊接头断口呈现出韧性断裂与铸态组织脆性断裂的混合断口形貌。

(5) 搅拌摩擦焊缝匙孔型缺陷补焊接头的微观组织、第二相析出物以及力学性能测试结果可以看出：采用熔焊填充 + 搅拌摩擦补焊复合工艺进行匙孔型缺陷修补是切实可行的。

### 参考文献

- [1] Mishra R S, Ma Z Y. Friction stir welding and processing. *Materials Science and Engineering*, 2005, 50: 1-78.  
[2] Zhang H, Lin S B, Wu L, et al. Current progress and prospect of

friction stir welding. *Transactions of the China Welding Institution*, 2003, 24(3): 75-79.

[3] Johnsen M R. Friction stir welding takes off at Boeing. *Welding Journal*, 1999, 78(2): 35-39.

[4] 封小松,徐萌,钱纪红. 载人航天器结构件 FSW 制造工艺及应用. *载人航天*, 2011, 1:52-57.

[5] 赵衍华,林三宝,吴林. 2014 铝合金搅拌摩擦焊接头缺陷分析. *焊接*, 2005(7):9-12.

[6] 刘会杰,潘庆,孔庆伟,等. 搅拌摩擦焊焊接缺陷的研究. *焊接*, 2007(2): 58-62.

[7] 张平,李奇,赵军军. 7A52 铝合金搅拌摩擦焊焊缝第二相分析及微区电位测试. *焊接学报*, 2011, 32(8): 42-45.

[8] Lacroix L, Ressler L, Blanc C, et al. Statistical study of the corrosion behavior of Al2CuMg intermetallics in AA2024-T351 by SKPFM. *Journal of the Electrochemical Society*, 2008, 155(1): C8-C15.

[9] 乔及森,余江瑞,苟宁年,等. 微观组织对 2A12 铝合金熔焊接头力学性能的影响. *焊接学报*, 2011, 32(9):5-10.

[10] Jones M J, Heurtier P, Desrayaud C, et al. Correlation between microstructure and microhardness in a friction stir welded 2024 aluminium alloy. *Scripta Materialia*, 2005, 52(8): 693-697.

[11] Xu L H, Tian Z L, Peng Y. Effect of microstructure on impact toughness of high strength aluminium alloy welds. *Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 45(7): 108-113.

(责编 亿霖)

(上接第 82 页)

[8] 邓将华,李春峰,于海平,等. 电磁铆接技术. *锻压技术*, 2010, 35(3):1-6.

[9] 刘平,李原,张开富,等. 压铆过程阶段划分与压铆力计算. *机械科学与技术*, 2009, 28(4):514-516, 521.

[10] 谢涛,齐海群,张俊. 超声振动拉丝试验研究. *中国机械工程*, 2006, 17(3):224-226.

[11] Huang J C, Huang Z H. Superimposed ultrasonic vibration on hot upsetting of aluminum alloy. *Ultrasonics*, 2005, 43(8):692-698.

[12] Tsujino J, Ueoka T, Itoh H. Ultrasonic vibration bending of mental plate specimens. *Yokohama: Ultrasonics Symposium*, 1989.

[13] 温彤,陈霞. 超声振动对轻合金塑性压缩变形过程的影响. *机械科学与技术*, 2013, 32(2):221-224.

[14] 张云电. *超声加工及其应用*. 北京: 国防工业出版社, 1995.

[15] Dampilon V G, Shamin A N. Ultrasonic oscillations and wire drawing. *Stal*, 2003(4): 54-55.

[16] Pasierb P, Vonjnar A. An experimental investigation of deep drawing and drawing processes of thin-walled products with utilization of ultrasonic vibration. *Materials Processing Technology*, 1992, 34(1-4): 62-68.

[17] 王哲,李新和,刘舜尧,等. 超声振动对材料流变行为的影响机制. *塑料工程学报*, 2012, 19(2):38-42.

[18] 石亦平. *ABAQUS 有限元分析实例详解*. 北京: 机械工业出版社, 2010.

[19] 刘春来,王晓林,程靳,等. 超声波拉伸装置的研制. *材料科学与工艺*, 1994, 2(2):70-74.

[20] 魏丽. 超声振动对 AZ31 镁合金室温塑性变形过程的影响 [D]. 重庆: 重庆大学, 2010.

(责编 深蓝)