

钛合金超塑成形/扩散连接四层结构表面沟槽控制方法研究*

李保永^{1,2}, 张铁军², 张凯锋¹, 姚为², 秦中环², 刘奇², 刘伟²

(1. 哈尔滨工业大学材料学院, 哈尔滨 150001;

2. 北京航星机器制造有限公司, 北京 100013)

[摘要] 通过有限元数值模拟和物理试验相结合方法,对超塑成形/扩散连接(SPF/DB)四层结构表面沟槽形成原因进行了分析和研究,采用正交试验方法分析了应变速率 $\dot{\epsilon}$ 、扩散连接宽度 b 、芯层与蒙皮厚度比 t 和摩擦系数 u 这4个因素对蒙皮表面沟槽深度的影响。结果表明,对蒙皮表面沟槽形成影响最大的因素为芯层与蒙皮厚度比 t 。通过试验研究,提出了一种对蒙皮表面施压背压的方法,可有效避免或控制超塑成形/扩散连接四层结构蒙皮表面沟槽的形成。

关键词: 钛合金; 超塑成形/扩散连接; 四层结构; 表面沟槽; 正交试验; 数值模拟

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2020.21.063



李保永

博士研究生,高级工程师,从事难成形材料轻量化结构近净、整体精密成形技术研究与应用工作,曾获国防科学技术进步一等奖、航天技术创新奖发明成果一等奖、航天工艺创新优秀项目一等奖等。

* 基金项目: 装备发展部共用技术项目(41423030606)。

近年来,钛合金因其优良的高温性能、较高的比强度和优异的耐腐蚀性,在航空航天、化工、船舶领域得到了更加广泛的应用^[1-4]。随着航空、航天领域的快速发展,飞行器高精度、轻量化、超声速、大航程等技战术指标日益提高,对飞行器构件制造精度要求愈来愈高、重量控制要求越来越严、研制周期要求越来越短,成本要求越来越低。超塑成形/扩散连接(SPF/DB)组合工艺作为一种精密塑性成形技术,具有近无余量、高效率 and 低成本等特点,所制造的零件具有设计自由度高、结构重量轻、整体性好等优点,在飞行器机体构件的制造方面有着十分广阔的应用前景^[5-6]。利用该技术可以实现单层、双层、三层和四层等轻质复杂薄壁中空结构的整体制备。其中四层结构具备整体刚度、承载能力强等优点,是飞行器翼面、舵面、鸭翼、腹鳍

等产品的首选设计结构之一。

蒙皮表面沟槽缺陷是四层结构的常见缺陷之一,是制备四层及其他中空多层结构产品亟待解决的问题。杜立华等^[7]以三层SPF/DB钛合金空心桁架结构为研究对象,通过平面应变有限元模型,研究了空心结构几何参数对超塑成形过程应力应变分布的影响以及与表面沟槽产生的关系,并进行了试验验证,得到了特定的满足沟槽控制要求的超塑成形工艺参数范围。Cheng等^[8]通过有限元模拟方法分析了三层结构表面沟槽的产生过程,从成形工艺和结构上提出了抑制表面沟槽的方法。秦中环^[9]进行了带块体嵌件TA15钛合金四层结构SPF/DB的工艺过程和控制方法研究,制备了表面质量良好的样件。部分研究对4层结构蒙皮表面沟槽成因进行了初步分析^[10-11],但鲜见有关不同因素对沟槽深浅影

响的系统研究及有效控制沟槽缺陷的可行途径探索。本文以典型 SPF/DB 四层结构为研究对象,通过有限元数值模拟与物理试验相结合,研究钛合金 SPF/DB 四层结构蒙皮表面沟槽控制方法。

试验材料

本试验所用 TA15 钛合金的名义成分为 Ti-6.5Al-1Mo-1V-2Zr,规格均为 1mm,由宝钛集团生产。TA15 钛合金的化学成分见表 1^[12]。试验选用的模具材料为 ZGCr25Ni20。

SPF/DB 四层结构沟槽成因分析

经分析,如图 1 所示,认为四层结构表面沟槽形成原因为:随着芯层成形所需内压 P 逐渐增大,而芯层与蒙皮之间的摩擦力 f 也随之增大,当 P 增大到一定值时,蒙皮即会失稳形成沟槽。

为了验证上述四层结构表面沟槽形成原因,同时,更直观地了解表面沟槽形成过程,采用 MSC.MRAC 超塑成形模块模拟了沟槽的形成过程。材料本构方程为 $\sigma = K\dot{\epsilon}^m$ 。其中, σ 为超塑成形材料的流变应力; $\dot{\epsilon}$ 为成形材料的应变速率; K 为成形材

料的材料常数; m 为成形材料的应变速率敏感性指数,受应变速率影响。当超塑性温度 $T=920^\circ\text{C}$,应变速率 $\dot{\epsilon}=0.0005/\text{s}$ 时,材料的超塑性最优,此时 $K=989.5$, $m=0.57$ 。定义材料参数时选用 Power Law 准则,其中 $B=989.5$, $n=0.57$ 模具定义为刚体;芯层成形区、蒙皮定义为变形体,选择壳单元;摩擦类型选择双线性库仑摩擦模型,摩擦系数设为 $0.2^{[12-14]}$,变形体厚度设为 1mm,扩散区宽度设为 2mm。成形过程模拟结果见图 2,沟槽深度随时间变化情况如图 3 所示。0s 为芯层(上方线条)与蒙皮(下方线条)相对位置;1168s 时,芯层逐步变形接触到蒙皮;2063s 时,沟槽开始产生,之后逐渐加深;3739s 时,沟槽最深达 2.48mm,而后深度又逐渐变浅;4539s 时,沟槽最终深度 1.51mm。

通过数值模拟验证上述 SPF/DB 四层结构表面沟槽形成原因,进一步开展试验验证,结果如图 4 所示,蒙皮表面形成的沟槽。

SPF/DB 四层结构表面沟槽影响因素

对 SPF/DB 四层结构成形工艺进行分析,给出了 4 个较为可能影响

表面沟槽形成的因素,即应变速率 $\dot{\epsilon}$ 、芯层间扩散连接宽度 b 、芯层与蒙皮厚度比 t 、模具与蒙皮间摩擦系数 u 。为了确定各因素对表面沟槽的影响,采用正交试验法进行数值模拟分析,软件仍为 MSC.MRAC,对比超塑成形结束时,四层蒙皮表面沟槽最深点的深度 h 。选用 $L9(3^4)$ 正交表,因素、水平如表 2 所示,试验方案及结果,如表 3 所示。从试验结果中可以看出,4 个可能影响表面沟槽的因素应变速率 $\dot{\epsilon}$ 、扩散连接宽度 b 、芯层与蒙皮厚度比 t 、模具与蒙皮间摩擦系数 u 中,影响最大的是芯层与蒙皮的厚度比,而且厚度比值越大,即芯层越厚蒙皮越薄,成形后蒙皮表面越易产生沟槽且沟槽越深;应变速率、扩散连接宽度、摩擦系数对表面沟槽形成影响较小,但是,选择较慢的应变速率、较窄的扩散连接宽度以及较大的摩擦系数可在一定程度上减小蒙皮表面产生沟槽深度。

SPF/DB 四层结构表面沟槽控制方法

通过正交试验,分析了 4 个可能影响表面沟槽形成的因素,并得到了各因素对沟槽深度的影响趋势。为减轻甚至避免沟槽:应采用较小的

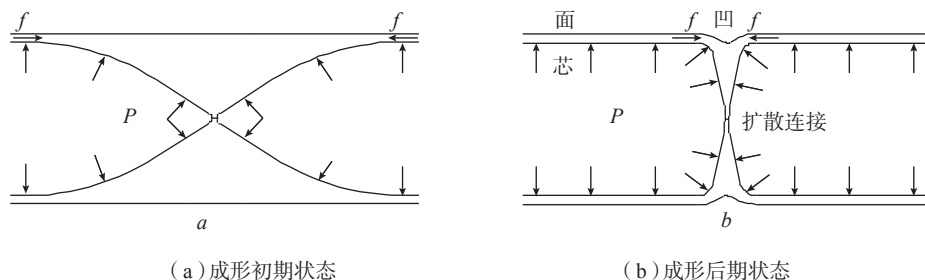


图1 SPF/DB四层结构表面沟槽形成示意图

Fig.1 Schematic diagram of groove formation on the surface of SPF / DB four-sheet structure

表1 TA15钛合金名义化学成分

Table 1 Standard chemical composition of TA15 titanium alloy

主要成分					杂质质量分数不大于						
Ti	Al	Mo	V	Zr	Fe	Si	C	O	N	H	其他元素
基	5.5~7.1	0.5~2.0	0.8~2.5	1.5~2.5	0.25	0.15	0.10	0.15	0.05	0.015	0.3

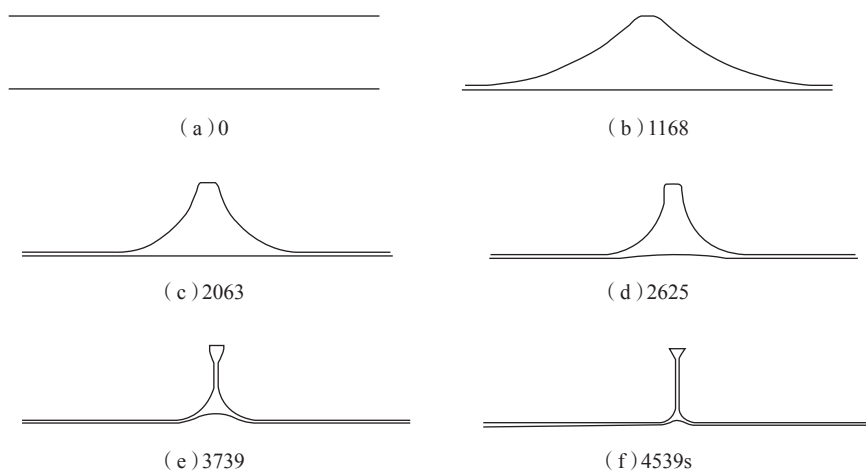


图2 蒙皮表面沟槽形成过程
Fig.2 Forming process of skin surface groove

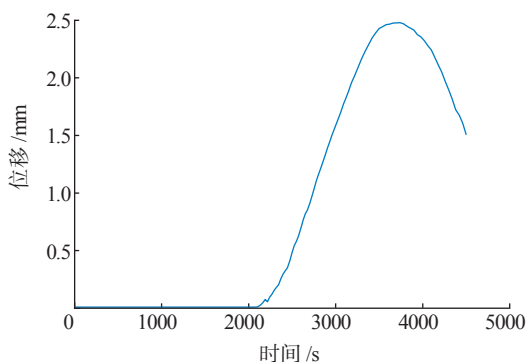


图3 沟槽最深点随时间变化曲线
Fig.3 Time varying curve of the deepest point of groove



图4 蒙皮表面形成的沟槽
Fig.4 Grooves formed on surface of the panel

表2 因素水平表
Table 2 Factor level table

试验号	应变速率 $\dot{\epsilon} / \times 10^{-4}$	扩散连接宽度 b/mm	板厚比 $t/(\text{mm} \cdot \text{mm}^{-1})$	摩擦系数 u
1	0.5	2	0.8 : 1.2	0.2
2	1	4	1.2 : 0.8	0.3
3	2	6	1.0 : 1.0	0.4

厚度比值,即芯层尽量薄、蒙皮尽量厚;其次,尽量减小扩散连接宽度,并适当增大模具与蒙皮间的摩擦系数;成形时,控制芯层间气压增大的速率,以降低芯层的应变速率。

但是,有时为了满足强度、刚度等使用要求,仍不得不选用较大的板厚比值,如此则四层结构表面极易产生沟槽。此时,推荐在芯层成形的同时,蒙皮内表面亦施压一定的背压,破坏蒙皮失稳起皱的条件,则可有效减轻甚至消除沟槽。图5为在表2试验号2的基础上,蒙皮内侧施加了0.2MPa背压后再次分析,蒙皮未产生沟槽。在物理试验中,芯层成形同时,在蒙皮内侧表面施压了0.2MPa背压,效果见图6,表面未产生沟槽。

结论

(1) 通过数值模拟和物理试验验证了SPF/DB四层结构表面沟槽是因为芯层成形过程中与蒙皮摩擦使蒙皮失稳起皱形成。

(2) 采用正交试验分析了4个

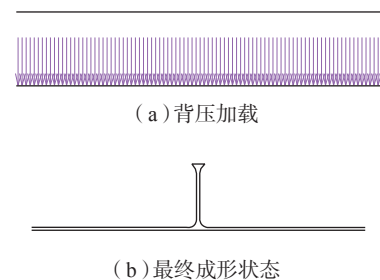


图5 蒙皮施加0.2MPa背压后未产生沟槽
Fig.5 No groove after 0.2MPa back pressure applied to panel



图6 物理试验蒙皮表面未产生沟槽
Fig.6 No groove on actual test panel surface

表3 试验方案及结果
Table 3 Test scheme and results

试验号	因素				沟槽深度 h/mm
	应变速率	扩散连接宽度	板厚比	摩擦系数	
1	0.5×10^{-4}	2	0.8 : 1.2	0.2	0.09
2	0.5×10^{-4}	4	1.2 : 0.8	0.3	1.22
3	0.5×10^{-4}	6	1.0 : 1.0	0.4	0.07
4	1.0×10^{-4}	2	1.2 : 0.8	0.4	1.17
5	1.0×10^{-4}	4	1.0 : 1.0	0.2	0.08
6	1.0×10^{-4}	6	0.8 : 1.2	0.3	0.08
7	2.0×10^{-4}	2	1.0 : 1.0	0.3	0.03
8	2.0×10^{-4}	4	0.8 : 1.2	0.4	0.08
9	2.0×10^{-4}	6	1.2 : 0.8	0.2	2.44
K_1	1.38	1.29	0.25	2.61	5.26
K_2	1.33	1.38	4.83	1.33	5.26
K_3	2.55	2.59	0.18	1.32	5.26
\bar{K}_1	0.46	0.43	0.08	0.87	5.26
\bar{K}_2	0.44	0.46	1.61	0.44	5.26
\bar{K}_3	0.85	0.86	0.06	0.44	5.26
优水平	2.0×10^{-4}	6	1.2 : 0.8	0.2	5.26
R_j	0.41	0.43	1.55	0.43	5.26
主次顺序	板厚比影响最大,应变速率、扩散宽度、摩擦系数影响相当				

影响蒙皮表面沟槽形成的可能因素,影响最大的是芯层与蒙皮的厚度比,应变速率、扩散连接宽度、摩擦系数对表面沟槽形成影响较小。选取较大的厚度比,减小扩散连接宽度,增大摩擦系数,降低芯层应变速率,即可减轻甚至避免 SPF/DB 4 层结构表面沟槽。

(3) 为满足设计对强度、刚度等使用要求,当选用较小的板厚比时,在芯层成形的同时,蒙皮内表面亦施压一定的背压,破坏蒙皮失稳起皱的条件,则可有效减轻甚至消除沟槽。

参考文献

[1] 王向东,郝斌,逯福生,等. 钛的基本性质、应用及我国钛工业概况 [J]. 钛工业进展, 2004, 21(1): 6-10.

WANG Xiangdong, HAO Bin, LU Fusheng, et al. The basic properties and application situation of titanium in China[J]. Titanium Industry Progress, 2004, 21(1): 6-10.

[2] LEYENS C, PETERS M. 钛与钛合金 [M]. 陈振华等,译. 北京: 化学工业出版社, 2005.

LEYENS C, PETERS M. Titanium and titanium alloys[M]. CHEN Zhenhua,trans. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.

[3] 赵树萍,吕双坤. 钛合金在航空航天领域中的应用 [J]. 钛工业进展, 2002(6): 18-21.

ZHAO Shuping, LÜ Shuangkun. The application of titanium alloy in the field of aerospace [J]. Progress of Titanium Industry, 2002 (6): 18-21.

[4] 刘全明,张朝晖,刘世锋,等. 钛合金在航空航天及武器装备领域的应用与发展 [J]. 钢铁研究学报, 2015, 27(3): 1-4.

LIU Quanming, ZHANG Zhaohui, LIU

Shifeng, et al. Application and development of titanium alloy in aerospace and military hardware[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2015, 27(3): 1-4.

[5] 张向辉. 超塑成形 / 扩散连接技术在航空航天上的应用[J]. 科技视界, 2014(22): 345-346.

ZHANG Xianghui. Application of superplastic forming/diffusion bonding technology in aerospace[J]. Science & Technology View, 2014(22): 345-346.

[6] 李志强,郭和平. 超塑成形 / 扩散连接技术的应用进展和发展趋势[J]. 航空制造技术, 2010, 53(8): 32-35.

LI Zhiqiang, GUO Heping. Application progress and development tendency of superplastic forming/diffusion bonding technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010, 53(8): 32-35.

[7] 杜立华,张兴振,韩晓宁,等. 几何参数对 SPF/DB 三层结构表面质量的影响研究[J]. 航空制造技术, 2018, 61(10): 100-103.

DU Lihua, ZHANG Xingzhen, HAN Xiaoning, et al. Study on the influence of geometric parameters on the surface quality of SPF/DB three-layer structure[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(10): 100-103.

[8] CHENG J H, LEE S. Methods for resolving grooving problems in parts manufactured from combined diffusion bonding and superplastic forming processes[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1994, 45(1-4): 249-254.

[9] 秦中环. 带块体嵌件的 TA15 四层结构 SPF/DB 工艺与评价[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.

QIN Zhonghuan. Process and evaluation of TA15 four layer SPF/DB with block insert[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.

[10] 阳峰,张鹏,罗楚养,等. 胶黏剂填补钛合金超塑成形 / 扩散连接零件表面沟槽的可行性研究[J]. 航空精密制造技术, 2017, 53(5): 34-38.

YANG Feng, ZHANG Peng, LUO Chuyang, et al. Feasibility study of adhesive fill up grooves in titanium alloy part[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2017, 53(5): 34-38.

- [11] 阳峰, 姚千斌, 成晓杰, 等. 超塑成型 / 扩散连接钛合金气动面表面沟槽对其强刚度的影响分析[J]. 航空制造技术, 2016, 59(12): 92-95, 99.
- YANG Feng, YAO Qianbin, CHENG Xiaojie, et al. Effects of aerodynamic surface's grooves on SPF/DB titanium alloy part's strength and stiffness[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(12): 92-95, 99.
- [12] 李保永. TA15 钛合金多层结构 LBW/SPF/DB 工艺[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- LI Baoyong. LBW/SPF/DB processing of multi-sheet structure for TA15 titanium alloy[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
- [13] BOTTOMLEY I E. Superplastic forming and diffusion bonding of aircraft structures[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 1995, 209(3): 227-231.
- [14] 李保永, 刘伟, 秦中环, 等. Ti60/TA15 合金四层结构舵面超塑成形/扩散连接技术研究[J]. 航空制造技术, 2019, 62(8): 76-80.
- LI Baoyong, LIU Wei, QIN Zhonghuan, et al. Research on superplastic forming/diffusion bonding for four-sheet structure rudder of Ti60/TA15 alloy[J]. Aviation Manufacturing Technology, 2019, 62(8): 76-80.
- 通讯作者: 李保永, E-mail: libaoyonght239@163.com。

Research on Control Method of Surface Groove of Titanium Alloy SPF/DB Four-Sheet Structure

LI Baoyong^{1,2}, ZHANG Tiejun², ZHANG Kaifeng¹, YAO Wei², QIN Zhonghuan²,
LIU Qi², LIU Wei²

(1. School of Material Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. Beijing Hangxing Machine Manufacturing Co., Ltd., Beijing 100013, China)

[ABSTRACT] In this paper, through the combination of the finite element numerical simulation and the actual test, the causes of the surface groove formation of superplastic forming/diffusion bonding (SPF/DB) four-sheet structure are analyzed and studied. The orthogonal test method is used to analyze the influence of four factors on the surface groove of the panel, including the strain rate $\dot{\epsilon}$, the diffusion connection width b , the thickness ratio t of the core plate to the panel and the friction coefficient u of the die. It can be seen that the thickness ratio t of the core plate to the panel is the most important factor of the surface groove of the panel. Based on the experimental study, a method of pressing 0.2MPa back pressure on the panel surface is proposed, which can effectively control the formation of the surface groove of SPF/DB four-sheet structure.

Keywords: Titanium alloy; Superplastic forming/diffusion bonding (SPF/DB); Four-sheet structure; Surface groove; Orthogonal test; Numerical simulation

(责编 大漠)