

一体化刚性加强结构尺寸对超塑成形减薄率的影响

王会东¹, 谢洪志¹, 吕 伟², 付和国¹, 韩颖杰¹, 李 明¹, 史吉鹏¹

(1. 沈阳飞机工业(集团)有限公司, 辽宁 沈阳 110034; 2. 航空工业沈阳飞机设计研究所, 辽宁 沈阳 110035)

摘要: 为了研究超塑成形/扩散连接过程中, 一体化刚性加强结构的几何尺寸对构件整体减薄率的影响, 通过 CAE 技术并基于超塑成形的技术特点, 对一体化刚性加强结构的厚度、宽度对减薄率的作用进行了计算分析, 优化了一体化刚性加强结构的几何尺寸, 最后进行了验证件的试制验证。结果显示: 降低一体化刚性加强结构的厚度, 有助于抑制构件的过度减薄, 而减小宽度, 有助于提高构件的贴模度, 优化得到的一体化梯度刚性加强结构在加工制造过程中成形稳定, 未出现成形缺陷。验证件的试制结果表明, 采用合理的一体化刚性加强结构尺寸, 可以实现局部加强零件的精准成形, 实测减薄率与计算结果一致, 可以指导零件生产。

关键词: 超塑成形; 扩散连接; 一体化刚性加强结构; 几何尺寸; 变形行为; 减薄率

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.05.009

中图分类号: V262.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2023) 05-0061-06

Influence of integrated rigid reinforcement structure dimension on thinning rate of superplastic forming

Wang Huidong¹, Xie Hongzhi¹, Lyu Wei², Fu Heguo¹, Han Yingjie¹, Li Ming¹, Shi Jipeng¹

(1. Shenyang Aircraft Industry Group Co., Ltd., Shenyang 110034, China;

2. AVIC Shenyang Aircraft Design & Research Institute, Shenyang 110035, China)

Abstract: In order to investigate the influence of the geometric dimensions of integrated rigid reinforcement structure on the overall thinning rate of components during superplastic forming and diffusion bonding process, based on the characteristics of superplastic forming technology, the effect of thickness and width of the integrated rigid reinforcement structure on the thinning rate was calculated and analyzed by CAE technology, and the geometric dimensions of the integrated rigid reinforced structure were optimized. Finally, the trial production verification of verification part was conducted. The results show that reducing the thickness of the intergrated rigid reinforcement structure helps to suppress the excessive thinning of component, while reducing the width helps to improve the degree of die fit for part. The optimized integrated gradient rigid reinforcement structure is stable in the manufacturing process, and there are no forming defects. The trial production results of verification parts indicate that the accurate forming of locally reinforced parts can be achieved by reasonable structural dimensions, and the measured thinning rate is consistent with the calculated results, which can guide the production of parts.

Key words: superplastic forming; diffusion bonding; integrated rigid reinforcement structure; geometric dimensions; deformation behavior; thinning rate

灵活、机动、长寿命、高可靠已经成为新型运载工具的设计发展理念, 因此, 也对产品制造提出了轻量化、大型化、高品质的要求^[1]。超塑成形/扩散连接技术 (Superplastic Forming/Diffusion Bonding, SPF/DB) 作为一种典型的轻量化加工技术, 具有成形质量好、结构适应性好、外形精度高的特

点, 成为国内外薄壁复杂、整体零件精准制造的典范, 并在航空航天构件制造领域得到了广泛的应用^[2-5]。随之, 研究者更是开发优化出多种多层复杂结构的 SPF/DB 加工制造技术, 替代传统的焊接与铆接等制造工艺, 实现了零件的高刚度、轻量化^[6-8]。

SPF/DB 加工过程中, 对构件起到加强作用的筋胞特征, 主要利用材料的超塑性, 依靠超塑成形工艺获得, 但该特征成形时原材料的减薄效应会降低构件的承载能力, 所以, 在满足零件刚度的要求下, 通常采用的措施为增加原材料的厚度。当下, 为了解决零件原材料增厚出现的构件重量整体增加的问题, 针对构件的整体受力状态, 采用梯度刚性

收稿日期: 2023-03-09; 修订日期: 2023-04-03

作者简介: 王会东 (1988-), 男, 学士, 工程师

E-mail: 260098181@qq.com

通信作者: 史吉鹏 (1984-), 男, 博士, 高级工程师

E-mail: shi_jipeng@126.com

结构对构件进行局部增强成为一种有效的解决办法。常用的局部增强结构为在拟制筋胞处放置一块加强块,此种方法的加强块与拟制筋胞处的材料为分体结构,在 SPF/DB 加工过程中会导致加强块脱落,造成零件报废。王珏等^[9]针对加强块脱落的情况,采用将内置形式更改为一体式,在原材料准备时便将加强块的外形在钣金内表面进行一体加工制造,并对局部增加结构的 SPF/DB 工艺进行了探索,实现了构件的制造。但是,局部加强块在 SPF/DB 加工过程中,会参与构件原材料的整体变形减薄,但对于局部加强块的外形尺寸对构件整体的减薄变形行为影响的研究,目前鲜有报道,制约了该技术的进一步推广应用。

本文以某构件的局部一体化梯度刚性加强结构特征为研究对象,采用有限元技术对一体化梯度刚性加强结构特征在 SPF/DB 成形过程中与构件的协调变形行为进行分析,优化一体化梯度刚性加强结构的外形尺寸参数,并进行了成形工艺验证,解决了 SPF/DB 成形工艺产生的局部减薄问题,为 SPF/DB 工艺的推广应用提供了技术支撑。

1 梯度刚性加强结构特征与工艺难点

1.1 结构特征

为了避免 SPF/DB 成形时延展区减薄导致的零件刚度下降问题,针对零件使用过程中的整体受力状态,在准备零件材料时在蒙皮延展区内侧制作与零件原材料一体化的增强结构,形成一体化梯度刚性加强结构,如图 1 所示,避免了分体式增加结构在成形过程中受力不均导致的脱落以及位置偏移问题,提高了成形后加强结构的位置精度。

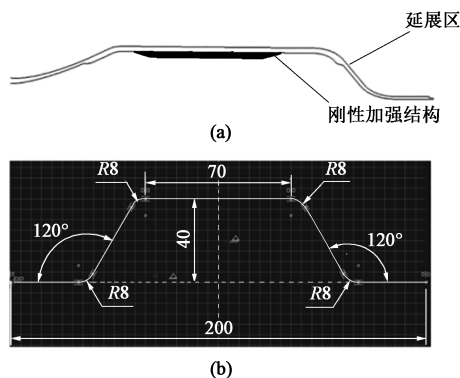


图 1 一体化刚性加强结构示意图

(a) 截面示意图 (b) 截面尺寸

Fig. 1 Schematic diagrams of integrated rigid reinforcement structure

(a) Schematic diagram of section (b) Section dimensions

1.2 工艺难点

一体化梯度刚性加强结构在 SPF/DB 加工时,与蒙皮一体成形,参与零件的成形过程,刚性加强结构的厚度与外形尺寸将直接影响零件的成形质量,如果刚性加强结构的尺寸设计不合理,则会导致所有的成形拉伸集中在非增厚区,造成该区域的过量减薄甚至破裂。因此,设计与优化一体化梯度刚性加强结构的外形尺寸是控制零件质量的核心。

2 有限元仿真

在 CATIA 软件中提取零件延展区梯度刚性加强结构的部位,并采用 Abaqus 商用有限元分析软件进行建模、网格划分以及后续的有限元求解

2.1 材料建模

本构关系采用经典的 Backofen 方程,成形温度为 920 °C,其表达式为:

$$\sigma = K \dot{\varepsilon}^m \varepsilon^n \quad (1)$$

式中: σ 为应力; ε 为应变; K 为材料常数,由材料自身决定,本文取 900 MPa; $\dot{\varepsilon}$ 为应变速率; m 为应变速率敏感指数,本文取 0.57; n 为应变强化指数,本文取 1.754^[10-13]。

TC4 钛合金在进行超塑成形时几乎无应变硬化现象,所以式 (1) 可简化为:

$$\sigma = K \dot{\varepsilon}^m \quad (2)$$

在 ABAQUS 中选用蠕变材料模型,表达式为:

$$\dot{\varepsilon}_{eq} = A \sigma_{eq} \quad (3)$$

式中: $\dot{\varepsilon}_{eq}$ 为等效单轴蠕变应变速率; σ_{eq} 为等效应力; A 为系数,本文取 6.5×10^{-6} 。

2.2 边界条件及接触定义

在计算过程中,始终固定模具的位置,并设置延展区左右两端为完全固定,同时设置垂直于延展区高平面的截面为 Z 向,且其位移为 0^[14]。由于所研制的构件的内蒙皮厚度为 2 mm,因此,分别选取了与内蒙皮等厚的加强结构以及 2 倍于内蒙皮的加强结构,同时为了对变化规律进行分析,在研究过程中增加了厚度为 3 mm 的加强结构,故分别设置加强结构的厚度为 2、3 和 4 mm。在加强区边缘处不设置倒角,其尺寸与延展区上平面的尺寸完全匹配,不存在余量。接触关系设置为有限滑移的面面接触,为了控制变量,设定切向力学摩擦罚值为 0.1。

2.3 仿真结果与分析

2.3.1 刚性加强结构的厚度对减薄率的影响

本次仿真进行了刚性加强结构的厚度分别为 2、3 和 4 mm 的对比试验,试验中施加 1 MPa 载荷来仿

真惰性高压气体对蒙皮的超塑成形过程，成形时间设为 3000 s，其计算结果如图 2 所示。从图 2 中可以看出，应力主要集中在凹模的两个圆角处，最大值出现在加强块边缘附近的圆角处，当加强结构厚度为 2 mm 时其值为 2.0349 MPa、加强结构厚度为 3 mm 时其值为 2.2850 MPa、加强结构厚度为 4 mm 时其值为 2.9359 MPa。最大等效应力以条带状出现在模具与蒙皮的贴合处，在加强结构边缘与模具结合位置也存在较高应力。随着加强结构厚度的增加，最大等效应力逐渐增加。可见随着加强结构厚度的增加，在相同时间下靠近上模圆角的成形难度逐渐增加，贴模程度逐渐降低。在加强结构两端存在变形不均匀的区域，其原因为：超塑成形过程中，模具内部板料充分贴胎，加强结构边缘的金属存在向两侧流动的趋势。加强结构边缘金属的流动程度随着加强结构厚度的增大而增大，这是因为变形抗力的增大致使更多的金属被拉出加强结构边缘。

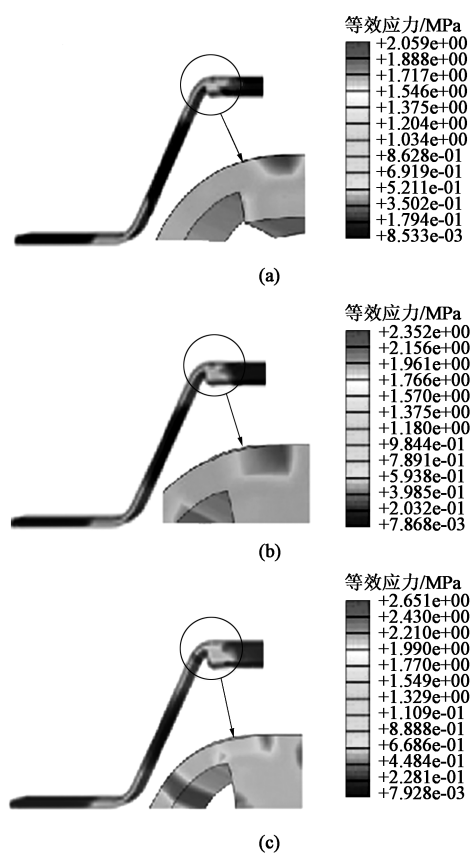


图 2 不同厚度的刚性加强结构的等效应力云图

(a) 2 mm (b) 3 mm (c) 4 mm

Fig. 2 Equivalent stress nephograms of rigid reinforcement structures with different thicknesses

对蒙皮在模具上下圆角处、筋包直壁处、加强结构下表面位置进行弹性应变与等效蠕变应变的对比，如图 3 和图 4 所示。可以看出，两种应变均在模

具圆角处较大，在模具直壁区较为均匀。随着加强结构厚度的增大，两种应变逐渐增大且趋势逐渐放缓，为了能够量化等效蠕变应变数值，绘制其值随时间变化的曲线并做出相应的对比与分析。分析位置选取为模具上下圆角处，以及直壁区与加强结构下表面。

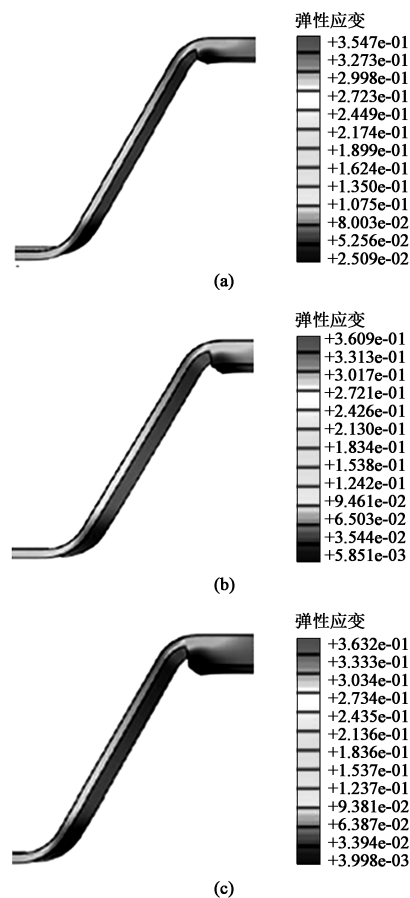


图 3 不同厚度的刚性加强结构的弹性应变云图

(a) 2 mm (b) 3 mm (c) 4 mm

Fig. 3 Elastic strain nephograms of rigid reinforcement structures with different thicknesses

针对不同厚度的加强结构，选取构件上的 4 个点，分别为加强结构、模具上圆角区、模具下圆角区、模具直壁区，分析各点在成形过程中的减薄量，结果如表 1 所示。从图 4 中可以看出，随着加强结构厚度变大，在模具上、下圆角及直壁区的蒙皮的等效蠕变应变均有所增大，且在蒙皮厚度从 2 mm 提高至 3 mm 时的变化趋势较厚度从 3 mm 提高至 4 mm 时急剧。而加强结构位置的等效蠕变应变随厚度增加先轻微下降后急剧提高。在成形的起始时刻各厚度下模型的蠕变应变速率相近，而在直壁区、加强结构较薄的蒙皮可以较早达到稳定的变形。相比 4 个区域的蠕变应变，其应变最大的部位在模具上圆角处，其次为模具下圆角，加强结构的蠕变应变最小。故基于以上结论，在模具上圆角部分的

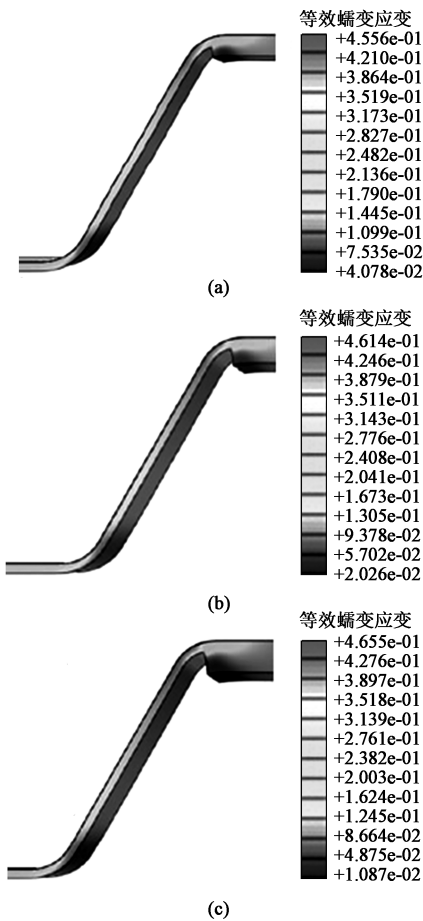


图 4 不同厚度的刚性加强结构的等效蠕变应变云图
(a) 2 mm (b) 3 mm (c) 4 mm

Fig. 4 Equivalent creep strain nephograms of rigid reinforcement structures with different thicknesses

表 1 不同加强结构厚度下不同部位的减薄率 (%)

Table 1 Thinning rates of different parts under different thicknesses of reinforcement structure (%)

部位	加强结构厚度/mm		
	2	3	4
模具下圆角	27.9	28.3	28.7
模具直壁区	23.6	24.3	24.6
模具上圆角	26.6	27.7	28.1
加强结构	7.4	6.0	5.8

蒙皮强度应被重点关注，防止在应力较大的情况下由于过大变形而发生破裂。在超塑成形过程中圆角部位的减薄率最高，其次是模具成形直壁区，而加强结构的减薄率最低。成形过程中圆角部分的金属发生较大塑性变形且发生较大减薄，需要在成形过程中设法通过改进工艺来防止由过度减薄造成的强度刚度不足或成形时破裂。随着加强结构厚度的加大，中间蒙皮的刚度提高，成形过程中中间部位的变形愈加困难，导致周围的金属被拉入成形模具内

致使加强结构的厚度提高而其余区域的减薄率也伴随提高的现象，虽加强结构的减薄率逐渐下降但其余部分的减薄率有不同程度的提高，这将影响成形的整体质量。当加强结构的减薄率在可考虑的影响范围内时，应适当减少加强结构的厚度以提高其余部位的厚度，防止破裂缺陷发生。

2.3.2 刚性加强结构的宽度对减薄率的影响

设置加强结构的宽度分别为 60、70 和 80 mm，厚度均为 4 mm，进行应力、蠕变应变及减薄率的对比分析。从图 5 可以看出，当加强结构的宽度增加时，在模具上圆角处的应力集中并逐渐向圆角两侧移动，应力集中条带的宽度逐渐变窄，且应力幅值在相同的成形时间下先急剧升高后缓慢下降。随着加强结构宽度的增大，加强结构的边缘逐渐接近甚至超过上圆角，则由于受到了模具的约束作用而产生了弯曲变形，导致了加强结构边缘区域承受了较大的弯曲应力，由弯曲导致的应力变化区域随加强结构尺寸的增大而增大。

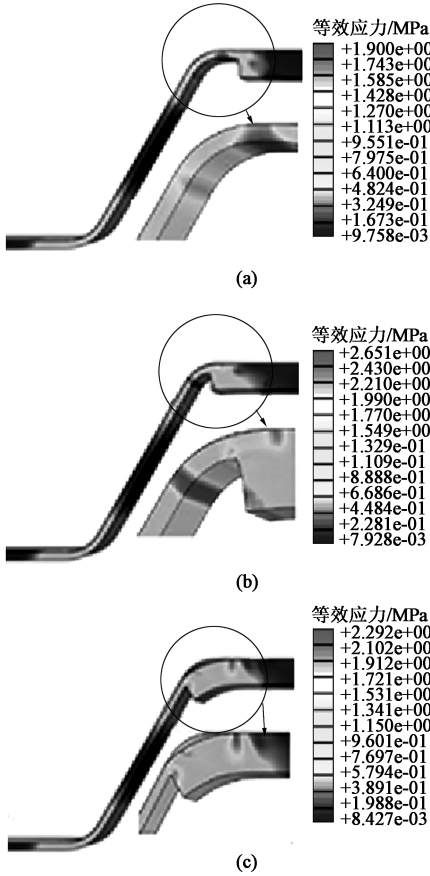


图 5 不同宽度的刚性加强结构的等效应力云图
(a) 60 mm (b) 70 mm (c) 80 mm

Fig. 5 Equivalent stress nephograms of rigid reinforcement structures with different widths

当加强结构宽度增加时，蠕变应变导致的变形

分布越来越不均匀，尤其是在加强结构两侧贴合圆角处。贴近模具的金属在两侧拉力的作用下发生流动，而加强结构远离模具区域的金属的蠕变应变相对较少，如图 6 所示。蠕变应变最大值分布在模具圆角以及板料与加强结构的过渡位置，且最大幅值随着加强结构宽度的增加而增加，内蒙皮其余部分的变形较为均匀。

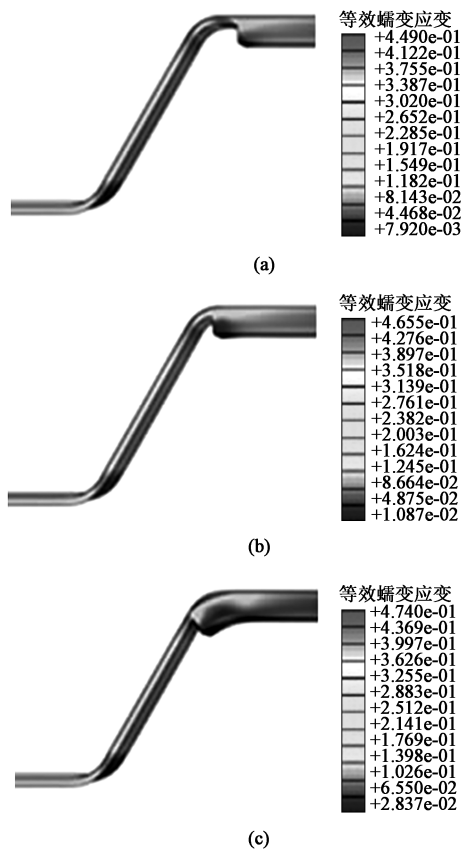


图 6 不同宽度的刚性加强结构的等效蠕变应变云图
(a) 60 mm (b) 70 mm (c) 80 mm

Fig. 6 Equivalent creep strain nephograms of rigid reinforcement structures with different widths

在相同的超塑成形时间内，加强结构宽度越小贴模性越好。当加强结构宽度较大时，贴模过程中由于弯曲区域的刚度较大，不易发生变形，致使贴模效果并不理想。如使用较宽的加强结构则需要选择较长的成形时间、较大的成形压力或较大的模具圆角半径。

选取构件上 4 个点，分别为不同宽度的加强结构、模具上圆角区、模具下圆角区、模具直壁区，分析各点在成形过程中的减薄量，结果如表 2 所示。从表 2 中可以看出，加强结构的宽度减少可以促进成形过程中金属向型腔内部流动，并且能够相应降低变形区的减薄率。加强结构宽度降低会伴随着加强结构减薄率加大，但其影响较小。反之对其余区

域的影响较大，当加强结构的宽度小于筋包宽度时能够明显发现圆角处的减薄率降低，从而减少成形过程中因为减薄率过大而引起的破裂现象。

表 2 不同加强结构宽度下不同部位的减薄率 (%)
Table 2 Thinning rates of different parts under different widths of reinforcement structure (%)

部位	加强结构宽度/mm		
	60	70	80
模具下圆角	27.0	28.5	29.0
模具直壁区	23.6	24.1	24.2
模具上圆角	25.0	28.0	28.0
加强结构	5.5	5.4	5.2

3 试验验证

根据上述对加强结构厚度及宽度的计算优化结果进行试验验证，其中试验供需依次为：计算展开料—下料—加工一体化刚性加强结构（图 7）—定位—涂止焊剂—扩散连接—超塑成形—制件外形—检验、交付。成形后制件如图 8 所示，从图 8 中可以看出，零件整体成形良好，表面质量满足服役需求。对选取的各点采用超声进行厚度检测，测量结果如表 3 所示，可以看出，实测减薄量与仿真结果基本一致。

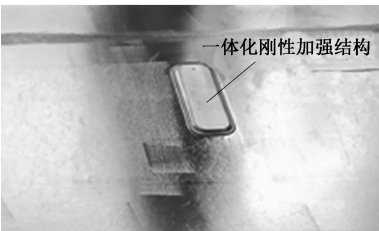


图 7 一体化梯度刚性加强结构

Fig. 7 Integrated ladder rigid reinforcement structure

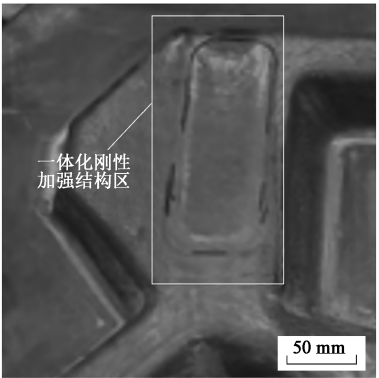


图 8 试验验证件

Fig. 8 Test verification piece

表 3 不同加强结构宽度下不同部位的实测减薄率

Table 3 Measured thinning rates of different parts under different widths of reinforcement structure

部位	原厚度/ mm	成形后厚度/ mm	减薄量/ mm	减薄率/ %
模具下圆角	2	1.752	0.248	12.4
模具直壁区	2	1.747	0.253	12.7
模具上圆角	2	1.742	0.258	12.9
加强结构	6	5.634	0.366	6.1

4 结论

(1) 一体化梯度刚性加强结构设计的外蒙皮厚度为 2 mm, 内蒙皮厚度为 6 mm, 在内蒙皮内侧加工出 4 mm 的梯度刚性加强结构, 并在 920 °C 下进行成形。

(2) 一体化梯度刚性加强结构应在充分考虑其刚性的情况下适当减小厚度, 有助于防止成形破裂, 同时刚性加强结构的宽度越小, 越有助于提高最终成形零件的贴模度。

(3) 通过零件试制, 验证了加强块结构设计的可行性与合理性, 仿真结果与试验结果相符, 研究所采用的分析手段可以为后续类似结构设计提供参考。

参考文献:

- [1] 韩颖杰, 付和国, 王会东, 等. 含预置板的双层钛合金超塑成形/扩散连接零件缺陷分析及工艺改进 [J]. 塑性工程学报, 2020, 27 (4): 41-47.
Han Y J, Fu H G, Wang H D, et al. Defects analysis and process improvement for double-layer SPF/DB structure parts of titanium alloy with pre-set panel [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2020, 27 (4): 41-47.
- [2] 周凌华, 沈中伟, 许涛. Ti55 钛合金双层板的超塑成形/扩散连接数值模拟及工艺试验 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (8): 76-82.
Zhou L H, Shen Z W, Xu T. Numerical simulation and process test on superplastic forming/diffusion bonding for Ti55 titanium alloy double-layer plate [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (8): 76-82.
- [3] 武永, 周贤军, 吴迪鹏, 等. TC31 钛合金四层舵翼超塑成形/扩散连接工艺研究 [J]. 航空制造技术, 2021, 64 (17): 34-40.
Wu Y, Zhou X J, Wu D P, et al. Superplastic forming and diffusion bonding process for four-sheet air rudder of TC31 titanium alloy [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64 (17): 34-40.
- [4] 吴迪鹏, 吴永, 周贤军, 等. TC4 钛合金点阵/4 层混合结构舵翼超塑成形/扩散连接工艺研究 [J]. 塑性工程学报, 2022, 29 (5): 92-97.
Wu D P, Wu Y, Zhou X J, et al. SPF/DB process of rudder wing lattice/four-sheet hybrid structure of TC4 titanium alloy [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2022, 29 (5): 92-97.
- [5] 王安阳, 王重阳, 卢振, 等. TiAl 薄壁中空结构材料制备与成形一体化研究现状 [J]. 精密成形工程, 2022, 14 (2): 66-73.

- Wang A Y, Wang C Y, Lu Z, et al. Research status of integration of preparation and forming of TiAl thin wall hollow structure materials [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2022, 14 (2): 66-73.
- [6] 李保永, 张铁军, 张凯锋, 等. 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 [J]. 航空制造技术, 2020, 63 (21): 63-67.
Li B Y, Zhang T J, Zhang K F, et al. Research on control method of surface groove of titanium alloy SPF/DB four-sheet structure [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2020, 63 (21): 63-67.
- [7] 李保永, 蒋少松. Ti2AlNb 合金超塑性能及四层立筋结构超塑成形/扩散连接工艺 [J]. 中国有色金属学报, 2020, 30 (1): 103-111.
Li B Y, Jiang S S. Superplastic forming/diffusion bonding of Ti-22Al-27Nb hollow four-layer structure [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2020, 30 (1): 103-111.
- [8] 杨钦鑫, 童国权, 何泽洲. 钛合金二层板结构超塑成形/扩散连接试验研究 [J]. 稀有金属, 2017, 41 (12): 1305-1310.
Yang Q X, Tong G Q, He Z Z. Process of superplastic forming/diffusion bonding for two-sheet structure of titanium alloy [J]. Chinese Journal of Rate Metals, 2017, 41 (12): 1305-1310.
- [9] 王珏, 王月林, 张晓巍, 等. 基于 CAE 的梯度增强刚性结构超塑成形/扩散连接工艺研究 [J]. 塑性工程学报, 2020, 29 (12): 41-46.
Wang J, Wang Y L, Zhang X W, et al. Research on superplastic forming/diffusion bonding process of gradient reinforced rigid structure based on CAE [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2020, 29 (12): 41-46.
- [10] Mosleh A O, Mikhaylovskaya A V, Kotov A D, et al. Experimental, modelling and simulation of an approach for optimizing the superplastic forming Ti-6Al-4V titanium alloy [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 45: 262-272.
- [11] 王珏, 张晓巍, 张英伟, 等. TA32 钛合金双层结构零件超塑成形/扩散连接工艺 [J]. 塑性工程学报, 2022, 29 (3): 53-58.
Wang J, Zhang X W, Zhang Y W, et al. Superplastic forming and diffusion bonding technology of TA32 titanium alloy double-layer structure part [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2022, 29 (3): 53-58.
- [12] 李析桐, 王会东, 周忠智, 等. 基于有限元分析 TC4 筋包超塑成形工艺优化 [J]. 兵器科学与工程, 2021, 44 (5): 12-16.
Li X T, Wang H D, Zhou Z Z, et al. Optimization of superplastic forming process of TC4 panel rib based on finite element analysis [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2021, 44 (5): 12-16.
- [13] 王斌, 朱冬妹, 刘章光, 等. TA15 钛合金四层板结构 SPF/DB 数值模拟及工艺研究 [J]. 塑性工程学报, 2020, 27 (6): 98-104.
Wang B, Zhu D M, Liu Z G, et al. Numerical simulation and process study of SPF/DB for four-sheet structure of TA15 titanium alloy [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2020, 27 (6): 98-104.
- [14] 赵毅, 陶华. 钛合金板塑成形/扩散连接成形因素影响的数值模拟 [J]. 航空精密制造技术, 2007, 43 (1): 41-43.
Zhao Y, Tao H. Numerical simulation of effect on SPF/DB of Ti alloy sheet [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2007, 43 (1): 41-43.