

Invar36 铁镍合金厚板热压成形框架模具的数值模拟与验证

邹震宇, 张 毅, 张小波, 岳 维, 陈明英, 王 强, 江开林

(成都飞机工业(集团)有限责任公司, 四川 成都 610092)

摘要: 为解决 Invar36 铁镍合金复材工装模板成形效果差的问题, 通过高温压缩实验, 研究了 Invar36 铁镍合金的高温热变形行为, 采用刚塑性有限元法, 利用高温压缩实验所得到的材料参数, 建立了 Invar36 铁镍合金厚板热压成形框架模具有限元模型, 通过有限元仿真分析研究了不同纵横筋条间距对零件成形效果的影响, 并总结了框架式热压模具成形时零件的变形特点。结果表明: 在上下模无筋条支撑的区域中, 由于零件脊线部位的曲率变化最大、变形量最大, 而又无型面支撑, 成形效果最差。因此, 提出了在零件的脊线部位增加支撑筋条的方案, 改进框架式热压模具的结构, 并通过热压成形实验, 验证了改进的热压模具结构的有效性。

关键词: 复材成形工装; 热压成形; Invar36 铁镍合金; 离散框架式模具; 纵横筋条间距

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.07.025

中图分类号: TB33; TG76; V261 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2023) 07-0184-08

Numerical simulation and verification on hot stamping frame die for Invar36 iron-nickel alloy thick plate

Zou Zhenyu, Zhang Yi, Zhang Xiaobo, Yue Wei, Chen Mingying, Wang Qiang, Jiang Kailin

(AVIC Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd., Chengdu 610092, China)

Abstract: In order to solve the problem of poor forming effect of composite material tooling template for Invar36 iron-nickel alloy, the high-temperature hot deformation behavior of Invar36 iron-nickel alloy was studied by high-temperature compression experiments, and the finite element model of hot stamping frame die for Invar36 iron-nickel alloy thick plate was established by rigid-plastic finite element method and material parameters obtained from high-temperature compression experiments. Then, the influences of different transverse and longitudinal rib spacings on the forming effect of part were studied by the finite element simulation analysis, and the deformation characteristics of part during the forming process for the frame hot stamping die were summarized. The results show that in the area where the upper and lower dies are not supported by ribs, and the forming effect is the worst because the curvature change at the ridge line of part and the deformation are the largest, and there is no surface support. Therefore, a scheme of adding support ribs at the ridge line of part is proposed to improve the structure of frame hot stamping die, and the effectiveness of the improved hot stamping die structure is verified by hot stamping experiments.

Key words: composite material forming tooling; hot stamping; Invar36 iron-nickel alloy; discrete frame die; transverse and longitudinal rib spacings

碳纤维增强树脂基复合材料具有较高的比强度、比模量、优异的可设计及工艺性, 被广泛用于国内外航空航天以及汽车零部件的生产制造中^[1-4]。复合材料在各类大型民用飞机上的应用广泛, 其中, 在 A380 飞机中的重量占总重量的 25%, 在 B787 飞机中的重量占比更是达到了 50%, 在 A350XWB 飞机结构中的重量占比更是达到了 52%^[5]。航空用复材蒙皮件

的成形过程主要是在复材成形模上进行铺层, 并在热压罐内通过最高可达 0.8 MPa 的高压条件、最高可达 200 ℃ 左右的高温条件进行固化成形。此外, 为确保复材零件成形后的力学性能、物理性能满足要求, 复合材料的成形过程中设置了较高的真空度要求。因此, 复材成形模具在满足复材零件成形尺寸精度需求的同时, 还需要具有较强的高温高压气密性。

由于 Invar36 铁镍合金在 200 ℃ 以下温度时具有较低的热膨胀系数 (约为 $2.0 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$), 且和碳纤维增强树脂基复合材料的热膨胀系数非常接近, 因此, 采用 Invar36 铁镍合金作为复材零件成形模具

收稿日期: 2022-09-09; 修订日期: 2022-12-11

作者简介: 邹震宇 (1990-), 男, 硕士, 工程师

E-mail: zzz2001118@qq.com

的材料，可有效解决成形过程中因模具材料和复合材料热膨胀系数不同导致的零件成形后尺寸精度较差的问题^[6-11]。美国波音公司和欧洲空客公司已经大量运用 Invar36 铁镍合金生产大型复合材料零件成形模具，其中包括波音公司的 B787 飞机的机翼复材制件成形工装（长度达 27 m）。而随着国内军民机产业的高速发展，大型复合材料 Invar36 铁镍合金模具的应用将越来越广泛^[12]。

复材成形模模板的预成形方法主要为^[13]：滚弯预成形、热压预成形、厚钢板整体加工以及逐点加压成形等。目前，在航空复合材料成形工装制造领域，针对曲率较大的 Invar36 铁镍合金材料工装模板，通常采用热压工艺对模板进行预成形。特别地，对于新机研制过程中的复材成形工装，为确保工装快速低成本研制，其模板通常采用如图 1 所示的框架结构的热压模具进行预成形。

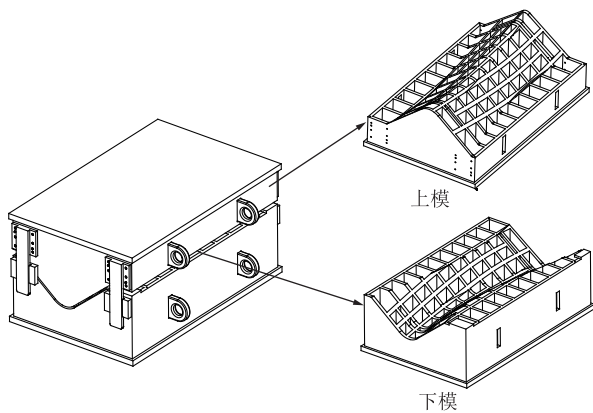


图 1 框架式热压模具示意图
Fig. 1 Schematic diagram of frame hot stamping die

长期以来，在采用框架式热压模具对模板进行成形时，成形效果较差，成形后的模板精度与理论型面的偏差超过 3 mm，严重影响模板后续加工，影响工装最终加工后的厚度均匀性，影响复材零件的成形质量。因此，有必要对复材成形工装模板热压成形框架式模具进行结构分析及改进，提高成形精度。本文通过高温压缩实验，研究了 Invar36 铁镍合金的高温热变形行为，采用刚塑性有限元法，利用实验所得材料参数，建立了复材成形工装模板热压成形框架模具有限元模型，通过有限元仿真分析了不同横纵筋条间距对零件成形效果的影响，总结了此类框架式热压模具的成形特点，据此对框架式热压模具进行了结构改进，并通过热压成形实验，验证了改进热压模具结构的有效性。

1 Invar36 铁镍合金高温压缩实验

为了研究 Invar36 铁镍合金的高温变形行为及变形机理，对挤压态 Invar36 铁镍合金进行了轴对称高温压缩实验。实验所选用的材料为法国进口的殷菲公司的热轧 Invar36 钢板，实验中所采用的材料的化学成分如表 1 所示。

表 1 Invar36 铁镍合金的化学成分（%，质量分数）
Table 1 Chemical compositions of Invar36 iron-nickel alloy
(%, mass fraction)

Ni	C	Si	Mn	S	P	Cr	Co	Fe
35.5~36.5	≤0.01	≤0.2	0.2~0.4	≤0.002	≤0.007	≤0.15	≤0.4	余量

本次高温压缩实验所用的试样为 $\Phi 8\text{ mm} \times 12\text{ mm}$ 的圆柱体试样，试样端面采磨削加工平整，并与侧面保持垂直。实验采用的设备为 Gleeble-1500 热模拟实验机，该装置可以实现加热温度、加热速度以及变形量等参数的精确控制，并进行实时记录。在实验之前，在试样端面涂抹石墨润滑剂，减少端面摩擦力，减少摩擦因素对热压缩结果的影响，并将热电偶点焊于试样中间部位，以实现试样温度的实时监控。

高温压缩实验的示意图如图 2 所示，其中， $\dot{\epsilon}$ 为应变速率， T 为变形温度。首先将所有试样进行均匀化处理，即加热至 $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，保温 12 h ，并炉冷到室温；接着以 $10\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ 的速度将试样分别加热到所需的变形温度（ 600 、 675 、 750 、 825 和 $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ ），保温 3 min ，使试样温度均匀；随后在各变形温度下，进行压缩量为 60% 、应变速率分别为

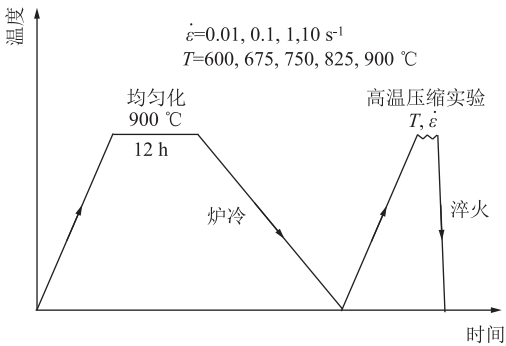


图 2 高温压缩实验示意图
Fig. 2 Schematic diagram of high temperature compression experiment

0.01、0.1、1 和 10 s^{-1} 的 20 组高温压缩实验。高温压缩实验过程中的真应力、真应变、变形温度、变形量等数据,可以通过计算机控制系统自动采集获得。

图 3 为通过高温压缩实验获得的 Invar36 铁镍合金在不同变形温度和应变速率下的真应力-真应变曲线。由图 3 可知,变形温度、应变速率以及真应变这 3 个因素对 Invar36 铁镍合金真应力的影响均比

较大。真应力随着应变速率的降低和变形温度的升高呈明显下降的趋势,这是因为应变速率的降低使变形的时间更长,位错交滑移过程有更足够的时间进行,促进了动态再结晶的发生,而较高的温度则提供了较大的动态再结晶形核驱动力,使动态再结晶的作用更加明显,其软化作用也更加明显。因此,在对 Invar36 铁镍合金热成形时,选择合适的变形温度和应变速率,可以更好地发挥其成形性能。

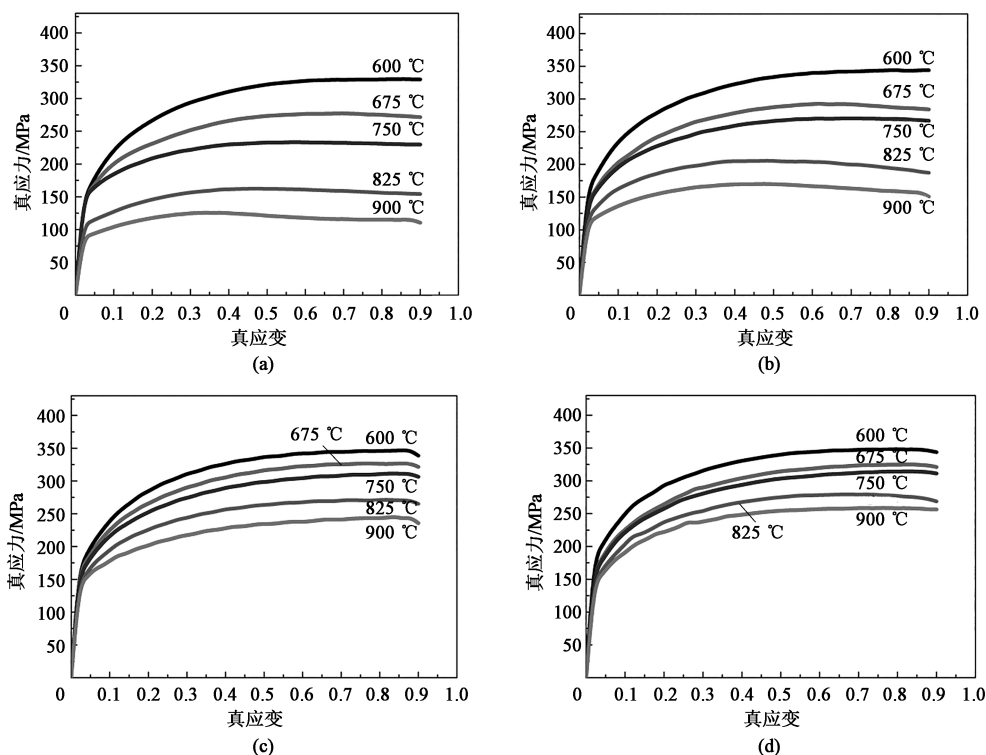


图 3 Invar36 铁镍合金在不同变形温度和应变速率下的真应力-真应变曲线

(a) $\dot{\epsilon} = 0.01\text{ s}^{-1}$ (b) $\dot{\epsilon} = 0.1\text{ s}^{-1}$ (c) $\dot{\epsilon} = 1\text{ s}^{-1}$ (d) $\dot{\epsilon} = 10\text{ s}^{-1}$

Fig. 3 True stress-true strain curves of Invar36 iron-nickel alloy at different deformation temperatures and strain rates

2 复材成形工装模板热压成形有限元模型构建

2.1 复材成形工装模板热压成形框架模具结构

复材成形工装模板热压成形的框架式模具主要包含下模、上模、吊耳、导向块、导滑槽 5 个部分,如图 4 所示。其中,上、下模主要由底板、横向筋条以及纵向筋条构成,横纵筋条以榫卯结构连接并焊接在一起,并与底板焊接组成框架结构主体,保证整体的结构强度。底板板厚、横纵筋条板厚及间距根据实际零件的成形难度进行设置,通常底板板厚设置为 60 mm,横纵筋条板厚设置为 40 mm,各筋条间距约为 250~350 mm,上、下模由待成形零件曲面分割形为非连续型面,实现坯料的成形。

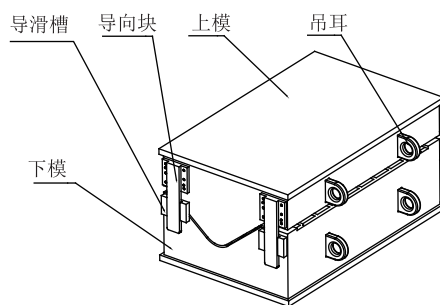


图 4 框架式热压模具结构示意图

Fig. 4 Structure schematic diagram of frame hot stamping die

2.2 有限元模型的建立

Invar36 铁镍合金模板的热压过程是一个热-力耦合的问题,且 Invar36 铁镍合金在高温下的变形过程是一个高度非线性的问题,因此模板热压过程的有

限元模型相对复杂。本文中，对热压成形过程中的上、下模进行了简化处理，有限元模型建立过程如下。

将上、下模中各基准孔、导滑槽安装孔、吊耳安装孔删除，简化模型；去除吊环、导向块、导滑槽结构（不参与计算）；将上、下模以及坯料转换格式并导入 DEFORM-3D 软件中，将上、下模设置为刚性传热体，坯料设置为刚塑性变形体。为提高计算速度，坯料网格采用四面体网格。在流变应力本构模型的设置上，由于 DEFORM-3D 软件材料库中不含 Invar36 铁镍合金的应力应变模型，因此，本文直接将第一章中开展的 Invar36 铁镍合金高温压缩实验的数据输入至新建的材料模型中，并直接进行保存和调用。建立的框架式热压模具有限元模型示意图如图 5 所示。

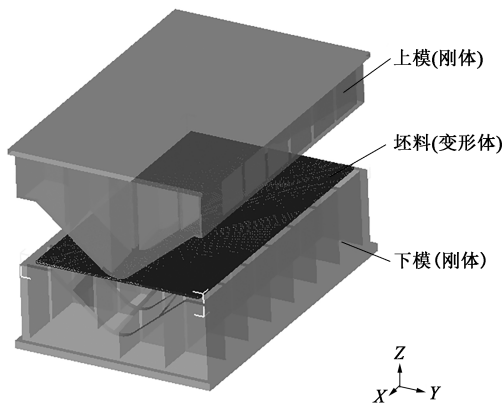


图 5 框架式热压模具有限元模型示意图
Fig. 5 Schematic diagram of finite element model for frame hot stamping die

2.3 初始及边界条件的定义

在厚板热压时，通常为下模固定不动，而上模则可以通过以下两种方式进行控制：（1）通过控制上模的压力来实现上模下压；（2）通过给定上模的下压速度或者位移-时间曲线来控制。在仿真时，由于不清楚热压过程中上模的具体载荷情况，所以上模通过压力控制不易实现，因此，本文在仿真时通过给定上模的下压速度来控制上模的运动。本文中将上模的运动速度设定为 $5\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

其他参数设置主要考虑上下模的初始温度、坯料初始温度、环境温度、上下模与坯料接触的摩擦因数、坯料与上下模的传热系数以及坯料和环境的传热系数。其中，上、下模与坯料之间主要通过固体之间的热传导进行接触传热，传热效率较高，本文中采取软件中推荐的热成形过程模具接触传热系数 $5\text{ N} \cdot (\text{s} \cdot \text{mm} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$ ；坯料与环境间主要依靠空

气的热对流进行传热，传热效率相对较低，本文中同样采取软件推荐的热成形过程坯料与环境对流传热系数 $0.02\text{ N} \cdot (\text{s} \cdot \text{mm} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$ 。具体的参数设置见表 2。

表 2 热压过程有限元模型参数
Table 2 Finite element model parameters of hot stamping process

参数	数值
坯料初始温度/ $^\circ\text{C}$	750
上、下模初始温度/ $^\circ\text{C}$	20
环境温度/ $^\circ\text{C}$	20
上、下模与坯料摩擦因数	0.3（剪切摩擦）
坯料与环境间传热系数/ $(\text{N} \cdot (\text{s} \cdot \text{mm} \cdot ^\circ\text{C})^{-1})$	0.02
坯料与上、下模间传热系数/ $(\text{N} \cdot (\text{s} \cdot \text{mm} \cdot ^\circ\text{C})^{-1})$	5

3 热压成形框架模具结构数值模拟

3.1 纵横筋条间距对模板成形效果的影响

热压成形框架式模具通常用于新机研制过程中的复材成形工装模板的预成形，但框架式模具的纵横筋条间距直接决定了型面的离散程度，从而影响模板的成形效果。纵横筋条的间距过大，则模板成形效果差。若成形后模板与理论型面的误差超过 $\pm 2\text{ mm}$ ，则无法满足后续加工要求，且无法保证最终模板的厚度均匀性；而纵横筋条间距太小，则会大大增加成形模具的制造成本和研制周期。因此，有必要对纵横筋条间距对零件成形效果的影响进行研究。本文针对一典型的曲率变化较大的复材成形工装模板（图 6）的热压成形过程，通过将纵横筋条间距分别设置为 $239\text{ mm}/215\text{ mm}$ 、 $265\text{ mm}/251\text{ mm}$ 、 $298\text{ mm}/302\text{ mm}$ 、 $341\text{ mm}/377\text{ mm}$ （模具的长宽尺寸

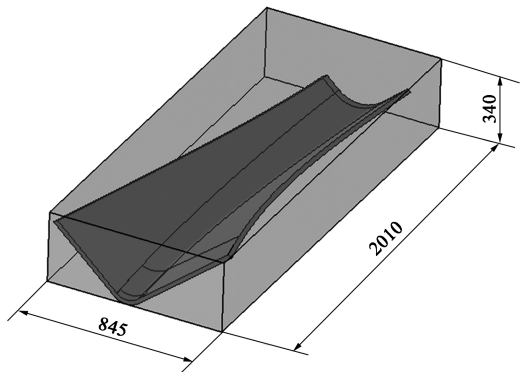


图 6 典型的曲率变化较大的复材成形模板零件
Fig. 6 Typical composite material forming template part with large curvature change

为 2510 mm×1630 mm), 分别采用前文建立的有限元模型进行仿真分析, 研究了不同横纵筋条间距对其成形最终效果的影响。

图 7 为不同横纵筋条间距下模板最终的成形效果。为进一步对零件最终成形效果进行定量分析, 本文将有限元仿真结果中坯料最终成形状态的有限元模型生成数模文件, 并导入 Geomagic 软件中, 与理论零件形状进行了对比, 如图 8 所示 (负偏差代表零件塌陷, 正偏差代表成形不充分)。从图 8 可以看出, 横纵筋条间距越窄, 模板最终的成形效果越好。横纵筋条间距为 341 mm/377 mm 和 298 mm/302 mm 时, 模板成形后, 大部分区域与理论形状相差较大, 超过 ± 2 mm 的误差范围, 局部甚至超过 15 mm, 完全无法满足模板后续加工要求; 横纵筋

条间距缩小至 265 mm/251 mm 时, 模板成形后, 大部分区域与理论形状的误差在 ± 2 mm 范围内, 仅有局部区域误差较大, 零件成形效果较差的区域较少, 可以通过局部校形的方法对零件局部进行修整, 使零件满足后续加工要求; 当横纵筋条间距进一步缩小为 239 mm/215 mm 时, 模板成形效果进一步变好, 大部分区域与理论形状相比, 误差在在 ± 2 mm 范围内。若继续缩小横纵筋条间距, 模板最终成形效果会更好。但由于横纵筋条间距低于 200 mm 时, 各筋条之间的焊接难度会显著增加, 增加制造周期的同时, 还会带来成本的增加, 整体经济性较差。因此, 结合仿真结果和实际制造过程分析, 横纵筋条间距应尽量控制在 200~250 mm, 并根据模具实际大小进行优化调整。

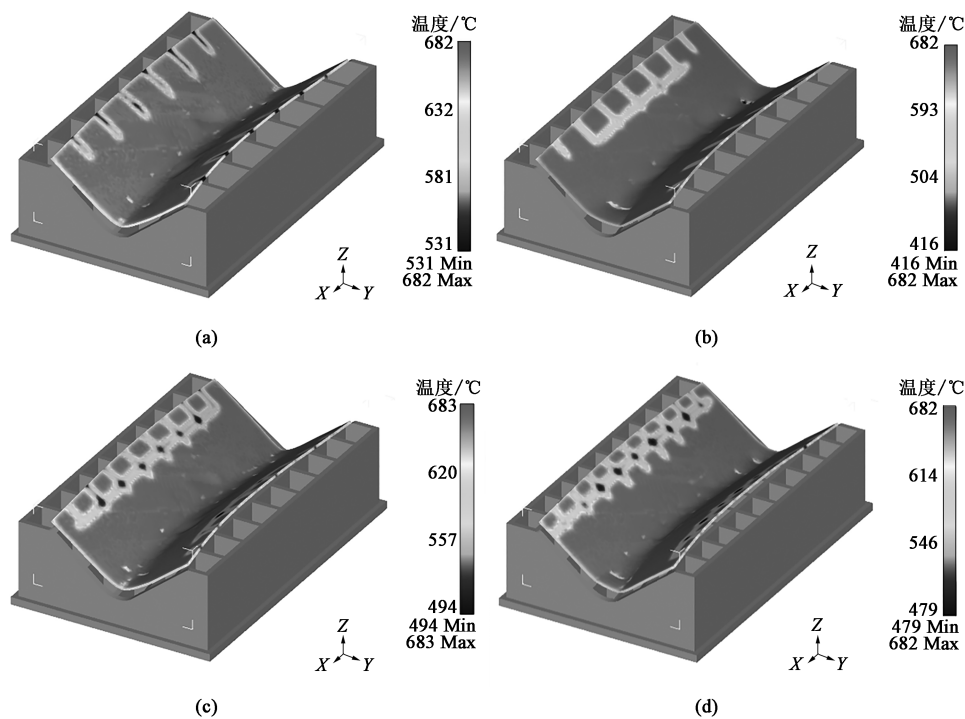


图 7 不同横纵筋条间距下模板最终的成形效果

(a) 341 mm/377 mm (b) 298 mm/302 mm (c) 265 mm/251 mm (d) 239 mm/215 mm

Fig. 7 Final forming effects of template under different transverse and longitudinal rib spacings

3.2 热压成形框架模具结构改进

为进一步优化框架式模具的成形效果, 本文针对 3.1 节中横纵筋条间距为 239 mm/215 mm 的框架模具的成形效果进行了进一步分析, 对比了横纵筋条网格位置、模板曲率变化的脊线位置和模板成形效果较差的区域之间的关系, 如图 9 所示。

从图 9 中可以发现, 在横纵筋条网格位置, 由于模板具有连续型面支撑, 因此成形效果较好, 而无横纵筋条网格的位置, 成形效果稍差。无支撑区

域中, 沿 X 向脊线和 Y 向脊线部位, 由于曲率变化最大, 变形量最大, 而又无型面支撑, 因而成形效果最差。因此, 仅需在零件变形最大的脊线位置增加支撑, 即可保证整体的成形效果。通过以上分析, 结合零件实际变形特点, 本文最终确定能够保证模板零件成形效果的框架式模具的改进方式为: 在零件外形线和零件脊线附近增加支撑, 支撑平行于原有横纵筋条, 大致沿零件线或脊线走向设置, 如图 10 所示。

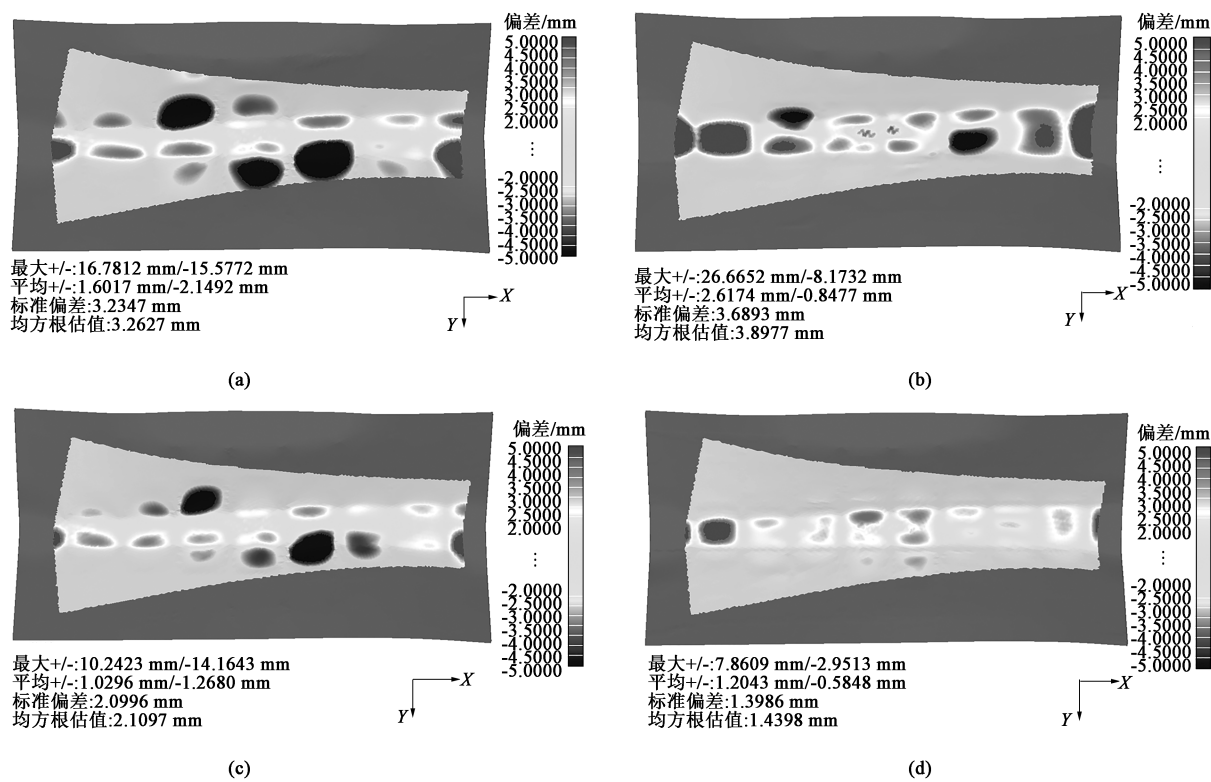


图 8 不同纵横筋条间距下模板最终成形形状与理论形状的对比如

(a) 341 mm/377 mm (b) 298 mm/302 mm (c) 265 mm/251 mm (d) 239 mm/215 mm

Fig. 8 Comparison between final forming shape and theoretical shape of template under different transverse and longitudinal rib spacings

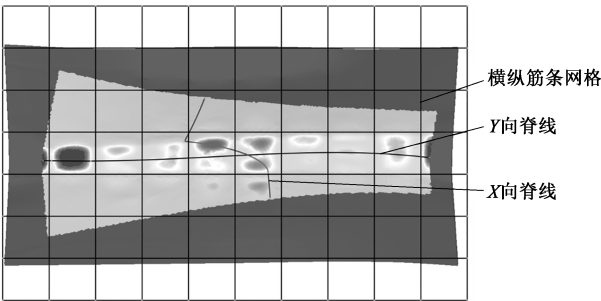


图 9 纵横筋条网格位置、模板曲率变化的脊线位置和模板成形效果较差区域的对比图

Fig. 9 Comparison diagram of grid position for transverse and longitudinal ribs, ridge line position with changing template curvature and poor forming effect area of template

图 11 为采用改进的框架式模具结构得到的仿真结果，图 12 为最终成形后模板与理论形状的对比如。从图 12 可以看出，模板成形后，大部分区域与理论形状相差较小，仅有 1 个非常小的区域，误差超过了 4 mm，其余部位误差均在 ± 3 mm 以内，且大部分区域误差在 ± 2 mm 以内，说明模具的局部改进对成形效果的改善效果较好，成形后的零件能够满足后续加工要求。

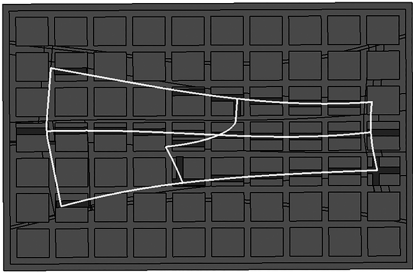


图 10 框架式模具结构改进方案

Fig. 10 Improved scheme of frame die structure

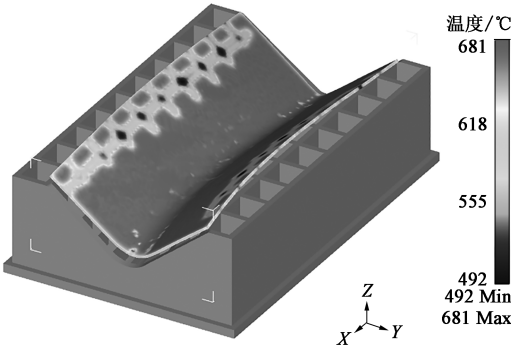


图 11 结构改进后模板最终的成形效果仿真

Fig. 11 Simulation of final forming effect for template after structure improvement

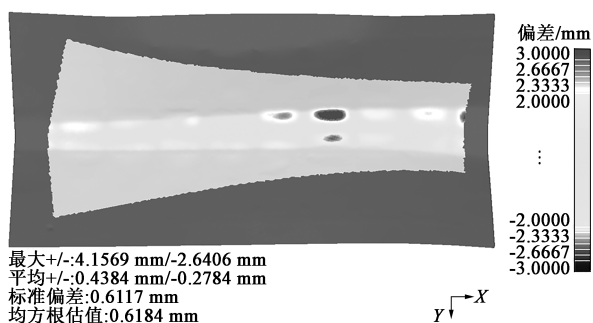


图 12 结构改进后模板最终成形形状与理论形状的对比

Fig. 12 Comparison between final forming shape of template after structure improvement and theoretical shape

4 成形实验验证

4.1 实验设备及材料

实际生产设备是某厂家自行改造的 6000 t 油压机，所选的 Invar36 铁镍合金为法国殷菲公司进口的厚度为 25.4 mm 的热轧钢板，坯料尺寸为 2320 mm×1355 mm。材料的具体化学成分如表 1 所示。

4.2 模板热压试制流程

根据 3.2 节中改进的框架式压模结构进行设计制造，制造完成后将上模安装在油压机上方，下模放置于工作平台相应位置，不在平台上固定，实验过程如图 13 所示，主要流程如下：

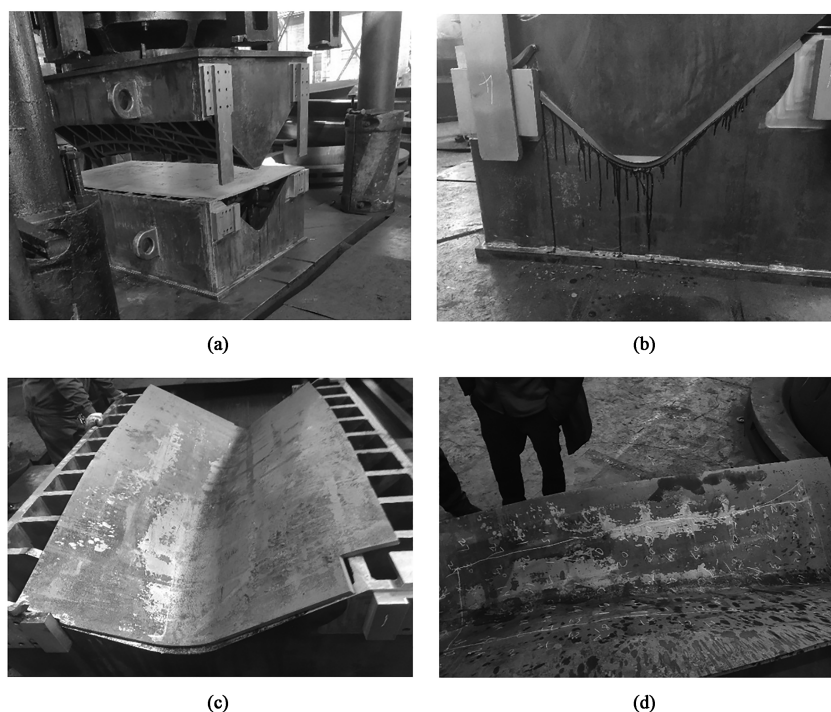


图 13 模板热压试制流程

(a) 模板热压 (b) 保压 (c) 冷却 (d) 测量

Fig. 13 Hot stamping trial production process of template

(a) Template hot stamping (b) Holding pressure (c) Cooling (d) Measurement

(1) 将坯料放入加热炉中以 $10\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 的速度加热至 $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，保温 1 h 后，以 $60\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$ 的速度加热至 $(800\pm 20)\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，保温 30~60 min；

(2) 将模板毛坯从加热炉中去除并快速移至压下模上，利用挡料块粗定位；

(3) 上模下压（下压时应确保零件温度在 $(750\pm 20)\text{ }^{\circ}\text{C}$ ），待上模移动至理论位置后，保持压力 5~10 min，待零件冷却至 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下时，压机卸载；

(4) 模板零件随下模一起冷却，待零件温度下

降至 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下时，取出模板零件；

(5) 完全冷却后，将模板零件再次放回下模，利用三坐标测量臂测量模板零件的实际成形效果。

4.3 结果与讨论

对上述实验过程所制得的模板零件进行测量分析，并将测量结果导入 Geomagic 软件进行定量分析，结果如图 14 所示。从图 14 可以看出，采用改进后的模具进行热压成形，模板成形后，大部分区域与理论形状相差较小，误差在 $\pm 2\text{ mm}$ 范围内，仅有局部区域超过 $\pm 3\text{ mm}$ ，最大达到 4 mm 左右，说明

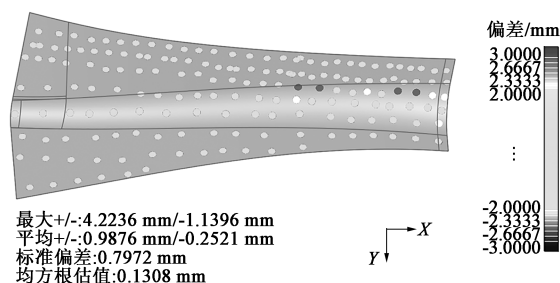


图14 试制模板测量结果

Fig. 14 Measurement results of trial template

模具的局部改进对成形效果的改善较好, 成形后的零件能够满足后续加工要求, 证明了本文改进结构的有效性。

5 结论

(1) 框架式热压模具横纵筋条间距越小, 模板零件的成形效果越好, 但横纵筋条间距小于 200 mm 时, 会大幅增加制造难度, 因此, 复材成形工装模板热压成形框架模具的横纵筋条间距最小应设置为 200~250 mm, 模板零件无法成形的位置通过局部优化进行调整。

(2) 基于仿真结果分析了横纵筋条网格位置、模板曲率变化的脊线位置和模板成形效果较差区域之间的关系, 模板零件成形效果的框架式模具的改进方式为: 在零件外形线和零件脊线附近增加支撑, 支撑平行于原有横纵筋条, 大致沿零件线或脊线走向设置。通过有限元仿真分析和模板热压成形试制实验, 验证了本文所采用的框架式热压模具结构改进方案的有效性。

参考文献:

- [1] 王玉华, 陈洁, 占小红, 等. 复合材料 Invar 模具制造技术分析 [J]. 航空制造技术, 2014, (11): 93-95, 99.
Wang Y H, Chen J, Zhan X H, et al. Manufacturing technology research on invar composites mould [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, (11): 93-95, 99.
- [2] 刘君伍, 黄建云. 新型复合材料夹层结构及接头在机身结构中的应用前景 [J]. 航空制造技术, 2008, (S1): 129-130.
Liu J W, Huang J Y. Application of new-type composite sandwich structure and joints in airframe [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2008, (S1): 129-130.
- [3] 孙鹏, 尹大伟, 王宏伟, 等. 复合材料在现代飞机中的应用 [A]. 吉林省第七届科学技术学术年会论文集 [C]. 长春, 2012.

Sun P, Yin D W, Wang H W, et al. Application of composite materials in modern aircraft [A]. Proceedings of the 7th Annual Conference of Science and Technology in Jilin Province [C]. Changchun, 2012.

- [4] 孙奋丽, 郭平安, 边翊, 等. 热固性预浸料模压成型工艺参数实验研究 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (3): 146-150.
Sun F L, Guo P A, Bian Y, et al. Experimental study on compression molding process parameters for thermosetting prepreg [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (3): 146-150.
- [5] 王永军, 元振毅, 杨选宏, 等. 先进复合材料构件成型模具和工装技术 [J]. 航空制造技术, 2013, (10): 32-35.
Wang Y J, Yuan Z Y, Yang X H, et al. Molding and tooling technology in advanced composites component [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013, (10): 32-35.
- [6] 何晓蓉, 高建军. 精密殷钢模具加工工艺 [J]. 模具工业, 2002, (5): 56-58.
He X R, Gao J J. The technology for processing the precision low-expansion alloy die [J]. Die & Mould Industry, 2002, (5): 56-58.
- [7] 刘招娣. 大型薄壁 Invar 钢复合材料模具制造技术 [J]. 电加工与模具, 2009, (1): 47-50.
Liu Z D. Manufacturing process of large-sized and thin-walled invar mold [J]. Electromachining & Mould, 2009, (1): 47-50.
- [8] 李细锋, 陈楠楠, 李佼佼, 等. 温度与应变速率对 Invar36 合金变形行为的影响 [J]. 金属学报, 2017, 53 (8): 968-974.
Li X F, Chen N N, Li J J, et al. Effect of temperature and strain rate on deformation behavior of Invar 36 alloy [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2017, 53 (8): 968-974.
- [9] 张家铭. 民机复材结构用 Invar 钢模具焊接工艺优化研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
Zhang J M. Study on Optimization of Welding Process for Invar Steel Die for Composite Structure of Civil Aircraft [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [10] Yu Y C, Chen W Q, Zheng H G. Research on the hot ductility of Fe-36Ni invar alloy [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2014, 43 (12): 2969-2973.
- [11] Xiong W, Zhang H, Vitos L, et al. Magnetic phase diagram of the Fe-Ni system [J]. Acta materialia, 2011, 59 (2): 521-530.
- [12] 刘扬. 民机 Invar 模具钢 MIG 自动焊接工艺研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.
Liu Y. Research on MIG Automatic Welding Process of Invar Die Steel for Civil Aircraft [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015.
- [13] 张勇兵, 苏艳红. 金属复材模具复杂曲面模板精确预成型工艺技术研究 [J]. 复合材料科学与工程, 2014, (1): 81-84.
Zhang Y B, Su Y H. Study on precise pre-forming process for complex surface template of metal composite mould [J]. Composites Science and Engineering, 2014, (1): 81-84.