

Ti₂AlNb 合金薄壁壳体多道次强旋成形有限元模拟

刘德贵¹, 吴 杨², 李继贞¹, 寇宏超², 李金山²

(1. 中国航空工业集团公司北京航空制造工程研究所, 北京 100024)

(2. 西北工业大学 凝固技术国家重点实验室, 陕西 西安 710072)

摘 要: 针对 Ti₂AlNb 合金旋压加工的实际工况与特点, 基于有限元软件的动态、显式模块建立了 Ti₂AlNb 合金薄壁壳体强旋成形的三维弹塑性模型, 并解决了多道次旋压模拟过程中涉及到的应力集中过大, 变形不均等问题。基于该数值模型, 对旋压工艺进行了优化, 并分析了不同道次下旋压件变形区的应力应变状态。模拟结果表明: 道次的增多会导致应力集中现象发生, 同时应变增大, 造成旋压件变形不均匀、贴膜性不好, 采用道次间退火工艺可减小应力集中与变形不均匀性。通过与旋压试验过程中出现的开裂、起皱等缺陷进行对比, 验证了多道次强旋成形有限元模型的准确性。

关键词: Ti₂AlNb 合金; 多道次; 有限元模拟

中图分类号: TG302

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2017)S1-211-06

Ti₂AlNb 是以有序正交结构 O 相为基础的金属间化合物合金, 成分通常在 Ti-(18%~30%)Al-(12.5%~30%)Nb(原子分数)范围内, 并含有少量其它元素^[1]。根据 Nb 含量的不同, Ti₂AlNb 合金分为 2 类: Nb 含量低于 25%, 存在 β/B₂+O+α₂ 三相, 称为第 1 代 O 相合金, 常见有 Ti-25Al-17Nb、Ti-21Al-23Nb、Ti-22Al-23Nb; Nb 含量高于 25%, 存在 O+B₂ 相, 称为第 2 代合金, 常见有 Ti-22Al-25Nb、Ti-22Al-27Nb^[2]。该合金具有较高的比刚度和比强度, 还具有高温蠕变抗力、断裂韧性高、抗氧化性好、热膨胀系数低等特点^[3], 作为新一代高温结构材料显示出了巨大潜力, 对于降低飞行器的自重、提高燃油效率和高温服役性能具有重要意义^[4]。然而 Ti₂AlNb 合金室温脆性大, 塑性变形难以控制, 在旋压加工过程中, 容易产生边缘褶皱、开裂等失效问题, 在高温环境下变形能力有所加强。

目前, 国内外的一些学者针对旋压过程中材料的变形机理及失效问题进行了一系列的研究, 多以数值模拟和实验研究等手段为主。潘毓滨针对单层管强旋过程, 研究了金属在正旋和反旋 2 种工艺中的变形特点, 通过对比, 认为正旋工艺更适合于制备金属复合管, 采用 ABAQUS 软件模拟了单层管的强旋过程, 进一步研究了试验温度、减薄率和管坯界面间正压力大小对零件成形性能的影响^[5]; 刘建华根据多道次普旋成形过程的特点, 基于弹塑性有限元基本原理, 自

主开发了多道次普通旋压有限元数值模拟系统, 研究了旋轮运动轨迹曲率半径对最大径向力、最大周向力和最大厚向应变的影响, 进而揭示了曲率半径对成形过程的影响^[6]; 马泽恩采用三维弹塑性有限元方法对筒形件强力旋压件旋压工艺进行分析, 研究得到了正旋时变形区接触面上旋压力 3 个分量的分布规律^[7]; 张涛对三维弹塑性有限元模拟研究, 建立起有限元计算模型, 分析了旋压过程中隆起现象, 通过计算旋压力, 得到了工艺参数对隆起及旋压力的影响关系^[8]; S. Kalpakcioglu 曾分别对强力旋压的变形机理做了一些模型试验和解析。其目的是揭示旋压过程中材料的变形机理, 如变形的几何关系、物理现象及性能等方面问题, 摆脱以往旋压工艺中所采用的尝试法的盲目性^[9]。

本研究利用有限元分析软件对 Ti₂AlNb 合金薄壁壳体旋压成形过程进行模拟, 研究成形过程的应力、应变分布规律, 优化工艺参数, 揭示变形机理, 为指导实际生产提供理论基础。

1 有限元模型的建立

1.1 建立模型

Ti₂AlNb 合金薄壁壳体旋压成形过程涉及到几何、物理、边界非线性问题, 致使有效控制工艺参数较为困难。在数值模拟方面, 为建立与实际相符合的三维弹塑性有限元模型, 需要对成形工艺进行一定的简化

收稿日期: 2016-12-06

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金 (3102014KYJD031); “111” 引智计划 (B08040)

作者简介: 刘德贵, 男, 1984 年生, 硕士, 中国航空工业集团公司北京航空制造工程研究所, 北京 100024, 电话: 010-85701113, E-mail: 15910321681@163.com

处理。实际成形过程中，坯料中心部分被芯模及尾顶夹持而难以变形，故为简化计算，设置坯料的中心区域为空区域，将坯料和芯模设置为 Tie 约束，保证二者可绕轴线同步转动。成形过程中主要是坯料受挤压变形，旋轮与芯模不发生变形，故将坯料作可变形体处理，芯模与旋轮作解析刚体处理，不定义材料属性，这样可在不失精确度的基础上提高计算效率。模型中定义了 3 个接触对，即坯料内表面与芯模外表面的接触，2 个旋轮与坯料外表面的接触。接触行为定义为“硬”接触，采用罚函数算法。考虑到坯料与芯模同时转动，二者之间的摩擦可忽略不计，实际旋压过程中，旋轮与坯料外表面的摩擦情况很复杂，滑动摩擦与滚动摩擦同时存在，摩擦系数在各点处都不同，为简化处理，假定摩擦系数不变，采用库仑定理计算摩擦力。基于上述简化假设，通过有限元软件的动态显式模块建立了如图 1 所示的 Ti_2AlNb 合金薄壁壳体的三维有限元弹塑性模型。

1.2 单元选择及网格划分

薄壁壳体旋压成形是大变形过程，模拟过程中网格的划分数量、类型、大小都会影响最后的成形质量。线性单元比二次单元对网格畸变的敏感性低，缩减积分对位移的求解结果较为精确，即使模拟过程中网格发生较大的扭曲变形，分析精度也不会受到太大影响，故本研究中采用线性实体缩减积分单元 C3D8R 对坯料进行离散划分，旋轮与芯模不作处理。数值模拟过程中，网格的划分密度会直接影响模拟结果的精确度，在一定范围内，网格划分越细密，模拟结果精确度越高。然而网格密度的增加会导致计算时间的延长，从而降低计算效率。因此，考虑实际加工过程中的变形特点，结合计算模拟过程中的效率及精确度，坯料的网格划分如图 2 所示。根据成形过程中不同区域变形程度的不同，本研究将坯料划分为 2 个区域：中心区域(CZ)和变形区域(DZ)。由于强旋过程变形量大，网格易发生畸变，尤以坯料与芯模圆角接触区域及坯料边缘区域较为严重，会降低计算精确度，甚至导致计算终止，故变形区域采用较为密致的网格进行划分。

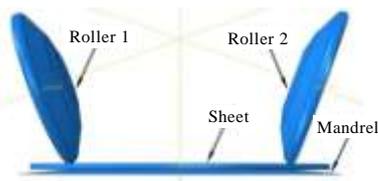


图 1 强旋有限元模型

Fig.1 Finite element model of power spinning

中心区域几乎不发生变形，对模拟结果影响不大，为提高效率，此区域采用较粗糙的网格进行划分。同时为了更好地减小网格畸变带来的影响，采用 ALE 自适应网格技术。

2 多道次旋压模拟及缺陷分析

2.1 多道次旋压模拟

Ti_2AlNb 合金薄壁壳体成形需要多个道次，本研究选取具有代表性的第 1 和第 7 道次，对成形过程中的应力应变分布规律进行深入分析，为实际加工生产过程提供理论指导。

2.1.1 第 1 道次旋压成形的应力应变分布

第 1 道次旋压成形的应力分布云图如图 3 所示。旋压成形过程可近似看作平面应变问题，坯料在变形过程中同时受到径向力、周向力、切向力的共同作用，即可看作材料处于三向压应力状态。随着变形量的增加，应力极大值整体呈上升趋势。在整个变形过程中，应力极大值出现在旋轮与坯料相接触的区域，并随着旋轮的移动而移动，且分布的区域在逐渐地增大，逐渐向旋轮前进的方向移动。应力的增大导致材料出现硬化现象，会影响后续旋压道次的进行，因此需要在该道次结束后对旋压件进行去应力退火处理。

为了更加直观地研究旋压成形过程应力应变的分布规律，选取坯料的内层、中间层、外层，如图 4 所示。在每一层分别选取等量的节点，构成一条径向的路径，分布记录下相应的应力应变，获得曲线分布图。

图 5 为第 1 道次应力分布。由图 5 可以看出，第 1 道次成形过程中，旋压件的内层、中间层、外层的应力变化趋势基本一致，中间层的应力要稍微高于内层的应力，而两者的极大值与极小值点是相重合的，外层应力的变化有一定的滞后性。

第 1 道次旋压成形的等效塑性应变分布云图如图 6 所示。可以看出，第 1 道次的旋压变形量相对较小，

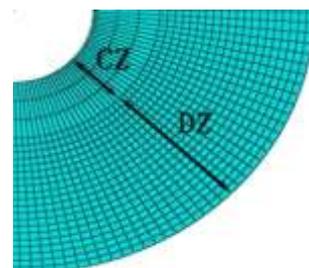


图 2 工件网格划分

Fig.2 Meshes of a workpiece

然后变小, 沿周向方向分布由不均匀到均匀。

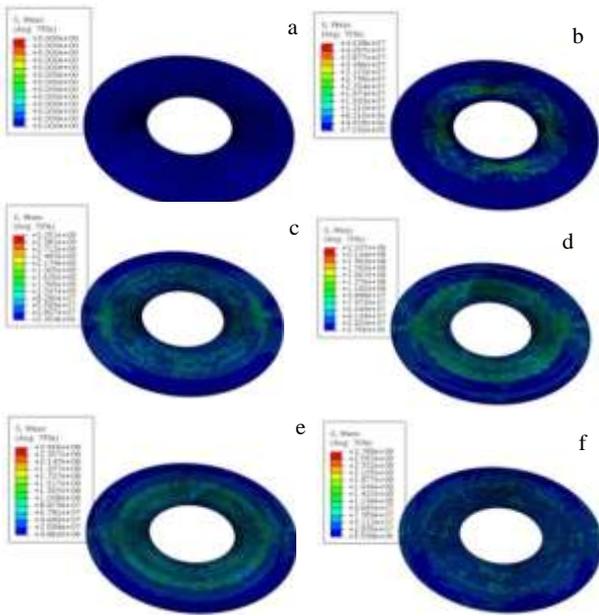


图 3 第 1 道次旋压的应力分布

Fig.3 Stress distribution of first pass

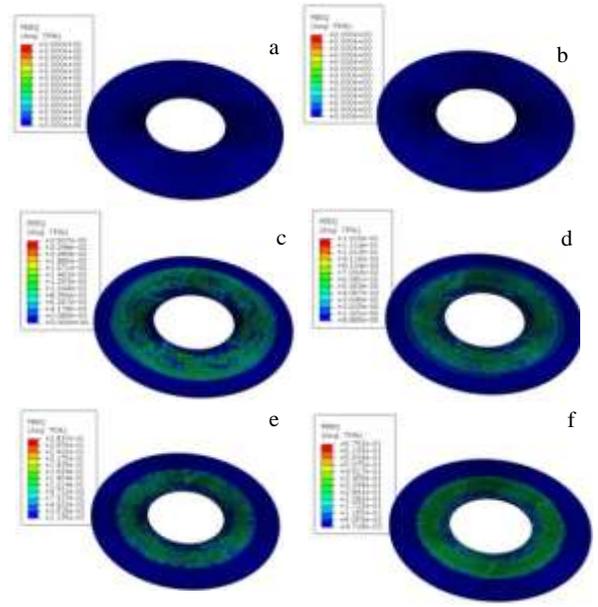


图 6 第 1 道次的等效塑性应变分布

Fig.6 Equivalent plastic strain distribution of first pass

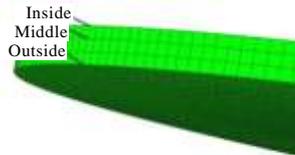


图 4 工件选取的节点

Fig.4 Nodes of the workpiece

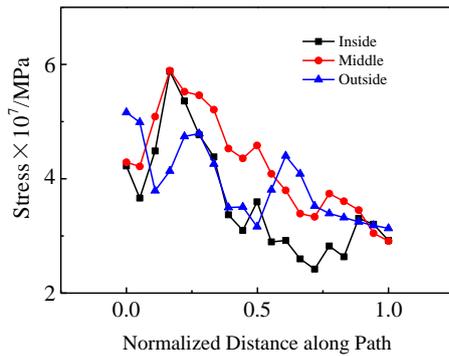


图 5 第 1 道次应力分布

Fig.5 Stress distribution of first pass

在变形 20%时, 等效应变极大值仍为 0, 随着旋压变形的进行, 等效塑性应变极大值在逐渐增大, 呈环状分布, 主要集中在坯料与芯模圆角接触的区域。在第 1 道次旋压成形中, 变形主要集中在坯料与芯模圆角接触处, 环带区宽度随变形进行而发生变化, 先变大

图 7 为第 1 道次等效塑性应变分布。由图 7 可以看出, 旋压件的内层、中间层、外层的等效塑性应变变化趋势一致, 先下降然后趋于平缓, 下降阶段主要处于坯料心部未变形区域, 变形区的等效塑性应变变化曲线平缓, 这是由于第 1 道次的变形量较小, 内外层及中间层的等效塑性应变区别不大, 说明变形均匀。

2.1.2 第 7 道次旋压成形的应力应变分布

第 7 道次旋压成形的应力分布如图 8 所示。经过了 7 个道次的旋压加工, 可以看到旋压件的形变量已经很大, 相应的应力极大值相比较于前几个道次也增加了很多。在变形的初期(变形 40%之前), 应力分布比较均匀, 应力集中主要存在于坯料与芯模圆角接触

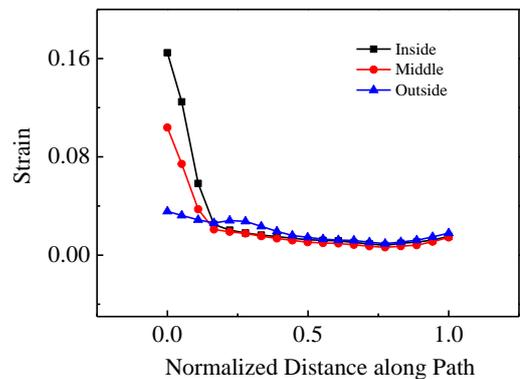


图 7 第 1 道次等效塑性应变分布

Fig.7 Equivalent plastic strain distribution of first pass

区域,随着变形量的逐渐增大,应力分布变得不均匀,应力极大值主要分布于旋轮与坯料挤压处,且由于变形大导致贴膜性不好,从而致使无法形成联系的应力分布环带区。应力极大值过大,容易造成旋压模拟过程中网格畸变严重,出现计算不收敛甚至中止问题,所以需要在后期道次模拟过程中适当调整工艺参数,保证模拟继续进行下去。

图 9 为第 7 道次应力分布。从图 9 可以看出,旋压件的应力相比前几个道次增加很多,在大变形区,内层的应力极大值明显高于外层的应力极大值,形成的应力差较大,容易造成旋压件的开裂及起皱等缺陷,这与云图所表现出的网格畸变相符合。

图 9 第 7 道次应力分布

Fig.9 Stress distribution of seventh pass

第 7 道次的等效塑性应变分布如图 10 所示。从图中可以看出,坯料的等效塑性应变极大值出现在旋轮与坯料接触处环形区域上,并且分布比较均匀,随着旋压成形的进行,等效塑性应变极大值呈现逐渐增大的趋势。

图 11 为第七道次等效塑性应变分布。从图 11 中可以看出,该道次的等效塑性应变分布变化规律与第 1 道次的等效塑性应变分布变化趋势有所不同,在大变形区等效塑性应变有明显的上升然后下降阶段,且内层的极大值几乎是外层极大值的 2 倍,这说明变形不均匀性增加。

2.2 缺陷分析

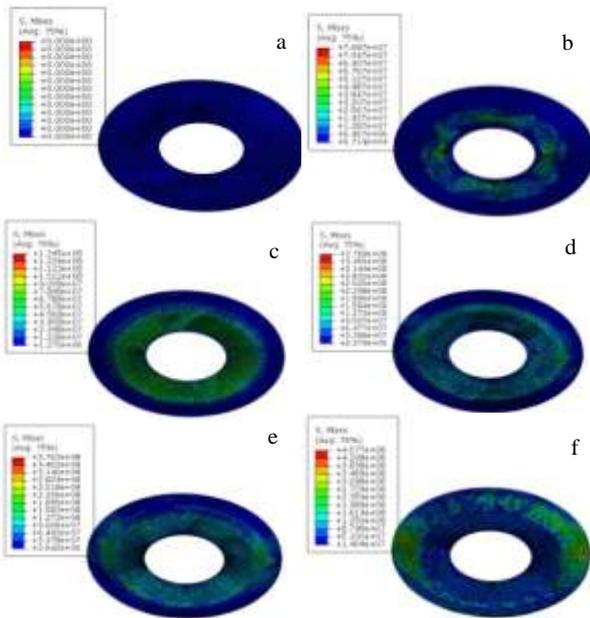


图 8 第 7 道次旋压的应力分布

Fig.8 Stress distribution of seventh pass

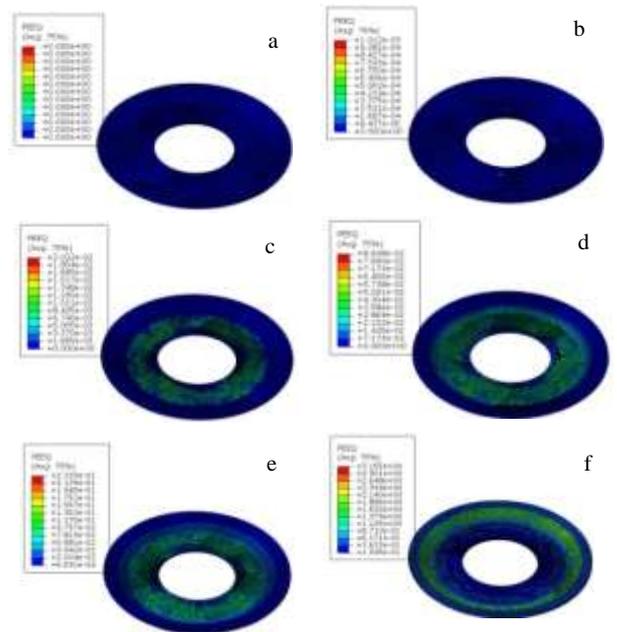


图 10 第 7 道次旋压的等效塑性应变分布

Fig.10 Equivalent plastic strain distribution of seventh pass

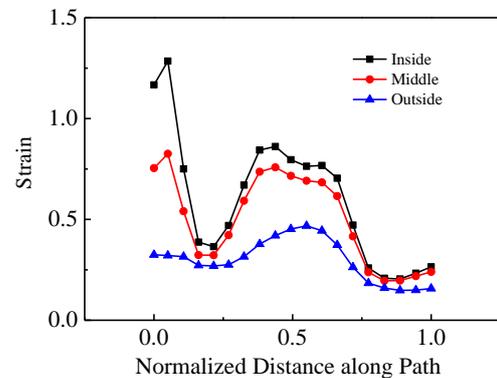
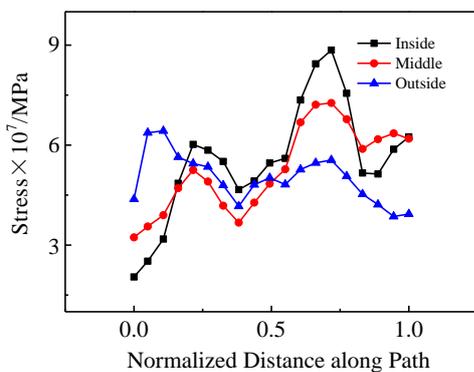


图 11 第七道次等效塑性应变分布

Fig.11 Equivalent plastic strain distribution of seventh pass

Ti₂AlNb 合金薄壁壳体强旋成形属于大变形过程, 变形过程中前一道次的旋压模拟质量会直接影响下一道次的成形质量, 所以每一道次的变形量都需要加以控制。如果变形量过大, 会导致旋压件的网格畸变严重, 降低模拟的精确度, 甚至使计算中止, 这在实际旋压生产过程中表现为旋压件的开裂或褶皱等缺陷, 如图 12 和图 13 所示。

通过图 12 模拟及实际生产中产生褶皱缺陷的对比, 可以看到模拟过程中由于变形量大或某一道次减薄率过高, 变形区的应力分布急剧增大, 造成了网格严重畸变, 扭曲堆积, 预示着旋压件褶皱趋势明显, 此现象尤其容易发生在边缘部分; 实际生产过程中, 由于减薄率过大, 材料的平稳流动受到阻碍, 产生堆积, 形成了褶皱缺陷。

通过图 13 模拟及实际生产中产生开裂缺陷的对

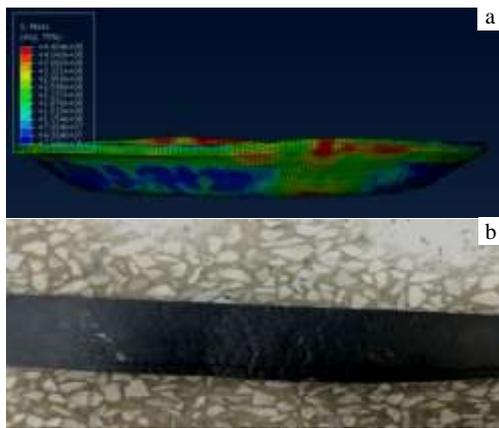


图 12 模拟及实际生产中的褶皱缺陷

Fig.12 Wrinkle defects during simulation (a) and actual production (b)

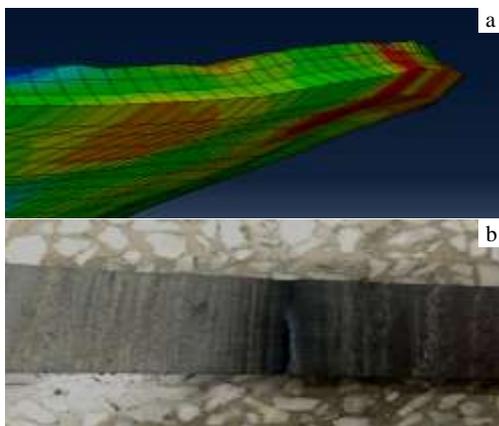


图 13 模拟及实际生产中的开裂缺陷

Fig.13 Fracture formed during simulation (a) and actual production (b)

比, 可以看到模拟过程中旋轮与坯料相接触的区域容易产生较大的拉应力, 拉应力越集中, 该区域越容易发生开裂现象。

3 结论

1) 基于有限元分析软件的动态、显式模块, 建立 Ti₂AlNb 合金薄壁壳体强旋过程的三维弹塑性有限元模型, 并解决了单元选择、网格划分、接触条件等关键性技术问题。

2) 通过对薄壁壳体第 1 和第 7 道次成形过程中应力应变场分布的研究发现, 随着道次的增多, 应力及应变也在增大, 坯料的内层、中间层、外层的应力应变虽然具有相同的变化趋势, 然而却存在一定的应力差和应变差, 需要进行一定的去应力退火处理。

3) 由于坯料成形过程中内外侧应力差及应变差的存在, 在模拟过程中会导致网格畸变, 严重影响了模拟计算的顺利进行; 而在实际生产过程中则会产生旋压件的开裂、褶皱等缺陷。因此, 选取合适的工艺参数进行模拟, 从而减小应力应变, 将是旋压数值模拟的工作重点。

参考文献 References

- [1] Wang Changwen, Zhao Tao, Wang Guofeng *et al.* *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2015, 222: 122
- [2] Li Dingqiang, Wright S I, Boehlert C J. *Scripta Materialia*[J], 2004, 51(6): 545
- [3] Feng Aihan, Li Bobo, Shen Jun. *Journal of Materials and Metallurgy*[J], 2011, 10(1): 30
- [4] Wang Li(王力), Liang Wenping(梁文萍), Miu Qiang(缪强) *et al.* *Heat Treatment of Metals (金属热处理)*[J], 2015, 40(3): 52
- [5] Pan Yubin(潘毓滨). *Research on the Process of Bimetallic Composite Tube by Spinning(金属复合管旋压过程研究)*[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012
- [6] Liu Jianhua(刘建华). *Research on Forming Mechanism of Multi-pass Conventional Spinning Process and Influence of Roller-trace on the Process(多道次旋压过程机理研究)*[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2003
- [7] Ma Zeen(马泽恩). *Journal of Northwestern Polytechnical University (西北工业大学学报)*[J], 1978, 2(2): 162
- [8] Zhang Tao(张涛), Lin Gang(林刚), Zhou Jinglong(周景龙). *Forging and Stamping Technology(锻压技术)*[J], 2001, 26(5): 26

[9] Kalpakcioglu S. *CIRP Annalen*[J], 1962, 10(1): 58

Finite Element Simulation of Multi-pass Power Spinning of Thin-walled Ti₂AlNb Alloy Shell

Liu Degui¹, Wu Yang², Li Jizhen¹, Kou Hongchao², Li Jinshan²

(1. AVIC Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, Beijing 100024, China)

(2. State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Considering the characteristics of the actual spinning of Ti₂AlNb alloy, a three-dimensional elastic-plastic FE (finite element) model of power spinning of thin-walled Ti₂AlNb alloy shell was established based on the dynamic, explicit module of FE software. Stress concentration and the inhomogeneous deformation during simulation were dealt with reasonably. The process parameters were optimized and the distribution of stress and strain of workpiece with different passes were analyzed based on this model. Results show that stress concentration is found with increase of passes, meanwhile strain increases. It will lead to the inhomogeneous deformation of workpiece. To solve this problem, stress-relief annealing between pass and pass were adopted. The reliability of model was validated by comparing the results of simulation and actual production.

Keywords: Ti₂AlNb alloy; multi-pass; FEM simulation

Corresponding author: Liu Degui, Master, AVIC Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, Beijing 100024, P. R. China, Tel.: 0086-10-85701113, E-mail: 15910321681@163.com