

轧制

基于有限元仿真的航空发动机叶片辊轧成形过程参数优化

王国栋¹, 王鸿雨¹, 蒋磊¹, 腾飞¹, 孙俊才¹, 孔祥伟²

(1. 大连海事大学 交通运输工程学院, 辽宁 大连 116000; 2. 东北大学 机械工程自动化学院, 辽宁 沈阳 110000)

摘要:精密辊轧是航空发动机叶片的重要加工方式, 其工艺参数难以确定, 导致叶片成形效果难以控制。提出使用 ABAQUS 有限元仿真方法对辊轧过程进行模拟, 通过改变辊轧压下量以及摩擦因数, 研究压下量和摩擦因数对叶片成形结果的耦合影响, 从而优化工艺参数, 获得最优的参数设定。研究表明: 随着摩擦因数的增加, 该辊轧模型叶片的宽展整体增加, 且所受轧制力与摩擦因数呈线性正相关; 随着端口压下量的增加, 叶片所受轧制力以及叶片宽展均有所提升, 但当压下量增加超过 0.06 mm 时, 轧制力以及宽展发生突增, 叶片变形集中于边缘局部区域, 不利于成形结果的精密控制。

关键词:精密辊轧; 叶片; 辊轧; 压下量; 摩擦因数; 轧制力

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.03.017

中图分类号: TG355

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2022) 03-0109-07

Parameter optimization on aero-engine blade rolling process based on finite element simulation

Wang Guodong¹, Wang Hongyu¹, Jiang Lei¹, Teng Fei¹, Sun Juncai¹, Kong Xiangwei²

(1. School of Transportation Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116000, China;

2. School of Mechanical Engineering Automation, Northeastern University, Shenyang 110000, China)

Abstract: Precision rolling is an important processing method for aero-engine blades, and it is difficult to determine its process parameters, resulting in controlling the blade forming effect difficultly. Therefore, it was proposed to use finite element simulation software ABAQUS to simulate the rolling process, and by changing rolling reduction amount and friction factor, the coupling influence of the rolling reduction amount and the friction factor on the forming result for blade was studied. Furthermore, the process parameters were optimized, and the optimal parameter settings were obtained. The research results show that with the increasing of the friction factor, the overall blade width of the rolling model increases, and the rolling force is linear positive correlation with the friction factor. With the increasing of the reduction amount in port, the rolling force on the blade and the blade width increase, but when the reduction amount exceeds 0.06 mm, the rolling force and the blade width increase suddenly, and the blade deformation is concentrated in the local area of edge, which is not conducive to the precise control of the forming result.

Key words: precision rolling; blade; rolling reduction amount; friction factor; rolling force

叶片制造是航空发动机制造的核心部分, 其工作量占整个航空发动机制造的 30%^[1]。如图 1 所示, 航空发动机中叶片种类繁多, 型面结构尺寸复杂, 属于薄且易变形的零件, 对精度和强度都有很高的要求, 提高其加工精度, 可明显提高航空发动

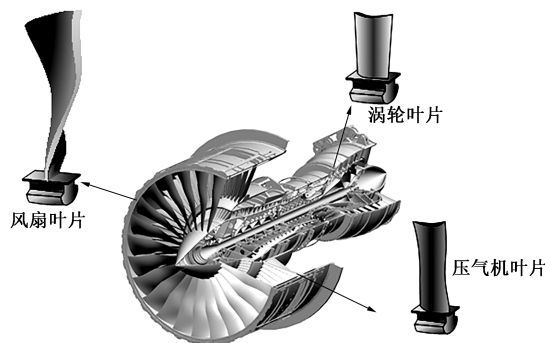


图1 某航空发动机 3D 图

Fig. 1 3D diagram of an aero-engine

收稿日期: 2021-02-03; 修订日期: 2021-05-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51905068); 辽宁省博士启动基金资助项目 (20180540098); 辽宁省自然科学基金资助项目 (2020-HYLH-24); 东北大学重点实验室开放课题基金资助项目 (2020RALKFKT012)

作者简介: 王国栋 (1995-), 男, 硕士研究生

E-mail: 1026112215@qq.com

通信作者: 王鸿雨 (1989-), 男, 博士, 副教授

E-mail: wanghongyu@dlmu.edu.cn

机的工作效率^[2]。航空发动机叶片具有变截面、有扭角、变弦宽的特点, 其加工工艺十分复杂, 如何

高效率、高精度地加工叶片是目前航空航天领域的重要研究内容。

目前,叶片加工的方式主要有数控车削、电解加工、精密锻造和精密辊轧。

(1) 数控车削加工的工艺参数容易控制,加工效率高,但不适用强度高的叶片,且加工过程中材料的利用率较低。

(2) 电解加工是精密叶片的主要加工方法,加工范围广,可以加工高硬度、高强度的金属,但电解加工的附属设备繁多,成本高,且电解产物通常具有污染性。

(3) 不同于前述两种方法,精密锻造和精密辊轧作为塑性变形方法,其叶片加工的周期短、加工余量少、寿命长、叶片晶粒细小、组织致密。但需指出,精密辊轧相较于精密锻造而言,其叶片变形更为集中,工作的载荷相对较小,连续的加工过程更易于实现机械化和自动化。在低温环境下,不仅精密辊轧的工艺难度大幅降低,能源消耗显著减少,同时,低温变形更有效地抑制了晶粒长大,使得叶片获得更为良好的力学性能^[3]。

在国外 20 世纪 60 年代,美国通用 GE 公司已使用冷轧的方法加工小尺寸的 17-4PH 叶片,苏联最先使用了 GH150 高温合金辊轧叶片^[4]。此后,叶片辊轧技术在发达国家高速发展,德国、英国、俄罗斯均采用精密辊轧技术加工航空发动机叶片^[5]。在国内,20 世纪 70 年代,我国开始研究叶片辊轧技术,截止目前已有重大的突破,实现了叶片无余量精密辊轧,开发了辊轧模具设计程序。但国内的叶片辊轧技术无论是在精度上还是效率上均与发达国家有较大的差距,叶片的精密辊轧属于机密技术,长久以来我国受到发达国家的技术封锁。研究叶片的精密辊轧技术对于我国航空工业的发展具有重要的意义。

于建民等^[6]采用 MSC/superform 软件对叶片辊轧工艺进行了数值模拟,分析了不同辊轧参数对坯料轧制过程中轧制力的影响。毛君等^[7]利用 ANSYS/LS-DYNA 软件建立了叶片辊轧系统的动力学模型,研究了不同辊轧参数叶片型面的变形规律以及叶片的金属流动行为。靳淇超等^[8-9]分别对辊轧模具型腔回弹和前滑补偿进行了研究,通过分析钣金件弯曲变形的过程,并基于钣金件的几何结构和材料特性建立了回弹前后中心角的变化模型与叶片截面回弹补偿模型,并提出了基于辊轧前滑补偿的压气机叶片辊轧模具型腔的优化设计方法。王渊彬等^[10]建立了截面线

族映射法则,以完成工艺模型叶形截面线族至辊轧模具扇面的重新空间分布,由所得的型腔模型截面线族重构型腔型面,通过与回转体的布尔运算获得辊轧叶片的模具型腔。王伟等^[11]针对叶片辊轧过程的大塑性变形特征,以及几何、材料、边界非线性的变形条件,通过对本构理论的研究,找到了适合于叶片辊轧过程的 Yoshida-Uemori 本构模型。

在以往针对叶片辊轧过程的研究中,研究者们着重探究了力学性能参数、模具几何参数等对辊轧效果的影响规律,但叶片的变形结果受制于多因素的耦合影响,不同辊轧模型的叶片变形规律存在较大的差异。如何针对某一特定的辊轧模型进行优化,对于辊轧生产及产品质量控制具有重要意义。本文采用 ABAQUS 有限元仿真的方法,对叶片冷轧过程进行仿真,设置不同参数的对照实验,探究压下量、摩擦因数与叶片成形型面间的关系^[12],得到辊轧制力、叶片应变、叶片宽展的变化曲线等成形参数,为提高叶片的成形精度提供理论依据。

1 有限元模型建立

1.1 轧辊和叶片精坯模型建立

轧辊采用 UG8.0 软件建模,盆模和背模为复杂三维曲面。上辊辊径为 $\Phi 61.5$ mm,下辊辊径为 $\Phi 64$ mm,辊模的厚度约为 3 mm。图 2 为轧辊模型。

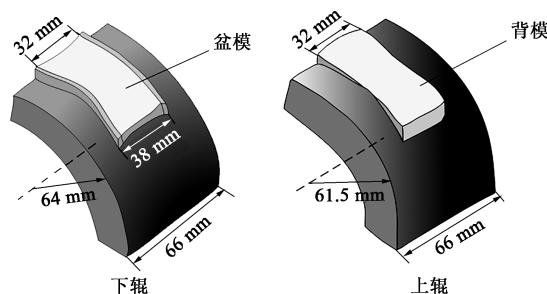


图 2 叶片辊轧模型

Fig. 2 Rolling model of blade

装配图如图 3 所示,建立全局坐标系 $OXYZ$,其中 Y 轴为下辊中心轴, $Y-Z$ 平面为上、下辊和叶片的端口平面, $X-Z$ 平面为叶片的对称平面。

在叶片的辊轧成形过程中,选用合适的叶片精坯,可以使得叶片加工过程中的压下量、变形量、轧制力更平均,从而得到性能更好的叶片。

截取轧辊端口的曲线,在曲线上取点,随后在 Matlab 上做曲线拟合,以 Z 轴和 Y 轴坐标 z 和 y 拟合参数得到 1 个多项式拟合曲线方程。图 4 是拟合曲线图。

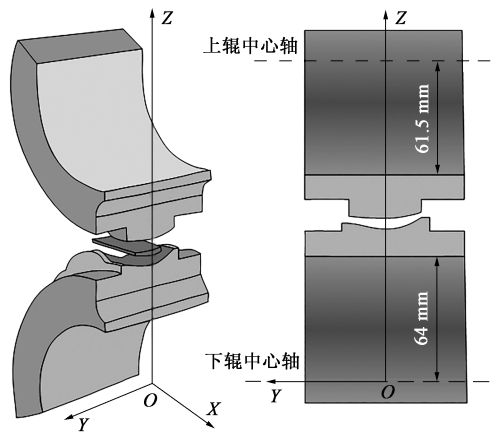


图3 装配及坐标轴建立示意图

Fig. 3 Schematic diagram of assembly and coordinate axis establishment

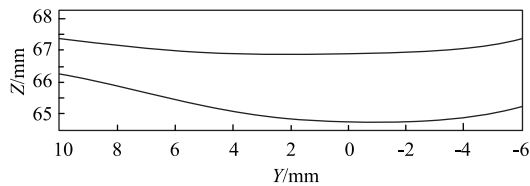


图4 叶片拟合曲线

Fig. 4 Fitting curve of blade

$$z = a_1y^5 + a_2y^4 + a_3y^3 + a_4y^2 + a_5 \quad (1)$$

式中： a_1 、 a_2 、 a_3 、 a_4 、 a_5 为拟合曲线方程的多项式参数。

由此基于 Matlab 分别得到背模和盆模的端口曲线方程后，在 Proe 草绘中选择导入曲线 $x=0$ ， $-6 \leq y \leq 10$ 。导入两条曲线后，用直线围成封闭图形，完成草绘，再用拉伸指令完成叶片精坯的建模。

假设辊模在辊轧过程中没有发生变形，将轧辊设置为刚体，叶片设置为组织和性能均质的变形体^[13]。划分叶片网格，叶片模型除去榫头，单元总数为 5760，节点总数为 8052，单元类型为 Explicit 单元库 C3D8R 单元，沙漏控制选择增强；划分轧辊网格，上辊单元总数为 5965，节点总数为 6910，下辊单元总数为 6676，节点总数为 6729，单元类型为 Explicit 单元库 R3D4。图 5 为部件网格划分示意图。由于轧辊的辊模是复杂的三维曲面，上、下轧辊的辊径在轧制过程中时刻发生变化，该过程属于异步轧制，是十分复杂的接触问题，设置分析步为动力学显式分析步^[14]。

1.2 材料参数

本文叶片材料选用 GH4169 镍基高温合金，该合金具有良好的高温力学性能和良好的热工艺性能，在航空航天和核工业领域得到广泛应用^[15]。表 1 为 GH4169 镍基高温合金仿真时的力学参数。

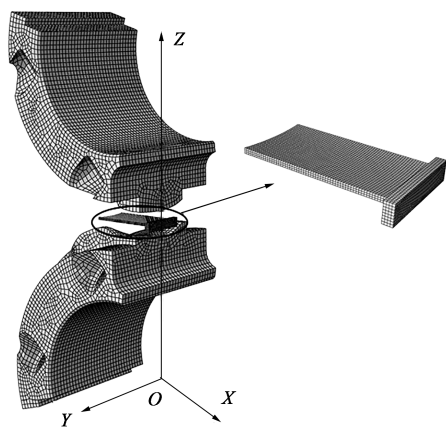


图5 网格划分示意图

Fig. 5 Schematic diagram of meshing

表 1 GH4169 镍基高温合金的力学参数
Table 1 Mechanical parameters of nickel-based superalloy GH4169

参数	密度/(g·cm ⁻³)	弹性模量/MPa	泊松比	屈服强度/MPa
数值	8.93	1.9×10 ⁵	0.3	1073

2 仿真结果及变形过程分析

2.1 叶片变形过程分析

为了使叶片辊轧模拟与实际情况相符，整个叶片的辊轧过程分为压下和轧制两步：压下分析步中，固定叶片，上、下辊分别向叶片靠拢，咬合住叶片端口；随后在轧制分析步中，叶片以一定的速度沿 X 轴正方向运动，模拟实际轧制中的拖曳，上、下辊以一定的角速度转动。图 6 为辊轧过程示意图以及叶片在轧制过程中的变形图。

2.2 基于宽展的参数优化

航空发动机叶片的辊轧属于变截面的轧制，在辊轧过程中不同变形平面的压下量不同，压下量可以通过辊缝的高度和叶片精坯的厚度得到。实验中控制端口压下量可以控制辊缝的高度，端口压下量的范围为 0~0.1 mm^[16]；摩擦因数的范围为 0.1~0.3。

宽展是轧件在轧前和轧后横向尺寸的增量，设叶片的原始宽度为 B ，辊轧完成后的叶片宽度为 B' ，则宽展 ΔB 为：

$$\Delta B = B' - B \quad (2)$$

如图 7 所示，在叶片上选取关键点集合，从叶根开始，在叶片两端每隔 3 mm 取一组，得到点 $P_1 \sim P_{10}$ 和点 $P'_1 \sim P'_{10}$ 。设辊轧前点 P_1 和点 P'_1 的距离为 B_1 ，辊轧完成后的距离为 B'_1 ，得出 $\Delta B_1 = B'_1 - B_1$ ，

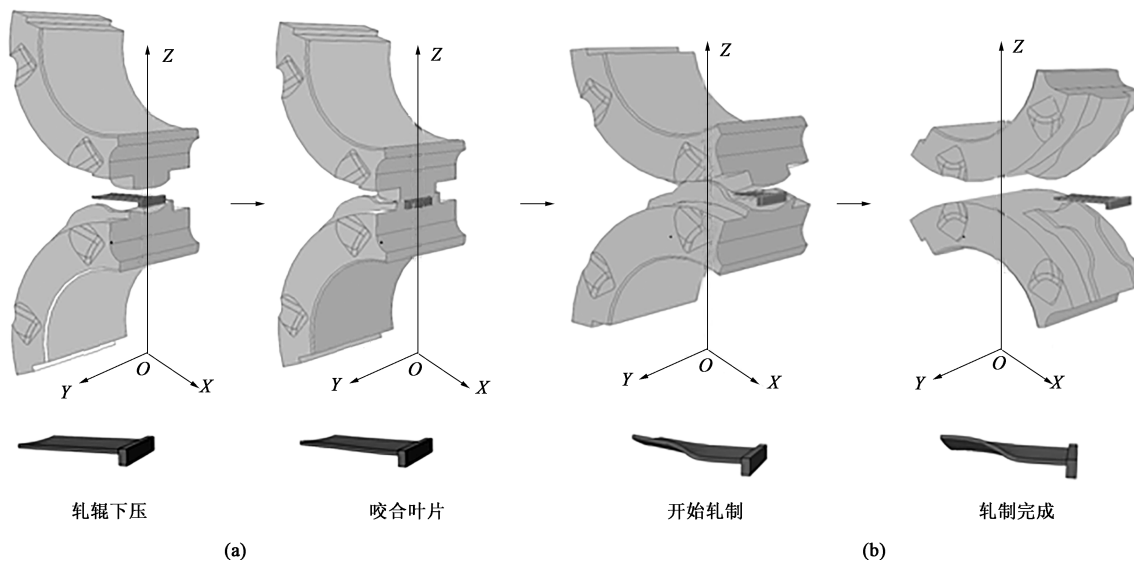


图 6 辊轧过程示意图

(a) 压下 (b) 轧制

Fig. 6 Schematic diagram of rolling process

(a) Pressing process (b) Rolling process

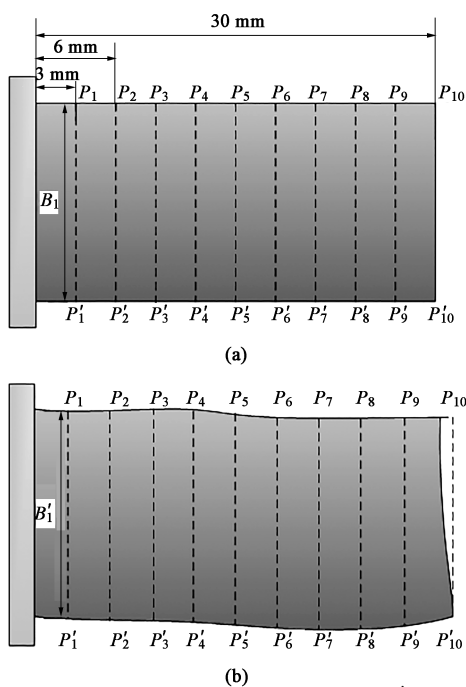


图 7 叶片关键点的选取

(a) 辊轧前 (b) 辊轧后

Fig. 7 Selection of key points on blade

(a) Before rolling (b) After rolling

ΔB_1 即距榫头 3 mm 处的宽展。同理得出 ΔB_2 , ΔB_3 , ..., ΔB_{10} 。

图 8 为不同摩擦因数和端口压下量下的叶片平均宽展, 叶片宽展和端口压下量成正相关, 在端口压下量由

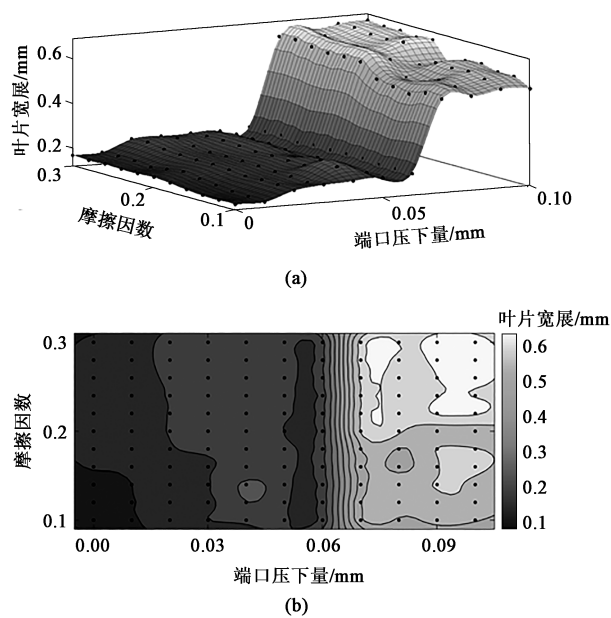


图 8 不同摩擦因数和端口压下量下的叶片宽展

(a) 三维云图 (b) 平面云图

Fig. 8 Blade widths under different friction factors and port reduction amounts

(a) Three-dimensional cloud diagram (b) Plane cloud diagram

0.06 mm 增加至 0.07 mm 时, 叶片宽展发生了突增。

为研究宽展发生突变的原因, 对关键点的金属流动进行分析, 图 9 是叶片变形前后关键点的坐标。从图 9 中的 X-Y 平面可以看出, 当端口压下量增加至 0.07 mm 时, 叶片后半部分关键点在 X 方向和 Y 方向出现了较大的位移。

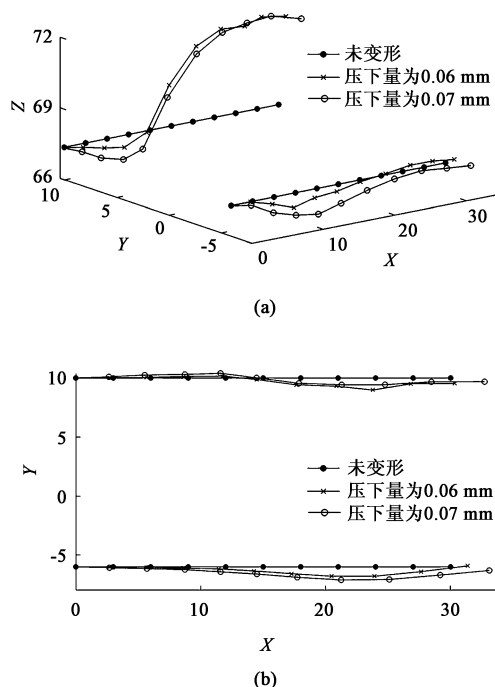


图9 叶片变形前后关键点坐标变化

(a) Z-X平面 (b) Y-X平面

Fig. 9 Coordinate changes of key points before and after blade deformation

(a) Z-X plane (b) Y-X plane

航空发动机叶片的后半部分的边缘薄且扭曲, 在加工过程中应该重点研究该部位。如图 10 所示, 叶片后半部分边缘的变形较大, 金属的流动规律在叶片中段发生改变, 更多金属在此堆积并向边缘流动。端口压下量由 0.06 mm 增加至 0.07 mm 时, 在大变形区域前堆积的金属到达临界值, 金属向边缘流动的趋势突增。在叶片加工过程中, 边缘产生较大的变形, 会使得边缘的形状不规则, 在实际的生产中应避免。在该辊轧模型中, 端口压下量应控制在 0.06 mm 以下。

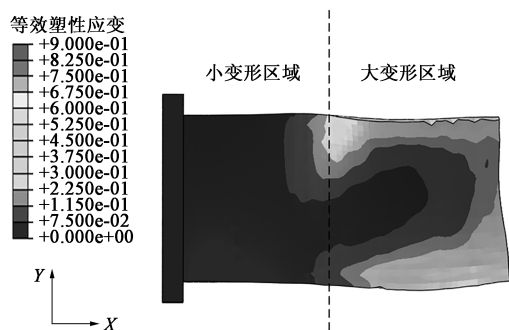


图10 叶片等效塑性应变云图

Fig. 10 Cloud diagram of equivalent plastic strain for blade

图 11 为端口压下量为 0.05 mm 时不同摩擦因数下的叶片平均宽展。由图 11 可以看到: 当摩擦因数

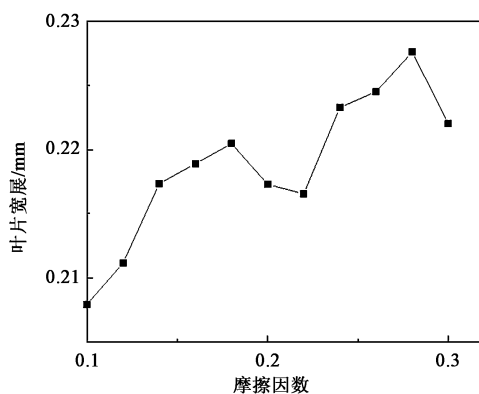


图11 端口压下量为 0.05 mm 时不同摩擦因数下的叶片平均宽展

Fig. 11 Average width of blade under different friction factors at port reduction amount of 0.05 mm

增加时, 叶片宽展整体增加, 但会出现起伏现象, 这与叶片在辊轧过程中摩擦力方向时刻变化有关。一般在变形时, 金属纵向流动趋势远大于横向, 当摩擦阻力增大时, 纵向阻力增大, 金属横向流动的趋势增加, 叶片宽展增加。但叶片在辊轧时由于变形平面时刻发生变化, 叶片表面摩擦力的方向也时刻变化, 不同辊轧模型的摩擦因数对叶片宽展的影响也不同。

2.3 基于轧制力的参数优化

图 12 为不同摩擦因数和端口压下量下的轧制力, 轧制力和端口压下量呈正相关, 端口压下量由 0.06 mm 增加至 0.07 mm 时, 轧制力发生了突增。当端口压下

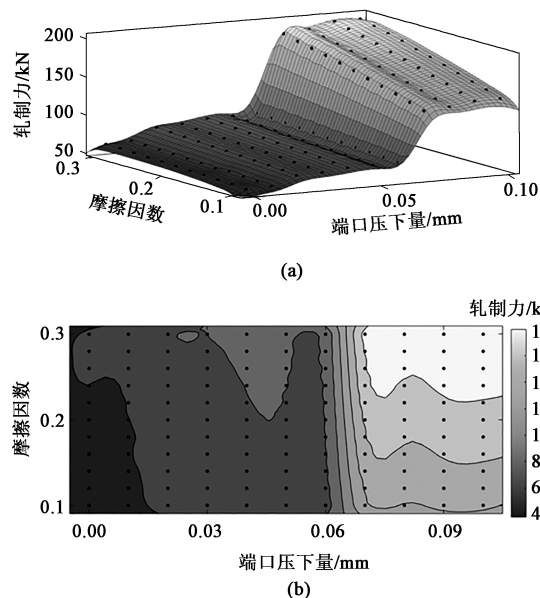


图12 不同摩擦因数和端口压下量下的轧制力分布

(a) 三维云图 (b) 平面云图

Fig. 12 Rolling force distributions under different friction factors and port reduction amounts

(a) Three-dimensional cloud diagram (b) Plane cloud diagram

量超过 0.07 mm 时, 轧制力将超过 150 kN, 轧制力过大, 这对于一般的辊轧机来说, 在实际的生产中应当淘汰。

分析轧制力突增的原因, 轧制力计算公式如下:

$$P = \bar{p} \cdot \frac{B + B'}{2} \cdot \sqrt{R\Delta h} \quad (3)$$

式中: P 为轧制力, N; \bar{p} 为单位平均应力, Pa; R 为轧辊半径, mm; Δh 为端口压下量, mm。

在宽展的研究中, 在端口压下量增加至 0.07 mm 时, 宽展突增, 此时式 (3) 中 $\frac{B+B'}{2}$ 突增, 因此, 轧制力突增。

图 13 为端口压下量为 0.05 mm 时, 不同摩擦因数下的平均轧制力, 可以看到: 摩擦因数与轧制力成正比例相关。

2.4 辊轧参数的优化

在之前关于端口压下量参数的探讨中, 确定了端口压下量应当小于 0.06 mm。在该辊轧模型中摩擦因数为 0.1~0.3, 对于叶片成型的影响较小, 摩擦因数的选择应该从辊轧的咬入条件考虑。只有叶片精坯被辊模咬入才能建立起辊轧过程, 在端部自然咬入, 模具与叶片之间的摩擦力是咬入的主

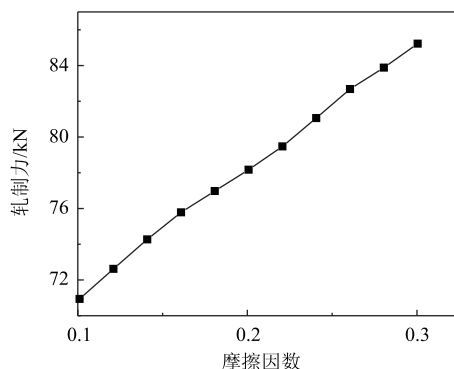


图 13 端口压下量为 0.05 mm 时不同摩擦因数下的平均轧制力

Fig. 13 Average rolling forces with different friction factors at port reduction amount of 0.05 mm

动力, 而叶片受到压力的分力是咬入的阻力。提高摩擦因数、减小咬入角有利于实现咬入条件, 因此, 选用 0.3 的摩擦因数作为合理参数。综上, 选择端口压下量为 0.05 mm 和摩擦因数为 0.3。

图 14 为合理参数与不合理参数下叶片等效塑性应变云图对比。摩擦因数对叶片成型效果的影响很小, 摩擦因数为 0.1 和 0.3 时, 叶片的成型效果基本一致。端口压下量为 0.08 mm 时叶片的后半部分边缘产生了较大的变形, 变形也因此不规则。

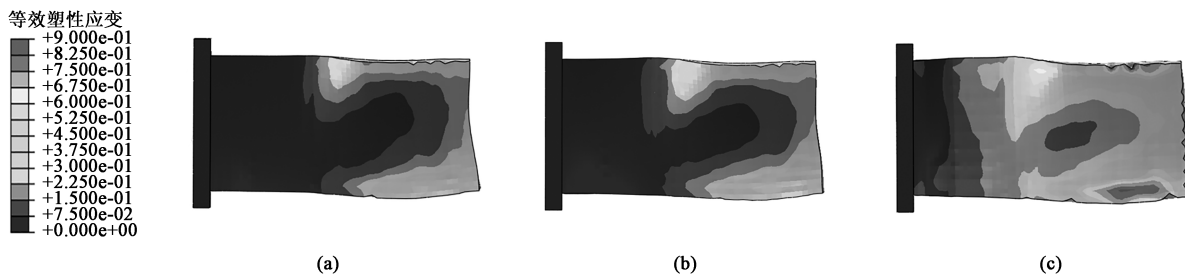


图 14 不同辊轧参数下的叶片等效塑性应变云图

(a) 端口压下量为 0.05 mm, 摩擦因数为 0.1 (b) 端口压下量为 0.05 mm, 摩擦因数为 0.3 (c) 端口压下量为 0.08 mm, 摩擦因数为 0.3

Fig. 14 Cloud diagrams of equivalent plastic strain for blade with different rolling parameters

(a) Port reduction amount of 0.05 mm, friction factor of 0.1 (b) Port reduction amount of 0.05 mm, friction factor of 0.3
(c) Port reduction amount of 0.08 mm, friction factor of 0.3

3 结论

(1) 在端口压下量由 0.06 mm 增加至 0.07 mm 时, 辊轧轧制力、叶片宽展突增, 不利于叶片加工, 在实际加工中应当选用小于 0.06 mm 的端口压下量。

(2) 随着摩擦因数增大, 叶片宽展和辊轧轧制力增加。

(3) 摩擦因数对叶片成型效果的影响较小, 而

选用较大的端口压下量, 则叶片后半部分边缘的成形难以得到控制。

参考文献:

- [1] 刘维伟, 张定华, 史耀耀, 等. 航空发动机薄壁叶片精密数控加工技术研究 [J]. 机械科学与技术, 2004, 23 (3): 329-331.
- Liu W W, Zhang D H, Shi Y Y, et al. Research on precision cnc machining technology of thin-walled aeroengine blades [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2004, 23 (3): 329-331.

- [2] 李深亮, 乔思佳, 姜绍西. 航空发动机叶片类静子辊轧叶片加工工艺 [J]. 航空制造技术, 2018, 61 (15): 40-47.
Li S L, Qiao S J, Jiang S X. Processing technology of stator rolling blade for aeroengine blade segment [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61 (15): 40-47.
- [3] 毛君, 孟辉, 陈洪月, 等. 航空发动机叶片热轧与冷轧过程对比分析与研究 [J]. 热加工工艺, 2013, 42 (13): 84-86, 91.
Mao J, Meng H, Chen H Y, et al. Comparative analysis and research on hot rolling and cold rolling process of aeroengine blade [J]. Hot Working Technology, 2013, 42 (13): 84-86, 91.
- [4] 邵清安, 李治华, 孙立群, 等. 航空发动机塑性成形技术的应用与展望 [J]. 航空制造技术, 2014, 451 (7): 34-39.
Tai Q A, Li Z H, Sun L Q, et al. Application and prospect of aeroengine plastic forming technology [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, 451 (7): 34-39.
- [5] 霍晓佩. 高温合金叶片辊轧成形数值模拟及边部损伤研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2015.
Huo X P. Numerical Simulation and Edge Damage Research of Superalloy Blade Roll Forming [D]. Shenyang: Northeast University, 2015.
- [6] 于建民, 张治民, 李国俊. 叶片辊轧工艺数值模拟研究 [J]. 火箭与制导学报, 2006, 26 (1): 833-835.
Yu J M, Zhang Z M, Li G J. Numerical simulation of blade rolling process [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2006, 26 (1): 833-835.
- [7] 毛君, 曹治, 董晓彤. 叶片辊轧过程中变形的影响因素 [J]. 科技导报, 2014, 32 (7): 56-61.
Mao J, Cao Z, Dong X T. Influencing factors of blade deformation during rolling [J]. Science & Technology Review, 2014, 32 (7): 56-61.
- [8] 靳淇超, 汪文虎, 蒋睿嵩, 等. 压气机叶片辊轧模具型腔回弹补偿方法研究 [J]. 机械工程学报, 2017, 53 (16): 148-155.
Jin Q C, Wang W H, Jiang R S, et al. Research on springback compensation method of compressor blade rolling die cavity [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53 (16): 148-155.
- [9] 靳淇超, 汪文虎, 蒋睿嵩, 等. 一种改进的压气机叶片辊轧成型前滑计算模型 [J]. 航空学报, 2016, 37 (10): 3178-3185.
Jin Q C, Wang W H, Jiang R S, et al. An improved forward slip calculation model for compressor blade roll forming [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2016, 37 (10): 3178-3185.
- [10] 王渊彬, 汪文虎, 张艳, 等. 压气机叶片辊轧模具型腔快速建模技术 [J]. 航空学报, 2014, 35 (11): 3190-3198.
Wang Y B, Wang W H, Zhang Y, et al. Rapid modeling technology of compressor blade rolling die cavity [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35 (11): 3190-3198.
- [11] 王玮, 耿文冉, 孔祥伟. 航空发动机叶片冷辊轧过程本构模型 [J]. 机械设计与制造, 2018, 328 (6): 5-8.
Wang W, Geng W R, Kong X W. Constitutive model of aeroengine blade cold rolling process [J]. Machinery Design & Manufacture, 2018, 328 (6): 5-8.
- [12] 金加奇, 周道. GH4169 叶片冷辊轧成形过程数值模拟分析 [J]. 机械设计与制造, 2019, 338 (4): 204-206.
Jin J Q, Zhou D. Numerical simulation analysis of GH4169 blade cold roll forming process [J]. Machinery Design & Manufacture, 2019, 338 (4): 204-206.
- [13] Kong X W, Li J, Li B. Finite element analysis of rolling process for variable cross-section blade [J]. Journal of Central South University, 2013, 20 (12): 3431-3436.
- [14] Jiang Z Y, Du X Z, Du Y B, et al. Strip shape analysis of asymmetrical cold rolling of thin strip [J]. Advanced Materials Research, 2010, 97-101: 81-84.
- [15] Ye N Y, Cheng M, Zhang S H. Effect of cold rolling parameters on the longitudinal residual stress distribution of GH4169 alloy sheet [J]. Acta Metallurgica Sinica: English Letters, 2015, 28 (12): 1510-1517.
- [16] Kong X W, Wang H Y, Jiang L, et al. Research on rolling force and stress during rolling process of blade with complex surface based on multi-plane slab method [J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2020, 42 (8): 1-12.

(上接第95页)

- [9] 刘健, 林高用, 冯迪, 等. 模桥结构对铝型材分流挤压纵向焊缝焊接性能的影响 [J]. 热加工工艺, 2009, 38 (21): 8-12.
Liu J, Lin G Y, Feng D, et al. Effects of die leg on welding ability of longitudinal welds during porthole die extrusion of aluminum profile [J]. Hot Working Technology, 2009, 38 (21): 8-12.
- [10] 朱俊瑞. 铝型材平面分流挤压模分流桥的结构研究 [D]. 烟台: 烟台大学, 2021.
Zhu J R. Structure Research for the Porthole Bridge of the Aluminium Profile Extrusion Porthole Die [D]. Yantai: Yantai University, 2021.
- [11] 张允继. 铝型材挤压过程模拟及模具优化设计 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2015.
Zhang Y J. Simulation for Aluminium Profile Extrusion Process and Optimum Design of Porthole Die [D]. Hefei: Hefei University of Technology.
- [12] 罗永新. 镁合金挤压过程模拟实验研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2007.
Luo Y X. Simulation and Experiment Research on the Extrusion Process of Magnesium Alloy [D]. Changsha: Hunan University, 2007.
- [13] Liu Z W, Li L X, Yi J. Influence of extrusion speed on the seam weld quality in the porthole die extrusion of AZ31 magnesium alloy tube [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 92: 1039-1052.
- [14] Dang L, Yang H, Guo L G, et al. Study on exit temperature evolution during extrusion for large-scale thick-walled Inconel 625 pipe by FE simulation [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 76: 1421-1435.