

叶片辊轧过程中变形的影响因素

毛君, 曹治, 董晓彤

辽宁工程技术大学机械工程学院, 阜新 123000

摘要 针对航空发动机某级静子叶片表面加工形状复杂、导致叶片变形量控制困难的现状, 通过高阶拟合曲线方法建立模具和叶片毛坯的三维模型, 利用 ANSYS/LS-DYNA 软件对叶片的辊轧过程进行模拟。根据模拟结果在叶片截面内选取节点, 研究了由轧制摩擦系数、轧制速度、轧制下压量所引起的叶片型面在法向和横向的变形情况, 得出了辊轧过程中叶片在不同参数下叶片型面变形的影响规律。研究表明: 叶片最大变形区域在叶盆弧面斜率较大位置处, 此区域叶片表面的曲率变化较大, 应变所产生的误差也最大; 变形量总体上随辊轧摩擦系数的增大而增大, 随轧制速度的增大而减小, 随轧制下压量的增大而增大。研究结果可为航空发动机某级静子叶片加工工艺的方案设计提供理论参考。

关键词 叶片; 辊轧; 变形量

中图分类号 TG335.19

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.07.008

Influencing Factors on Deformation of Blade Rolling Process

MAO Jun, CAO Zhi, DONG Xiaotong

School of Mechanical Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China

Abstract For a certain grade of the aviation engine stator blade surface machining, complex shapes may cause a difficult situation of blade deformation control. Through the high-order curve fitting method, the three-dimensional model of blank molds and blades are established, and ANSYS/LS-DYNA software is used to simulate the blade rolling process. According to the results of the simulation of the blade cross section, nodes are select to study the blade surface's normal and lateral deformations caused by the rolling friction coefficient, the rolling speed, the rolling amount of pressure. Different parameters influencing the deformation of blade surface and the laws of the rolling process are obtained. The results show that the maximum deformation area of the blade is in the dorsal arc position of the steep slope, where the blade surface curvature is large. The error is also generated by the maximum strain. The deformation amount of the blade increases with the rolling friction coefficient decreasing, reduces with the rolling speed increasing, and increases with the rolling amount of pressure increasing. The results can provide a theoretical reference for a certain grade aircraft engine stator blade processing design.

Keywords blade; rolling; deformation

叶片是航空发动机中的重要零件,它在航空发动机能量转换中起着关键的作用。叶片辊轧工艺保持了流线的连续性,提高并改善了叶片的抗应力腐蚀性能和抗疲劳性能,降低了生产周期和加工的成本^[1~3]。詹梅^[4]对叶片制造工艺提出了三维有限元数值模拟和物理模拟。王乐安^[5]对叶片锻造工艺及其设备技术改造提出了合理化建议。于建民等^[6]对叶片辊轧工艺数值模拟进行了研究。鲁玉峰等^[7]提出了航空叶片精密电解加工数字化系统。

航空发动机某级静子叶片加工形状复杂,其表面形状是叶片最终检验合格的重要标准,因此在实际的叶片辊轧中,对于叶片的安装位置、楔铁伸出量、辊轧速度等调整量要求较高。目前的加工过程只能根据经验并通过反复试验确定各项调整量,造成大量废料,影响了叶片的加工效率。本文通过 ANSYS/LS-DYNA 软件对叶片的辊轧过程进行模拟,分析摩擦系数、轧制速度、下压量对叶片变形所产生的影响,对辊轧过程的调整方法提供依据。

收稿日期: 2013-11-12; 修回日期: 2013-12-30

基金项目: 国家科技支撑计划项目 (2007BAF12B01)

作者简介: 毛君, 教授, 研究方向为机械动态设计与仿真, 电子信箱: crazy890421@qq.com

引用格式: 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.

1 叶片轧制仿真模型的建立

在实际的轧制工作中,叶片的轧制过程属于塑性成型,为了便于有限元模型的建立,提高计算精度和效率,将模具和轧辊视为刚体,叶片坯料采用多段线性弹塑性材料模型。利用 Pro/E 建立上下模具的模型,然后导入 LS-DYNA 中进行分析。叶片坯料在 ANSYS 的环境下建立,其中叶片厂某级叶片的参数为:密度 4.39 g/cm^3 ,弹性模量 113 GPa ,泊松比 0.28 ,屈服强度 884 MPa ,切变模量 42 GPa ,导热率 $6.7 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$,比热容 $610 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$ 。叶片轧制的模型建立如图 1 所示。

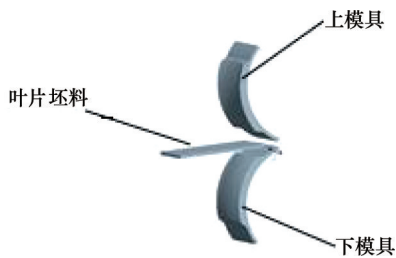


图 1 叶片坯料与模具模型

Fig. 1 Model of blade billet and mould

2 模具和叶片的网格划分、边界条件及载荷处理

飞机发动机叶片模具和叶片坯料表面要求有较高的光滑度,因此叶片模具型面的三维造型采用的是高阶拟合曲线方法,其结果具有良好的收敛性和稳定性,可以实现叶片模具型面光滑度高、曲率良好的要求。通过 ANSYS 自动对模具模型进行网格的划分,在网格划分过程中,为防止在成形过程中有限元网格畸变过大而导致计算精度降低,在模具成形的部分采用高密度等分线段映射网格划分方式,单元类型采用薄壳单元,如图 2 所示。在 ANSYS 程序中,将叶片与模具的接触类型设置为侵蚀接触,采用表面与表面的接触模型,模具表面为目标面,叶片表面为接触面。叶片模具通过螺钉固定在轧辊轴上,可作固定处理。在叶片的对称轴线处施加约束。由于模具在轧辊上进行轧制,因此施加力矩载荷,并施加在叶片模具的工作面上,如图 3 所示。

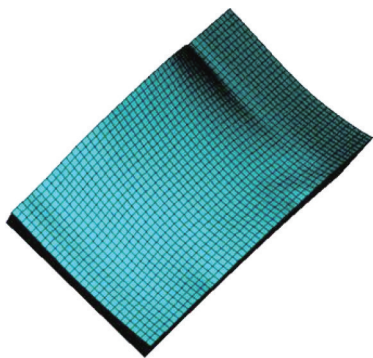


图 2 模具有限元模型网格划分

Fig. 2 Meshing, boundary conditions and loading processing of the mould

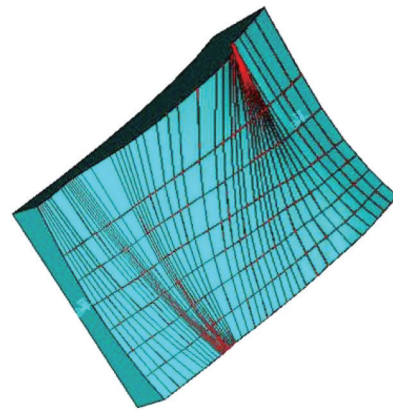


图 3 模具约束与载荷效果

Fig. 3 Selection of internal nodes

3 叶片型面关键点的确定

叶片坯料在轧制的作用下产生了塑性变形^[8],由仿真结果可得出叶片某一纵截面轧制之后对应的最大应变云图(图 4)。红色区域说明金属变形量最大,即叶盆弧面斜率较大位置处,此区域叶片表面的曲率变化较大,其应变所产生的误差也最大。在轧制过程中,叶片内部的节点必将产生移动,从而导致质点的应变,为了研究轧制参数对金属流动特性的影响,提高叶片加工质量,在叶片内部变形量最大区域选取节点,研究不同参数下该节点的流动特性。

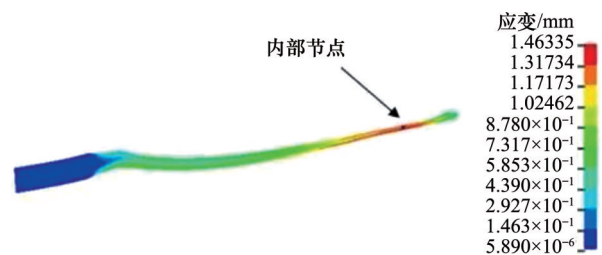


图 4 内部节点的选取

Fig. 4 Selection of internal nodes

4 不同参数对叶片变形的影响

4.1 轧制摩擦系数对变形的影响

图 5 为不同摩擦系数对应的等效应变云图。从图 5 可以看出,叶片轧制摩擦系数为 0.10 、 0.15 、 0.20 时对应的最大等效应变分别为 1.07 、 1.46 、 1.62 mm ,说明等效应变随着摩擦系数的增加而增加。由图 5 还可以看出,红色区域即最大等效应变的范围随着摩擦系数的增加而增大。

图 6 为相同轧制速度、压下率的条件下,得到的不同摩擦系数对金属节点的横向位移影响曲线。分析图 6 曲线可知:在 $0\sim 0.21 \text{ s}$ 时,叶片咬入阶段,节点横向位移的变动量不大。当 $0.21\sim 0.71 \text{ s}$ 时,节点开始进入轧制区,节点位移逐渐增加,曲线 A 增加的幅度最大,其增值为 0.21 mm ,曲线 B、曲线 C 增加的幅度比较平缓,增加幅值分别为 0.06 、 0.04 mm 。通过数

值对比发现,在此时刻区间内摩擦系数越大节点横向位移越小,这是叶片轧辊接触面的摩擦阻力所导致的,摩擦阻力增大阻碍了节点产生横向位移。当0.71~1.24 s,节点退出轧制区进入前滑区,此时节点的横向位移大幅度增加,曲线A、B、C增加的幅值依次为0.20、0.66、0.81 mm,这是受摩擦力的影响,前滑区的金属流动速度要大于轧制区和后滑区^[9]。当1.24~1.63 s时刻,叶片接近辊轧末端,节点横向流动趋于平缓。

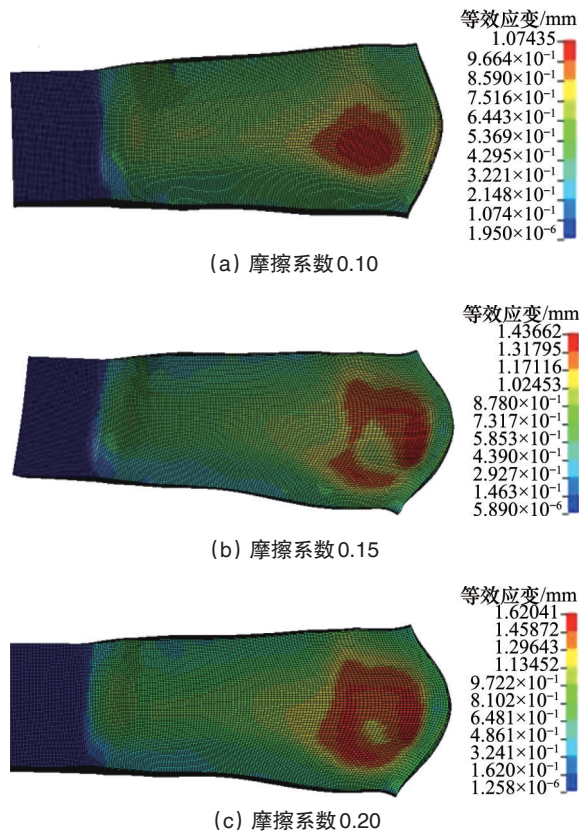


图5 不同摩擦系数对应的等效应变

Fig. 5 Friction coefficients corresponding to the equivalent principal strains

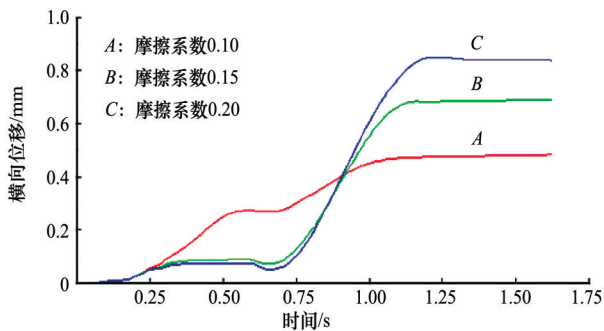


图6 摩擦系数对节点横向位移影响

Fig. 6 Friction coefficient impact on the lateral displacement node

由图7可知,节点的法向位移处于逐渐增大的趋势。在0~0.14 s时,叶片处于咬入阶段,摩擦系数为0.4所对应的曲线C的增加幅值仅为0.3 mm。当0.14~0.24 s时,节点进入后滑区,由于与轧制区金属粒子的相互作用,叶片节点的法向位移趋于平缓^[10]。曲线C的法向位移值仅为0.04 mm。在0.24~1.19 s时,曲线B、C对应的节点进入轧制区,其法向位移逐渐增加,而曲线A的增加在0.24~0.94 s,比曲线B、C增加时间快,这是因为摩擦力越大阻碍节点作用力越大。最后时间段,曲线B、C法向位移的增加逐渐减小,而曲线A有上升的迹象,说明在叶片弯曲曲面轧制时使节点上升,而摩擦力的增大使叶片在此处的弯曲程度减小,证明摩擦系数的增大对叶片型面变形具有很大影响。

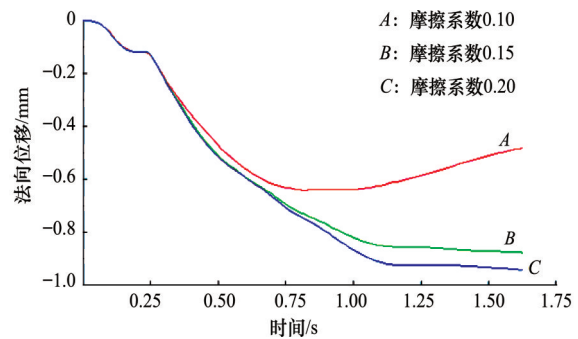


图7 摩擦系数对节点法向位移影响曲线

Fig. 7 Friction coefficient impact on the longitudinal displacement node

4.2 轧制速度对辊轧变形的影响

图8为不同轧制速度对应的等效应变云图。从图8可以看出,轧辊的轧制速度为0.4、0.5、0.6 rad/s时对应的最大等效应变为1.99、1.74、1.52 mm,说明等效应变随着轧制速度的增加而减小。从图8还可以看出,红色区域即最大等效应变的面积随着轧制速度的增加而减小。综上所述,轧制速度的增加使叶片的辊轧等效应变减小。

以上分析了辊轧速度对等效应变的影响,而应变是由叶片节点发生位移所导致的,同样选取图4上的一内部节点,研究不同轧制速度对节点的位移影响。

从图9可知,轧制速度增加使节点横向位移上升时间缩短,节点累计横向位移A、B、C依次为0.69、0.60、0.43 mm,可见随着辊轧速度的提升横向位移减小,这是因为轧制速度增加,导致轧制过程时间减少,轧件与轧辊的机械咬合来不及或者不充分,从而导致轧辊和轧件之间的摩擦系数减小,而摩擦系数的减小将导致轧制力减小,即轧制力在横向分布轧制力减小,使节点横向位移减小。

从图10分析可知,节点累计法向位移曲线C、B、A依次为0.26、0.46、0.88 mm,可见随着轧制速度的增加,节点的法向位移减小,这是因为轧制速度增加将影响到摩擦系数使其减小,而由摩擦系数对节点法向位移的影响情况可知,轧制速

度的减小将使节点的法向位移增大。此外,叶片进入弯曲曲面轧制时,曲线B、曲线C对应的节点均有回升趋势,但曲线A没有,可见轧制速度过慢对叶片型面的轧制有一定的影响。

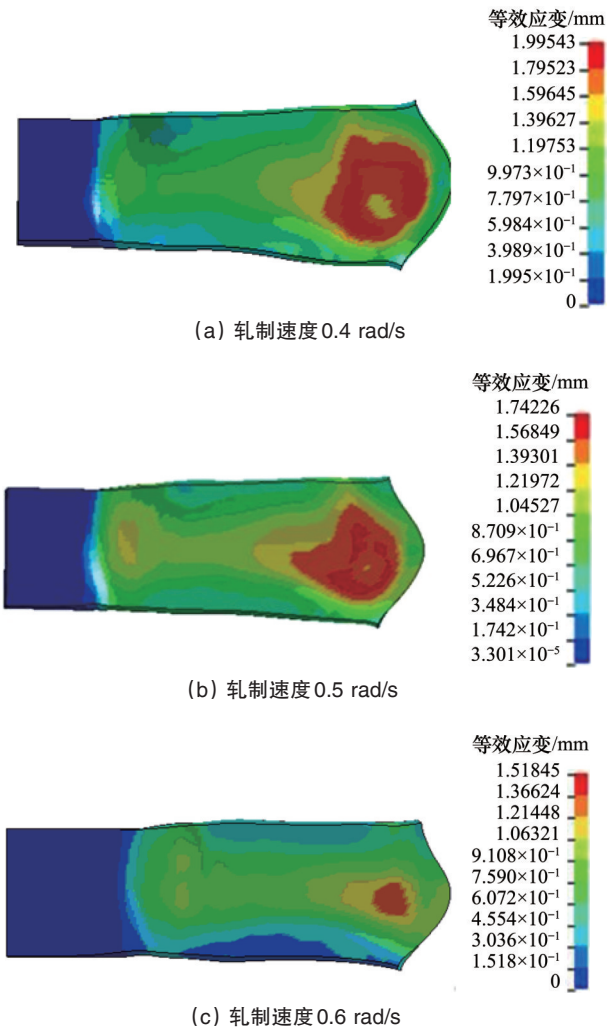


图8 不同轧制速度对应等效应变
Fig. 8 Rolling speeds corresponding to the equivalent strains

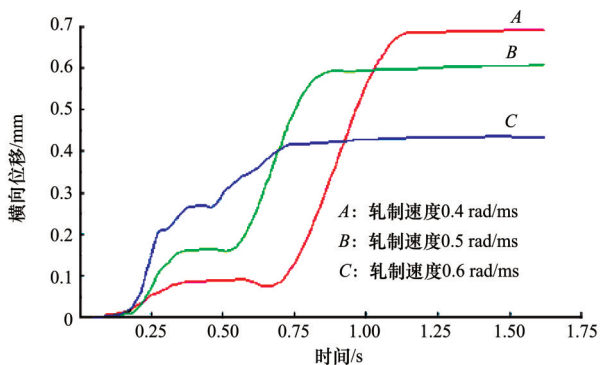


图9 轧制速度对节点横向位移影响
Fig. 9 Rolling speed impact on lateral displacement node

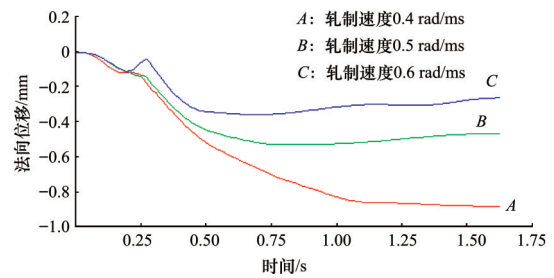


图10 轧制速度对节点法向位移影响
Fig. 10 Rolling speed impact on longitudinal displacement node

4.3 轧制压下率对辊轧变形的影响

图11为不同压下率对应的等效应变云图。从图11可以看出,当轧辊的压下率为44%、50%、55%时对应的最大等效应变为0.93、1.05、1.17mm,说明等效应变随着压下率的增加而增加。此外,如图中红色显示区域所示,最大等效应变区域随着压下率的增大而增大。

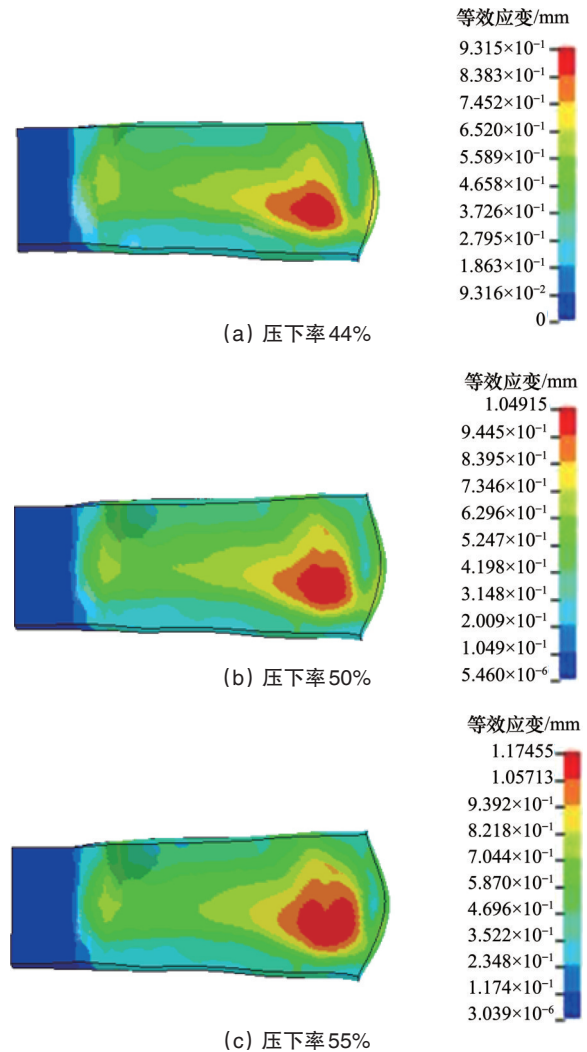


图11 不同压下率对应的等效应变
Fig. 11 Rolling amounts of pressure corresponding to the equivalent strains

以上分析了不同压下率对等效应变的影响,不同压下率对导致应变的节点位移的影响情况如图12所示。

在0~0.71 s时叶片处于咬入、稳定轧制初始阶段,压下率对横向位移的影响不大,在0.71 s时,3者相差最大值为0.02 mm。在0.71~1.1 s区间内由于横向轧制力的峰值分布在此处,3种压下率对应的横向位移呈大幅度增长,最后节点累计横向位移为0.13、0.24、0.69 mm,可见横向位移随着压下率的增加呈增大趋势。

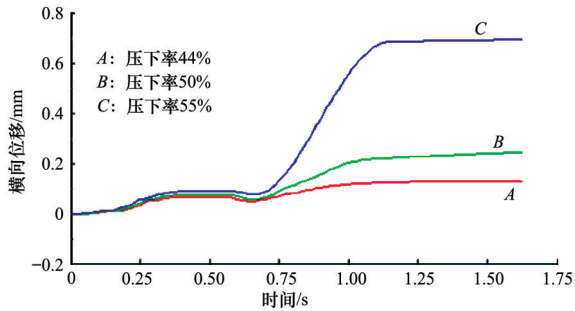


图12 压下率对节点横向位移影响曲线

Fig. 12 Rolling amount of pressure impact on lateral displacement node

从图13可知,曲线A、B的法向位移先增大,达到峰值之后上升,而曲线C一直增大,只有在后期轧制时增大幅度减小。因为压下率的增大使叶片在此处的弯曲程度减小,可见压下率的改变对叶片型面影响之大。3种不同压下率条件下,节点法向位移的累计位移从上到下依次为0.30、0.50、0.88 mm。从数值以及观察曲线分布可知随着压下率的增加,节点法向位移相应的增加。

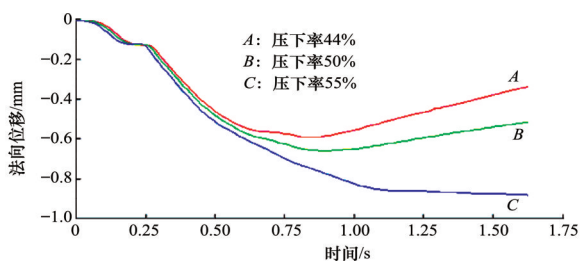


图13 压下率对节点法向位移的影响

Fig. 13 Rolling amount of pressure impact on longitudinal displacement node

5 叶片轧制试验

根据航空发动机某级静子叶片的工艺加工要求以及叶片变形的规律,通过辊轧不同参数值试件,确定了叶片在加工过程中各项参数的具体调整范围;其中摩擦系数在0.12~0.14、辊轧速度在0.35~0.4 rad/s、压下率在58%~62%的范围内所辊轧出的叶片合格率最高,符合叶片的加工工艺要求。图14为确定可调整范围进行的轧制试验的辊轧结果,图15为在确定的可调整范围内所轧制出的合格叶片。



图14 叶片轧制试验结果

Fig. 14 Test results of the blade rolling



图15 试验轧制的合格叶片

Fig. 15 Qualified blade of the rolling test

6 结论

根据航空发动机某级静子叶片的工艺加工要求以及叶片变形的规律,通过辊轧不同参数值试件,确定了叶片在加工过程中各项参数的具体调整范围,研究方法和结论可为航空发动机叶片辊轧工艺的设计提供参考。

1) 通过研究不同摩擦系数对叶片变形的影响,得到最大等效应变的范围随着摩擦系数的增加而增加,并且变形程度总体上随着摩擦系数的增大而增大。

2) 叶片的最大等效应变区域随着辊轧速度的增大而减小,并且导致摩擦力降低,进而使得叶片变形程度随着轧制速度的提高而减小。

3) 叶片最大等效应变区域随着压下率的增加而增加,变形程度随着辊轧压下率的增大而增大。由于压下率的增大使叶片在轧制处的弯曲程度减小,后期轧制时变形增大的幅度减小。

4) 叶片最大应变区域在叶盆弧面斜率较大位置处,此区域的叶片表面的曲率变化较大,进而其辊轧加工所产生的误差也最大。

参考文献 (References)

- [1] 盛文娟. 钛合金叶片型面电解加工工艺研究[J]. 金属加工(冷加工), 2011(17): 54-57.
Sheng Wenjuan. Study on the electrolysis processing technology of titanium alloy blade surface[J]. Metal Processing, 2011(17): 54-57.
- [2] 钟杰, 胡楚江, 郭成. 叶片精密锻造技术的发展现状及其展望[J]. 锻压技术, 2008(1): 1-5.
Zhong Jie, Hu Chujiang, Guo Cheng. The technology development

- status and outlook of blade precision forging[J]. Forging & Stamping Technology, 2008(1): 1-5.
- [3] 吴海龙. 航空发动机精锻叶片数控砂带磨削工艺基础研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
- Wu Hailong. Basic research on the CNC belt grinding process of aero-engine precision forging blades[D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.
- [4] 詹梅. 航空叶片的精锻工艺与模拟技术[J]. 重型机械, 1999(6): 1-8.
- Zhan Mei. Aviation blade precision forging craft and simulation techniques[J]. Heavy Machinery, 1999(6): 1-8.
- [5] 王乐安. 航空工业中的锻压技术及其发展[J]. 锻压技术, 1994(1): 57-61.
- Wang Le'an. Proposals concerning the technology reform of forging process and its equipments for jet engine blades[J]. Forging & Stamping Technology, 1994(1): 57-61.
- [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 Jianmin, Zhang Zhimin, Li Guojun. Study on numerical simulation of the leaf roll process[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2006, 26(1): 833-835.
- [7] 鲁玉峰, 吴蓉昆. 航空叶片精密电加工数字化集成系统[C]/第十届全国特种加工学术会议论文集. 北京: 中国机械工程学会特种加工分会, 2003: 120-122.
- Lu Yufeng, Wu Rongkun. Aviation precision blades digital integrated electrochemical machining system[C]/Proceedings of the Tenth National Conference of Special Processing. Beijing: Special Processing Branch of the Chinese Mechanical Engineering Society, 2003: 120-122.
- [8] 王延溥, 齐克敏. 金属塑性加工学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2001.
- Wang Yanpu, Qi Kemin. Metal plastic processing[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2001.
- [9] 吕丽华. 轧制理论基础[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1991.
- Lü Lihua. Rolling theoretical foundation[M]. Chongqing: Chongqing University Press, 1991.
- [10] 贺毓辛. 轧制工程学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.
- He Yuxin. Rolling engineering[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2010.

(责任编辑 侯澄芝)

·学术动态·



《科技导报》2014年新添“英国皇家学会推介”等4个特色栏目

《科技导报》2014年创设“英国皇家学会推介”、“快讯”、“科技数据”、“科技图片”4个特色栏目,欢迎科技工作者热情关注,欢迎一线科研人员积极投稿。

1)英国皇家学会推介。翻译英国皇家学会系列期刊所刊登论文的导读,英国皇家学会组织的会议、活动及相关政策等内容,促进中国读者了解英国科技界的最新情况。

2)科研快讯。以简讯形式快速报道国内外重大研究进展,包括主要研究成果、研究方法、研究意义等。附250字左右摘要,参考文献不超过30条。

3)科技数据。发布重大研究中的系列原始数据,以及各类与科技界相关的统计数据。

4)科技图片。刊登科技工作者原创科技精美图片,并供给其他人员付费使用,《科技导报》负责联系、管理。

近年来,为进一步促进期刊品牌建设,强化科技传播效果,《科技导报》创立了众多栏目。

为了快速报道前沿科技成果,创立了“专题论文”、“研究论文”、“综述文章”、“学术争鸣”、“封面图片说明”等栏目;

为了评述科学前沿、推介科技政策、促进科学人文融合,创立了“专稿”等栏目;

为了及时提供热点科技评论,创立了“卷首语”、“科技风云”、“科技工作大家谈”、“科技事件”、“学术聚焦”、“书评”、“图书推介”、“科技纵横捭阖”、“科学顿悟”等栏目;

为了追踪报道热点科技要闻,创立了“科技要闻”、“科技期刊亮点”、“科技新闻媒体关注指数排行榜”、“科技界声音”等栏目;

为了探讨研究生、年轻科研人员在科研和求职中可能遇到的问题,创立了“主编心语”、“读者之声”、“科技基金漫谈”、“科技职场”、“科技人才招聘”、“全球招聘新闻”等栏目;

为了树立学术规范、强化科学道德,创立了“学术不端行为举报”等栏目;

为了报道中国科协和全国学会的学术活动,创立了“科学共同体要闻”、“学术动态”、“宣传画廊”等栏目。