

电镀砂轮磨损对 GH4169 磨削表面完整性的影响^{*}

马爽^{1,2}, 李勋¹, 苏帅¹

(1. 北京航空航天大学机械工程及自动化学院, 北京 100191;

2. 中航工业北京航空精密机械研究所, 北京 100076)

[摘要] 电镀砂轮具有优异的成型性和形状保持能力, 越来越广泛地应用于复杂曲面的加工, 但是磨损对零件表面完整性影响的研究并不充分。在深入分析利用圆环型砂轮在插磨方式下加工 GH4169 试件所产生的表面形貌形成规律的基础上, 对高刚度矩形试件的磨削表面粗糙度随砂轮磨削量的变化进行了详细记录, 并对某型号发动机静子叶片进行实际磨削验证。试验结果表明, 精磨时适当的砂轮磨损可以使高刚度试件表面粗糙度下降 35%, 对表面硬度和残余应力影响不大; 而叶片的弱刚度会大幅提高磨削粗糙度, 但适当的砂轮磨损可以使叶片端部粗糙度下降 64%, 并降低刚度对粗糙度的影响, 进而提高叶片表面磨削质量的一致性。因此, 通过磨削粗糙度对砂轮的磨损状况进行大致评估, 选择合适磨削量的砂轮用于精加工, 以充分降低工件的表面粗糙度并提高磨削质量的一致性。

关键词: 电镀砂轮; 粗糙度; 磨损; 悬臂插磨; 表面完整性

Influence of Electroplated Wheel Wear on GH4169 Grinding Surface Integrity

MA Shuang^{1,2}, LI Xun¹, SU Shuai¹

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. AVIC Beijing Precision Engineering Institute Aircraft Industry, Beijing 100076, China)

[ABSTRACT] Electroplated wheels have excellent formability and shape holding capacity which make it more and more widely used in complex curved surface grinding. But the researches on the surface integrity influenced by wheel wear is insufficient. Therefore, the surface topography feature of cantilever plunge grinding were studied and the roughness changing with wheel wear were recorded when the rectangular specimens with high stiffness and a kind of motor stator vane with weak stiffness were grinded. The result show that the appropriate wear can make the roughness fell by 35%. But the wear has little influence on surface hardness and residual stress. The weak stiffness of aero-engine blade can increase the roughness. The appropriate wear not only can make the blade top edge roughness reduce by 64% but also can weaken the influence on roughness by stiffness and improve the uniformity of surface integrity. So the wear of electroplated wheels can be estimated by workpiece roughness. The conclusion can help select the wheels with appropriate wear for finish grinding. It contributes to decrease the roughness of workpiece and improve the uniformity of surface integrity.

Keywords: Electroplated wheel; Roughness; Wear; Cantilever plunge grinding; Surface integrity

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2017.1/2.074

航空发动机叶片在高温高压的环境中承受着复杂热力载荷, 要求其材料具有良好的机械性能和热性能。GH4169 作为一种典型的镍基高温合金, 广泛应用于航空、宇航的耐高温部件^[1-2], 但优异的机械性能也导致其加工性能较差^[3]。利用超硬磨料砂轮高速磨削加工已被证明有利于提高加工精度及质量^[4-5], 并被国内外学者所重视。电镀 CBN 砂轮由于优异的成型性和良好的经济性, 具有突出的优势, 但是它只具备单层砂粒, 其磨

损情况对叶片表面质量影响更为突出。

在精密磨削过程中, 尤其是对于高温合金等难加工材料, 砂轮的磨损状态是决定磨削性能好坏的重要指标, 不仅关系到经济指标, 对砂轮的改进、砂轮寿命和零件表面状况的预测有着重要作用, 因此一直是学者研究的重点^[6-9]。研究方法大体分为仿真分析和试验观察两个方面。仿真分析大多通过有限元方法, 有效地减少了试验量, 东北大学的巩亚东^[10]通过 ABAQUS 研究了超高速点磨削砂轮的磨损仿真, 但大多数还是通过试验方式进行研究, 并发展了大量的在线检测方法; 南航的李

^{*} 基金项目: 叶片磨削抛光加工单元研究应用 (2013ZX04001051); 涡轮增压内冷却磨削液施加新原理研究 (51105024)。

峰^[11]发现顺磨和逆磨的法向磨削力差值可以作为判断砂轮磨损状况的指标;巴西的 Benini^[12]专门研究了基于声发射技术的砂轮磨损状况在线检测;美国的 Guo^[13]认为可以通过功率衡量砂轮磨损。除此之外激光功率谱技术、光学投影技术、振动监测技术、CCD 图像监测技术、多传感器监测技术、基于网络专家系统等也都有相应的发展^[14]。这些方法重点关注砂轮何时不能继续用于加工,并重点检测砂轮失效前后各种指标的变化,却并没有将其与工件材料的表面完整性联系起来。对于一些表面质量和精度要求很高的零件,新制砂轮加工出的表面粗糙度较高,不利于叶片疲劳寿命的提升。为使其加工后的表面质量得到改善,需将其进行初期修整或前期处理。对于发动机叶片等复杂曲面,经常使用大粒度号电镀异形砂轮,砂轮在线修整需要很高的定位精度,若误差较大,就很容易使砂粒完全脱落或者失去磨削性能,因此实际生产中通常用新制砂轮进行粗加工或半精加工的方式对砂轮进行前期处理,所以精确的控制初期磨损量对于提高零件的表面质量和延长砂轮有效使用时间非常重要。

叶片是发动机的核心部件,其复杂的曲面造型和弱刚度导致加工更加复杂。随着机床的发展尤其是五轴数控磨床的出现,利用圆环型砂轮在插磨方式下加工高精度的复杂曲面的应用越来越广泛。孟凡军、李勋等提出了利用悬臂装夹的方式对叶片进行精密磨削加工的工艺方法,能够大幅度提高叶片磨削加工的尺寸精度,同时相对于周磨、悬臂、插磨的刀轨曲率小很多,降低了对机床动态性能的要求^[15-16]。但是在对 GH4169 等航空材料的表面完整性进行研究的过程中,大多数学者选择了平面周磨,由于插磨方式下表面纹理形成方式与周磨不同,叶片刚度又通常较弱,并不能直接套用其结论。

本文研究了电镀 CBN 砂轮在悬臂插磨方式下加工 GH4169 平板试件时,砂轮磨损对表面完整性的影响,并对典型薄壁叶片进行试验验证。试验结果为叶片加工过程中选择具有合适磨损量的电镀砂轮提供理论基础。

1 试验条件和试验过程

试验试件采用 GH4169 试件,试件分为高刚度试件和弱刚度试件两种,高刚度试件为使用基体硬度是 HRC43 的平板试件,尺寸为 15.7mm × 4.8mm × 56mm(其中一半长度用于夹持);弱刚度试件为同样基体材料的某型号航空发动机静子叶片,叶身长度约为 27mm,最厚处为 0.8mm。

试验采用三轴立式磨床;砂轮采用 $\phi 16$ 圆环状 200# CBN 电镀砂轮,轴向圆弧半径为 1.5mm;磨削液采

用 Blaser 高速磨削油;粗糙度测量仪采用表面轮廓仪;硬度测量仪采用 HV-1000 显微硬度计,试验载荷选用 0.2N,保持载荷时间为 10s;残余应力测量采用 X 射线无损检测法,使用芬兰 XStress3000。

试验装夹方式为悬臂装夹;磨削方式为轴向进给插磨,采用“之”字型走刀;对平板试件采用精磨参数进行砂轮磨损试验;对与叶片半精-精加工交替进行,试验参数见表 1。

表1 磨削试验参数

加工方式	磨削深度 /mm	磨削宽度 /mm	进给速度 / (mm·min ⁻¹)	砂轮转速 / (m/s ⁻¹)
半精加工	0.05	1	800	17.6
精加工	0.01	0.55	800	17.6

2 试验结果及分析

2.1 插磨方式下表面形貌特点

工件的表面形貌是砂粒经过加工表面所留下的痕迹,插磨方式下的工件表面形貌和周磨方式有着明显的不同,用新制 CBN 砂轮磨削刚度良好的 GH4169 试件的表面形貌如图 1 所示,从中可以看到工件表面实际上呈现的是垂直于进给方向的一条条的突起纹路,两条突起之间的距离恰好等于砂轮每转进给的距离,即 38 μm 。由于 200# 电镀砂轮的砂粒尺寸应当大约在 70 μm 左右,明显大于砂轮每转进给量,并结合图 1 (b) 所示的表面形貌,可以看出此时仅有极少量的砂粒参与了磨削过程,甚至只有 1~2 颗砂粒起到了主要作用,也就是说插磨方式下形成的工件表面实际上是近似于铣削表面,显著区别于周磨表面。这是因为砂轮在装夹过程中不可避免的存在圆跳动,另外电镀砂轮上也不可避免的存在高点,在砂轮旋转过程中砂轮高点和低点切入工件的深度就会有所不同,又由于砂轮进给方向和砂轮转速方向相互垂直,砂轮高点和低点的加工痕迹不会相互遮盖,因此会在已加工表面上留下如图 1 (b) 所示的近似铣削状表面。可见,磨削表面粗糙度与砂轮上砂粒的等高性有着明显关系。

2.2 砂轮磨损对平板试件表面完整性的影响

因为工件表面形貌为近似铣削表面,所以容易得出推论其突起条纹的高度和砂轮高低点的高度差有很大关系,这也直接影响到了磨削表面的粗糙度。通过精磨参数下的磨损试验可以发现其粗糙度随着砂轮使用时间,经过若干次波动总体呈逐渐降低趋势(如图 2);粗糙度在砂轮开始使用时最高,大约为 $R_a 0.57 \mu\text{m}$ 左右,最终降低到了 $R_a 0.37 \mu\text{m}$ 左右,下降了大约 35%;并且砂轮在长达 9h 的使用时间后,通过 SEM 照片观察砂轮表

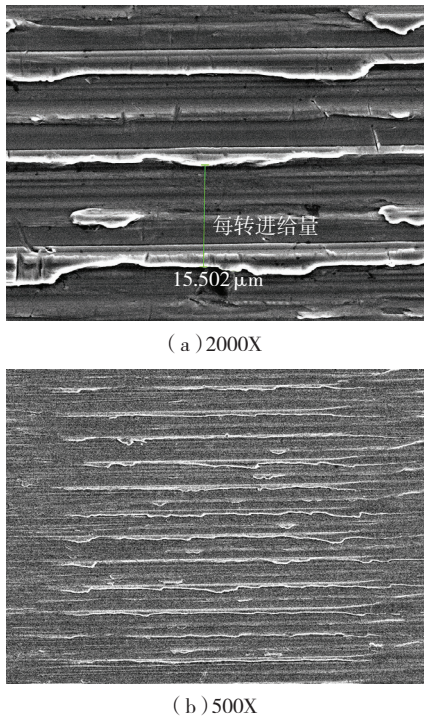


图1 新制砂轮插磨方式下的加工表面SEM照片
Fig.1 SEM photos of workpiece plunge ground by new electroplated wheel

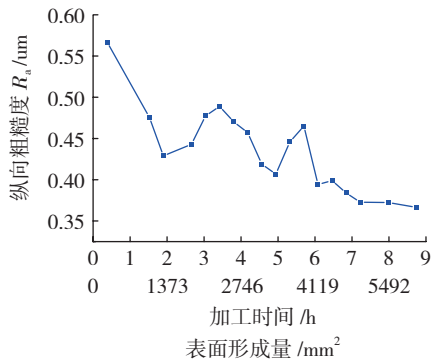


图2 进给方向粗糙度随砂轮使用时间的变化曲线
($v_s=17.58\text{m/s}$, $f=800\text{mm/min}$, $a_p=0.01\text{mm}$)
Fig.2 Roughness changing with wheel wear time
($v_s=17.58\text{m/s}$, $f=800\text{mm/min}$, $a_p=0.01\text{mm}$)

面,此时没有发现明显的磨粒的脱落情况,磨损方式主要为磨粒的磨耗和微观破碎(如图3),工件表面也没有发现明显缺陷,说明在所采用的精加工参数下该型号砂轮有足够的耐用度,因此对于精磨参数下的磨损试验不再进一步延长试验时间;随着砂轮的磨损工件的表面显微硬度及残余应力基本保持不变,约为 HRC₅2.32,硬化率为 21.7%;进给方向残余压应力约为 1200MPa,转速方向残余压应力约为 780MPa,如图4所示。

因为砂轮存在圆跳动,在旋转到不同角度时砂粒的切深不同,磨损情况也不相同。因此砂轮加工的过程也

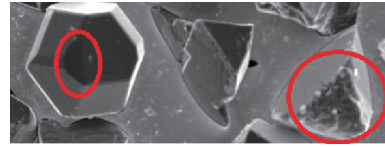


图3 精磨砂轮砂粒磨损情况
Fig.3 Wear state of finish grinding wheel

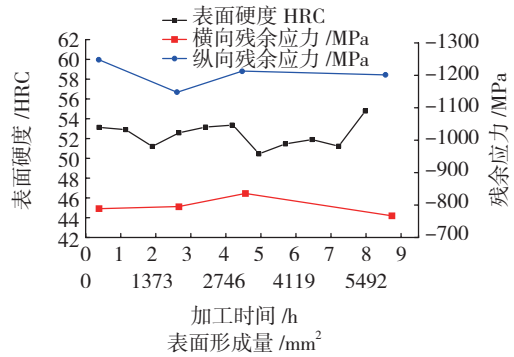


图4 表面硬度及残余应力随砂轮使用时间的变化曲线
($v_s=17.58\text{m/s}$, $f=800\text{mm/min}$, $a_p=0.01\text{mm}$)
Fig.4 Surface hardness and residual stresses changing with machine time
($v_s=17.58\text{m/s}$, $f=800\text{mm/min}$, $a_p=0.01\text{mm}$)

可以看作工件对砂轮进行“修整”的过程,砂轮轮廓表面的高点随着磨削加工的进行逐渐降低,参与磨削的砂粒也会逐渐增多,使得砂轮逐渐变“圆”,其轮廓精度逐渐提高,近似铣削过程也会逐渐向理想的磨削过程转变,因此粗糙度整体呈下降趋势。从图5中可以看到砂轮经长时间磨损后所加工的工件表面不再出现间隔明显的条状突起存在;而下降过程中的若干次波动是由于旧高点破碎而降低,新高点露出造成的;又因为磨削过程中始终是少数的砂粒参与磨削,磨削瞬时的状态未产生明显的改变,所以磨削表面的显微硬度和残余应力也不会有明显变化。

由于粗糙度会随着砂轮磨损程度的增减呈若干次波动,逐渐降低,因此可以通过零件表面粗糙度大致判断砂轮使用状况选择合适的砂轮用于精加工。在本试验条件下,当砂轮在精磨参数下粗糙度小于 $R_a 0.4 \mu\text{m}$

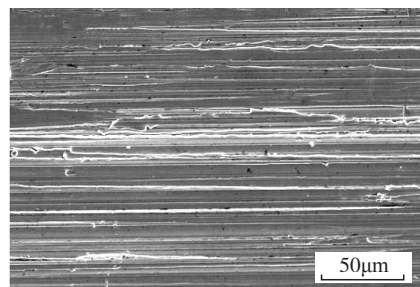


图5 加工9h后砂轮工件表面500倍SEM照片
Fig.5 500 times SEM photo of workpiece plunge ground by electroplated wheel after 9h

后,适用于精加工,此时不仅粗糙度值较小,而且粗糙度波动也较小,所加工出的工件表面质量的一致性较高。

2.3 薄壁叶片的加工实例

发动机叶片是典型的弱刚度零件,用同一砂轮连续半精-精加工同一型号叶片,每一个叶片加工完成后,将叶片沿长度方向分为端部、底部两个部位沿砂轮进给方向对粗糙度进行测量,试验结果如图6所示。

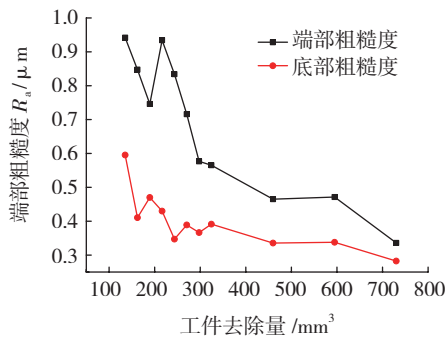


图6 某型号发动机静子叶片进给方向粗糙度随工件去除量的变化情况

Fig.6 Roughness of a stator vane changing with removal amount

从图6中可以得到如下3点结论:第一,验证了适当的电镀砂轮磨损可以有效地降低粗糙度,其中端部粗糙度下降了64%,底部粗糙度下降了47%;第二,叶片的刚度显著影响了磨削粗糙度,底部粗糙度变化与板型试件类似,而端部粗糙度显著大于底部粗糙度,这是叶片端部刚度低于底部刚度的缘故;第三,可以发现端部粗糙度和底部粗糙度的差值随砂轮磨损逐渐减小,最终稳定在 $R_a 0.1\text{m}$ 左右,显著提高了薄壁叶片整体磨削质量的一致性。这是因为初始磨削时由于砂轮存在“高点”,切削过程更接近于铣削,近似断续加工,容易引起叶片振动;随着砂轮的磨损,高点逐渐去除,砂轮慢慢变“圆”,切削过程更接近于理想磨削过程,磨削力开始稳定,振动减小,因此粗糙度差值也逐渐减小,从而增加了叶片不同位置表面粗糙度的一致性。

通过在薄壁叶片上进行砂轮磨损试验可以验证:适当的磨损可以显著降低叶片的磨削粗糙度,同时可以大幅提高叶片不同位置磨削质量的一致性。

3 结论

通过以上分析和研究,得到以下几个结论:

(1) 精加工参数下电镀 CBN 砂轮主要以磨粒的磨损和微破碎为主。

(2) 精加工参数下工件的表面硬度和残余应力随着砂轮的磨损没有明显变化,但粗糙度逐渐下降,因此可以通过对零件粗糙度的检测估计砂轮的磨损状况。对

于 200# 电镀 CBN 圆环形砂轮,当粗糙度低于 $R_a 0.4\ \mu\text{m}$ 后适用于精加工,此时粗糙度变化较为稳定。

(3) 对于薄壁零件,砂轮磨损除降低表面粗糙度外,还可以减小振颤,显著提高零件不同刚度位置的磨削表面质量及其一致性。

(4) 新制电镀 CBN 砂轮应当利用其前期加工质量不稳定的阶段进行半精加工,经过一定磨损后用于精加工,充分利用砂粒等高性能阶段,提高砂轮经济性。

(5) 电镀砂轮在正常磨损过程中,磨削表面完整性除粗糙度外不会发生明显变化,因此通过选用经过初期磨损、工作状态稳定的砂轮,可以使生产过程中前后加工的不同叶片之间的表面完整性保持良好的一致性。

参考文献

- [1] 黄新春,张定华,姚倡锋,等. 镍基高温合金 GH4169 磨削参数对表面完整性影响[J]. 航空动力学报, 2013(3): 621-628.
HUANG Xinchun, ZHANG Dinghua, YAO Changfeng, et al. Effects of grinding parameters on surface integrity of GH4169 nickel-based superalloy[J]. Journal of Aerospace Power, 2013(3):621-628.
- [2] 徐九华,张志伟,傅玉灿. 镍基高温合金高效成型磨削的研究进展与展望[J]. 航空学报, 2014,35(2): 351-360.
XU Jiuhua, ZHANG Zhiwei, FU Yucan. Review and prospect on high efficiency profile grinding of nickel-based superalloys [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014,35(2): 351-360.
- [3] 杜随更,姜哲,张定华,等. GH4169DA 磨削表面变质层软化机理研究[J]. 航空学报, 2013(34):1-5.
DU Suigeng, JIANG Zhe, ZHUANG Dinghua, et al. Study on the softening mechanism of grinding surface metamorphic layer of GH4169A[J]. Acta Aeronautica et Sinica, 2013(34):1-5.
- [4] LI X. Application of self-inhaling internal cooling wheel in vertical surface grinding[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2014(1):86-91.
- [5] TIAN L, FU Y C, XU J H, et al. The influence of speed on material removal mechanism in high speed grinding with single grit[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2015,89:192-201.
- [6] GONG Y D, QIU J, LIU Y J, et al. The grinding mechanism on quick-point grinding wheel wear and effects on surface quality[J]. Key Engineering Materials, 2009,416:370-374.
- [7] RAUSCH S, BIERMANN D, KERSTING P. Five-axis grinding of wear-resistant, thermally sprayed coatings on free-formed surfaces[J]. Production Engineering, 2014,8(4):423-429.
- [8] DING K, FU Y C, SU H B, et al. Wear of diamond grinding wheel in ultrasonic vibration-assisted grinding of silicon carbide[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 71:1929-1938.
- [9] ARRIANDIAGA A, PORTILLO E, SÁNCHEZ J A, et al. Virtual sensors for on-line wheel wear and part roughness measurement in the grinding process[J]. Sensors, 2014,14(5):8756-8778.
- [10] 巩亚东,刘月明,韩廷超,等. 超高速点磨削砂轮的设计与磨损仿真[J]. 超硬材料工程, 2010, 22(4): 37-42.
GONG Yadong, LIU Yueming, HAN Yanchao, et al. Design and wear simulation of the grinding wheel used in super-high speed point grinding[J].

Superhard Material Engineering, 2010, 22(4): 37-42.

[11] 李峰, 苏宏华, 丁文锋, 等. 电镀 CBN 砂轮高速磨削高温合金的砂轮磨损研究 [J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2011(6): 29-32.

LI Feng, SU Honghua, DING Wenfeng, et al. Wear of electroplated CBN wheels in high speed grinding of superalloy [J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2011(6): 29-32.

[12] BENINI L, WEINGAERTNER WL, SILVA MACIEL LD. Wear monitoring on microcrystalline aluminum oxide grinding wheels on profile grinding with the aid of acoustic emission [J]. Advanced Materials Research, 2014, 894: 95-103.

[13] GUO C, SHI Z, ATTIA H, et al. Power and wheel wear for grinding nickel alloy with plated CBN wheels [J]. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2007, 56(1): 343-346.

[14] 孔振, 冯虎田, 陶卫军. 砂轮在线监测技术及发展趋势 [J]. 机床与液压, 2010(24): 92-94.

KONG Zhen, FENG Hutian, TAO Weijun. Development trends of grinding wheel on-line monitoring technology [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2010(24): 92-94.

[15] MENG F J, LI X, CHEN Z T, et al. Study on the cantilever grinding process of aero-engine blade [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2014, 228(11): 1393-1400.

[16] 李勋, 孟凡军, 陈志同. 一种利用三轴联动插补的叶片悬臂磨削加工方法: 201310009069.6 [P]. 2013-01-10.

LI Xun, MENG Fanjun, CHEN Zhitong. A kind of three axes linkage interpolation method for cantilever grinding blades: 201310009069.6 [P]. 2013-01-10.

通讯作者: 李勋, 博士, 副教授, 主要研究方向为高性能材料切削磨削技术及表面完整性, E-mail: lixunbuaa@163.com.

(责编 大漠)

(上接第69页)

in age forming of aluminum alloy plates [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2007, 20(6): 564-569.

[3] HO K C, LIN J, DEAR T A. Modelling of spring back in creep forming thick aluminium sheets [J]. International Journal of Plasticity, 2003, 20(4-5): 733-751.

[4] 曾元松, 黄遐, 黄硕. 蠕变时效成形技术研究现状与发展趋势 [J]. 塑性工程学报, 2008, 15(3): 1-8.

ZENG Yuansong, HUANG Xia, HUANG Shuo. The research situation and the developing tendency of creep age forming technology [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2008, 15(3): 1-8.

[5] 甘忠, 熊威, 张志国. 2124 铝合金时效成形回弹预测 [J]. 塑性工程学报, 2009, 16(3): 140-144.

GAN Zhong, XIONG Wei, ZHANG Zhiguo. Springback prediction of age-forming for 2124 aluminum alloy [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2009, 16(3): 140-144.

[6] 穆霞英. 蠕变力学 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1990.

MU Xiaying. Creep mechanics [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1990.

[7] YS/T 591-2006 变形铝合金热处理规范 [S].

YS/T 591-2006 Heat treatment of wrought aluminium and aluminium alloys [S].

[8] 陈卫忠, 伍国军, 贾善坡. ABAQUS 在隧道及地下工程中的应用 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.

CHEN Weizhong, WU Guojun, JIA Shanpo. The application of ABAQUS in tunnel and underground engineering [M]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2010.

通讯作者: 童国权, 教授、博导, 主要从事钣金成形工艺、材料超塑性变形和钛板成形专用装备等的研究, E-mail: meegqtong@nuaa.edu.cn.

(责编 大漠)

(上接第73页)

缺陷, 大大减少了生产过程中不必要的损失。以 CAA/CATIA 为平台, 建立了蒙皮边缘孔最小边距的快速检测平台, 可提高工艺性审查效率, 减少工艺人员不必要的劳动, 降低研制成本, 大大提高了飞机研制效率。

参考文献

[1] 刘晓波. 基于 MBD 的飞机装配工艺辅助系统研究 [D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2013.

LIU Xiaobo. A research on the auxiliary system of aircraft assembly process based on MBD [D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2013.

[2] 李永毅, 楚王伟, 王晓刚. MBD 模式下的飞机结构零件工艺设计研究 [J]. 制造业自动化, 2014, 36(4): 130-134.

LI Yongyi, CHU Wangwei, WANG Xiaogang. The research of airplane structure part process design based on MBD [J]. Manufacturing Automation, 2014, 36(4): 130-134.

[3] 靳江艳, 黄翔, 刘希平. 基于模型定义的飞机装配工艺信息建模 [J]. 中国机械工程, 2014(25): 569-576.

JIN Jiangyan, HUANG Xiang, LIU Xiping. Model-based definition assembly process information modeling for aircrafts [J]. China Mechanical Engineering, 2014(25): 569-576.

[4] 王境宇, 邓立营. 基于 CATIA 的产品定义信息三维表达及组织方法 [J]. 制造业自动化, 2011, 33(11): 130-133.

WANG Jingyu, DENG Liying. CATIA based 3D annotation and organization for product definition information [J]. Manufacturing Automation, 2011, 33(11): 130-133.

[5] 谢方琳. 飞机铆接结构中铆钉直径和边距的确定 [J]. 航空学报, 1990, 11(10): 3-5.

XIE Fanglin. Determination of rivet diameter and edge distance in aircraft riveted structure [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1990, 11(10): 3-5.

通讯作者: 韩志仁, 博士、教授, 主要研究方向为钣金成形 CAE 和数字化制造, E-mail: hanren888@163.com.

(责编 大漠)