

航空材料Waspaloy镍基高温合金 表面完整性研究

■ 西安航空发动机集团有限公司动力国际 (陕西 710021) 宋晓庆 唐彩国 伏建锋

摘要: 针对航空部件镍基高温合金Waspaloy材料的车削、钻铣削及棱边加工的试验研究, 确定了镍基高温合金Waspaloy车削加工的合理参数、钻铣加工的工艺方法以及棱边加工方法, 确保镍基高温合金Waspaloy切削加工的表面完整性, 同时提高零件疲劳寿命。

西航动力国际(简称: XAE)与德国摩天宇航空公司(简称: MTU)建立了长期合作关系, 并签订了10个关键环类旋转件的订单, 涉及V2500、PW2000等重要发动机型号。这些零件组装于高压涡轮部件端, 材料为镍基高温合金, 牌号Waspaloy。依据MTU公司的技术文件要求, XAE需向MTU报批加工参数、设备, 提供剖切件所用的加工刀具以及剖切件, 用于MTU评定XAE的加工工艺方案和剖切件的表面完整性。

1. 零件结构特点及材料特性

首先从零件结构特点、材料特性等进行分析, 依据分析结果科学合理地策划工艺方案, 突破关键技术, 确定切削刀具、加工参数以及表面质量的检测。

(1) 结构特点。该零件是一个典型薄壁环形零件。零件直径为400~500mm, 形状复杂, 精度要求高, 涉及车、铣、钻和偏析腐蚀等工艺方法; 对零件的表

面质量要求高, 加工难度大。零件装配如图1所示。

(2) 材料性能。镍基合金(Waspaloy)具有耐腐蚀、耐高温、硬度高和难加工的特点, 广泛地应用在航空、航天领域, 尤其是在航空发动机的高温部件中, 如发动机涡轮封严环、叶片等。镍基高温合金的难加工性主要会导致两个问题: 一是刀具寿命缩短和严重的零件加工后表面缺陷; 二是产生的切削热和加工中的塑性变形会影响加工后材料表面完整性, 切削热通常会改变

合金的微观组织结构和导致残余应力的产生, 而残余应力还可以产生于塑性变形。切削热和塑性变形进一步导致裂纹的产生和组织结构的变化, 而且还产生显微硬度的变化。同时, 残余应力也是工件装配时几何尺寸不稳定现象的原因。

因此, 为了保证加工后零件的表面完整性, 必须选择合理的加工参数, 包括刀具与涂层材料的选择、加工方法、切削用量、冷却润滑来保证足够的刀具寿命和加工材料的表面完整性。

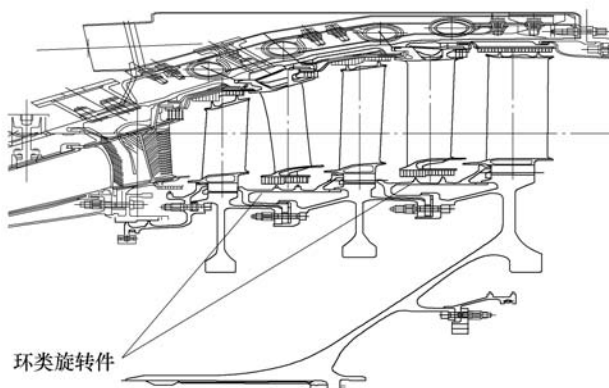


图1 环类旋转件装配图

2. 车削加工合理参数试验

(1) 合理切削速度试验。

本试验选用 Waspaloy合金材料的零件3A0963进行车削,如图2a所示,切削试验刀片选用ISCAR公司提供的硬质合金基体刀片VCMT160404,涂层牌号IC806。试验时保持切削液充分浇注,给定进给 f 和切深 a_p 的情况下,试验不同的切削速度。加工后使用大功显检测刀具磨损,最后通过分析检测结果得出合理的切削速度。

在试验中给定切深 $a_p=0.2$ mm,进给 $f=0.15$ mm/r,以不同的切削速度进行车削加工,试验后刀具磨损情况如表1所示。

上述数据显示,第1、5、6组

刀具磨损值较大,超出刀具磨损评定的极限值,从而推定使用常用刀具加工此材料比较合理的切削速度为25~35m/min。

(2) 合理切削进给试验。

本试验选用 Waspaloy合金材料的零件3A0963进行车削,如图2b所示,切削试验刀片选用ISCAR公司提供的硬质合金基体刀片GIPY3.00-1.50,涂层牌号IC907。试验时保持切削液充分浇注,给定切削速度 v_c 和切深 a_p 的情况下,试验不同的进给。加工后使用大功显检测刀具磨损,最后通过分析检测结果得出合理的切削进给。

在试验中,给定切深为0.2mm,切削速度30m/min,以不

同的切削速度进行车削加工,试验后刀具磨损情况如表2所示。

上述数据显示,第1、5、6组刀具磨损值较大,超出刀具磨损评定的极限值,从而推定使用常用刀具加工此材料比较合理的切削进给为0.15~0.25mm/r。

(3) 合理切削深度试验。

本试验选用 Waspaloy合金材料的零件3A2522进行车削,如图2c所示,切削试验刀片选用ISCAR公司提供的硬质合金基体刀片GIPY4.00-2.00,涂层牌号IC320。试验时保持切削液充分浇注,给定切削速度 v_c 和进给 f 的情况下,试验不同的切削深度。加工后使用大功显检测刀具磨损,最后通过分析检测结果得出合理

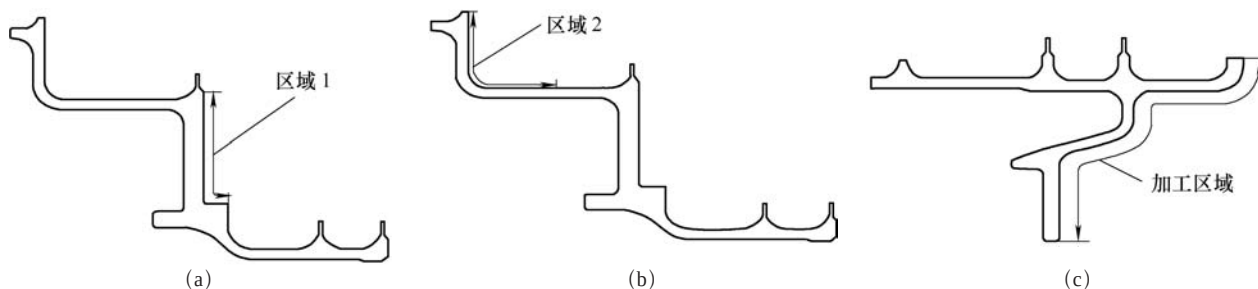
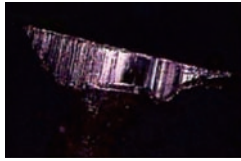
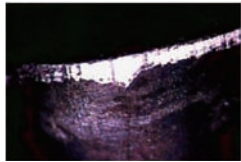


图2 试验件加工区域

表1 刀具磨损数据

VCMT160404 IC806				进给 $f=0.15$ mm/r			
刀片	线速度/ ($m \cdot min^{-1}$)	刀片磨损/mm	刀片磨损视图	序号	线速度/ ($m \cdot min^{-1}$)	刀片磨损 /mm	刀片磨损视图
1	20	0.4		4	35	0.28	
2	25	0.35		5	40	0.38	
3	30	0.38		6	45	0.45	

表2 刀具磨损数据

刀片	GIPY3.00-1.50 IC907			线速度=30m/min 切深 a_p =0.2mm			
序号	线速度/ ($\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$)	刀片磨损/ mm	刀片磨损视图	序号	线速度/ ($\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$)	刀片磨损/ mm	刀片磨损视图
1	0.1	0.42		4	0.25	0.32	
2	0.15	0.22		5	0.3	0.42	
3	0.2	0.27		6	0.35	0.5	

的切削深度。

在试验中，给定进给为0.15mm/r，切削速度30m/min，以不同的切削深度进行车削加工，试验后刀具磨损情况如表3所示。

上述数据显示，第4、5、6组刀具磨损值较大，超出刀具磨损评定的极限值，1组磨损太小，刀

具未充分使用，从而推断使用常用刀具加工此材料比较合理的切削深度为0.2~0.3mm。

(4) 车削加工合理参数验证。通过上述试验可获得常用加工刀具的合理切削参数，即切削速度 $v_c=25\sim35\text{m/min}$ ，进给 $f=0.15\sim0.25\text{mm/r}$ ，切深 $a_p=0.2\sim0.3\text{mm}$ 。为验证切削参数的合理

性，选择零件3A0963做切削试验，加工位置如图2所示；使用刀具VCMT160404 IC806，其切削参数如表4所示。

在给定参数的试验加工后，对已加工位置区域按表面完整性的评定要求进行了表面粗糙度、表面残余应力及表层金相组织的检测，如图3所示。

表3 刀具磨损数据

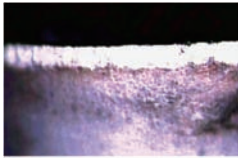
刀片	GIPY4.00-2.00 IC320			切削速度=30m/min		进给 <i>f</i> =0.15mm/r	
序号	线速度/ (m·min ⁻¹)	刀片磨损/ mm	刀片磨损视图	序号	线速度/ (m·min ⁻¹)	刀片磨损/ mm	刀片磨损视图
1	0.1	0.1		4	0.6	0.37	
2	0.2	0.25		5	0.8	0.4	
3	0.3	0.28		6	1	0.48	

表4 切削试验参数

加工刀片	切削速度 v_c /($\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$)	进给 f /($\text{mm}\cdot\text{r}^{-1}$)	切深 a_p /mm
VCMT160404 IC806	30	0.15	0.25

从以上检测结果可以判定试验件的加工符合零件表面完整性制造要求,进而验证了试验获得的常用刀具加工参数的合理性,为高温镍基合金Waspaloy的车削加工积累了宝贵经验。

3. 钻铣加工试验

(1) 加工方法。MTU项目旋转件均属薄壁环形件,壁厚仅有2~3mm,零件最大外圆直径400~600mm。外侧分布有2~3个封严齿结构,内侧均布有孔和花边,尺寸公差精度 $\pm 0.05\text{mm}$,位置精度0.1mm,表面粗糙度值 $R_a=1.6\mu\text{m}$,具体结构如图4所示。零件整体结构刚性差,机加性能不足,易引起振动和变形,且装配在高温高压的发动机涡轮部分,工作环境十分恶劣。因此,如何安排孔及花边的加工方法,保证零件的各项设计要求就显得至关重要。

考虑到零件的结构特点,同时还要兼顾满足MTU项目文件MTV548-1/2(孔加工要求)、MTV634-1(铣加工要求)的具体要求,首先安排铣削花边,其次再是孔加工。

(2) 加工刀具和参数选择。

加工刀具与涂层:铣削方式采用整体合金涂层铣刀加工,铣刀规格 $\phi 12\text{mm}\times 70\text{mm}$,刃长30mm;钻头使用硬质合金材料制造,刀具本体材料YK30F,规格 $\phi 6.6\text{mm}\times 75\text{mm}$,刃长30mm,不附带涂层;铰刀本体材料YK30F,附带涂层材料,规格 $\phi 6.8\text{mm}\times 75\text{mm}$,刃长30mm;倒圆铰刀不带涂层,切削刃为R0.5mm的圆弧,在圆弧的两端有两条 18° 的直线,刀具具有3个齿,总长100mm。铣刀与铰刀涂层的主要成分为氮化铝(AlN)和氮化钛(TiN),涂层较薄,并且具有耐热性高和结合强度好的特点,适用于高温合金的切削加工,涂层的基底是微晶硬质合金,这种微晶合金的特点是耐磨性和抗裂强度高,可实现稳定切削,如图5所示。

加工参数:钻铣加工参数的选择中,MTU认可的加工参数范围:铣削速度(10~40m/min),进给量(0.02~0.08mm/r·z),因此试验中选择最大铣削速度为40m/min。为接近实际零件的精铣加工过程,选取典

型的镍基合金精加工切削深度0.25mm。在试切过程中,当选择铣削速度40m/min、切削深度0.25mm、进给量0.05mm/r·z时,切削加工的初始阶段刀具发生了崩刃现象,刀具磨损超出MTU要求的磨损标准0.1mm,而后改用铣削速度30m/min、切削深度0.25mm、进给量0.02mm/r·z时,刀具未出现崩刃情况,磨损也符合标准要求。通过类似的试验加工也获得了钻头、铰刀、倒圆铰刀的加工参数:①钻头切削速度16m/min,进给量0.02mm/r·z。②铰刀切削速度17m/min,进给量0.02mm/r·z,切削深度0.1mm。③倒圆铰刀切削速度10m/min,进给量0.05mm/r·z。

加工试验:本试验选用Waspaloy合金材料的零件3A2522进行钻铣削加工,按上述加工方法,选择确认的刀具和加工参数,试验时保持切削液充分浇注。加工后检测刀具磨损及表层金相组织,判定钻铣加工表面的完整性。

试验结束后,用大功显对刀具磨损情况进行检测,结果均符合MTU刀具磨损的要求,满足对刀具磨损的控制,铣刀磨损不大于0.1mm,钻头磨损不大于0.2mm,铰刀磨损不大于

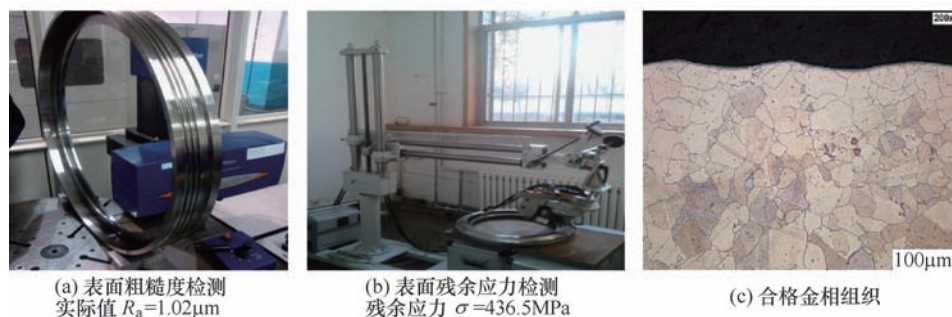


图3 表面完整性检测



图4 旋转件实体图

0.15mm，倒圆铰刀磨损不大于0.05mm。刀具磨损检测满足要求后，再对试验所加工的孔及花边剖切进行表层金相检测，采用放大倍数500或1 000的方法检测，结果都满足MTP206-1，MTP206-2的标准要求。

从刀具磨损与表层金相检测结果可判定试验件的加工符合表面完整性制造要求，为高温镍基合金Waspaloy钻铣加工研究指明了方向，保证了该材料加工的表面完整性。

4. 棱边加工试验

(1) 加工方法。MTU项目

零件孔口和花边都有倒圆的加工要求，由于之前采用手工进行倒圆加工，不仅无法保证尺寸的一致性，而且手工处理极易在孔口或孔壁产生附带损伤，外观质量得不到保证，如图6所示。

为了更好地保证倒圆尺寸的一致性，只能将手工倒圆方法优化为机械加工，通过数控程序可较好地保证倒圆尺寸的一致性。因此，孔口和花边的加工确定在机床完成。

(2) 加工试验（见图7）。本试验选用 Waspaloy合金材料的零件3A3047进行棱边倒圆加工，

选用三轴加工中心设备MV-85，倒圆刀具R0.4mm。零件3A3047要加工20处花边和20个孔，在机床上使用倒圆刀对20处花边和20个孔口的正、反面进行倒圆加工，每加工完10处花边或10个孔就更换新刀具。试验后使用样膏和轮廓度测量仪对首、末孔及花边进行对比检测，判定倒圆尺寸大小的一致性。

从上述检测数据可知，样膏与轮廓度检测仪的数据基本吻合，满足了设计对孔及花边倒圆的加工要求。通过轮廓度检测仪绘制的图形可看出圆弧光滑、平整，无尖锐划伤和刻痕，降低了应力集中点的出现，有效保证了棱边加工的表面完整性。

5. 结语

对镍基高温合金机械加工表面完整性知识有了深入的研究：

① 镍基高温合金的物理、力学及机械加工性能，有助于选择合适的方法、刀具和参数进行机械加工，保证零件的表面完整性。② 利用试验方法验证了车削、钻铣加工参数的合理性，获得了符合要求的加工表面完整性。③ 棱边加工方法由手工处理优化为机床上完成，倒圆尺寸大小一致性较好，圆角部位的表面完整得到保证。为今后同类零件的研发做出了好的技术储备，实用价值很大。

参考文献：

[1] 航空制造工程手册总编委会. 发动机机械加工[M]. 北京：航空工业出版社，1997.

MW（收稿日期：20160822）

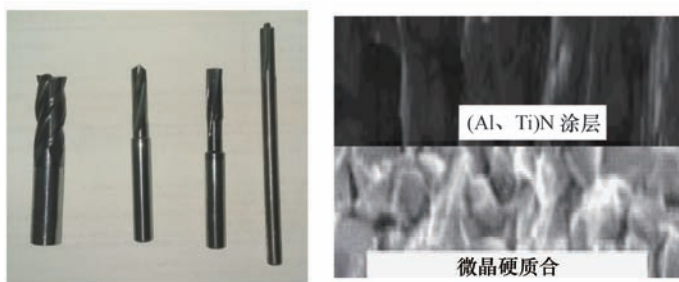


图5 加工刀具及刀具涂层结构

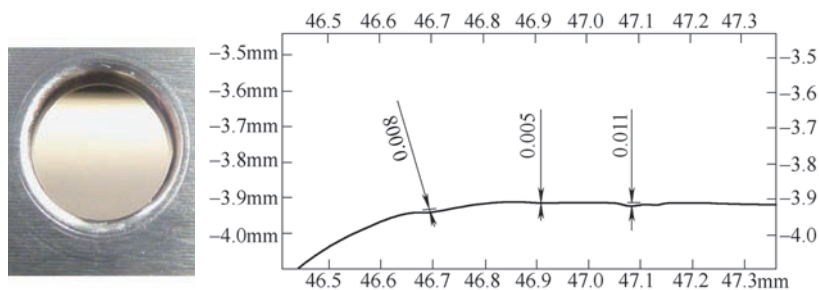


图6 孔口刻痕与刻痕深度检测结果

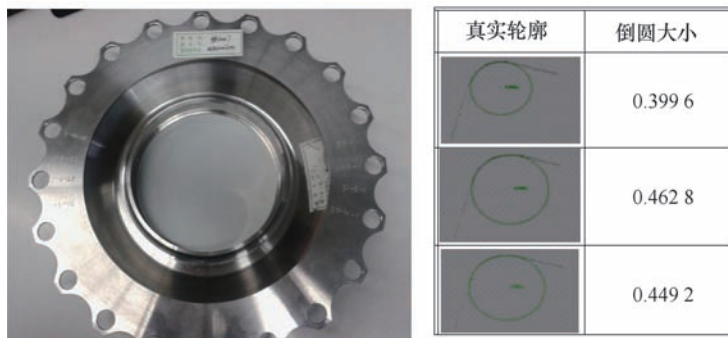


图7 孔和花边的检测对比