

航空发动机关键转动部件 加工技术

Machining Technique of Aeroengine Critical Rotating Component

中航工业沈阳黎明航空发动机(集团)有限责任公司 姜雪梅 赵鹏飞



姜雪梅

研究员级高级工程师,中航工业发动机公司盘轴类零件加工首席技术专家,从事航空发动机盘轴制造技术研究。在国家级刊物发表的主要论文有:《高速拉削工艺的研究与应用》、《粉末高温合金涡轮盘机械加工技术研究》、《空心长轴深孔加工工艺研究》、《整体盘轴零件优质高效加工技术》等。

航空发动机是飞机的心脏,是决定飞机性能的重要因素之一。发动机中盘、轴、鼓筒、轴颈等零件均是发动机的核心转动部件和关键件,在高温、高压、高转速的恶劣环境下工作。这类零件材料大多采用高温合金、粉末高温合金、钛合金等难加工材料制

先进的制造技术是航空发动机技术发展的基础,高性能航空发动机的发展对制造装备和工艺技术的要求越来越高,航空发动机性能水平的提高,不仅仅是依靠提升设计水平,而是依赖于设计、材料和加工工艺技术水平的共同提高和进步,特别是对于盘鼓、轴颈等关键转动部件,其加工精度和表面质量对发动机性能和可靠性至关重要。

造,尺寸精度要求高,技术条件严格,对零件表面质量、表面完整性要求高,其加工质量的高低直接影响到发动机的使用寿命和安全可靠性。

近年来,随着航空发动机技术的不断进步和发展,这些关键部件的加工技术有了大幅度的提升,从传统的加工方式、过多依赖操作者的经验和水平完成加工,转向车铣复合加工、全程序无干预数控加工、各类边缘自动成型加工和自动光整加工等自动化、集成化、精准化及抗疲劳制造的方向推进和发展。航空发动机关键部件加工技术的进步对提高航空发动机的可靠性,在全寿命使用周期内安全可靠的工作起到了至关重要的作用。

典型零组件结构特点

航空发动机转动零、组件主要有盘、轴、鼓筒、轴颈等典型零件(见图1)。图1(a)中新结构涡轮盘不但具有轮缘、辐板、榫槽、盘心孔等传统结构,而且带有双翼安装边,与轮盘的辐板形成了大深度半封闭深型腔,敞开性差,轮盘辐板及双翼安装边处均为薄壁结构,壁厚为2.0~2.6mm,零件刚性差,加工难度大。

图1(b)为盘轴一体结构零件,是将传统的压气机盘和轴颈集成为一体的重要承力件,材料为TC17,大端是轮盘结构,具有轮缘、辐板、轮毂、盘心孔,轮缘上带有安装叶片的燕尾榫槽,辐板处有精密螺栓连接

孔。零件轴颈端外型面带有螺纹、篦齿、外花键、径向斜孔等结构特征。盘轴一体结构零件的另一特点是轴颈锥壁与轮盘辐板形成了半封闭深型腔结构,加工工艺性差。

图1(c)为压气机后鼓筒零件,是由5个压气机盘通过惯性摩擦焊接组合而成,带有五级环形燕尾榫槽,辐板间内腔型面空间狭小,内腔根部径向深度大、敞开性差、加工难度大,外型面结构复杂,尺寸精度高,技术条件要求严,后鼓筒材料为GH4169,硬度 $HB \geq 388N/mm^2$ 。

典型零件机械加工技术

1 高效车铣复合加工技术

盘、鼓筒、轴颈等回转类零件的复合加工,主要以车铣复合加工为主,其特点是以工序集中为原则,将车削、铣削、钻镗等加工合为一体,在一台加工设备上完成不同工序或者不同工艺方法的加工,特别适合于零件精加工阶段,在完成主要型面车削加工的同时,还可同步完成定位孔、联结孔、键槽、花边、花键等镗铣加工

和滚齿加工,即通过一次装夹,完成车、铣、钻、镗、铰、攻丝、滚齿等多种加工要求,车铣复合加工可以减少零件定位装夹次数和找正时间,消除重复定位误差,减少工装数量、实现自动化、集成化加工,大幅度提高零件加工精度和加工效率。

以图1(b)中盘轴一体零件为例,零件除具有轮缘、辐板、轴身等回转表面外,还具有多处精密联结孔、径向斜孔、锁片槽、球头凹槽等特征,不但需要车削加工,而且还需钻、镗、铰加工和铣削加工。按传统的加工模式零件不仅需要数控车床、坐标镗床、五坐标加工中心等多种设备上加工,而且需要经过多次车、铣、钻镗、孔边倒圆等共18道工序才能完成加工,涉及的专用工装数量多,需要多次重复装夹找正。而采用车铣复合加工技术,仅用二道工序通过二次装夹,即可完成传统工艺需18道工序加工的内容。

车铣复合加工中心适合于加工以车削为主,钻、镗、铣加工为辅的回转类零件加工。五轴车铣型复合加

工中心具有的B轴摆动车削功能,特别适用于航空发动机一些结构复杂零件的半封闭型腔加工,如涡轮盘(见图1(a)),盘轴一体零件(图1(b))的深型腔加工。这类零件的主要结构特点是:辐板较长,型腔空间狭小,且径向深度大,盘心孔部位轴向开口宽度窄,加工中主要难点一方面是零件薄壁结构,加工中易受切削力影响产生加工变形,影响加工精度,另一方面深腔切削过程中刀具与零件易产生碰撞、干涉,甚至打刀,造成零件报废。为解决上述问题,除加工前进行模拟仿真,消除加工中的干涉外,同时需要设计满足深腔加工的非标专用刀具。半封闭深型腔在普通数控车床或车削中心上加工,需要三把非标刀具才能将整个型面全部加工完成,而应用车铣复合加工中心的B轴摆动车削功能,使铣削主轴头带动刀具同步摆动,刀具随着加工部位的形状不断地调整切削角度和运动方位,弥补了常规车削中刀杆固定不动的不足。在上述盘轴一体零件的深腔加工中只采用了一把高压内冷结构非标刀具,通过程序设计中应用了B轴摆动车削加工技术,实现了X、Z、B轴三轴联动车削,满足了半封闭深型腔加工需要,减少了接刀、换刀次数,保证了深腔型面轮廓的圆滑转接,提高了零件加工质量。

2 全程序无干预数控加工

全程序无干预数控加工技术,是将一道工序中的所有工步加工内容整合成一段具有“人机交互”能力的数控程序,数控机床除了在工艺设计需要的计划停车点停车以外,工序的各个工步加工内容是按照一定的次序步骤连续不断地完成的,加工过程不需要人工干预,实现程序整体连续运行,一次启动完成加工,改变了传统的数控加工由操作者手工对刀、测量、上刀这种落后方式,增强操作系统的可靠性,消除加工中的误差,将加工、测量和补偿有效地融合在同

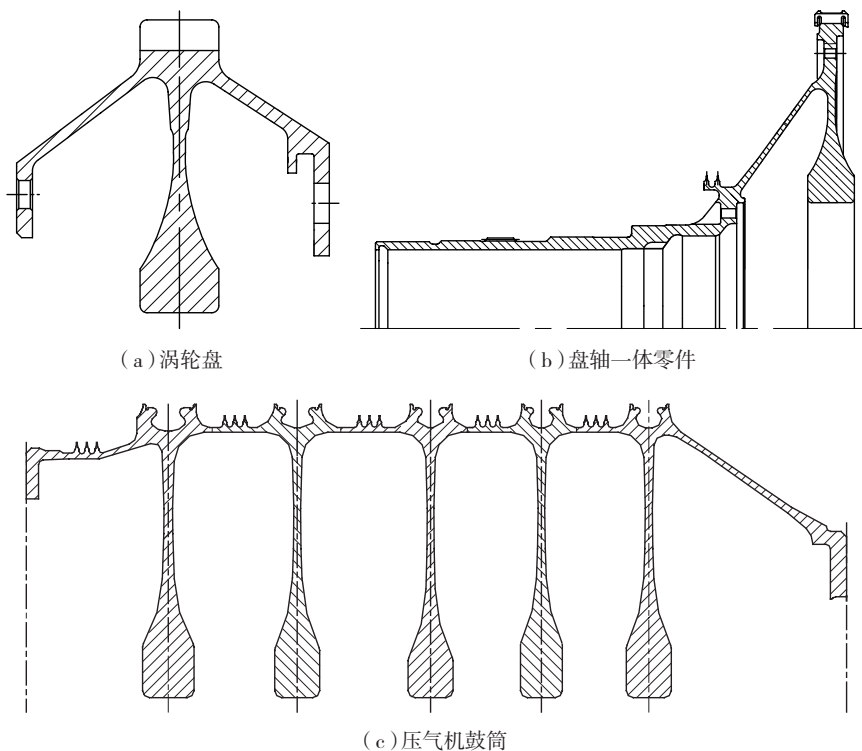


图1 典型转动零件结构简图

一程序段中,实现由机床为过程执行主体的连续“无干预”加工模式,大大地减少了人为出错的几率和不必要的停车时间。

全程序无干预数控加工,需要对不同结构零件的加工工艺方案、加工步骤、走刀轨迹、切削速度、切削方式、进给量及刀具结构等工艺要素进行优化设计,确保工艺要素正确合理、完整可靠,同时必须使切削过程中充分冷却和有效地断屑,避免加工中断。例如在加工图1(b)中的盘轴一体结构零件深腔结构时,粗精车加工均采用带有高压内冷结构的专用刀具和车铣复合加工设备,采用机床自动对刀、换刀,模拟走刀轨迹,避免刀具与零件干涉,然后根据所编制的无干预数控加工程序,选定不同的刀板形式和机夹刀片、切削参数,按照所设计的加工步骤进行加工。首先采用垂直结构的刀板,安装4~6mm宽的切刀,进行粗开内腔和深扎内腔的加工,去除深型腔大部分余量,其次采用“倾斜”结构的刀板,安装圆头刀片,用轴向分层切削方式,完成内腔辐板的加工,然后更换为径向分层切削方式,完成深腔根部的加工,最后应用了B轴摆动车削加工技术和恒定线速度切削,完成深腔型面的精车加工。

传统的加工方式,零件尺寸精度依靠操作者上刀补值控制、受人为的影响因素大,尺寸公差离散度大,采用无干预数控加工规范了操作员的操作步骤和次序,最大限度地降低“人为干预”的错误机率,将诸多方面可能出现的问题和存在的风险进行了有效的规避,加工后的零件尺寸公差90%接近中差值,而且不同操作员加工零件的时间几乎一致,实现了标准作业时间。

3 盘鼓零件榫槽加工

盘鼓类零件轮缘上通常都带有安装叶片的榫槽,按形状可分为纵树形榫槽和燕尾形榫槽,按榫槽方向又

分为轴向榫槽和环形榫槽,轴向榫槽通常采用拉削加工,环形燕尾榫槽采用数控车削加工。

3.1 榫槽拉削加工

由于榫槽尺寸精度及位置精度的不断提高,榫槽拉削加工已由传统的液压内拉削方式改进发展为数控高速侧拉削,数控高速侧拉床具有刚性好、速度范围大、传动平稳,行程长、精度高、自动化程度高等特点,并可极大地简化夹具结构,加工效率高、劳动强度大大降低。目前已广泛用于涡轮盘、压气机盘及民用透平机械的榫槽加工。

某粉末高温合金涡轮盘纵树形榫槽拉削,设备选择为数控高速侧拉床,最大行程7500mm。设计成套拉刀共14把,排成2排分2次拉削完成。第1~7把为开槽刀,第8把粗拉齿型,第9~11把为粗拉齿底槽刀,第12把粗拉齿顶圆弧刀,第13把精拉槽底圆弧,第14把为精拉齿形刀。其拉削方案示意图即各把拉刀的拉削余量如图2所示。

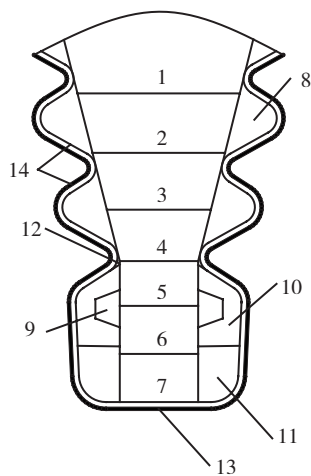


图2 纵树形榫槽拉削方案图

拉刀材料选用了粉末高速钢材料T15,拉刀前角为 15° 、后角为 3° ,采用的齿升量为:粗开槽刀为0.05~0.055mm;粗拉齿型刀为0.025~0.04mm;精拉槽底圆弧刀为0.02mm;精拉齿型刀为0~0.025mm,拉削方式为渐切式+全成型,优化

后的拉削速度为粗拉1m/min;精拉1~1.5m/min,取得了良好的拉削效果。

3.2 环形燕尾榫槽的数控车加工

在发动机压气机盘及鼓筒组件上应用环形燕尾榫槽结构的较多,榫槽开口小、内腔宽,榫槽工作面轮廓度一般在0.01mm左右,其他表面轮廓度一般在0.025mm左右,制造的精度要求高,主要加工难点为:

(1)榫槽工作面节点尺寸、轴向位置精度及基准边直径尺寸公差要求严格,尤其是榫槽轮廓度要在全型面上保证,对设备刀具要求高,GH4169材料切削性差、加工硬化现象严重,影响零件的加工精度与表面质量水平。

(2)榫槽结构为腔大、口小,敞开性差,使榫槽加工用刀具头大颈小,颈部强度较弱,且加工余量较大,排屑困难,加工过程中易出现打刀现象。

环形燕尾榫槽加工应选用设备精度较高的数控卧车或数控立车,在数控立车上加工示意图如图3所示。按照先粗后精的加工顺序,分5个步骤完成榫槽加工。第一步使用切刀,采用阶梯进刀方式,将榫槽外圆及中部余量去除;第二步使用刀尖半径为R0.4mm、左右偏向的菱形车刀,分别加工上下部外圆基准,将直径尺寸加工至图纸要求;第三步使用专用的榫槽车刀,分上下两部分,逐层将榫槽两侧的大部分余量去除,留0.3mm余量;第四步选用轮廓型面较好的榫槽刀片,进行榫槽最终型面加工;第五步使用圆刀片,车修榫槽底部的接刀痕,完成整个榫槽的车削加工。编程时注意尽量采用圆弧进退刀方式,以保证轮廓轨迹平滑。

4 鼓筒组合件辐板间深腔型面加工

压气机盘通过摩擦焊或电子束焊形成鼓筒组合件后,各级盘辐板间深腔底部型面加工一直是加工中的难点和瓶颈,特别是内腔径向深度尺

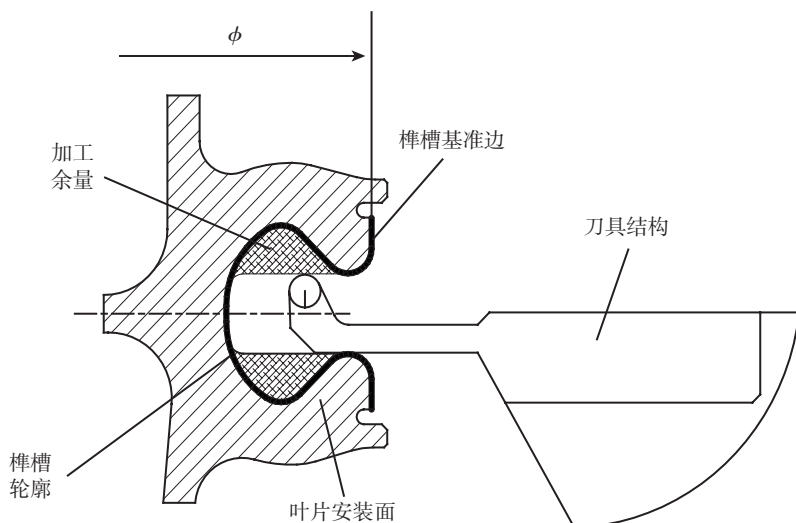


图3 环形燕尾榫槽加工示意图

寸 H 大于盘心孔直径 ϕA 的封闭狭长内腔型面加工更是鼓筒组合件加工中的关键。由于各级盘轮毂之间间距 C 小,刀具切削时在盲视状态下加工,无法观察监控切削情况,加工风险大(见图4)。常规的工艺方法及刀具无法完成此类深腔封闭型面加工,只能选用悬伸较长、厚度较薄的刀具进行加工,造成刀具刚性差、强度较低,加工过程中易出现让刀及切削共振现象,加剧刀具磨损,加工后零件表面易出现振纹,加工难度大。

工艺方案设计中,需要从刀具及

工艺方法两方面入手,首选重复定位精度高的CAPTO结构板形刀体,采用防振装置使刀体具备良好的刚性和稳定性,刀体内配高压冷却液通道,将冷却液直接送达到切削部位,解决内腔排屑和冷却难题。加工刀具由3部分组成,包括与设备相连的转接刀体、与转接刀体相连的深腔刀板及刀片。转接刀体长度随零件轴向高度与级数不同变化,深腔刀板通常分为上、中、下3种结构,分别加工深腔底面的上部、中部、下部型面。在工艺方法上优先选用带有机内对刀系统的数控立车进行加工,分粗加

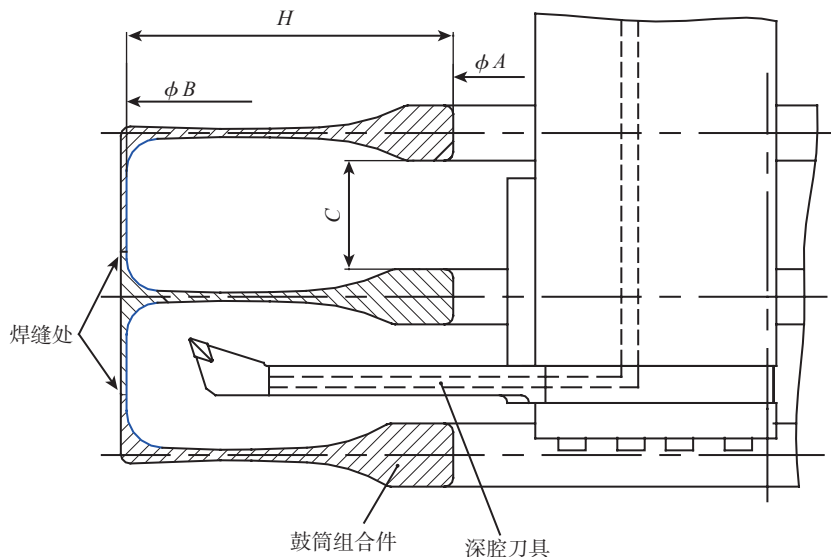


图4 鼓筒深腔加工示意图

工和精加工两步进行,对于特深狭长型腔加工,起刀点和退刀点都设在型腔内部。刀具的切削方式采用径向分层切削,尽量减少走刀次数。首先使用中部刀板,加工内腔底部直径 ϕB ,其次更换上部刀板,按程序设计的刀具轨迹进行加工,加工后观察与腹板转接处的接刀情况,修正轴向刀补,重新运行程序完成上部型面的加工;最后使用下部刀板加工其余表面,完成整个型面加工。

提高盘类零件表面完整性加工技术

发动机构件表面质量、表面完整性作为新型发动机的设计指标正逐渐地被提出,特别是对于盘、鼓筒等关键转动部件,由于其工作环境恶劣、受力情况复杂,因此对这类零件的表面质量、表面完整性及表面精细加工提出了严格的要求。

1 盘件振动光饰加工

涡轮盘结构复杂,表面质量要求高,特别是安装边与轮盘辐板形成半封闭深型腔,敞开性极差。轮盘辐板、安装边外圆及端面、辐板处型腔内表面粗糙度要求严格,均为 $R_a 0.80 \mu\text{m}$,传统的光整加工是在普通车床上使用砂布条、采用手工抛光方式加工,由于涡轮盘型腔敞开性差,手工抛光几乎不可达,粗糙度不易保证,质量不稳定。

振动光饰加工通过磨料和零件的相对运动,产生微量的磨削加工作用,去除零件表面的尖边和微小凸起,促使零件表面产生残余压应力,从而提高零件的表面完整性。旋轴式振动光饰机可以正反双向转动,即可绕自身自转,同时围绕主轴中心公转,磨料箱周期性上下往复运动,从而使零件与磨料接触和磨削加快,大面积多方向摩擦,实现高效光整加工。

振动光饰加工时,首先将轮盘一侧表面朝下通过专用夹具,将盘件安装在机床气动夹盘上,通过主轴系统

的升降带动零件进入磨料中,在行星轮系、运动料箱等多方面运动系统的作用下,对轮盘零件的外表面、型腔及端面进行光整加工,使磨料与零件表面产生挤压、划擦等运动,实现对零件的微切削高效加工。磨料成份为刚玉或陶瓷,形状可为多边形、三角形或圆形。振动光饰加工选用的频率通常为 $60 \pm 5\text{Hz}$,振动光饰时间通常为 30~60min。完成一侧表面振动光饰后,翻转零件,重新安装在机床气动夹盘上,进行另一侧表面光饰加工。

对振动光饰后的轮盘进行相关指标检测,结果如下:

(1) 振动光饰前后的尺寸、技术条件变化量小,在 0~0.01mm 之间,通过固化工艺参数和振动光饰时间,其变化量可控,振动光饰后零件尺寸精度满足设计图纸要求。

(2) 振动光饰后表面粗糙度值降低 1~2 个等级。

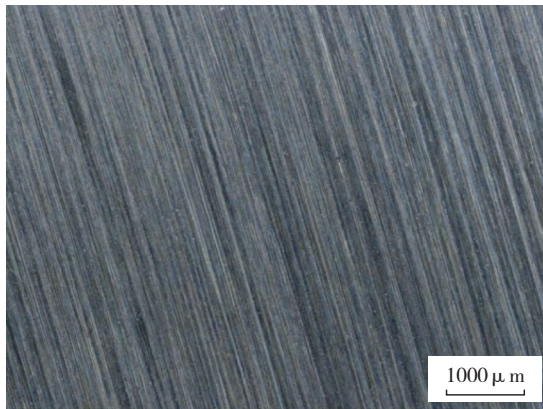
(3) 振动光饰后轮盘表面由拉应力改变为压应力,压应力值在 -200~-500MPa 之间。说明振动光饰加工不仅可改变表面粗糙度,而且可以改变零件表面的应力状态和表面完整性。

(4) 振动光饰后的表面形貌有很大的改观,经放大 50 倍金相检验,表面纹理均匀规整,无明显的周向走刀痕迹,表面质量得到极大的改善,如图 5 所示。

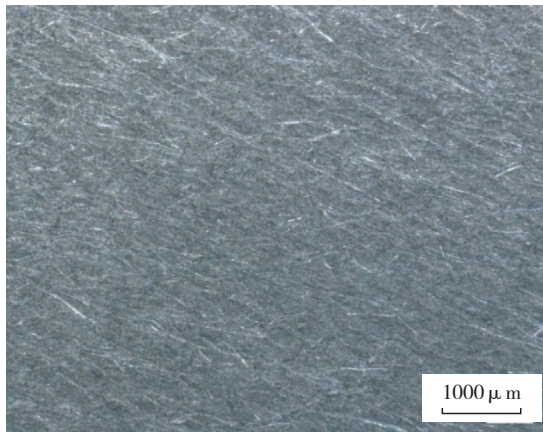
2 榫槽边缘自动成型加工

涡轮盘榫槽与端面边缘过渡圆角为 $R_{0.4} \sim R_{0.6}$,表面粗糙度为 $R_a 0.80 \mu\text{m}$,并要求沿榫槽型面倒圆并抛光,圆滑转接(见图 6)。传统的加工方式是采用锉刀、油石及纱布条去除毛刺并抛光的工艺方法完成榫槽边缘加工,加工后边缘尺寸一致性较差。

榫槽边缘的自动成型加工是在自动到角机上,采用专用倒角铣刀与机床抛光单元的抛光刷,按预先



(a) 振动光饰前表面形貌



(b) 振动光饰后表面形貌

图5 振动光饰前后表面形貌对比

编制好的数控程序轨迹,并以一定的切削参数实现对涡轮盘榫槽边缘进行铣削和自动抛光的复合加工,采用组合夹具可满足不同孔径盘件的装夹要求,应用硬质合金专用铣刀四轴联动铣削圆角,铣刀转速 $n=25000\text{r/min}$,进给量 $f=600\text{mm/min}$,切削深度 $a_p=0.1\text{mm}$,去除榫槽边缘大部分余量,粗糙度可达

$R_a 1.60 \mu\text{m}$,然后应用两种标准金刚石粗、细抛光刷,对铣加工后的边缘进行圆整与抛光,完成榫槽边缘的复合光整加工。该工艺方法倒角、倒圆

后尺寸一致性好,不接触和影响拉削后的榫槽表面和尺寸精度,降低表面粗糙度值效果明显。

结束语

先进的制造技术是航空发动机技术发展的基础,高性能航空发动机的发展对制造装备和工艺技术的要求越来越高,航空发动机性能水平的提高,不仅仅是依靠提升设计水平,而是依赖于设计、材料和加工工艺技术水平的共同提高和进步,特别是对于盘鼓、轴颈等关键转动部件,其加工精度和表面质量对发动机性能和可靠性至关重要。我们必须下大力气开展高性能航空发动机制造技术的研究,在消化吸收国际先进制造技术的基础上,结合新材料、新结构、新工艺不断应用的实

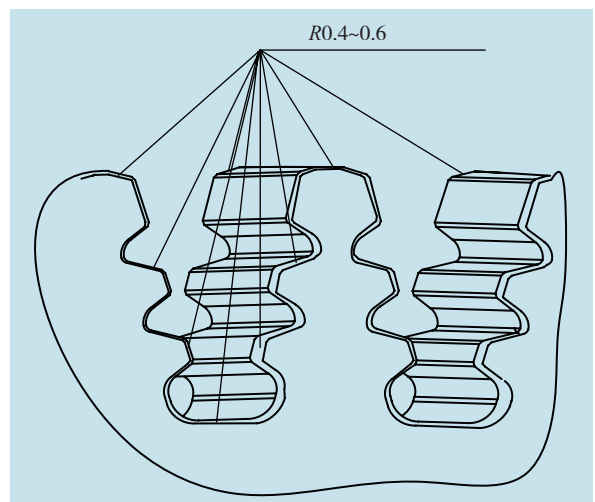


图6 榫槽边缘倒圆示意图

际需要,开展工艺制造技术的创新和探索,大力提升航空发动机制造技术水平。

(责编 亦非)