

粉末高温合金涡轮盘机械加工技术研究

Technical Research on Mechanical Machining of High-Temperature Powder Alloy Turbine Disk

沈阳黎明航空发动机(集团)有限责任公司盘轴加工厂 姜雪梅

[摘要] 以FGH96粉末高温合金材料涡轮盘为载体,优化零件加工工艺路线,改进传统的工艺加工方案,通过切削试验,优选采用新型的刀具材料,研究确定粉末高温合金涡轮盘榫槽拉削加工工艺,分析摸索零件加工变形的规律,对有效控制减少零件加工变形等方面进行了较详细地论述。

关键词: 工艺 刀具 拉削

[ABSTRACT] Based on cutting test with new type of cutting tool for FGH96 high-temperature powder alloy material, broaching process of turbine disk tenon with high temperature powder alloy is researched, the laws of part machining deformation is analyzed, and how to effectively decrease part manufacturing deformation is discussed on detail from the aspects of optimizing the process route of part manufacture as well as improving traditional manufacturing plan.

Keywords: Process Cutting tool Broaching

涡轮转子部件是航空发动机重要的核心热端部件之一,涡轮部件的材料必须具有高的屈服强度、拉伸强度和良好的热稳定性,能适应高温下可靠的工作要求。随着发动机推重比的提高,粉末高温合金材料越来越多地被采用,一方面给切削加工带来很大的困难,无论是车削、铣削、拉削还是钻孔,采用普通的硬质合金刀具、高速钢拉刀都不能满足加工的需要;另一方面零件结构上突出的特点是形状复杂、壁薄、刚性差、圆弧转接多,加工时极易产生变形,传统的加工工艺都是靠成型刀加工型面来进行加工,属于面接触加工,加工中切削力较大,增加了零件变形的产生。因此必须研究新的加工工艺和应用新型高硬度、高耐磨的刀具材料,引用高刚性、大功率的加工设备,优化工艺路线,改进传统的加工方案,有效地控制并减少零件的加工变形,满足高精度粉末冶金盘的加工需要。本课题以FGH96粉末涡轮盘为载体,重点从摸索粉末高温合金材料的加工特性,优化工艺方案、新型刀具材料切削试验及应用,加工变形控制等方面进行试验与研究。

1 粉末涡轮盘结构及加工工艺性分析

1.1 零件类型及结构工艺性分析

随着发动机推重比和涡轮前温度的不断提高,涡轮盘的应力水平越来越高,传统的变形高温合金材料已经不能满足需要,而迫切要求使用具有高抗疲劳蠕变性能的粉末合金。粉末盘的出现解决了涡轮盘材料高合金化造成的凝固偏析和变形困难的问题,提高了力学性能,而且性能波动小。在目前的涡轮盘制造技术中,粉末冶金已成为制造高性能涡轮盘最成熟、可靠的方法,国外已将粉末盘广泛应用于多种先进发动机的研制和生产中。

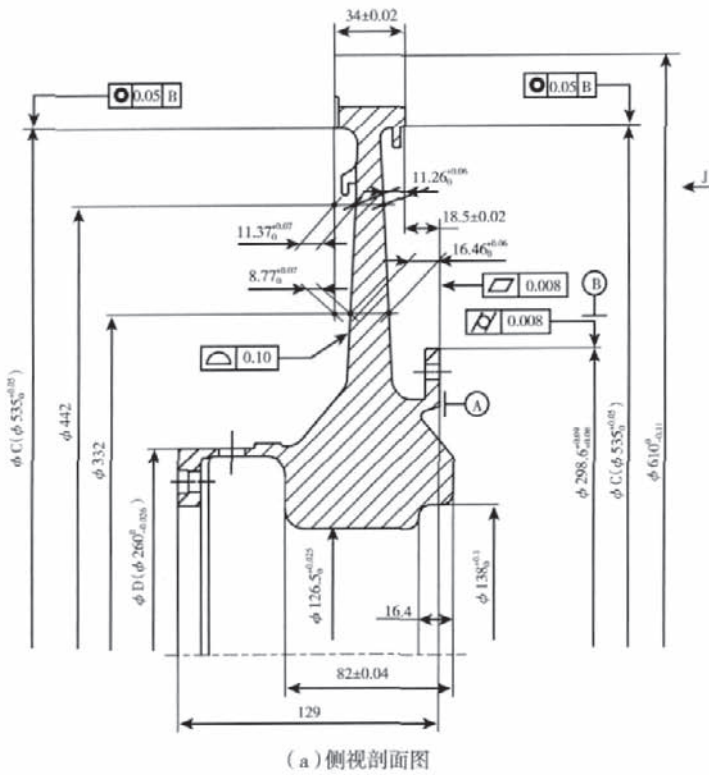
本课题所述粉末涡轮盘是大直径、多型腔、结构复杂的环形薄壁盘件,尺寸多、精度高,如图1所示。其带有77个纵树形榫槽, ϕB 、 ϕC 、 ϕD 等多处直径配合表面,尺寸精度要求高,轮盘辐板为不等厚结构,靠多处坐标值控制辐板厚度。各型面转接处为多圆弧与锥面转接,要求转接圆滑,且有轮廓度要求。在轮盘一侧带有伸臂安装边结构,其端面带有弧齿。由于伸臂处安装边悬臂较长,直径方向的壁厚仅为4mm,加工中极易产生变形,使得安装边处的内腔型面加工难度增大,需要多把刀具转接加工才能完成。轮盘上的端面弧齿是与压气机轴颈的连接部位,受力情况复杂,再加上材料硬度高、切削性能差等因素,零件的加工难度非常大。

1.2 粉末高温合金涡轮盘材料性能分析

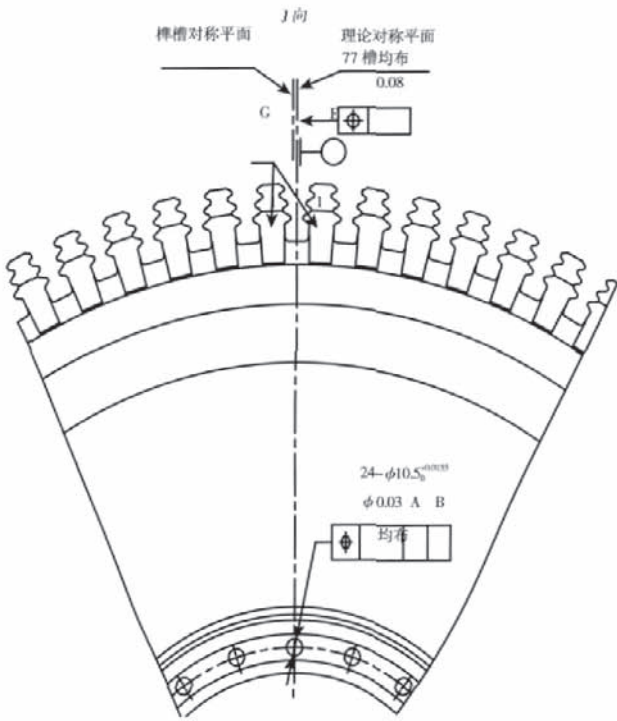
粉末盘采用FGH96材料制造,该材料具有较高的断裂韧性和抗蠕变能力,其热稳定性及综合性能良好。粉末(镍基)高温合金晶粒细小,组织均匀,无宏观偏析,合金化程度高,抗蠕变性能高、屈服强度高,疲劳性能好,是制造高推重比发动机涡轮盘部件的最佳材料。目前在粉末高温合金领域,美国和俄罗斯工艺各异,都居于世界领先地位。FGH96材料粉末盘的化学成分及力学性能见表1和表2。

由材料的化学成分及性能指标可看出该材料的切削加工性如下:

(1)导热性差,导热系数仅为普通钢的1/4~1/3,加



(a) 侧视剖面图



(b) 正视图

图1 零件结构图

Fig.1 Graph of part configuration

工中传热困难,切削温度很高,因此切削时容易产生粘刀现象。

(2)热强性好,粉末高温合金在较高的温度下仍具有高的物理、机械性能,切削阻力比普通钢高3~5倍。

(3)材料本身有大量的强化相,加工硬化严重,表面硬度比基体硬度高50%~100%,容易磨损刀具,降低刀具的耐用度和寿命。

由于粉末高温合金具有这些性能特点,所采用的刀具材料必须具有高强度、高红硬性、良好的耐磨性好和韧性、高导热性和强的抗粘接能力,并保持刀刃锋利、排屑流畅。同时选用刚性好的工艺装备(刀具、夹具和机床等)合理的切削用量(如较低的切削速度),进给量适中,切削深度可较大,使刀尖在硬化层下工作,有利于提高刀具耐用度,加工时应保持冷却液充分的冷却。

2 切削加工试验

粉末高温合金在切削加工时,由于上述材料的特点,刀具磨损剧烈,刀具寿命明显下降,在高切削温度(750℃~1000℃)下,刀具产生严重的扩散磨损和氧化磨损;加工硬化现象严重,已加工表面的硬化程度可达200%以上。因此粉末高温合金的切削加工性能低,切削加工困难大,通过试验来选择最佳的刀具的材料和优化切削参数是十分必要的。

为了更好地摸索粉末高温合金的切削特性,用于切削试验的试验件和零件的材料完全一致,均为粉末高温合金FGH96材料。

2.1 粗车加工试验

在进行毛料的粗车加工时,去除的余量较大,切削过程中冲击性较大,由于此时对零件的表面粗糙度及尺寸精度要求不高,考虑到加工的经济性,所以在粗加工时首先在国产刀具材料中进行选择。

选用YD15、YG8和M42等不同材料的刀具分别进行切削试验,试验结果表明:YG8材料加工中刀具磨损严重,需频繁换刀,甚至根本车不动。M42材料即使采用低的切削速度,也无法满足加工需要,而且刀具磨损较快。YD15刀具晶粒细小,在车削过程中抗冲击性较好,不易打刀,但切削速度较低,综合考虑了多种因素,因此在粗加工时选用YD15材料刀具。

2.2 半精车加工试验

考虑到加工质量和加工效率,在进行半精加工时选用进口刀具进行了试验。先后选择了陶瓷、立方氮化硼(CBN)、涂层硬质合金及非涂层硬质合金等材料的刀具进行了试验。

通过对陶瓷刀具、硬质合金刀具、涂层硬质合金刀具分别对粉末高温合金试件的切削对比试验可知:陶瓷刀具材料具有硬度高、耐磨性能好、耐热性和化学稳定

表1 FGH96合金化学组成

w/%

元素	C	Cr	Co	Mo	W	Nb	Al
含量	0.02~0.05	15.5~16.5	12.5~13.5	3.8~4.2	3.8~4.2	0.6~1.0	2.0~2.4
元素	Ti	B	Zr	Ce	O	N	H
含量	3.5~3.9	0.006~0.015	0.025~0.050	0.005~0.010	≤0.007	≤0.005	≤0.001
元素	Si	S	P	Fe	Mn	Ta	Ni
含量	≤0.200	≤0.015	≤0.015	≤0.500	≤0.150	≤0.200	余

表2 室温拉伸性能

室温拉伸性能			硬度
σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ /%	HRC
≥1 460	≥1 000	≥15	≥38

性优良、不易与金属产生粘结特点,在相同切削条件下,陶瓷刀具的耐用度高于硬质合金刀具和涂层硬质合金刀具,切削速度是硬质合金刀具的4~5倍,更适合于粉末冶金零件的切削加工;在相同切削参数下,因为陶瓷刀具的化学稳定性较好且与试件的摩擦系数小,其加工表面粗糙度值小于涂层硬质合金刀具。

(1)通过所选用陶瓷刀具和K类、S类硬质合金刀具的切削对比试验可知:陶瓷刀具比这2种硬质合金刀具更适合用于镍基粉末高温合金的半精车加工;

(2)通过所选用陶瓷刀具和硬质合金刀具切削力和表面粗糙度对比试验可知:在相同切削参数下,两者的切削力相差不多,但陶瓷刀具的加工表面粗糙度值小于硬质合金刀具。

(3)所选陶瓷刀具的磨损形态主要是前刀面的月牙洼磨损,主要破损形态是前刀面的剥落;前刀面主要磨损机理是扩散磨损和磨粒磨损,后刀面主要磨损形态是磨粒磨损。

试验结果表明:在一定的范围内,随着进给量的增大,加工表面的粗糙度值 R_a 明显增大,而切削速度的变化对粗糙度影响不大;所以选用陶瓷刀具可进行高速切削,且加工表面的粗糙度值明显低于所选用硬质合金刀具的加工表面粗糙度值。

2.3 精车加工试验

精车加工时重点考虑到零件的加工精度和表面粗糙度的要求,选用了CBN刀片和S05F复合涂层的硬质合金刀具。

2.3.1 CBN刀片切削试验

切削用量: $v=60\sim 65\text{m/min}$, $a_p=0.2\sim 0.3\text{mm}$, $f=0.1\text{mm/r}$ 。
与硬质合金相比,用CBN刀片车削粉末高温合金

时刀具磨损小,不仅加工质量高,而且刀具寿命显著提高,因而将CBN刀片用于精车,加工精度可以得到保证。

由于粉末高温合金材料中的Ni、Cr、Mo、Ti和Nb等元素在一定的切削温度作用下与CBN刀片表面有较强的亲合作用,因而发生较明显的粘结。粘结会形成刀具表面

的微粒脱落,造成粘结磨损。

当切削温度达到 $1\ 000\text{℃}\sim 1\ 200\text{℃}$ 时,刀具表面会产生氧化与放氮现象,过高的温度还会产生 $\text{CBN}\rightarrow\text{HBN}$ 的转化,使CBN刀片失去切削能力。为此,在采用CBN刀具切削时,必须注意选择合适的切削用量和刀具几何参数,使切削温度不致过高。

CBN刀具应用的前提是:机床-工件-刀具系统要有足够动力和良好的刚性,而且工件以及机床要能承受高切削热和大切削力带来诸如变形等影响。因此必须控制切削力和切削振动。

2.3.2 S05F复合涂层材料硬质合金刀具切削试验

S05F涂层硬质合金刀片,采用复合涂层,中间层涂层成分为: $\text{TiCN}-\text{Al}_2\text{O}_3$,表层涂层成分:MT-CVD化学涂层。

采用切削参数: $v=45\sim 60\text{m/min}$, $a_p=0.2\sim 0.3\text{mm}$, $f=0.1\text{mm/r}$ 。

S05F复合涂层材料适用于对硬质合金刀具锋利切削刃的涂覆,这一点对粉末高温合金加工尤为重要。该涂层刀具切削性能好,耐用度高,适合于复杂型面、型腔的半精车和精车加工。切削试验证明,在很宽范围运用时这种组合涂层比其他任何一种单一涂层更有效,因此,应用 $\text{TiCN}-\text{Al}_2\text{O}_3$ 复合涂层材料的刀具,加工粉末高温合金等难加工材料已成为应用新涂层材料硬质合金刀具的新亮点。

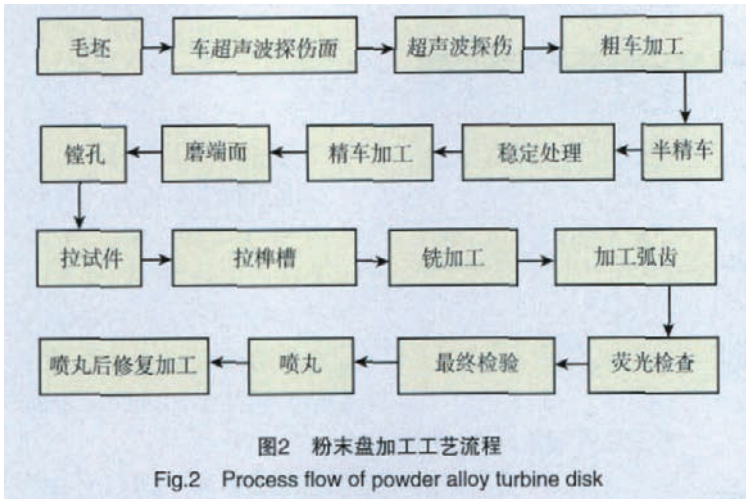
3 粉末盘的加工工艺

3.1 工艺路线安排

粉末盘毛坯采用模锻件,热处理状态:固溶+时效,HB≥388。根据以往加工盘类零件的经验和对该盘件进行工艺性分析,考虑到零件的结构及材料的加工特点等因素,制定粉末盘主要加工工艺流程如图2所示。

3.2 加工过程中注意的问题

从图1中可以看出,粉末涡轮盘结构复杂,型面点多,最小处壁厚只有4mm。在车削加工过程中,由于从毛坯到成品有较大的加工余量,因而会产生较大的切削



材料、不同的盘件以基本一致的工艺流程进行加工中,摸索的变形规律,说明如下:

(1)对于高温合金、粉末高温合金材料,加工中产生的变形不仅仅是机械加工中的切削应力造成的,零件的毛坯锻件在加工过程中内应力释放后重新达到平衡状态同样会引起较大的变形。内应力的释放过程,一是时间过程,零件加工的周期越长,内应力释放的越充分,变形就越小,零件加工周期越短,内应力越不容易得到释放,变形就越大。

(2)不同的材料就有不同的变形量。针对高温合金和粉末高温合金的机械加工,材料的去除量是造成零件变形的主要原因,切削余量大,切削应力大,零件变形随之增加。

(3)零件加工的工艺路线、加工顺序和走刀轨迹、刀具材料的选择、零件的装夹方式等工艺方案是否先进合理,直接影响到零件的加工变形。

3.3.2 控制变形的措施

(1)划分加工阶段,合理分配各工序的加工余量。

针对加工余量大、加工应力集中引起变形的问題,应优化、细化加工工艺路线,合理分配各加工阶段的加工余量,尽可能在粗加工时去除更多的余量,使零件尽早释放应力。

(2)优化、固化切削参数,在粗加工时控制切削深度不大于 0.5mm,通过多次进刀完成大余量的去除。这样可以有效地减小加工应力,精加工留有尽可能小的加工余量,保证最终加工后应力较小。

(3)零件的型槽、型腔部位,对变形的影响很大,所以尽可能都要在精车加工前开槽。槽的深度尽量大,宽度可以稍窄些。精加工时转接圆角部位的加工余量也要尽量小,这对减轻零件轴向尺寸的变形非常有利。

(4)盘类件的榫槽拉削加工后会产生较大的变形,一般精车加工后的所有径向尺寸,经拉榫槽后会普遍缩小,也会使零件各表面的形位公差值发生改变,因此应摸索变形规律,采用尺寸补偿的方法或增加修复加工工序消除变形的影响。

(5)增加消除应力稳定热处理工序。

虽然采取了一系列减小加工应力、控制加工变形的措施,但在粗车后和半精车后都要增加消除应力稳定热处理工序,使加工中的应力得到有效释放,这样可以减少精加工中的变形。

(6)喷丸前后的尺寸测量及修复加工。

喷丸过程中,由于丸粒是在一定的压力下对零件表面的撞击作用,在零件表面层产生压应力,同时喷丸强化过程中零件加工应力也会得到一定释放,所以不可避免地会使零件产生变形,造成零件尺寸发生变化。为了

力。加上材料本身的锻造应力的影响,零件加工中极易产生变形,从而造成零件尺寸难以保证,技术条件达不到设计要求。以精车加工为例,加工时首先将轮盘辐板型面的大部分余量去除,留 0.1~0.2mm 的余量时,再加工端面 A、直径 B 等表面。加工中发现的问题集中体现在,将端面 A、直径 ϕB 基本加工到位,留有 0.1mm 左右的余量时,再加工 R3 端面型槽,当 R3 型槽加工合格后,却发现尺寸 (18.5 ± 0.02) mm 和直径 B 尺寸 $\phi 298.6^{+0.09}_{-0.06}$ mm 均超出图纸要求,说明其变形程度已经超出了预留的加工余量, $\phi 298.6$ mm 尺寸缩小,18.5mm 尺寸增大。同样精车轮盘另一侧时,应先将辐板处余量去除,在加工伸臂处安装边外圆 ϕD 和内腔型面时,为了保证外圆尺寸公差和壁厚要求,先车外圆,留 0.2mm 左右的余量,然后加工型腔处,最后再精车外圆,保证图纸要求。

针对加工中暴露出的问题,及时调整了加工方案和优化了加工顺序和走刀轨迹,将预留的加工余量进行了调整,并增加了精车修复工序,通过这些措施有效的减小了零件的加工变形,保证了尺寸精度和严格的技术要求。

3.3 加工变形原因分析和控制措施

3.3.1 变形原因分析

FGH96 粉末高温合金材料的加工难度大,以加工 GH4169 材料通用的 YD15 硬质合金刀具为例进行分析,加工 FGH96 材料其切削速度也只能达到加工 GH4169 材料的 60%,切削深度只能达到加工 GH4169 材料的 50%~60%,走刀量也不足 GH4169 材料的 70%,加工效率低,而且材料变形也很严重,大约为 GH4169 材料变形量的 3~5 倍。这给加工带来了极大的困难,早日摸清粉末高温合金材料的变形原因和变形规律,采取有效的控制措施,消除或降低变形所带来尺寸超差,是亟待解决的问题。通过近些年对高温合金、粉末高温合金同等

摸索出喷丸后尺寸变化规律,在喷丸前、后要对一些重要尺寸进行测量,安排修复加工工序,对于难以修复的重要尺寸,则需要考虑在喷丸前预留变形量等尺寸补偿办法解决变形问题。

4 粉末盘榫槽拉削

4.1 拉削技术要求

粉末盘榫槽槽型及尺寸如图3所示:

(1) 滚棒距尺寸 A_1 、 A_2 偏差的差值不大于 0.025mm ;

(2) 任意两榫槽之间 F 平面的高度差不大于 0.025mm ;

(3) 榫槽工作面在对称平面方向上的相互最大允许错移量不大于 0.02mm 。

粉末盘两侧带有安装边,尤其是一侧伸臂处壁厚仅为 4mm ,使零件在夹具上定位装夹困难,轮盘轮缘厚度较厚,拉削时拉削力大、刚性差,容易产生振动,使榫槽表面产生波纹,降低表面质量,因此必须设计制造专用拉削夹具,增加其夹具底座的刚性和耐振性,保证夹具定位正确可靠。同时该零件榫槽深度尺寸比以往加工的盘类件榫槽要深得多,这样必然使拉削力增大,因此设计成套拉刀时必须选择合适的齿升量和拉削方案,通过试加工选择确定最佳拉削速度。拉削中采用良好的冷却润滑液进行充分的冷却。

4.2 拉刀材料的选择及拉刀方案设计

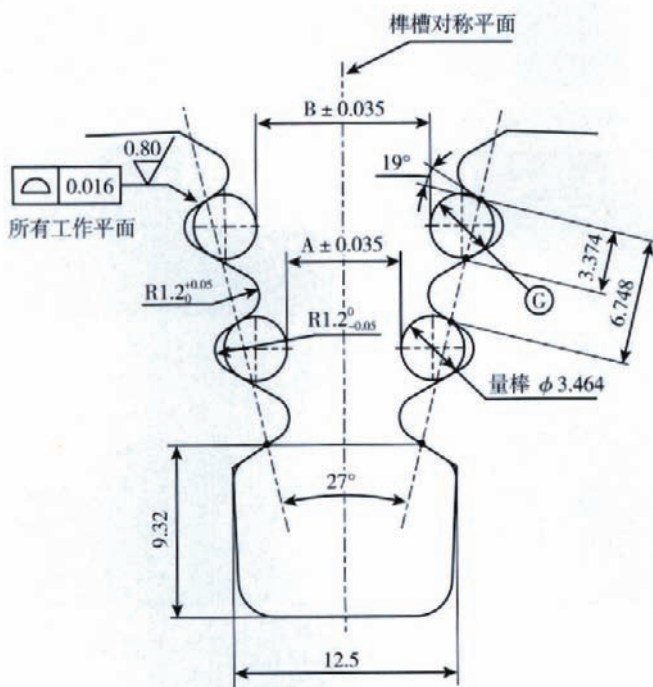


图3 榫槽槽型

Fig.3 Diagram of tenon groove profile

由于此前没有粉末高温合金材料的拉削经验,通过查阅大量相关资料,采用进口粉末高速钢材料 ASP2060 制造拉刀,拉刀硬度 HRC66~68。

采用成套拉刀共 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 把为粗拉齿底圆弧刀,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。其拉削示意图即各把拉刀的拉削余量如图 4 所示。

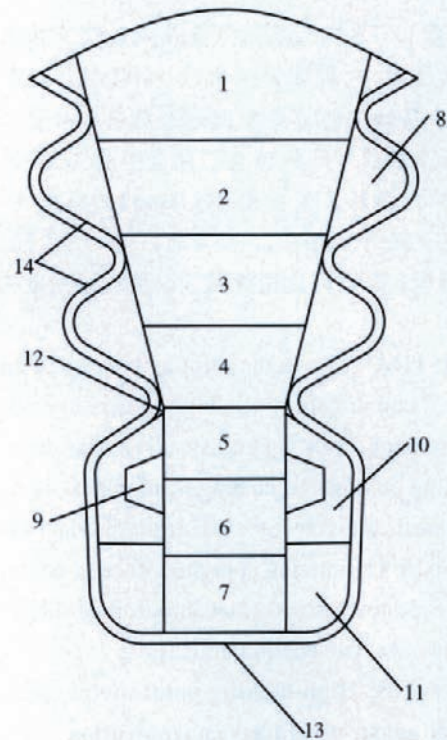


图4 拉削余量分布

Fig.4 Distribution diagram of broaching allowance

4.3 拉刀的工艺参数

拉刀材料: ASP2060 (粉末高速钢材料)。

拉刀前角: 15° ; 后角: 3° 。

齿升量: 粗开槽刀为 $0.045\sim 0.06\text{mm}$; 粗拉齿型刀 $0.02\sim 0.035\text{mm}$; 精拉槽底圆弧刀 0.02mm ; 精拉齿形刀 $0\sim 0.03\text{mm}$ 。

拉削方式: 渐切式 + 全成型。

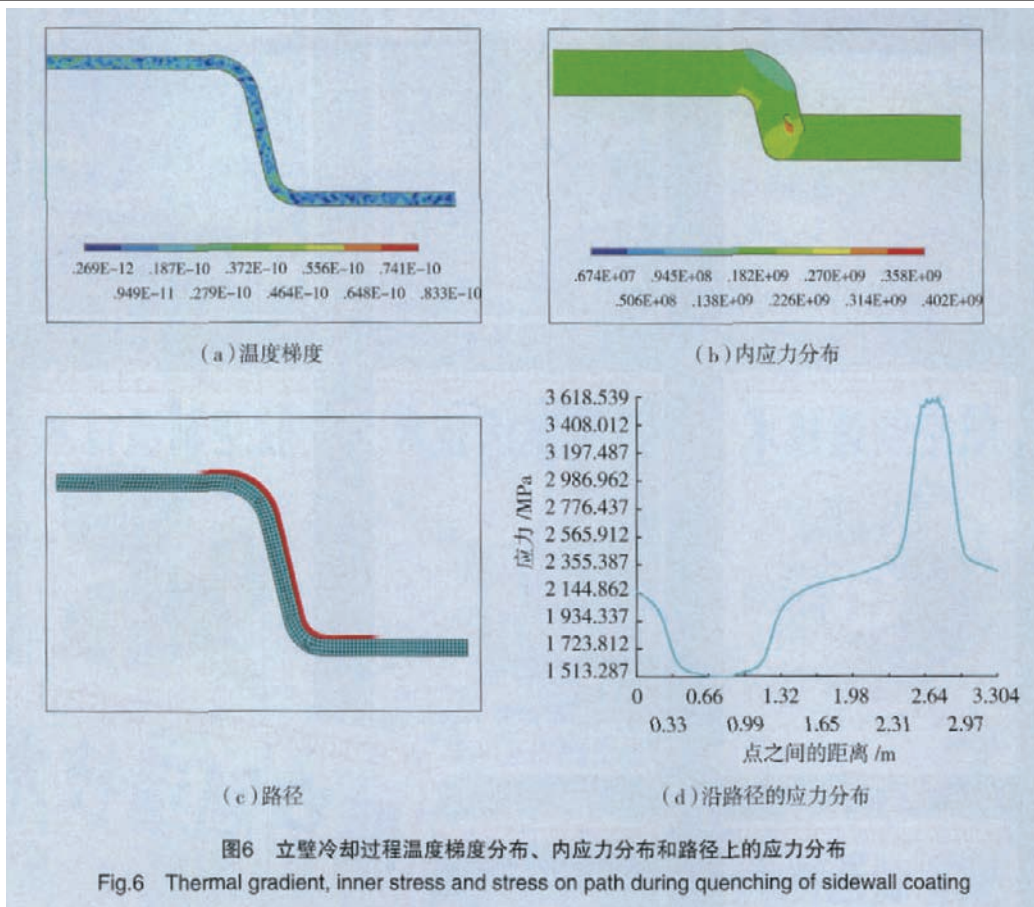
4.4 使用设备

采用进口数控高速侧拉床,主驱动功率 135kW ,额定拉力 25t ,最大行程 7.5mm 。

4.5 确定最佳拉削速度

基于上述零件材料为 FGH96 的切削特点,试验确定最佳拉削速度至关重要,考虑到现有机床行程 7.5m ,一套拉刀总长 10m ,因此拉刀必须排 2 排才能完成加工。

(下转第 99 页)



喷涂工艺补充部分,诱导涂层在工艺补充部分释放应力。

参考文献

[1] 罗瑞强,章桥新.热喷涂涂层中应力研究与分析[D].武汉:武汉理工大学机械电子工程,2008.

[2] 伍超群,周克崧,刘敏,等.铜基体上超音速火焰喷涂镍基涂层残余应力分析.金属热处理,2006,35(19):35-38.

[3] 韩雪峰,朱张校,王昆林,等.提高电弧喷涂层与基体结合强度的新工艺. SURFACE TECHNOLOGY,2001,30(5):24-25.

[4] 文赫岩,肖念新.喷涂的残余应力分析.煤矿机械,2005,6:47-48.

[5] 王忠诚.热处理常见缺陷分析与对策.北京:化学工业出版社,2007,9:6-8.

(责编 岩石)

(上接第93页)

根据以往加工GH4169材料涡轮盘的加工经验,同时考虑到粉末材料的难加工性,开始时采用了1.5~2 m/min的拉削速度,但发现拉刀磨损严重,每拉削7个槽就需要卸下拉刀进行重新刃磨,经多次拉削试验,最后将拉削速度调整为粗拉1m/min;精拉1~1.5m/min,取得了良好的拉削效果。

4.6 拉削中出现的问题及改进方案

通过拉削过程中刀具的磨损情况和投影检查结果发现影响拉削质量和拉刀耐用度的主要因素有:

(1) 拉削速度。在数控高速侧拉床上拉削,使用常规拉削GH4169材料的拉削速度2m/min,明显发现拉刀磨损严重,榫槽表面粗糙度不好,经多次试拉将拉削速度调整为粗拉1m/min,精拉1.5m/min,取得了良好的拉削效果。

(2) 投影检查小试件发现,榫槽轮廓转接不圆滑,槽型局部有突起,经研究确定了拉刀的修磨方案,对粗拉槽底拉刀进行了结构和拉削方式的改进,将原侧面拉削改为顶齿拉削,同时将精拉齿型刀的齿距加大,避免了刀具的快速磨损,保证了榫槽轮廓形状完全符合放大图要求。

(3) 在试拉削过程中,通过检测发现轮盘辐板尺寸由于受到拉削力影响,辐板处向拉削方向产生了0.15mm左右的倾斜变形。通过对拉具结构方案进行改进,增加辅助支撑,有效地降低了拉削过程中的变形。

(4) 粗拉齿底槽拉刀齿升量偏大,造成拉刀刀齿崩刃,经重新进行拉削试验,改进了拉削方式,降低齿升量,保证了拉削质量。

(5) 拉刀材料ASP2060含碳量高,拉削中发现材料脆性大,易产生崩齿现象,刀具材料改为T15粉末高速钢后,拉刀寿命和耐用度提高。

5 结束语

先进的制造技术是航空发动机技术发展的基础,航空事业的发展依赖于材料、设计和加工技术的共同进步,粉末盘的研制与应用使我们的制造技术水平迈向了新的台阶。但就目前来说,我国在粉末盘制造技术领域与国外相比,存在较大的差距,特别是在机械加工方面,我们要快速开展切削技术研究工作,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际需要,开展工艺制造技术的创新和探索,开展针对性的技术合作,大力提升制造技术水平。

(责编 侧卫)