

# 大直径C/C开口弹性密封环的 加工技术

## Machining Technology for Large-Diameter C/C Open Elastic Seal Ring

中航工业沈阳发动机设计研究所 张忠伟 魏莲珍 徐莹



张忠伟

沈阳发动机设计研究所工程师,从事机械加工生产管理。

大直径 C/C 复合材料开口弹性密封环(以下简称密封环)加工在国内首次进行,材料难加工、零件尺寸大,具有很大的挑战性,对加工工艺、刀具、机床等有一定的特殊要求。针对 C/C 复合材料加工特点,本文从密封环开口定型、车削、铣削、平面研磨等几个方面阐述了 C/C 开口弹性密封环的加工技术。

管喉衬、涡轮叶片、导弹端头帽、刹车片等航空航天领域<sup>[2]</sup>。航空发动机轴间密封材料要求具有良好的热性能、低而稳定的摩擦系数以及高速旋转产生的巨大离心力所需的高强度,这使得 C/C 复合材料成为首选轴间密封材料<sup>[3]</sup>。

大直径 C/C 复合材料开口弹性密封环(以下简称密封环)加工在国内首次进行,材料难加工、零件尺寸大,具有很大的挑战性,对加工工艺、刀具、机床等有一定的特殊要求。针对 C/C 复合材料加工特点,本文从密封环开口定型、车削、铣削、平面研磨等几个方面阐述了 C/C 开口弹性密封环的加工技术。

C/C 复合材料(Carbon/Carbon Composites)即碳纤维增强碳基复合材料,是由基体碳和一维或二维的增强碳纤维组成,其制备过程是将基体碳充填到碳纤维预制体中<sup>[1]</sup>。

C/C 复合材料具有低密度、高比强度、高比模量、大热容、良好的导热性能、优异的摩擦磨损性能以及良好的可设计性,已成功地应用于火箭喷

### C/C 开口弹性密封环分析

C/C 开口弹性密封环是典型的材料难加工、结构较复杂、精度要求高的航空产品。

#### 1 零件结构分析

密封环是单开口的薄壁环形件,有以下几种特征:环槽、花边、开口、台阶孔等,端面、外圆具有较高的尺寸精度、表面质量和形位要求。密封环收口状态外圆尺寸超  $\phi 400\text{mm}$ ,自由状态下开口间隙( $23 \pm 2.5$ )mm,开口间隙( $0.15 \pm 0.1$ )mm,外圆  $R_a 0.8\mu\text{m}$ ,左、右两端面  $R_a 0.4\mu\text{m}$ 、平面度  $0.009\text{mm}$ ,且右端面有两处宽  $1\text{mm}$ 、深  $0.8\text{mm}$  的同心优弧环槽。

## 2 C/C 复合材料特点

C/C 复合材料主要指标:

(1) 抗拉强度: 周向、径向  $\geq 120\text{MPa}$ , 轴向  $\geq 40\text{MPa}$ ;

(2) 密度  $1.8\sim 2.0\text{g/cm}^3$ ;

(3) 肖氏硬度  $\leq 70$ 。

C/C 复合材料是新材料领域中重点研究和开发的一种新型超高温材料,它具有以下显著特点<sup>[4]</sup>:

(1) 密度小 ( $< 2.0\text{g/cm}^3$ ), 仅为镍基高温合金的  $1/4$ , 陶瓷材料的  $1/2$ 。

(2) 高温力学性能极佳。温度升高至  $2200\text{℃}$  时, 其强度不仅不会降低, 甚至比室温还高, 这是其他结构材料无法比拟的。

(3) 抗烧蚀性能良好, 烧蚀均匀, 可以用于  $3000\text{℃}$  以上高温短时间烧蚀的环境中。

(4) 摩擦磨损性能优异, 其摩擦系数小, 性能稳定, 是各种耐磨和摩擦部件的最佳候选材料。

(5) 具有其他复合材料的特性, 如高强度、高模量、高疲劳度和蠕变性能等。

C/C 复合材料力学性能呈各向异性, 机械加工条件比较恶劣, 是典型的难加工材料。C/C 复合材料切削加工的主要特点: 脆性大、强度高、硬度高、层间强度低、切削温度高, 切削时在切削力的作用下容易产生分层、崩缺、掉渣等缺陷。

### 3 密封环加工难点

本单位以前加工过的石墨类、C/C 复合材料类密封环直径均在  $\phi 200\text{mm}$  以内, 本次加工的 C/C 开口弹性密封环直径大大超过此值, 加工难度大幅提高。

在密封环加工中主要有以下难点:

(1) 由于直径超大、材料特殊, 密封环开口间隙很难保证;

(2) C/C 复合材料的车削、铣削性能差, 易发生分层、崩缺、掉渣现象, 刀具磨损严重;

(3) 右端面宽  $1\text{mm}$  环槽非完整

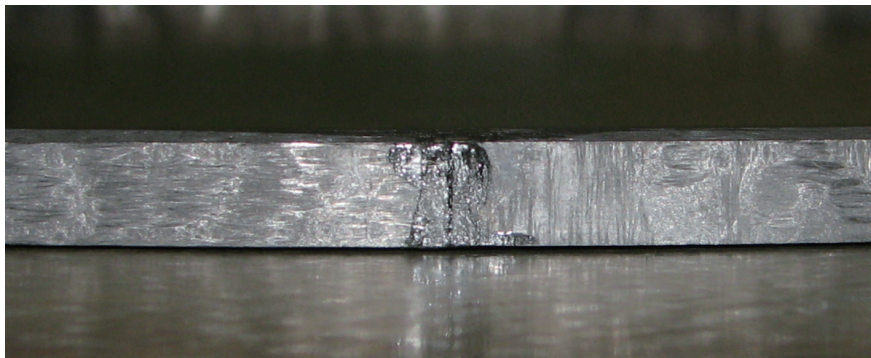


图1 开口粘接

的一圈, 不能采用车削加工, 铣削时  $\phi 1$  铣刀极易折断;

(4) 因直径超大, 密封环端面研磨难度大。

### 密封环开口定型方案

开口定型是密封环加工的难点、关键点, 难在本单位从未加工过石墨类开口弹性零件, 没有可借鉴经验, 并且零件外圆尺寸超大。

普通金属材料(如  $9\text{Cr}18$ ) 弹性开口环加工工艺方案比较简单: 在粗加工后进行淬火保证零件硬度要求, 在半精加工后安排去应力退火来去除机加应力, 开口后用工装装夹, 安排定型回火去除开口应力、同时进行开口定型, 最后精加工直至成品。

如何保证 C/C 开口弹性密封环收口状态外圆尺寸、开口间隙保持在  $(0.15 \pm 0.1)\text{mm}$  呢?

有两套开口定型工艺方案: 方案一, 开口后用工装定型; 方案二, 开口后用粘接剂粘接。两个方案对比: 方案一须使用直径超大、结构复杂的定型工装, 加工中受切削力作用零件易脱落, 且受断续切削力极易在零件端头处崩缺、掉渣; 方案二操作简便, 减小了装夹难度, 避免了断续切削, 大大降低了加工中发生崩缺、掉渣的风险。方案二能够显著减小 C/C 复合材料密封环加工风险, 是首选方案。

经过试验, 最后选定的粘接剂为某进口胶水。使用方法简单: 用酒精

或丙酮清洗开口结合面, 待晾干后涂胶, 圆周用工装固定, 自然干燥固化  $24\text{h}$ , 抗剪强度、抗拉强度能够满足机械加工要求(图 1)。除胶方便: 用丙酮浸泡溶解  $24\text{h}$  即可。

确定开口间隙如何变化需进行工艺试验。零件在自由状态下的开口间隙存在着一些不确定性, 因为零件在不同的厚度下开口, 由于内应力的变化, 开口间隙会有所不同, 而且在后续的加工过程中, 零件的开口间隙也会随着内应力的变化和重新分布而发生相应的变化。试验表明, 开口后密封环发生微量收口现象, 但尺寸变化影响可以忽略不计; 开口尺寸与厚度尺寸关系不大。

确定密封环加工工艺方案如下: 先粗加工; 在端面留有一定余量时将零件开口, 保证自由状态下间隙为  $23\text{mm}$ ; 然后用胶水粘接, 在保证开口间隙  $(0.15 \pm 0.1)\text{mm}$  的状态下进行半精加工、精加工; 最后除胶至成品。

### 车削加工技术

车削时采用工装装夹, 端面定位轴向压紧。针对 C/C 复合材料的车削性能, 主要从车削刀具、车削用量、清除粉尘等几个方面来考虑。

#### 1 车削刀具

##### 1.1 刀具材料

刀具材料是决定刀具切削性能的根本因素, 对加工效率、加工质量、加工成本以及刀具耐用度影响很大。

刀具材料越硬,其耐磨性越好,硬度越高,冲击韧性越低,材料越脆。硬度和韧性是一对矛盾,也是刀具材料所应克服的一个关键。

常用刀具材料可分为工具钢、硬质合金、刀具陶瓷、超硬刀具材料4类<sup>[5]</sup>。金刚石涂层刀具为超硬刀具材料,具有硬度高、耐磨性好、摩擦系数低等优点,就加工性能而言,现阶段金刚石涂层是C/C复合材料加工刀具的最佳选择。考虑到单件、小批量的加工特点,C/C复合材料刀具尽量选用钨钴类(YG)硬质合金刀具进行加工,可选YG8。在相同切削条件下,YG硬质合金车刀较普通W18Cr4V高速工具钢车刀车削磨损要轻微、使用寿命更长;而与加工C/C复合材料专用刀具相比,YG类硬质合金刀具成本低得多、易于刃磨。

### 1.2 刀具几何角度

C/C刀具选择合适的几何角度,有助于减小刀具的振动,反过来,零件也不容易崩缺。C/C复合材料加工的主要刀具磨损区域为前刀面和后刀面。刀具前角、后角不宜过大,采用大正前角加工时,刀具磨损严重,切削振动也较大;刀具后角过大

后,切削振动加强。

以车削外圆上宽 $2_{-0.3}^0$ 深0.8mm环槽的切断刀具角度(如图2所示)为例。切断刀前角( $\gamma_0$ )应在 $10\sim 15^\circ$ 之间,后角( $\alpha_0$ )应在 $8\sim 10^\circ$ 之间,两处副偏角( $k'_r$ )应在 $2\sim 3^\circ$ 之间,两处副后角( $\alpha'_0$ )应在 $2\sim 3^\circ$ 之间。

### 1.3 刀具保持锋利

车削加工C/C零件过程中一定要保证刀具刃口锐利。由于加工C/C复合材料对刀具磨损较为严重,在加工过程中应注意观察刀具使用情况,若磨损应用油石修磨前刀面和后刀面,保证刀具锋利,提高表面质量,以减小磨擦。

## 2 车削用量

选择在CW6180B卧式车床上进行车削加工,其最大加工直径 $\phi 800\text{mm}$ 。

切削深度:切削深度大,切削力大,变形振动;进给量:进给量小,表面质量高,但过小则效率降低;切削速度:切削速度快,工件热,过快刀具会急剧磨钝失效。粗加工时,一般优先选择尽可能大的切削深度,其次选择较大进给量,最后根据刀具的耐用度,确定合适的切削速度;

精加工时,首先要保证零件的加工精度和表面质量要求,故一般选用较小进给量和切削深度,以及尽可能高的切削速度。粗加工切削深度 $0.1\sim 0.2\text{mm}$ ,进给量 $0.2\sim 0.4\text{mm/r}$ ,切削速度 $50\sim 150\text{m/min}$ ;精加工切削深度 $0.05\sim 0.1\text{mm}$ ,进给量 $0.05\sim 0.2\text{mm/r}$ ,切削速度 $150\sim 250\text{m/min}$ 。

## 3 清除粉尘

加工C/C复合材料一般采用干切削方法,在加工过程中采用吹气或吸尘方式,及时清理工件表面的石墨粉尘,有利于减小刀具二次磨损,延长刀具的使用寿命,减少石墨粉尘对机床丝杠和导轨的影响。同时,石墨粉尘对人体健康危害大,应戴口罩做好防护。

## 铣削加工技术

铣削时采用工装装夹,端面定位轴向压紧。针对C/C复合材料的铣削性能,铣削花边、右端面两处宽1mm深0.8mm优弧环槽时,主要从铣床、铣削刀具和铣削用量等几个方面来考虑。

### 1 铣削环槽铣床选择

铣削宽1mm环槽时 $\phi 1$ 铣刀非

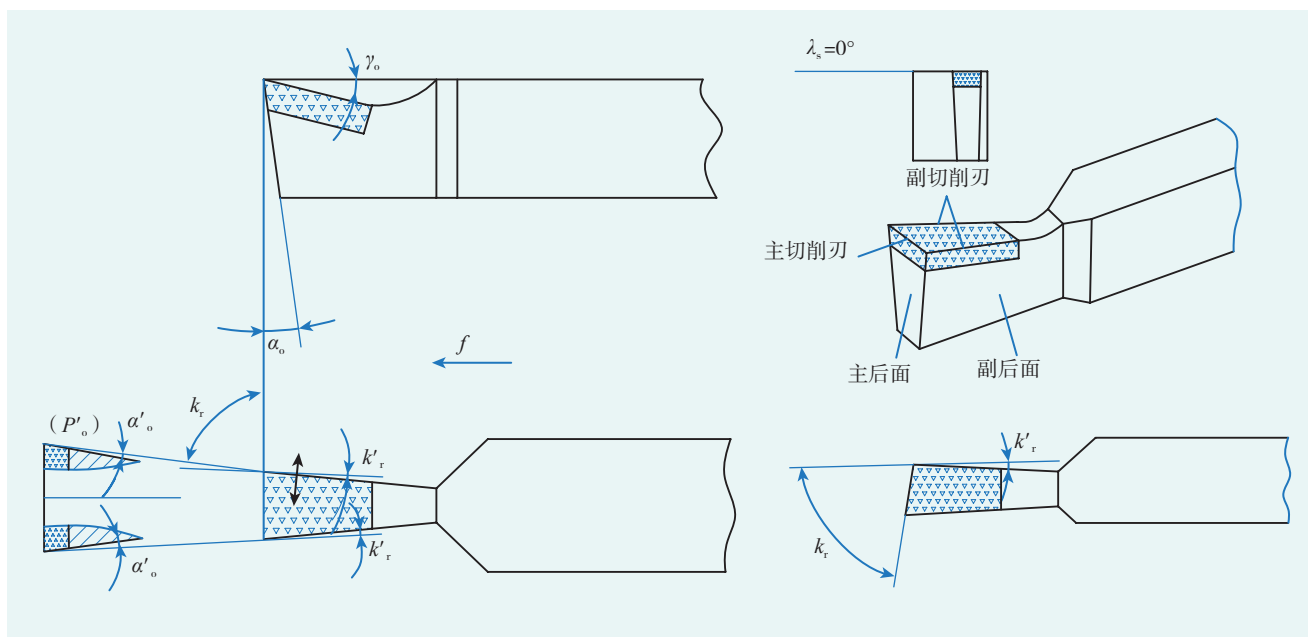


图2 切断刀刀具角度<sup>[6]</sup>

常容易出现折断现象,因此选择合适的铣床非常重要,要考虑以下几点:

首先,铣床的精度要高、刚性要好,能够达到零件的要求精度;

其次,小批量加工,尽量在一台铣床上完成两道工序的加工内容。一次装夹加工两道工序,能够减少再次装夹圆盘的麻烦,节省加工准备时间,大大提高生产效率;

再次,也是非常重要的一点,如果采用数控铣床铣宽 1mm 的环槽,虽然数控铣床精度能够达到零件的精度要求,但是加工过程中  $\phi 1$  铣刀的受力情况无法感知,即使发生了折刀情况也无法准确、及时观察到,非常不利于铣削加工过程的掌控。

综合考虑,选择 XA6232A 万能升降台铣床铣削加工宽 1mm 的两处环槽。

## 2 铣削刀具及铣削参数

### 2.1 铣削刀具

刀具磨损是 C/C 复合材料加工中最重要的问题。磨损量不仅影响刀具损耗费用、加工时间、加工质量,而且影响加工零件的表面质量。C/C 复合材料具有非常强的耐磨性,且采用干切削方法,机械加工过程中刀具的磨损比较快,因此铣刀选择 YG8 牌号的铣刀。

综合考虑现有机床附件,加工右端面宽 1mm 的环槽时,铣刀选择刀柄为  $\phi 3$ 、刀径  $\phi 1$ 、刀尖 R0.2 的两刃键槽铣刀;加工外圆 20- $\phi 12$  圆弧槽时,铣刀选择 4 刃立铣刀。

### 2.2 铣削用量

顺铣时的切削振动小于逆铣的切削振动。逆铣时,刀具的切入厚度从零增加到最大,刀具切入初期因切削厚度薄将在工件表面划擦一段路径,此时刃口如果遇到 C/C 复合材料中的硬质点或残留在工件表面的切屑颗粒,都将引起刀具的弹刀或颤振,因此逆铣的切削振动大;顺铣时的刀具切入厚度从最大减小到零,刀具切入工件后不会出现因切不下切

屑而造成的弹刀现象,工艺系统的刚性好,切削振动小。

在顺铣加工试件及之后的正式零件中,切削参数选择每齿进给量 0.1~0.15mm,吃刀深度为 0.1~0.2mm,机床主轴转速为 1080~1500r/min 时,铣刀磨损相对要稍小,单把铣刀的加工效率稍大。同时,在加工中应缓慢匀速摇动圆盘手柄,必须控制切削力和切削振动,保持加工余量均匀,尽量减少刀具的振动,避免出现零件崩缺现象。



图3 C/C开口弹性密封环成品开口处

## 平面研磨技术

平面研磨是 C/C 开口密封环加工的关键。研磨有诸多优点:尺寸精度高、形状精度高、表面粗糙度低、零件表面耐磨性提高、零件表面疲劳强度提高,但研磨不能提高零件各表面间的位置精度<sup>[5]</sup>。平面研磨 C/C 密封环,使用恰当的研具、研磨剂、工装很重要,同时对研磨环境要求较为严格。

### 1 机械研磨

手工研磨平面对操作者的经验和研磨手法要求非常高,适用于小尺寸零件,研磨大尺寸平面时受力不均导致研磨不均匀现象比较明显。

C/C 密封环直径尺寸较大,安排在大直径研磨机上进行机械研磨,微粉选用金刚石微粉,粒度 W3.5,研磨液选用普通洗涤剂,并采用小流量清水自流方式对研磨机台面进行不断冲洗。

### 2 研磨环境要求

研磨为终结加工,其结果决定了零件加工质量。因此对研磨环境要求比较严格,操作间门、窗应密封良

好,应保持操作间内清洁、无灰尘,温度、湿度要严格控制。

C/C 复合材料平面研磨过程中对灰尘、杂质等细小硬质颗粒非常敏感,灰尘、杂质等细小硬质颗粒易在石墨材料表面留下划痕,影响研磨质量,严重的甚至导致报废。

### 3 平面度检测

密封环直径尺寸太大,超出本单位采用平晶干涉法进行平面度检测范围,平面度测量工作安排在三坐标测量机上进行(图 3)。

## 结束语

C/C 复合材料的机械加工相对于普通的钢件来说难度大得多。通过对 C/C 复合材料加工技术的研究和实践,掌握了其机械加工的一般规律,积累了非常宝贵的加工经验,解决了大直径 C/C 复合材料高精密封环加工问题,为航空新技术验证提供了强有力的保障。

## 参考文献

- [1] 陈建勋,熊翔,黄启忠,等.高性能炭/炭刹车盘的纤维分布与基体炭特性.粉末冶金材料科学与工程,2007(3):55-58.
- [2] 张明瑜. C/C 复合材料的多元物理场 CVI 制备过程及其性能研究[D].长沙:中南大学,2007.
- [3] 葛毅成,易茂中.基于碳结构对轴间密封环用 C/C 复合材料摩擦磨损特性的影响.航空学报 2004(6):92-97.
- [4] 康永,柴秀娟.碳/碳复合材料的性能和应用进展.粘接,2010(12):74-76.
- [5] 杨叔子.机械加工工艺手册.北京:机械工业出版社,2001.
- [6] 袁哲俊,刘明华.刀具设计手册.北京:机械工业出版社,1999.

(责编 良辰)