

C_f/SiC 陶瓷基复合材料车削加工工艺研究

王 平, 张权明, 李 良
(西安航天发动机厂, 陕西 西安 710100)

摘 要: 为满足高性能、轻质化的设计要求, 开展了C_f/SiC基复合材料-金属连接工艺试验件的试验工作, 阐述了C_f/SiC 陶瓷基复合材料喷管车削加工难点和解决方案。理论分析和试验验证表明, 通过选择合理的机械加工方法、人造金刚石聚晶车刀及冷却润滑方法, 采用合适的切削用量和刀具几何参数, 能够实现陶瓷基复合材料喷管连接部位的车削加工, 保证C_f/SiC 陶瓷基复合材料喷管连接部位的表面质量和尺寸精度及形状精度。

关键词: 陶瓷基复合材料; 加工的难点; 车削加工工艺

中图分类号: V257-33 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2011) 02-0067-04

Research on turning technology of C_f/SiC ceramic matrix composites

WANG Ping, ZHANG Quan-ming, LI Liang
(Xi'an Space Engine Factory, Xi'an 710100, China)

Abstract: The technology of C_f/SiC ceramic matrix composites joined up with metal were researched and tested to meet the design requirements of high performance and light weight. Several machining methods were compared. The turning quality was improved. The difficulties and solutions for C_f/SiC nozzle turning are discussed. The appropriate turning parameters and angles of turning-tool are proposed. Theoretic analysis and testing results indicate that the reasonable machining method, modified synthetic polycrystalline (PCD) diamond turning-tool, appropriate cooling and lubrication method, accurate turning parameters and turning-tool geometric parameters, perfect turning of ceramic matrix composites nozzle joint can satisfy the requirements of surface quality, and the dimensional and shape accuracy of C_f/SiC nozzle joint can be achieved.

Keywords: ceramic matrix composite; machining difficulty; turning technology

0 引言

碳纤维增强碳化硅陶瓷基复合材料(C_f/SiC)具

有耐高温、抗氧化、密度低、耐腐蚀、抗热震及抗烧蚀性等优异的性能, 用C_f/SiC陶瓷基复合材料替代金属材料能够提高液体火箭发动机身部温度, 降低发动机结构质量。国外已用于液体火箭

收稿日期: 2010-08-06; 修回日期: 2010-09-30

基金项目: 国家航天技术支撑项目

作者简介: 王平 (1964—), 男, 工程师, 研究领域为火箭发动机推力室、阀门等自动器的机械加工、装配工艺

大发动机喷管延伸段和姿轨控发动机身部,法国SEP研制的C/C、C/SiC和SiC/SiC复合材料在5 N、25 N、200 N、6000 N等多种推力室上进行了成功的点火试验,并在小型卫星和航天飞行器上得到应用,逐渐取代Nb、Mo、Hf等高温合金。其优点在于:1)质量轻,比金属喷管质量减轻50%以上;2)使用温度提高,达1800℃,且无需冷却;3)烧蚀率小,可重复使用。欧洲阿里安第三级液氢液氧推力室喷管是SEP公司制造。美国道康宁公司研制的3D C/SiC复合材料已在姿轨控发动机推力室和航天飞机防热瓦等部件上得到应用。日本试验空间飞机HOPE-X的第二代热结构材料使用了碳纤维增强SiC作为前部外板、上部及下部面板等;为满足高性能、轻质化的设计要求,国内液体火箭发动机已开始C/SiC陶瓷基复合材料制造喷管的应用研究。

在液体火箭发动机推力室应用中需要身部与金属材料进行连接,为适应连接部位尺寸、表面质量的要求,需要对C/SiC陶瓷基复合材料喷管连接部位进行机械加工。复合材料推力室的应用很大程度上取决于连接技术的发展,归结起来是复合材料和金属材料的连接,连接部位的表面加工质量关系到能否满足性能要求。本文通过对C/SiC陶瓷基复合材料切削加工工艺的研究,针对C/SiC陶瓷基复合材料延性和冲击韧性低、加工性能差等难点。探讨解决其加工过程中易产生分层、撕裂、毛刺、拉丝、崩块、表面光洁度差等缺陷。C/SiC陶瓷基复合材料的机械加工工艺有车削加工、磨削加工、铣削加工及钻削加工等方法,车削加工与磨削加工相比较,具有简单高效、加工成本低及生产周期短的优点,在工厂可以推广使用。

1 C/SiC陶瓷基复合材料喷管结构及加工要求

C/SiC陶瓷基复合材料喷管模拟件结构见图1,在与金属连接之前,需采用车削、磨削机械加工方法加工待连接表面,先将待连接的C/SiC陶瓷基复合材料喷管连接面加工平整光滑,最终保证装配的要求。



图1 陶瓷基复合材料喷管模拟件外观形貌

Fig. 1 Shape of nozzle specimen made of ceramic matrix composites

2 陶瓷基复合材料车削加工的难点

陶瓷基复合材料喷管预制体成形采用编织方法,编织制品的特点是结构整体性能好、抗烧蚀、抗冲击及抗损伤性能好。用3D编织方式的陶瓷基复合材料喷管,晶间呈菱形网格排列,因编织纤维走向的异向性,其加工过程中易产生分层、撕裂、毛刺、拉丝及崩块等缺陷。C/SiC陶瓷基复合材料是典型的难加工材料,具有硬度高、热导性差等切削难点,极易造成刀具缺损、崩刃及磨损,尺寸精度及形状精度控制比较困难,加工时刀尖部位温度很高,极易产生发热堵塞,从而导致碳纤维复合材料基体表面产生碳化现象,影响表面质量。因此,寻求合适的加工工具和加工方法是解决C/SiC陶瓷基复合材料喷管待连接表面切削加工问题的关键。

C/SiC陶瓷基复合材料喷管待连接表面车削加工过程中,切屑是外力作用在刀具上挤压工件形成的,C/SiC陶瓷基复合材料喷管待连接表面的车削加工经过挤压、滑移、挤裂及分离四个阶段。相同条件下,C/SiC陶瓷基复合材料喷管的切削力比金属材料要大的多。要保证C/SiC陶瓷基复合材料喷管待连接表面的表面加工质量和尺寸精度、形状精度,除选择合适的刀具参数外,还应选择合理的切削用量,切削用量的大小是影响切削力的重要因素。

3 陶瓷基复合材料加工的工艺

3.1 C/SiC陶瓷基复合材料喷管加工方案

在某种C/SiC陶瓷基复合材料推力室喷管-

金属连接工艺试验中,对该材料机械加工工艺方案进行试验。从图1、图2可看到陶瓷基复合材料喷管是薄壁件回转体,并且圆柱度、同心度及垂直度等形状精度基础不好,壁厚不均匀,表面编织纹路清晰可见,不宜直接进行磨削加工。与磨削加工相比较,车削加工更简便,能够有效去除余量。所以喷管机械加工工艺方案采取先车削后磨削加工的工艺方法。



图2 C₄/SiC 陶瓷基复合材料短身部外观形状

Fig. 2 Shape of short C₄/SiC body

在车削加工中通过选用具有代表性的不同材质、牌号的刀具进行切削加工,摸索出合理的刀具几何参数,并相应推荐了切削加工工艺参数。

3.2 车削加工零件装夹方案

C₄/SiC 陶瓷基复合材料喷管硬而脆,而且喷管的壁较薄,车削加工中必须控制装夹力不能过大,否则会将 C₄/SiC 陶瓷基复合材料喷管夹裂。车削加工中采用了自行设计制造的工装进行装夹,在装夹找正和切削加工过程中都要避免冲击、碰撞,做到轻拿轻放,设计的装夹工装设法增大装夹部位的接触面积,避免夹紧部位点接触、线接触,能够有效地解决 C₄/SiC 陶瓷基复合材料喷管的夹裂问题。

3.3 车削加工刀具的选择及试验

在 C₄/SiC 陶瓷基复合材料喷管加工试验中,选用了 YG6X、YA6、YG8、YW1、YT15 硬质合金刀及高速钢车刀、人造金刚石聚晶车刀进行 C₄/SiC 陶瓷基复合材料喷管待连接表面的加工。

选用高速钢车刀做车削加工试验:起初分析认为 C₄/SiC 陶瓷基复合材料是非金属材料,密度低,编织制品纤维走向具有异向性,晶间结合力小,因此车削加工过程中易产生分层、撕裂等缺

陷,晶粒细化的高速钢车刀更为锋利,避免车削加工过程中发热堵塞,从而避免碳纤维材料基体表面产生碳化现象,可能会适合于车加工非金属的碳纤维类复合材料,但经过做车加工对比试验证明,高速钢车刀的耐磨性最差,刀尖、刀刃的磨损速度很快,加工后工件的外圆锥度、椭圆度较大,不能保证工件的精度要求。

选用硬质合金车刀做车削加工试验:当用主偏角为 90° 的硬质合金车刀加工 C₄/SiC 陶瓷基复合材料喷管待连接表面时,发现牌号为 YG6X 的硬质合金刀头使用寿命相对较长,针对 C₄/SiC 陶瓷基复合材料喷管硬而耐磨的特性采取了一些改进措施,将转速限制在 160 转/分钟左右,吃刀深度 < 0.3 mm,走刀量 $S=0.05 \sim 0.25$ mm/转,不加注冷却润滑油,改用猪油冷却润滑,用耐磨性较好的硬质合金 YG6X 车刀,刃倾角不倒棱保持刀刃的锋利,刀尖 $R \approx r 0.4$,刀尖刀刃用油石砑光提高强度和耐磨性,前角 3°~5°,主后角约 5°~7°,副后角 5°~8°,主偏角 90°,采用此切削参数能够有效延长车刀的使用寿命,可以完成对 C₄/SiC 陶瓷基复合材料喷管的外圆及端面、锥面的加工,但是车加工锥面的形状精度(椭圆度和直线度)、表面粗糙度仍较毛糙。车加工 $\Phi 78$ 、长度 18 mm 的外圆之后,测量上下两段共 8 个点的直径发现圆柱度为 $\Phi 0.08$ mm。

选用人造金刚石聚晶车刀做车削加工试验:考虑到人造金刚石聚晶车刀具有高强度和更好的耐磨性,刀具红硬性好,使用寿命长,所以试用人造金刚石聚晶刀具做车加工对比试验,发现转速可提高到 200 转/分钟以上,涂抹四氯化碳猪油冷却润滑,人造金刚石聚晶刀具车削加工 C₄/SiC 陶瓷基复合材料喷管时更耐用,刀尖刀刃保持锋利的比硬质合金 YG6X 车刀成倍延长,消除了工件的圆柱度偏差较大的问题,选用不同刀具切削时间与刀尖磨损之间的关系见图 3。

车加工 $\Phi 78$ 、长度 18 mm 的外圆之后,测量上下两段共 8 个点的直径发现圆柱度为 $\Phi 0.03$ mm。表面粗糙度能够达到 $Ra 6.3$ 以上,能够达到尺寸精度 0.03 的要求。

用人造金刚石车刀车削 C₄/SiC 陶瓷基复合材

料喷管时,采用表 1 所列的切削用量。用人造金刚石聚晶车刀加工 C_f/SiC 陶瓷基复合材料喷管时易采用低转速、中走刀量、大吃刀深度。刀具几何参数的选择是保证 C_f/SiC 陶瓷基复合材料喷管表面加工质量的关键,车削加工时建议采用表 2 的刀具参数。

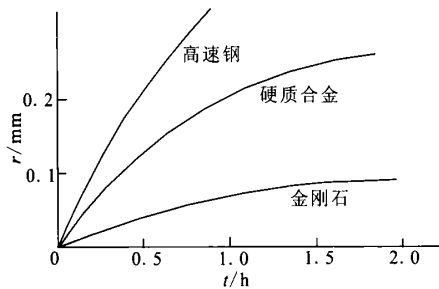


图 3 不同刀具切削时间与刀尖磨损之间的关系
Fig. 3 Nose wear versus turning time of different cutters

表 1 人造金刚石车刀车削 C_f/SiC 陶瓷基
复合材料喷管切削用量

Tab. 1 Turning parameters of C_f/SiC nozzle with synthetic diamond cutter

| diamond cutter | |
|----------------|--------------|
| 名 称 | 切削用量 |
| 切削速度 | 60~110 m/min |
| 走刀量 | 0.6~1.0 mm/r |
| 吃刀深度 | 1~2 mm |

表 2 人造金刚石聚晶刀具加工 C_f/SiC 陶瓷基
复合材料喷管切削参数

Tab. 2 Turning parameters of C_f/SiC nozzle with synthetic PCD cutter

| with synthetic PCD cutter | | |
|---------------------------|-------------------|---------------------------|
| 角度名称 | 角度 | 人造金刚石聚晶车刀与硬质合金车刀的对比情况 |
| 前角(γ) | 12°~15° | 可以加大刀具切割作用,减少切削热,提高刀具寿命 |
| 后角(α) | 6°~8° | 保证切削轻快,减少磨擦热和切削热 |
| 主偏角(φ) | 75°~90° | 可减少径向力和振动,提高刀具强度,改善刀具散热条件 |
| 刃倾角(λ) | 0°~5° | 可减少加工中的冲击力,保护刀具强度 |
| 刃口形状 | 锐刃 | 保持刃口的锋利 |
| 刀尖形状 | 圆弧刀或修光刀 R=0.2~0.5 | 提高刀尖强度和耐用度 |

用人造金刚石聚晶车刀加工 C_f/SiC 陶瓷基复合材料喷管,使 C_f/SiC 陶瓷基复合材料喷管连接部位的形状精度、尺寸精度、表面粗糙度质量大幅提高,以车代磨逐步成为可能。通过提高陶瓷基复合材料喷管连接部位的形状精度、尺寸精度、表面粗糙度,可以有效增加产品性能,满足工艺要求。

4 结论

1) 通过本文的理论分析和试验验证表明,通过选择合理的机械加工方法、刀具,采用合适的切削用量、刀具几何参数、冷却润滑方法,能够实现陶瓷基复合材料喷管连接部位的车削加工,保证 C_f/SiC 陶瓷基复合材料喷管连接部位表面质量。

2) 按照分析探讨的工艺方法加工出的产品已经完成 C_f/SiC 陶瓷基复合材料喷管加工,已通过推力室热试车考验。但车削加工喷管连接部位的形状精度、尺寸精度及表面粗糙度仍然不是最理想的状态,并且对于车床性能精度和工人的技术水平有一定的依赖,以后还将不断完善机械加工工艺,探索磨削加工的工艺方法,进一步提高形状精度、尺寸精度和表面粗糙度。

参考文献:

[1] 葛明龙,田昌义,孙纪国.碳纤维增强复合材料在国外液体火箭发动机上的应用[J]. 导弹与航天运载技术, 2003 (4): 22-26.

[2] 阎联生,王涛,邹武,等.国外复合材料推力室技术研究进展[J]. 固体火箭技术, 2003, 26(1): 64-66.

[3] 柯晴青,成来飞,童巧英,等.连续纤维增韧陶瓷基复合材料的连接方法[J]. 材料工程, 2005 (11): 58-63.

[4] 宋桂明,周玉,王玉金,等.固体火箭发动机喉衬材料[J]. 固体火箭技术, 1998, 21(2): 51-55.

[5] 刘炜,徐红艳,沈同俊.航天复合材料热导率测量的实验研究[J]. 低温工程, 2010 (1): 22-24.

(编辑: 马 杰)