

# 航空粉末冶金高温合金 的车削加工

Turning of Powder Metallurgy Superalloy for Aviation Industry

中航工业沈阳黎明航空发动机(集团)有限责任公司 刘 阳 赵秀芬



刘 阳

现任职于沈阳黎明航空发动机(集团)有限责任公司技术中心。主要从事金属切削基础研究,高效加工、航空难加工材料以及切削数据库的智能化研究。

涡轮盘是发动机重要的热端部件之一。它的工作条件极为苛刻,在飞行时承受着循环机械应力和温差引起的热应力的叠加作用,很容易产生涡轮盘疲劳断裂。另一方面,涡轮盘件用的 $\gamma'$ 相沉淀强化型合金

粉末高温合金涡轮盘组织均匀、晶粒细小、无明显偏析、合金化成度高、抗屈服强度高、抗疲劳性能好,是高推比发动机涡轮盘等部件的首选材料。

由于强化元素不断增多,严重的偏析使热加工性能恶化、低周疲劳性能降低、裂纹容易扩展,且投料比达19:1以上。高投料比和复杂锻造工艺,使其成本大为提高。为保证航空发动机的可靠性和稳定性、成本的经济性,对于此部件的材料欧美等发达国家多用粉末高温合金,我国也正在逐步改用之中。粉末高温合金涡轮盘组织均匀、晶粒细小、无明显偏析、合金化程度高、抗屈服强度高、抗疲劳性能好,是高推比发动机涡轮盘等部件的首选材料;而与变形高温合金相比,它降低了原材料的消耗,金属的利用率大大提高,成本低;涡轮盘寿命也显著提高,由原来的1032h提高到1500h。但同时也增加了加工过程的难度,粉末冶金零件的切削加

工性较差,一般只能低速加工,并且在使用普通的刀片时刀具磨损很快,刀尖锐化严重,加工质量难以保证。现结合现场所做粉末高温合金盘的切削试验,介绍一下不同的刀具对FGH96的试验加工情况。

## 粉末高温合金性能

### 1 FGH96 化学成分和力学性能

FGH96 化学成分和力学性能见表1和表2。

### 2 粉末高温合金的切削性能

粉末高温合金具有组织均匀、晶粒细小、屈服强度高、抗疲劳性能好等优点,但是由于其中含有许多(如铬、钴、钼、铌、镍、铁、钽等)高熔点合金元素且 $\gamma$ 相含量高,使得粉末高温合金得到很大的强化效应,在一定

表1 FGH96合金质量分数

%

| 元素 | Co   | Cr | Mo | W   | Al  | Ti  | Nb  | B    | C    | Zr   | Fe  | O     | N     | H      | Ni |
|----|------|----|----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|-----|-------|-------|--------|----|
| 比例 | 12.9 | 16 | 4  | 3.9 | 2.3 | 3.7 | 0.8 | 0.01 | 0.04 | 0.05 | 0.1 | 0.004 | 0.003 | 0.0003 | 其余 |

表2 FGH96力学性能

| 温度/°C | 抗拉强度 $\sigma_b$ /MP | 屈服强度 $\sigma_{0.2}$ /MP | 延伸率 $\delta$ /% | 断面收缩率 $\psi$ /% |
|-------|---------------------|-------------------------|-----------------|-----------------|
| 750   | 1260                | 1030                    | 14              | 14              |

的温度范围内,随温度升高,其硬度反而有所提高,由于其材料本身的化学成分及独特的多孔性结构,在较小的面积内其硬度值也有一定的波动。即使测得的宏观硬度为20~35 HRC,但组成零件的颗粒硬度会高达60 HRC,这些硬颗粒会导致严重而急剧的刃口磨损,因此粉末冶金高温合金是典型的难加工材料。

### FGH96 涡轮盘的切削试验

试验目的:选择好的品牌、好的刀具材料,优化切削参数。

试验刀具:焊接硬质合金刀具、涂层硬质合金刀具、CBN 刀具、陶瓷刀具。

试验机床:CK61100(转速范围:4~400r/min)。

最小进给0.001mm/min;最大回转直径1000mm)。

工艺要求:工件材料FGH96,材料硬度(HB)>388,工件直径610mm;加工方法:车削。

测量仪器:千分表、卡尺。

### 试验结果与分析

#### 1 焊接硬质合金刀具切削试验

根据上述粉末高温合金的切削性能分析可知:粉末高温合金比变形高温合金更难加工,所以在焊接硬质合金刀具几何角度的选择上,刀具前角应略小,以保证刀具的刀尖强度。研究中在FGH96涡轮盘粗加工时通过比较试验最终采用YD类的

焊接刀具,试验时切削参数如下:

切削速度 $v=10\sim 30\text{m/min}$ ,切削深度 $a_p=0.25\text{mm}$ ,进给速度 $f=0.1\sim 0.2\text{mm/r}$ 。

试验中采用三因素正交试验法,试验几组参数:

(1) $v=30\text{m/min}$ , $a_p=0.25\text{mm}$ , $f=0.2\text{mm/r}$ 。

(2) $v=25\text{m/min}$ , $a_p=0.25\text{mm}$ , $f=0.2\text{mm/r}$ 。

(3) $v=25\text{m/min}$ , $a_p=0.25\text{mm}$ , $f=0.2\text{mm/r}$ 。

(4) $v=20\text{m/min}$ , $a_p=0.25\text{mm}$ , $f=0.1\text{mm/r}$ 。

(5) $v=13.5\text{m/min}$ , $a_p=0.25\text{mm}$ , $f=0.1\text{mm/r}$ 。

试验结果表明,(1)~(3)组参数刀具磨损剧烈,很快失效。而后刀面的磨损,既包含了主后刀面磨损,又包含了副后刀面磨损,工件表面质量极差,材料几乎被剥落。由于切削力大、切削温度高,切削路径长度大约在2~3m时刀尖塑性变形严重。(4)组参数虽然好于前3组,但刀具的磨损使刀具的寿命仍然不能保证连续加工一个面。(5)组参数相对较好,能保证粗加工的使用要求,但是加工效率很低,由于其价格便宜,可以在加工毛料时使用。

#### 2 涂层硬质合金刀具切削试验

通过试验比较,最终选用材料S05F这种刀片材料。硬质合金S05F这种刀片材料采用了新技术,是专为解决镍基高温合金的切削而设计

的。材料的晶粒更细,表面有 $4\mu\text{m}$ 的CVD TiCN- $\text{Al}_2\text{O}_3$ -TiN的薄涂层,此刀片特别适合粉末高温合金的精加工,其耐磨性好,适用于小切深。

S05F V型刀片切削用量: $v=30\sim 60\text{m/min}$ , $a_p=0.25\text{mm}$ , $f=0.1\text{mm/r}$ 。采用速度逐渐递增的方式。

试验结果:表面质量很不好。刀具表面有崩刃现象,后经检查发现刀片在安装时没有固定好,致使在切削过程中刀片振颤。

改进后结果:经过重新定位调整后,切削用量采用: $v=35\text{m/min}$ , $a_p=0.25\text{mm}$ , $f=0.1\text{mm/r}$ 。效果相对较好。切削流畅,每段切屑长度大约在5~6cm左右,切屑易于控制。加工过的表面跳动值大约在0.01mm。加工后表面端跳动值约为0.01mm,效果更好。

刀具磨损情况:刀尖及边界磨损极为严重,后刀面也产生了沟纹磨损。由于FGH96镍基高温合金的导热性差,粉末高温合金粘结倾向大,容易粘刀产生积屑瘤,在合金中存在大量的金属碳化物,切削过程中相当于对刀具进行研磨,另外国产材料中大多有硬质点,这对刀具有很强的冲击性和破坏性,因此会造成上述磨



损。

由于粉末高温合金中的微量元素在高温下会与硬质合金刀具产生亲和作用,使得硬质合金微粒随切屑一同被带走,形成了刀具材料的局部剥落,切削刃已呈现须状崩碎纹。在车削粉末高温合金时硬质合金刀片磨损严重,只能在很短的时间内保证加工精度。另外,使用TiAlN涂层的刀具寿命要好于其他刀具,因为铝在加工过程中形成氧化铝可以阻止刀具的进一步磨损。

上述硬质合金刀片切削粉末高温合金,虽然效率不尽如人意,但与焊接刀具相比有很大提高,尤其在加工辐板和萼齿时,需要刀具具有很高的抗冲击韧性,更是其他刀具不能取代的。

### 3 陶瓷刀具切削试验

陶瓷刀具的试验采用了WG-300和KY2100两种材料的圆刀片。WG-300和KY2100都是Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>赛阿龙陶瓷刀片,非常适合加工镍基高温合金,也适合加工粉末高温合金。

切削用量:  $v=110\sim 150\text{m/min}$ ,  $a_p=0.5\text{mm}$ ,  $f=0.1\text{mm/r}$ 。

试验结果表明:切屑长而薄,自动断屑状态不好,属于自卷曲断屑,零件表面端跳动值在0.04~0.05mm,刀片边缘轻微崩裂,后刀面有沟槽磨损的现象。经过试验,最终采用的切削用量为:  $v=145\text{m/min}$ 、 $a_p=0.5\text{mm}$ 、 $f=0.1\text{mm/r}$ ,效果很好。

用赛阿龙陶瓷刀片进行加工时,加大切削速度效果反而更好。这是因为赛阿龙陶瓷刀具采用Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>作

为耐磨相, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>为硬化相,具有很高的室温与高温硬度,优良的化学稳定性和抗机械磨损性能,在1000℃的高温下仍能进行切削。速度越高,产生的切削温度越高。靠材料的自软性,刀片的切削加工更为容易,刀具工作寿命延长。因此,陶瓷刀具切削粉末高温合金,增加切削热,往往成为改善切削加工性的有利因素。

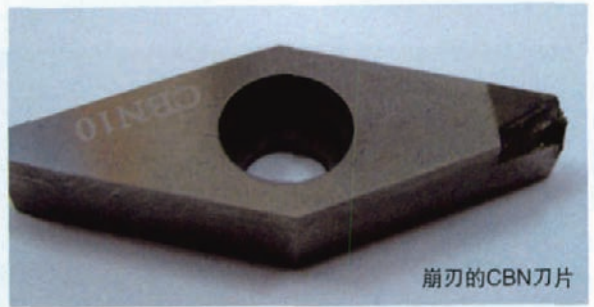
用陶瓷刀具高速切削粉末高温合金时,使用圆刀片增大刀片的强度。但是使用圆形刀片时,应当减小切深以降低切削抗力。另一方面用陶瓷刀具切削既可干切,也可使用冷却液。使用冷却液,要保证充足的压力以使冷却充分。合理使用冷却液,不仅可以阻止积屑瘤的形成,还有利于降低切削区域的温度、带走多余的热量,减少刀具的磨损。

### 4 CBN刀具切削试验

立方氮化硼(CBN)刀具材料是用六方氮化硼(白石墨)为原料,经高温高压烧结而成的无机超硬材料。制造方法为:可做成整体的圆柱形烧块,或在碳化钨硬质合金基体上烧结成0.5mm厚的复合刀片。立方氮化硼刀具可用金刚石磨轮磨出新的几何角度。因为立方氮化硼有很高的硬度和耐磨性、很高的热稳定性、优良的化学稳定性,适合于难加工材料的切削加工,尤其是粉末高温合金的高速切削加工。

切削用量:  $v=90\sim 110\text{m/min}$ ,  $a_p=0.5\text{mm}$ ,  $f=0.1\text{mm/r}$ 。在切削用量为  $v=105\text{m/min}$ 、 $a_p=0.5\text{mm}$ 、 $f=0.1\text{mm/r}$ 时,由于材料中有硬质点的存在,受到冲击力,产生了轻微崩刃的现象。切屑长而薄,自动断屑状态不好,属于自卷曲断屑,刀具尖端红热,表面氧化发黑。

而采用切削参数为  $v=90\text{m/min}$ 、 $a_p=0.5\text{mm}$ 、 $f=0.1\text{mm/r}$ ,并使用切削液



崩刃的CBN刀片

时,切屑呈暗红色的“半熔态”,沿副刀刃方向流出,切削温度很高。在高温高压作用下造成粘结磨损;零件表面端跳动值在0.02mm左右。与硬质合金相比,CBN刀片车削粉末高温合金的刀具的后刀面磨损量VB要小得多,而且CBN刀片的加工精度可以得到保证。在质量相差不大的情况下,CBN的刀具寿命明显要高于涂层硬质合金。

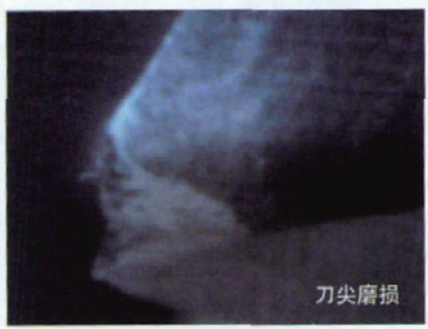
但是在高温高压下粉末高温合金与CBN刀片表面会发生亲合作用,因而发生较明显的粘结,造成粘结磨损,因此要通过使用高压切削液和减少切削抗力的办法减少磨损。因此加冷却液是提高CBN刀具寿命的措施之一。

用CBN刀具加工粉末高温合金,效率高于硬质合金刀具,刀具寿命高于陶瓷刀具,但是从性价比的角度来看,CBN刀具的优越性就不是很明显了。

### 结束语

(1)焊接硬质合金刀具加工粉末高温合金,效率低、精度不易保证,但是由于其价格便宜,可以在加工毛料时使用;(2)硬质合金刀具S05F加工粉末高温合金,虽然效率不理想,但是加工辐板和萼齿的最佳选择;(3)陶瓷刀具加工粉末高温合金能兼顾加工效率和刀具性价比2个方面,是粗加工和半精加工的首选;(4)CBN刀具在精加工时,能表现出优越性,但由于其性价比低,制约了其在加工粉末高温合金中的使用。

(责编 小颖)



刀尖磨损