

FGH97材料性能及切削参数选择

■ 中国重汽（香港）有限公司 边剑宇 张喜鹤 徐 民

摘要：本文对镍基粉末高温合金FGH97粉末的制备、材料性能、合金切削特性以及参数的选择进行了概括，分析了各种合金元素对合金性能的影响，以及刀具材料及角度、切削参数的选择对合金加工的影响。

继FGH95、FGH96之后，我国又成功研制出新一代镍基粉末高温合金—FGH97。相比前两代合金，FGH97性能更优，具体表现在其具有更高的持久强度、蠕变抗力及更低的裂纹扩展速率等，且其在650~750℃的恶劣作业环境中仍有优良的力学性能。基于以上优点，由FGH97粉末高温合金制成的涡轮盘等部件已应用到某发动机上，且已成为当前制造高推重比发动机涡轮盘的首选材料。

1. FGH97的制备

镍基粉末高温合金FGH97粉末的制备采用等离子旋转电极法（Plasma Rotate Electron Powder/ PREP）和热等静压成型工艺（Hot Isostatic Pressing/HIP）。

PREP制粉是利用等离子弧融化高速旋转的合金棒料，旋转的棒料断面上被融化的液滴在离心力的作用下飞出，遇冷形成粉末（见图1）。相较于氩气雾化制粉法，PREP法所制得的粉末有以下五个优点：①纯度高，无坍塌污染。②粉末含氧量少，表面光洁，形状为球形，空心粉少

（见图2）。③粉末流动性好，适合HIP成型工艺填充复杂形状包套。④粉末粒度分布均匀。⑤粉末粒度可由棒料直径决定。但该方法缺点也很明显，比如生产效率低，粉末平均粒度较大（> 50 μm）等。

HIP成型工艺是在高温和各向均等的静压力环境中，将粉末压实成型的一种工艺。相较于其他成型工艺，HIP法主要具有以下三个优点：形状可变性高、致密化程度高和各向同性。但同时存在两个缺点：相对粒度较粗以及需其他处理工艺协同完成。

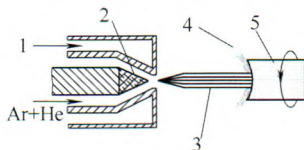


图1 PREP制粉法示意图

1.切削液 2.电极 3.等离子弧
4.粉末 5.旋转棒料

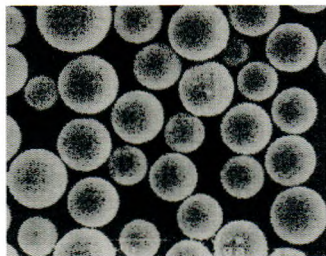


图2 粉末颗粒（PREP×200）

2. 材料的性能

镍基粉末高温合金FGH97中存在基体相 γ 、强化相 γ' 和碳化物等，其中基体相 γ 是合金元素在Fe、Co和Ni中的固溶体，能够溶解大量的合金元素，保证合金具有良好的固溶强化、沉淀强化和晶界强化效果；强化相 γ' 的质量分数高达60%左右，其固溶温度高达1 180~1 190℃。FGH97的化学成分如附表所示。

合金强化的主要途径有固溶强化、沉淀强化和晶界强化等强化方式。从表1中合金的化学成分角度分析：在Ni-Cr基体的固溶度范围内加入适量的Co、W、Mo和Nb等元素，使形成镍基复杂固溶体。且固溶体内不同元素原子之间又产生交互作用，使得基体晶格产生畸变形成内应力，从而使位错运动受到牵制产生固溶强化作用。经固溶强化作用的高温合金，具有优良的抗热腐蚀、抗氧化性能且导热系数高、材料塑性好。为了进一步提高高温强度，在进行热处理时，向材料基体中加入一定量的Al、Ti、Nb和C等元素，以利于合金内部析出不同

FGH97的化学成分（质量分数）表 (%)

C	Cr	Co	Al	Ti	W	Mo
0.02~0.06	8.0~10.0	15.0~16.5	4.8~5.3	1.6~2.0	5.2~5.9	3.5~4.2
Nb	Hf	B	Zr	Mg	Ce	Ni
2.4~2.8	0.1~0.4	≤0.015	≤0.015	≤0.02	≤0.01	余

类型的金属间化合物，进而产生显著的沉淀强化效果。镍基粉末高温合金FGH97中强化相 γ' (Ni_3Al) 能在1 150℃的高温下保持良好的稳定性，且其析出量较大，占合金质量分数的60%，所以成为合金的主要强化相。当 γ' 数量一定时， γ' 相尺寸越小，对降低裂纹扩展速率越有利。

相比于两种前身合金 (FGH95和FGH96)，FGH97化学成分中最显著的特点是金属元素Hf的添加，虽然其质量分数仅为0.1%~0.3%，但该元素的添加对合金性能的改善作用十分明显：①Hf元素的加入有助于提高合金中 γ' 相和 $\gamma-\gamma'$ 的共晶含量。②Hf元素的存在有助于在合金中形成稳定的MC型碳化物，且促进合金中MC型碳化物在晶界上析出，以提高合金的抗裂纹扩展能力，同时抑制M6C和M23C6的形成。③Hf元素的加入对合金中强化相 γ' 的形成有一定影响，并借此影响合金的拉伸强度和蠕变性能。④Hf元素与氧元素有很强的亲和力，适量的Hf有助于消除原始颗粒边界 (Previous Particle Boundary/PPB)，但是当Hf的质量分数超过0.6%时，会导致合金中再次出现PPB。⑤Hf能与合金中有害元素S形成稳定化合物，有助于降低合金晶界脆性。

合金中Co元素的化学活性

很大，这也是在切削过程中刀具出现剧烈扩散磨损和粘结磨损的原因之一。同时，切削加工中切削区域的高温高压耦合现象，再加上铣削加工中由断续切削产生的机械冲击现象，使得实际用来加工该合金的刀具极易被快速磨损。

3. FGH97的切削

(1) 高温合金的切削特性。

高温合金是典型的难加工材料，这条结论同样适用于FGH97。针对该合金的切削加工主要有以下五个特点：①该合金呈热导性孔隙结构，这意味着在切削中由切削引起的切削热现象会导致该合金在微观上出现孔隙，这种结构上的不均匀会引起刀具切削刃产生微观疲劳，最终导致切削刃微崩。②导热系数低，仅为普通钢的1/4~1/3，切削时切削刃上温度很高，且散热困难，刀具在高温高压下极易产生磨损和变形。③切削力大，高温合金在较高的温度下仍然具有较高的高温强度，因此切削力是普通钢的2~4倍。④加工硬化严重，加工后表面的硬度比基体硬度高50%~100%。⑤合金中存在硬质点，个别颗粒硬度达到60HRC，这些硬颗粒会导致严重的硬质点磨损。基于以上所述特点可以得出结论：优质、高效且经济地切削加工FGH97的难度是客观存在的。

(2) 刀具的材料。考虑到



SPM 系列刀具
微径深沟刀具

KPM 系列刀具
高效能模具刀具

KAM 系列刀具
铝合金刀具

KDM 系列刀具
石墨刀具

KSM 系列刀具
不锈钢刀具

KGM 系列刀具
通用刀具

地址：中国·昆山·巴城镇·迎宾西路 555 号
电话：+86 512 5518 6868
传真：+86 512 5518 6789
Email: info@osktool.com



www.osktool.com

◆广告 查询编号：3046

上述FGH97的切削特性,用于切削加工该合金的刀具应该在保证具有良好的加工性前提下,选用具有可靠性高、耐磨性好、耐高温、刃口强度高以及抗冲击性能优的材料。

国内外许多研究人员发现,加工FGH97过程中出现的刀具失效形式主要有:①切削刃崩刃,这主要由材料本身的孔隙结构、刀具本身韧性不足、切削力波动特点、加工工艺参数及刀具角度选择不合理等原因所致。如CBN刀具和金属陶瓷刀具由于刀具本身韧性不足、抗疲劳强度及抗弯强度低,刀刃极易崩刃,导致失效。②前刀面月牙洼、后刀面以及刀尖磨损,磨损的部位主要出现在刀尖和刀具与工件的接触摩擦区。这主要由于切削温度的升高,刀具材料的硬度随之降低,尽管在高温下,FGH97也会出现软化,但刀具材料与FGH97之间的硬度差值逐渐减小,使得刀具出现磨损。如硬质合金刀具、CBN刀具及陶瓷刀具等。③沟槽磨损,切削中连续的切屑毛边给刀具造成疲劳损伤,最终形成宏观的沟槽,如硬质合金刀具、陶瓷刀具等。④片状剥落,主要发生在刀具的前刀面和后刀面上,由刀具与切屑和刀具与工件之间的接触应力疲劳和热应力疲劳所致。在发生片状剥落初期,一般被认为是磨损,随着后续加工的进行,在工件内部的疲劳裂纹逐渐扩展导致刀片大块剥落,最终刀具失效。如硬质合金刀具、陶瓷刀具等。

(3) 刀具几何参数选择。影响切削性能的因素不只刀具材

料,还有刀具的几何参数,这直接关系到切削力、切削热、已加工表面质量和切屑形态等。切削镍基高温合金时刀具前角一边选择 $0^{\circ} \sim 10^{\circ}$,粗加工时进给量和切深较大,可选择较小前角,精加工选择较大前角,一般 $5^{\circ} \sim 10^{\circ}$;较大后角有利于减小刀具后刀面与已加工表面的摩擦,但后角过大,刀具强度会降低。粗加工镍基粉末高温合金时,后角一般选择 $6^{\circ} \sim 8^{\circ}$,精加工选择 $10^{\circ} \sim 12^{\circ}$;主偏角会影响到切削力、刀具寿命和切屑厚度等,是影响零件加工精度和表面形貌的最主要因素。因此,在加工镍基高温合金时,主偏角选择 $30^{\circ} \sim 60^{\circ}$,副偏角选择 $0.5^{\circ} \sim 3^{\circ}$,刃倾角选择 $-20^{\circ} \sim -10^{\circ}$ 。

(4) 切削深度的选择。切削深度的确定需要考虑到刀具寿命、刀具强度、加工余量和加工效率等各个方面。

$$Q=v_c f_n a_p \quad (1)$$

$$T=C_1/v_c^x f_n^y a_p^z \quad (2)$$

式中, Q 为金属去除率; T 为刀具寿命; C_1 为常数。由式(1)可知,随着切深增大,金属去除率增大,但受机床功率影响,切深不可随意增大。粗加工时可选择较大去除量,以减少走刀次数,提高加工效率。精加工时应选择较小去除量,以减小工件变形,提高加工表面质量。

(5) 进给量的选择。进给量的选择可根据刀具材料、加工工艺和系统刚性等参数选择。

$$F=C_2 v_c^x f_n^y a_p^z \quad (3)$$

$$R_{\max}=1\,000 f_n^2 / 8 r_z \quad (4)$$

式中, F 为切削力; $R_{\max}$ 为表面粗糙度; r_z 为刀尖圆弧半径。由式

(1)可知,进给量增大,材料去除率也随之增大,但由式(3)知,进给量增大切削力也增大。因此,在选择进给量时要综合考虑加工效率、切削力和刀具强度等因素。由式(4)知,精加工时,可增大刀尖圆弧半径,减少进给量,以降低表面粗糙度值。

(6) 切削速度的选择。切削速度受诸多方面影响,比如刀具材料、机床功率等,但影响最大的是刀具寿命。在保证刀具寿命尽可能长的情况下,应选择尽量高的切削速度。由式(1)~式(3)知,切削速度增大,金属去除率大,效率提高,切削力减小。

4. 结语

FGH97是新一代粉末高温合金,具有优良的热力学性能,虽然该合金已经进入实际应用阶段。但是对FGH97材料的切削加工性研究较少,主要集中在材料的制备,处理工艺等。作为典型的难加工材料,要实现对其高效、经济以及优质地加工,就要针对其加工特点,有针对性的研制高效的机床、高性能的刀具材料、合理的工艺路线和优化的加工参数等,为航空发动机的制造铺设道路。

参考文献:

- [1] 雷景富,郑勇,余俊,等.镍基粉末高温合金的研究进展[J].宇航材料工艺,2011(06):18-22.
- [2] 张义文,杨士仲,李力,等.我国粉末高温合金的研究现状[J].材料导报,2002(05):1-4.

MW (收稿日期:20170520)