

典型难加工材料叶片切削加工研究

Study on Cutting of Difficult-to-Cut Material Blade

中航工业沈阳黎明航空发动机(集团)有限责任公司 李美荣 刘娜 王钰玉

[摘要] 本文通过建立刀具磨损预测模型,并将该模型理论和现场生产实际相结合,在保证加工质量要求的前提下,给出了难加工材料(GH2132)经济效益最大化的切削加工参数,并在航空发动机叶片型面加工中获得验证,取得了加工质量、加工效率和加工成本的最优结合,为解决航空典型难加工材料的切削参数优化问题提供了重要依据和解决途径,这对于提高航空发动机难加工材料的加工效率和降低加工成本具有重要意义。

关键词: 难加工材料 叶片 高速加工

[ABSTRACT] By building the tool wear forecast model and combining the model theory and production practice, and ensuring the quality requirement of machining quality, cutting parameters are given to maximize the effectiveness of difficult-to-cut material (GH2132). These parameters are verified during the blade surface machining of aeroengine, which achieves the optimal combination of machining quality, efficiency and cost and provides the important basis and solve method for cutting parameterization of aviation difficult-to-cut materials. This method is very important for enhancing machining efficiency and reducing cost.

Keywords: Difficult-to-cut material Blade High-speed machining

近年来随着发动机研制型号的逐渐增多,越来越多的新材料应用到发动机叶片的设计当中,而为改进这些材料的力学性能而添加到基体之中的化学元素如钴、镍等元素使得这类材料更加难于加工^[1]。在缺少理论知识支持并缺乏实践数据积累的条件下,生产现场在刀具选择和切削参数的给定上缺乏必要的支持,因此在刀具耐用度和切削效率方面差距较大,同时由于切削状况的恶化难以带来较高的加工质量,因此如何在刀具选择和参数给定上进行优化选择来提高刀具的耐用度、提高切削效率和加工质量是目前急需解决的问题。

本文通过对近几年切削理论研究和现场加工实践的总结,在典型叶片的型面加工方面,将切削理论研究与数控铣加工实际相结合,优化了叶片型面的数控铣削

加工参数。通过在材料GH2132固溶时效状态叶片上的应用,取得了很好的应用效果。

1 叶片结构及加工材料特点

1.1 叶片结构特点

航空发动机叶片是发动机的核心部件之一,发动机的性能很大程度上取决于叶片型面的设计和制造水平。航空发动机叶片大小不同,形状各异(见图1),但叶片长宽比大,截面尺寸薄,加工时容易变形是基本特点。叶片毛坯多为模锻件,余量在0.8~2.0之间。为保证严格的尺寸公差,工序比较复杂,从图纸到成品,一般要经过40~60个工序。

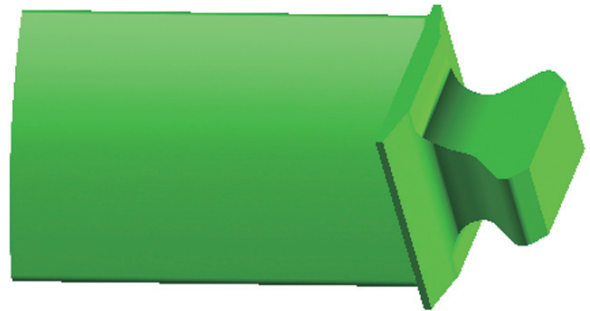


图1 压气机叶片三维模型
Fig.1 3D model of compressor blade

1.2 高温合金GH2132的切削性能

该材料切削温度高,加工硬化倾向大^[2],切削时其硬化层深度可达0.04mm,给切削加工带来不良影响。材料的强度高,塑性和韧性大,表面残余应力大。加工缺陷使零件表层的性能降低,影响零件表面质量。在切削加工中应合理选择切削深度和进给量,使切削刃在硬化层下面切削,否则会给切削带来困难,加速刀具磨损。

镍基高温合金的切削加工有以下共性:

- (1) 切削力较大,一般为加工钢材的1.5~2倍;
- (2) 切削温度高,在相同条件下,切削温度约为45#钢的1.5~2倍;
- (3) 刀具磨损严重,机械磨损、粘结磨损、扩散磨损

和氧化磨损均比较严重;

(4) 加工硬化现象严重,已加工表面硬化程度可达基体硬度的 1.5~2 倍;切屑硬而韧,不易折断,造成切削过程中切屑处理困难。

2 铣削参数优化

2.1 铣削刀具耐用度预测模型

根据 GH2132 材料切削性能试验结论,铣削刀具耐用度预测模型为:

$$T = \frac{6473}{v^{1.36} a_p^{0.97} f_z^{0.82} a_e^{0.73}} \quad (1)$$

2.2 粗铣切削参数优化计算

按式(1)结合加工成本构成要素,经过优化计算,得出在轴向切深 $a_p=1\text{mm}$ 、径向切深 $a_e=4\text{mm}$ 、每齿进给量 $f_z=0.15\text{mm/z}$ 时的优化切削速度 $V_c=85.3\text{m/min}$ 。此时,刀具消耗为 0.3 把,金属切除率为 $3.26\text{cm}^3/\text{min}$,加工效益为每分钟 1.63 元。切削速度与加工效益关系如图 2 所示。

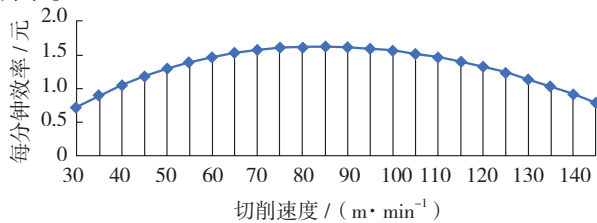


图2 粗铣切削速度与加工效益关系

Fig.2 Relationship of cutting speed and machining benefit during rough milling

2.3 精铣切削参数优化计算

经过优化计算,得出在轴向切深 $a_p=0.5\text{mm}$ 、径向切深 $a_e=5\text{mm}$ 、每齿进给量 $f_z=0.08\text{mm/z}$ 时的优化切削速度为 $V_c=96.4\text{m/min}$ 。此时,刀具消耗 0.15 把,金属切除率为 $1.23\text{cm}^3/\text{min}$,加工效益为每分钟 0.11 元,切削速度与加工效益关系如图 3 所示。

2.4 切削参数对切削力影响计算

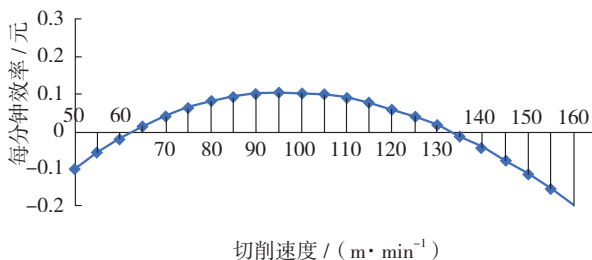


图3 精铣切削速度与加工效益关系

Fig.3 Relationship of cutting speed and machining benefit during finish milling

因为加工叶片型面时,切削力对于加工变形影响较大,所以必须对切削参数与切削力之间的关系进行计算(图 4、图 5)。经过对不同切削速度和每齿进给量条件下的切削力的测试可以得出,在每齿进给量一定的条件下,切削速度控制在 120m/min 之内,切削力没有明显的变化;但是当切削速度超过 120m/min 以后,切削力随着切削速度的增大而明显增加。同样在切削速度固定的条件下,随着每齿进给量的增加,切削力逐渐增大;当每齿进给量超过 0.2mm/z 以后,切削力急剧增大。

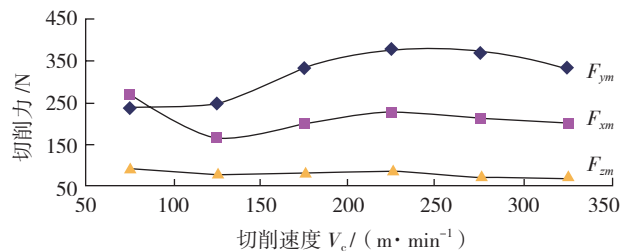


图4 切削速度对切削力的影响

Fig.4 Influence of cutting speed on cutting force

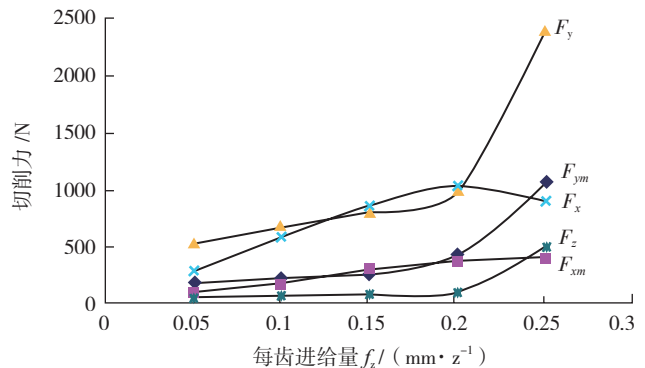


图5 每齿进给量对切削力的影响

Fig.5 Influence of feed per tooth on cutting force

3 叶片铣削加工试验

3.1 试验情况

3.1.1 试验对象

以铣削某发动机压气机叶片叶身型面作为试验对象,加工工艺验证在采用双驱动的 C.B.Ferrari 机床上进行,叶片通过专用夹具夹紧榫头实现与机床的精密定位与准确连接,同时叶片的另外一端也通过特殊夹具进行固定,这种装夹方式可以提高薄壁叶片的支撑刚性,降低加工变形,其试验状态如图 6 所示。

3.1.2 试验状态

试验状态见表 1。

3.2 试验结果

(1) 优化前的切削加工情况见表 2。

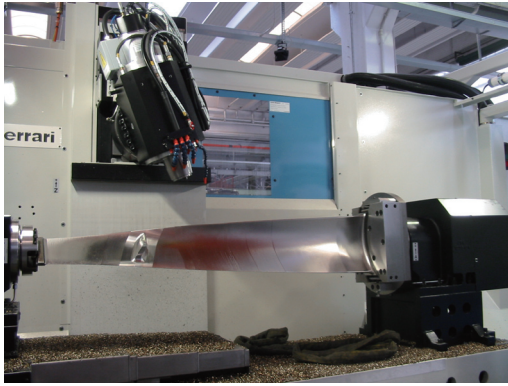


图6 叶身型面数控铣削

Fig.6 Numerical control milling of blade surface

表1 试验状态

设备	零件材料	刀具直径	热处理状态
五坐标数控铣	GH2132	$\phi 10$	时效
齿数	刀片材料	切削液	刀片价格 / 元
4	KC525M	巴索	70

表2 优化前的切削加工情况

加工部位		粗铣叶身型面	精铣叶身型面
切削参数	切削速度 $V_c / (\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$	55	70
	轴向切深 a_p / mm	1	0.5
	径向切深 a_e / mm	4	5
	每齿进给量 $f_z / (\text{mm} \cdot \text{z}^{-1})$	0.15	0.08
试验结果	切除率 $I / (\text{cm}^3 \cdot \text{min}^{-1})$	2.1	0.893
	每分钟效益 / 元	1.39	0.04
	精度和表面质量	达到工步要求	达到图纸要求
	表面粗糙度 $R_a / \mu\text{m}$	3.2	1.6
	平均消耗刀具量 / 片	0.2	0.3
	实际消耗刀具总额 / 片	0.5	

(2) 优化后的切削参数试验, 试验结果如表 3 所示。

3.3 效果分析

(1) 粗铣优化前后对比分析效果如表 4 所示。

(2) 精铣优化前后对比分析效果如表 5 所示。

4 结束语

(1) 由切削速度与加工效益关系图谱得出, GH2132 高温合金铣削加工参数数值较高, 主要因为 GH2132 属于铁基高温合金, 在高温合金系列里的切削性能是最好的;

(2) 经过切削参数优化, 典型难加工材料在提高加

表3 试验结果统计表

加工部位		粗铣叶身型面	精铣叶身型面
切削参数	切削速度 $V_c / (\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$	85.3	96.4
	轴向切深 a_p / mm	1	0.5
	径向切深 a_e / mm	4	5
	每齿进给量 $f_z / (\text{mm} \cdot \text{z}^{-1})$	0.15	0.08
试验结果	切除率 $I / (\text{cm}^3 \cdot \text{min}^{-1})$	3.26	1.23
	每分钟效益 / 元	1.63	0.11
	精度	好于工步要求	达到图纸要求
	表面粗糙度 $R_a / \mu\text{m}$	3.2	1.6
	平均消耗刀具量 / 片	0.3	0.15
	实际消耗刀具总额 / 片	0.45	

表4 粗铣优化前后对比效果

切削参数优化前后对比分析			分析计算结果
参数	优化前	优化后	
切削速度 $V_c / (\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$	55	85.3	提高加工效率 55%
切除率 $I / (\text{cm}^3 \cdot \text{min}^{-1})$	2.1	3.26	
每分钟效益 / 元	1.39	1.63	降低加工成本 17%
精度和表面质量	0.1		好于工步要求
表面粗糙度 $R_a / \mu\text{m}$	3.2		达到工步要求

表5 精铣优化前后对比效果

切削参数优化前后对比分析			分析计算结果
参数	优化前	优化后	
切削速度 $V_c / (\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$	70	96.4	提高加工效率 37.7%
切除率 $I / (\text{cm}^3 \cdot \text{min}^{-1})$	0.893	1.23	
每分钟效益 / 元	0.04	0.11	降低加工成本 17.5%
精度和表面质量	0.1		达到图纸要求
表面粗糙度 $R_a / \mu\text{m}$	1.6		达到图纸要求

工效率和降低成本上都有明显改善, 但是每分钟效益较低。经过分析, 除了设备使用费用高影响效益外, 另一重要因素为发动机叶片毛坯制造费用占整个叶片成品价值 60% 以上, 而多道工序分摊效益不是太合理。

参考文献

- [1] 刘大响. 对加快发展我国航空动力的思考. 航空动力学报, 2001, 1, 16(1):1-6.
- [2] 白禹, 张定华, 刘维伟, 等. 叶片类零件四坐标高效螺旋数控编程方法研究. 机械科学与技术, 2003, 22(2):177-182.

(责编 三丰)