

基于切削有限元模拟的刀具几何参数优化研究

江敏¹, 齐龙², 周琴¹

(1. 绵阳职业技术学院 机电工程系, 四川 绵阳 621000; 2. 中国空气动力研究与发展中心, 四川 绵阳 621000)

摘 要: 刀具几何参数是金属切削加工过程中切屑的形成、切削力的大小以及散热条件等的重要因素, 影响被加工工件的表面质量。针对汽轮机薄壁叶片的加工变形, 采用 ABAQUS 对切削加工过程进行有限元模拟, 对刀具的几何参数进行优化, 运用优化后刀具进行汽轮机静叶片的铣削加工。实验结果表明, 薄壁叶片加工过程中的变形得到有效改善。

关键词: 金属切削; 有限元; 刀具几何参数; 加工变形

中图分类号: TG506 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2020)03-0083-04

Research on Geometrical Parameter of Cutter Optimization Based on Metal Cutting Finite Element Simulation

JIANG Min¹, QI Long², ZHOU Qin¹

(1. Department of Mechanical and Electrical Engineering, Mianyang Vocational and Technical College, Mianyang 621000, China; 2. China Aerodynamic Research and Development Center, Mianyang 621000, China)

Abstract: The geometrical parameters of cutter are important influencing factors of the formation of chip, the size of cutting force and the heat dissipation condition in metal cutting process, which have influence on the surface quality of the workpiece. To prevent the deformation occurring in machining the thin-walled turbine blades, ABAQUS is used with the finite element method to simulate the machining process, then, the geometrical parameters of the cutter are optimized. The optimized tool is used for the milling of the static turbine blades. The experimental results show that the machining quality of the thin-walled turbine blades is improved greatly.

Keywords: metal cutting; finite element; geometrical parameter of cutter; deformation occurring in machining

0 引言

刀具几何参数是影响薄壁叶片曲面加工变形的重要因素, 对切削变形、切削力、切削温度和刀具磨损等有着重要的影响^[1]。刀具几何参数包括角度、刀面形式、切削刃形状^[2]。研究刀具几何参数对工件加工变形的影响需要大量的切削加工实验, 大量的试验需求造成研究成本过高, 使得刀具几何参数的优化研究受到了阻碍, 有必要探索一种新的方法实现切削加工过程的真实再现。随着有限元技术的发展, 运用有限元技术对加工过程进行模拟研究将成为越来越流行的方式。

1 金属切削有限元关键技术

1.1 材料模型

切削加工是一个涉及高温、高应变和高应变率的动态切削过程, 材料表现出来的不再是塑性变形过程的线弹性关系, 而是发生应变硬化效应的非线性行为^[3]。切削模拟过程中使用的材料模型必须能准确地表达材料的这些

性能。本文采用的即是热弹塑性本构模型, 它在反映非线性行为方面有很大的优势, 特别是能很好地反映金属在大应变、大应变率以及高温下的材料行为^[4]。针对汽轮机薄壁叶片材料 2Cr13 不锈钢, 通过大量查阅国内外文献, 2Cr13 的 Johnson-Cook 公式可以写成^[5]:

$$\bar{\sigma} = [A + B(\bar{\epsilon})^n][1 + C \ln(\dot{\bar{\epsilon}}/0.007)] \left[1 - \left(\frac{T - T_{\text{room}}}{T_{\text{melt}} - T_{\text{room}}} \right)^m \right] \quad (1)$$

其中: A 、 B 、 n 为材料的应变强化项系数; m 为材料的热软化系数; C 为材料应变率强化项系数; $\bar{\sigma}$ 为流动应力; $\bar{\epsilon}$ 为应变; $\dot{\bar{\epsilon}}$ 为应变率; T 为切削温度; T_{melt} 为材料溶化温度; T_{room} 为参考温度。2Cr13 马氏体不锈钢的材料本构模型参数表述如表 1。

表 1 2Cr13 材料 J-C 模型参数

参数	A	B	C	m	n
值	674	288	—	1	0.52

材料应变率强化项系数 C 随着切削条件的改变而改变, 见式 (2)。

$$C = 0.061 - 203 - 185.084t - 0.00412v \quad (2)$$

基金项目: 四川省科技支撑计划项目 (2010GZ0135)

第一作者简介: 江敏 (1988—), 女, 四川隆昌人, 讲师, 工学硕士, 研究方向为先进制造技术。

其中: t 为切削深度; v 为切削速度。

1.2 摩擦模型

有限元分析软件 ABAQUS 使用的是罚摩擦行为^[6],允许存在“弹性滑移”。许多接触问题如冲压、锻造、旋压、切削等在模拟过程中都可以使用罚摩擦行为。本文在对薄壁叶片进行切削加工有限元模拟时采用的是罚摩擦模型。

1.3 切屑分离准则

切削过程是刀具相对工件材料运动不断地挤压、剪切形成切屑的过程,需要一个合适的切屑分离准则对这个过程进行描述,以实现切屑在有限元软件中的自动分离。本文在有限元模拟切削过程中采用有限元软件 ABAQUS/Explicit 支持的 ALE 法,并结合物理分离准则来实现模拟汽轮机薄壁叶片加工过程中的切屑分离。材料的初始失效状态采用了 J-C damage 进行定义,结合单元删除技术删除分离层相应的失效单元,实现切屑和工件的分离。

1.4 网格畸变

在金属切削模拟过程中,网格大变形甚至畸变是普遍存在的问题。过大变形将导致计算中断,对计算结果产生很大影响,使得求解结果不正确,因此有必要对其进行处理,使求解得以顺利进行。由于初始切屑多余材料的模型不能真实反映切削的真实状态,本文提出了一种对切屑进行特殊处理的方法以对大变形进行控制。这种方法结合了 ALE 方法、切屑端部增加材料和倾斜网格的优点,如图 1 所示,对切屑端部开一个小口,并对图中框出的部分使用倾斜网格,且对这一部分进行 ALE 方法处理,其他部位采用切屑分离准则和普通网格。结果表明,该方法在解决了网格畸变的同时也缩短了计算时间,网格基本呈现规则化。在研究数控工艺参数对薄壁叶片的加工变形时,这种方法可以应用到三维金属切削模拟中。

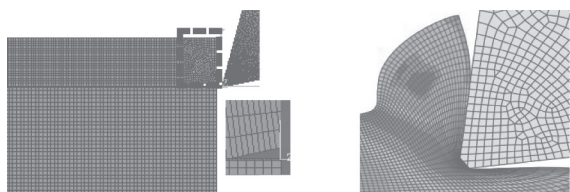


图 1 本文切屑处理方法

2 正交模拟实验

目前对于 2Cr13 马氏体不锈钢刀具工艺参数的确定没有可靠的理论依据,只能依靠工人多年的积累经验。为了探讨不同刀具几何参数对加工变形的影响,需要对在不同参数条件下的切削加工进行有限元仿真^[7],在进行有限元模拟时采用图 2 的切削模型。

加工汽轮机薄壁叶片的刀具工艺参数水平设计如表 2 所示,采用 4 因素 4 水平的正交模拟实验,就各个参数对加工变形的综合影响进行分析。此时不变因素主轴转速 $n=3200\text{ r/min}$,切削深度 $a_p=0.1\text{ mm}$,切削宽度 $a_w=3.5\text{ mm}$,每齿进给量 $f_z=0.1\text{ mm/z}$ 。在叶片上选取 6 个不同的点,查询叶片

变形量,叶片薄壁叶片的加工变形不仅与刀具几何参数有关,同时还与刀具距离、壁厚等因素有重要联系。



图 2 刀具几何参数分析模型

表 2 刀具几何参数因素水平表

水平	前角/(°)	后角/(°)	刃倾角/(°)	刀尖半径/mm
1	8	5	10	0.010
2	14	8	5	0.015
3	20	11	0	0.020
4	28	15	-5	0.030

以第 2 组模拟实验为例,此时刀具前角 $\alpha=14^\circ$,后角 $\beta=8^\circ$,刃倾角 $\gamma=5^\circ$,刀尖圆角半径 $r=0.015\text{ mm}$,金属切削有限元模拟的结果如图 3 所示。对于 16 组模拟实验,在 ABAQUS 中进行有限元模拟分析,4 因素 4 水平正交模拟所得到的试验结果如表 3。

表 3 汽轮机薄壁叶片切削加工有限元模拟结果数据

序号	位移值/mm					
	1	2	3	4	5	6
1	0.003 9	0.000 1	0.000 8	0.053 9	0.053 8	0.019 2
2	0.014 0	0.005 0	0.009 0	0.129 1	0.096 0	0.040 0
3	0.052 0	0.081 0	0.102 0	0.216 2	0.227 0	0.156 0
4	0.038 0	0.024 0	0.031 0	0.275 7	0.231 0	0.097 0
5	0.029 3	0.020 0	0.027 2	0.140 7	0.120 4	0.065 2
6	0.004 7	0.000 7	0.003 1	0.091 5	0.069 6	0.023 8
7	0.015 4	0.011 5	0.019 2	0.283 6	0.176 3	0.072 3
8	0.055 8	0.109 5	0.131 3	0.249 7	0.270 5	0.181 4
9	0.029 6	0.052 4	0.061 0	0.125 9	0.107 1	0.084 6
10	0.001 7	0.001 4	0.003 7	0.087 7	0.028 9	0.012 4
11	0.001 3	0.005 9	0.007 9	0.030 5	0.016 6	0.012 5
12	0.001 9	0.000 3	0.000 9	0.030 9	0.017 9	0.006 7
13	0.000 2	0.000 5	0.002 2	0.073 5	0.021 8	0.006 5
14	0.005 9	0.018 5	0.026 7	0.051 1	0.035 3	0.028 6
15	0.003 6	0.002 5	0.004 6	0.020 5	0.026 0	0.011 4
16	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.002 4	0.001 1	0.000 1

3 实验验证

为了证明采用金属切削有限元模拟方法研究刀具几何参数方法的正确性和可用性,本文采用了汽轮机静叶片

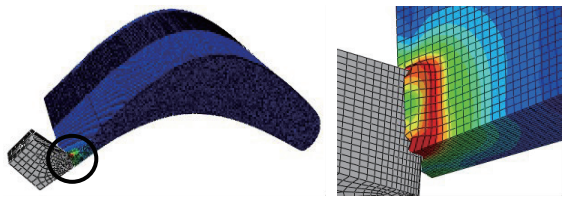


图3 模拟结果示例图

实验加工的方法来对其进行验证,汽轮机薄壁片加工效果图如图4所示。由于实验条件的限制,实验过程中采用4轴数控机床对汽轮机静叶片经特殊工艺进行加工,同时采用传统的离线检测技术(即完成相应工序后取下工件进行检测)。汽轮机静叶片容易发生变形的部位为叶片出气边的薄壁部分,待工件加工完成后取汽轮机静叶片薄壁部位上6个固定点,测定该部位与工件加工前的位移变化量,这一位移变化量也就是叶片加工完成后这一点的加工变形量。实验所得叶片变形值和金属切削有限元模拟所得叶片变形值的相对误差见表4。

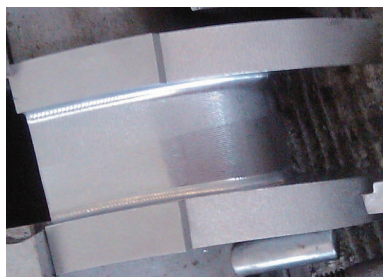


图4 汽轮机薄壁叶片加工效果图

表4 变形量预测值与实验值相对误差分析表 单位: %

序列	1号点	2号点	3号点	4号点	5号点	6号点
1	30.41	-19.23	33.08	400.00	-25.79	20.91
2	-76.42	17.70	17.14	-21.74	-16.25	-22.96
3	-13.43	29.87	13.82	85.00	-31.05	21.11
4	-75.07	24.19	-17.10	414.65	-43.04	-31.84
5	-51.98	-60.84	-11.38	-15.73	10.00	12.00
6	12.75	-19.89	-26.31	20.92	375.86	12.15
7	-87.40	64.27	-15.52	-27.33	-100.09	15.74
8	16.10	-87.59	804.50	-27.09	363.33	-22.05
9	87.78	-13.79	-97.50	0.00	100.00	190.00
10	16.96	-32.13	11.63	-0.54	8.71	-30.49
11	17.21	6.18	-54.71	-69.21	-12.78	-78.46
12	-36.19	-51.57	17.25	-15.72	-19.77	176.81
13	37.40	18.48	-11.79	-27.47	-4.19	-69.47
14	-10.46	-63.02	56.67	-12.08	17.87	2.07
15	15.80	8.59	4.72	9.80	17.94	-72.39
16	-12.56	-27.25	7.96	23.68	-1.00	6.15

从表4可以看出:

1) 叶片变形预测值与实验值最大误差为804.5%,最

小误差为0.00%,误差平均值为19.83%。造成误差太大的原因一方面是该点在金属切削有限元模拟的过程中发生了不应该产生的大变形没有完全得到合理解决^[8];另一方面金属切削有限元模拟过程中忽略了切削热、振动等一系列复杂、不确定因素的影响^[9]。

2) 通过误差结果分析,金属切削模拟加工和实验加工的叶片变形值大体上是一致的,可以说明本文所采用的金属切削有限元模拟方法以及正交模拟实验模拟结果相对合理。

4 刀具几何参数优化研究

通过上述正交模拟实验得到了汽轮机薄壁叶片刀具几何参数改变时的切削变形量,分别进行极差、方差分析来评价出刀具几何参数叶片加工变形的影响规律和影响程度^[10],得出刀具几何参数的最优组合,见表5和图5。

表5 叶片加工变形平均值极差分析表

		前角	后角	刃倾角	刀尖圆角	
各刀具几何参数水平引起的	$\bar{X}_{ij}$	0.081 5	0.073 2	0.038 9	0.016 8	0.055 6
叶片变形平均值/mm	$\bar{X}_{2j}$	0.090 5	0.064 8	0.061 3	0.027 4	0.055 6
	$\bar{X}_{3j}$	0.030 4	0.045 8	0.057 3	0.063 1	0.049 6
	$\bar{X}_{4j}$	0.014 3	0.032 8	0.059 1	0.102 5	0.055 8
总平均值/mm				0.0542		
平方和	SS_j/mm^2	0.016 9	0.004 0	0.001 3	0.018 1	0.000 1
平方总和	$\Sigma SS_j/\text{mm}^2$			0.0404		

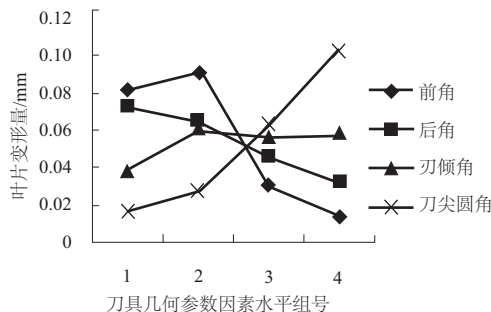


图5 刀具几何参数对叶片加工变形平均值影响趋势图

由表5和图5可知,合理的刀具几何参数对薄壁叶片的加工变形量有很大影响。较大的前角和后角固然能够减小叶片的加工变形,提高叶片的加工精度,但在实际加工过程中,必须考虑刀具的强度和耐用度。因此,刀具前角选择14°左右,后角8°左右,刃倾角10°左右,并且随着刀具的磨损应该及时地更换刀具。

根据方差分析表,给定显著性水平 $\alpha=5\%$,查表得 $F_{0.05}(4,4)=6.39$ 。叶片加工变形平均量的方差分析表如表6。前角、刀具磨钝圆角对叶片变形的影响极显著;后角、刃倾角对叶片变形影响相对显著。实际加工中,应根据工件加工精度要求和刀具耐用度综合选择刀具几何参数。

表6 叶片加工变形平均值方差分析表

来源	平方和	自由度	均方	F 值 (方差值)	分位数
前角	0.016 9	3	0.005 6	152	6.39
后角	0.004 0	3	0.001 3	36	6.39
刃倾角	0.001 3	3	0.000 4	11	6.39
刀尖圆角	0.018 1	3	0.006 0	163	6.39
误差	0.000 1	15-3×4=3	0.000 033		
总和	0.040 4	15			

5 结语

1) 本文采用金属切削有限元模拟技术对薄壁叶片的加工过程进行模拟,得到了相对理想的模拟结果,故本文所采用的 ABAQUS 有限元模拟切削加工的方法切实可行,为以后的金属切削模拟加工提供了一种参考方法。

2) 通过运用优化的刀具几何参数(刀具前角、后角、刃倾角、刀尖圆角)进行汽轮机静叶片的铣削加工实验,汽轮机叶片加工变形得到了有效改善,废品率有所下降。

参考文献:

[1] 潘永智,艾兴,唐志涛.基于切削力预测模型的刀具几何参

数和切削参数优化[J].中国机械工程,2008,19(4):428-431.

- [2] 周宇.细长轴加工中刀具几何参数的选择[J].机械制造与自动化,2011,40(3):45-46.
- [3] 白金金.航空薄壁件精密铣削加工变形的预测理论及方法研究[D].杭州:浙江大学,2008.
- [4] 颜聪明,林有希,相泽锋.高速切削过程有限元分析的研究进展[J].机械制造,2010,48(10):48-52.
- [5] 李琳,解丽静,王西彬.金属切削加工中难加工材料 2Cr13 的本构模型[J].中国机械工程,2009,20(20):2466-2469.
- [6] 黄素霞,李河宗,崔坚.基于 ABAQUS 的金属切削数值模拟分析[J].工具技术,2010,44(2):56-59.
- [7] 梁磊.刀具几何参数对切削过程的影响[J].工具技术,2009,43(9):29-32.
- [8] HOWERTON D H. An experient and numerical investigation of orthogonal machining of aluminum6061-T6[D]. Raleigh:North Carolina State University, 1989.
- [9] STRENKOWSKI J S, MOON K J. Finite element prediction of chip geometry and tool/workpiece temperature distribution in orthogonal metal cutting[J]. Tran ASME J Eng Ind, 1990, 112(4):313-318.
- [10] 武凯,何宁.基于变形控制的薄壁结构件高速铣削参数选择[J].机械科学与技术,2005,24(7):788-791.

收稿日期:2018-12-06

(上接第32页)

小。由图9可以看出,a、b位置处的金相组织以树枝晶为主,随着熔覆过程的进行,成形件受到热循环作用而产生热量积累,成形件温度较高,过冷度减小,冷却速度降低,熔池寿命增长,晶粒尺寸略有增大。法向分层区和斜定向分层区组织无明显差别,成形件整体组织过度均匀,组织致密,成形质量良好。

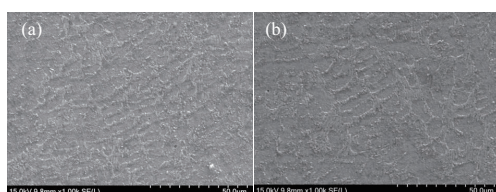


图9 不同位置处金相组织图

4 结语

本文采用光内送粉技术,熔覆成形出尖顶封闭结构件。采用法向分层和圆弧分段熔覆以及间歇熔覆的方法,解决了顶端封闭问题。成形件检测尺寸误差控制在8%以内,硬度保持在685~720HV之间,成形区域显微组织致密均匀。

参考文献:

[1] 程小元,黄明涛,张明岐,等.精密电解加工在航空发动棚整体结构件制造中的应用[J].航空制造技术,2015,493(Z2):54-56.

- [2] 熊洪森,李春,王家宣,等.炮弹壳体液态模锻模设计[J].模具工业,2008,34(2):61-63.
- [3] 王家宣,李春,熊洪森,等.炮弹壳体的液态模锻模具结构设计[C].北京:半固态金属加工技术研讨会,2002.
- [4] HUANG Weidong. Laser solid forming [M]. Xi'an: North-western Polytechnic University Press, 2007.
- [5] LI Jianzhong, LI Xiangfeng, ZUO Dunwen, et al. Influence of defocusing amount on the process of Al/Ti cladding above 7050 aluminum alloy based on numerical simulation study [J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(4):1126-1133.
- [6] LI Rui, YANG Xiaojun, ZHAO Wei, et al. Effect of femtosecond laser micromachining on the roughness of cladding sidewalls [J]. Infrared and Laser Engineering. 2015, 44(11):3244-3249.
- [7] 陈帅峰,王守东,雷玉川,等.大型厚壁椭圆封头多次热冲压成形分析[J].锻压技术,2015,40(2):37-40.
- [8] 周杰,罗艳,王珣,等.基于响应面的封头冲压成形工艺多目标优化[J].吉林大学学报(工),2016,46(1):205-212.
- [9] 邓晓婷,张士良,刘劲松,等.球形封头热冲压成形残余应力分析[J].锻压技术,2016,41(4):14-18.
- [10] 石世宏,傅戈雁,王安军,等.激光加工成形制造光内送粉工艺与光内送粉喷头:中国,CN101148760[P].2008-03-26.
- [11] 狄科云.激光熔覆快速成形光内同轴送粉斜壁堆积的初步研究[D].苏州:苏州大学,2008.

收稿日期:2019-03-11