

复杂槽型刀片车削时表面残余应力有限元仿真与试验*

刘二亮¹, 宁世友¹, 邱峰¹, 何耿煌¹, 陈学强¹, 郑永纯¹, 王亚威²

(1. 哈尔滨理工大学机械动力工程学院, 哈尔滨 150080;

2. 哈尔滨东安发动机(集团)有限公司, 哈尔滨 150069)

[摘要] 针对复杂槽型车刀片对残余应力分布的影响进行有限元仿真, 得到前角及涂层对残余应力的影响规律; 通过切削试验分析了切削参数和刀具参数对切削力和切削温度的影响作用, 进而研究了槽型和涂层对残余应力的影响规律。研究表明: 涂层刀具减少了已加工表面的残余拉应力; 轴向和切向残余应力是拉应力, 且切向残余应力大于轴向残余应力。

关键词: 残余应力; 切削参数; 涂层刀具; 槽型

FEM Simulation and Experiment on Surface Residual Stress in Turning With Complex Groove Tools

LIU Erliang¹, NING Shiyu¹, QIU Feng¹, HE Genghuang¹, CHEN Xueqiang¹, ZHENG Yongchun¹, WANG Yawei²

(1. School of Mechanical and Power Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China;

2. AVIC Harbin Dongan Engine (Group) Corporation LTD., Harbin 150069, China)

[ABSTRACT] For the influence of complex groove tools on residual stress distribution, the finite element simulation is carried out, the effects of rake angle and coating is analyzed. Then the influence of cutting and tool parameters on cutting force and temperature, while the influence of groove and coating on the residual stress are analyzed. The research results indicated that the coated tools reduced the residual tensile stress in the machined surface. The axial and tangential residual stress is tensile stress, and the tangential residual stress is larger than the axial in machining.

Keywords: Residual stress; Cutting parameters; Coated tools; Groove

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2016.06.096

国内外学者从 20 世纪 50 年代开始对金属切削加工表面的残余应力进行研究, 取得了显著的成果^[1-3]。2005 年 Ee 采用弹塑性有限元法对工件表面残余应力进行研究, 分析卸载和冷却阶段对残余应力的影响作用, 得出比较准确的残余应力的预测值^[4]。王素玉等针对切削速度对残余应力的影响规律进行了有限元仿真分析^[5]。试验方面, 孙建英等进行了高速切削加工表面残余应力的研究与控制^[6]。Jacobson 通过车削淬硬钢的试验研究, 发现负刀具前角越大、刀具半径越小越容易产生残余压应力^[7]。孔庆华等进行了刨削试验研究, 得出了工件材料、切削参数等对残余应力的影响规律^[8]。残余应力是一个非常复杂的问题, 切削参数、刀具几何参数、材料匹配和加工工艺等因素均会对其产生一定的影响^[9-11]。上述研究侧重于残余应力的理论建模、试验分析和有限元仿真预测等方面, 但是复杂槽型对残余应力影响的研究鲜见报道。

* 项目基金: 黑龙江省教育厅科学技术研究项目(12511085)。

本文以复杂槽型车刀片车削 45 钢时的已加工表面残余应力为研究对象, 通过有限元仿真和试验手段, 分析复杂槽型对力、温度、残余应力的变化规律的影响作用。

1 复杂槽型车刀片切削时残余应力的建模仿真

本文采用 Third Wave AdvantEdge 自身所携带的材料本构关系(Power-Law 本构模型)进行有限元仿真。模型材料从材料库中选用 AISI1045, 即 45 钢, 刀具选用硬质合金刀具, 建模边界条件如图 1 所示, 取切削速度 $V_c=250\text{mm}/\text{min}$, 切削深度为 $a_p=0.5\text{mm}$, 进给量为 $f=0.25\text{mm}/\text{r}$, 后角 a_o 为 10° 。

1.1 复杂槽型前角对残余应力的影响

取前角 γ_o 分别为 5° 、 10° 、 15° , 切削刃半径为 0.015mm 。如图 2(a) 所示, 已加工表面的残余应力为拉应力, 次表层的残余拉应力逐渐减小, 转变为压应力, 达到最大残余压应力后, 残余压应力逐渐趋于零。增大

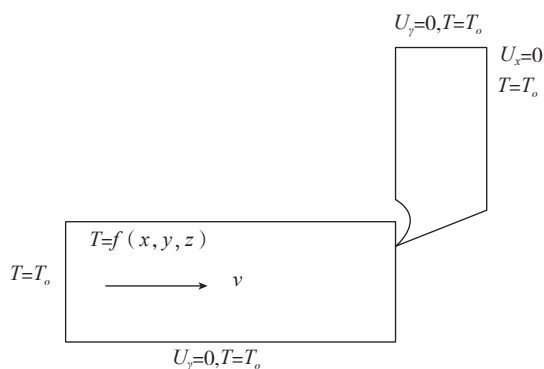
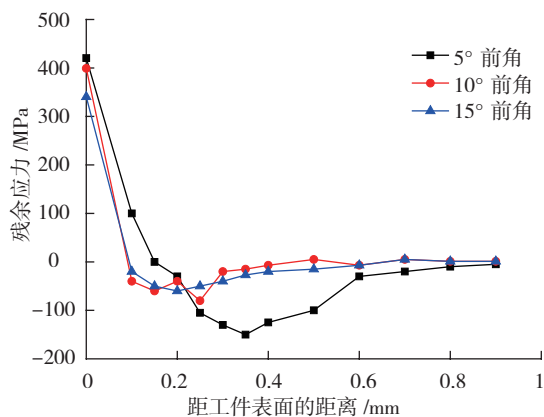


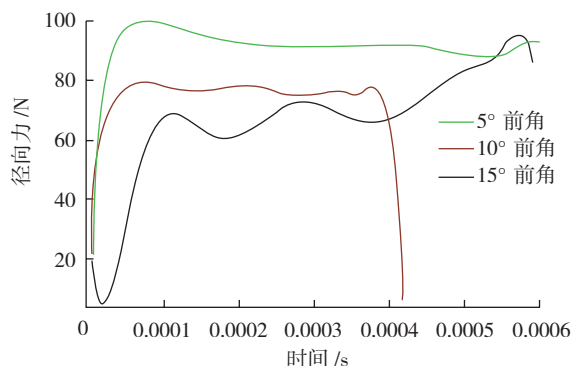
图1 边界条件

Fig.1 Boundary conditions

槽型前角,残余拉应力减小,硬化层里压应力也减小。残余拉应力层减小。残余拉应力层的分布深度大约在0.1mm左右。当前角很小的时候,切屑的状态接近自然卷曲。随着槽型前角的增大,受到复杂槽型的约束作用,切屑的卷曲半径变小,切屑的弯曲应力就变大,切屑对工件的拉力就越大。图2(b)为不同前角下切削力瞬时变化图。一方面由于切削刃对工件的压缩变形变小,使得摩擦作用变小,切削温度降低,从而残余拉应力降



(a) 前角对残余应力的影响



(b) 前角对切削力的影响

图2 前角对残余应力的影响和切削力的变化瞬时图

Fig.2 Influence of groove rake angle on the residual stress and cutting force

低;另一方面由于切削变形减小,挤压和摩擦减小,残余压应力也随着前角的增大而减小。

1.2 涂层对残余应力的影响

图3为TiN涂层和无涂层的复杂槽型刀片切削时已加工表面残余应力的分布曲线。由图3可知,已加工表面残余应力为残余拉应力,但是采用TiN涂层时,表面残余应力值明显小很多。

图4为有无涂层时的切削力和切削温度的对比图,从4(a)和4(b)可看出有涂层的复杂槽型刀片切削时切削力小于无涂层时的切削力,并且无涂层时切削力的曲线波动比较大,而有涂层的则相对平稳,说明涂

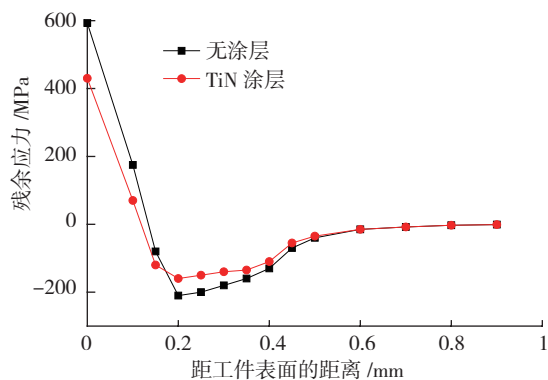


图3 刀具涂层对残余应力的影响

Fig.3 Influence of cutting tool coating on residual stress

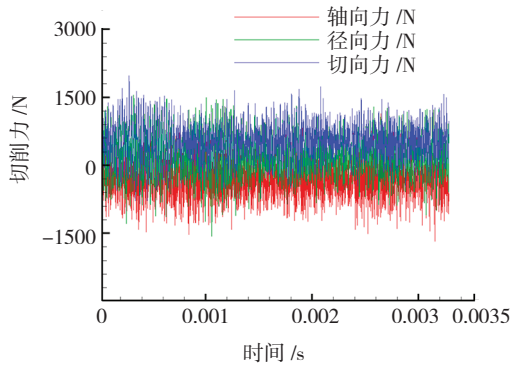
层有利于降低切削力;从图4(c)和图4(d)可看出,带涂层的复杂槽型刀片切削时的切削温度较低,这是因为涂层材料具有高硬度、耐磨耐热的性能,涂层材料与工件的粘结较小,有一定的润滑作用,减少了复杂槽型与工件的摩擦系数,切削加工产生的热量相对较少,从而降低了切削温度。由图4可知,切削力的降低,使切削加工过程中的压应力相对减少,但是温度的上升使残余拉应力增大;由于涂层刀片的切削稳定性优于无涂层刀片,因此涂层刀片切削时的已加工面残余应力小于无涂层的刀片。

2 复杂槽型车刀片切削时残余应力的试验研究

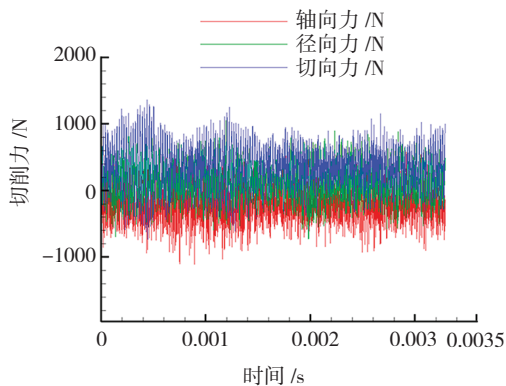
2.1 试验装置、材料和设备

试验用车床型号为CAK6150,车刀片选用Sandvik公司两种不同断屑槽型的硬质合金涂层刀片,刀片型号和部分几何参数如表1所示。试验材料选用45钢棒料,切削方式为外圆车削,棒料直径 $d=90\text{mm}$,长度 $l=450\text{mm}$ 。在试验中,进给量 $f=0.25\text{mm/r}$,切削速 $V_c=250\text{mm/min}$,背吃刀量选用4个水平(分别为0.2mm、0.5mm、0.8mm、1.0mm)。每次车削长度为20mm,用于检测工件已加工表面的残余应力。

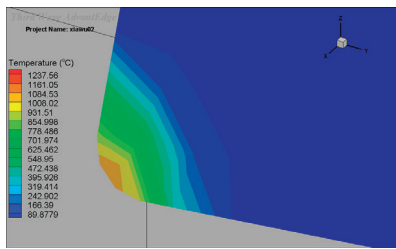
采用kistler公司生产的测力仪进行切削力测量;采



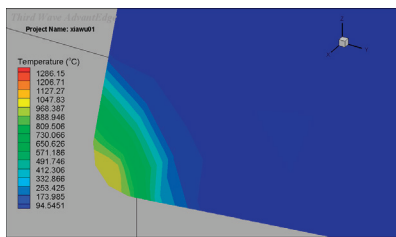
(a) 无涂层时切削力的瞬时变化图



(b) TiN 涂层时切削力的瞬时变化图



(c) 无涂层时切削温度的分布示意图



(d) TiN 涂层时切削温度的分布示意图

图4 刀具涂层对切削力和切削温度的影响图
Fig.4 Influence of tool coating on the cutting force and cutting temperature

用加拿大 PROTO 公司生产的 LXR D 组合式和 IXRD 便携式 X 射线应力分析仪进行已加工表面残余应力测试。

2.2 复杂槽型对已加工表面切削力及切削温度的影响试验分析

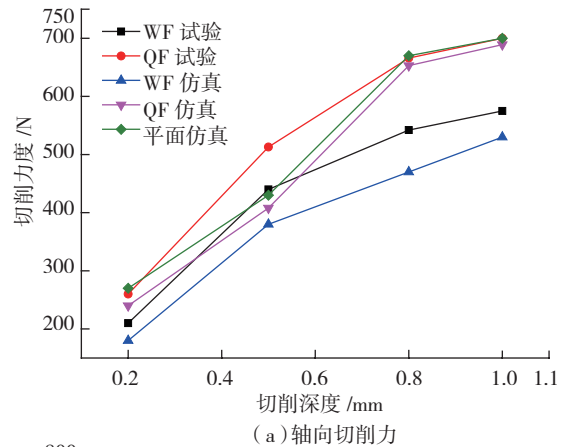
TiN 涂层刀片在进给量 $f=0.25\text{mm/r}$, 切削速度 $V_c=250\text{mm/min}$, 切削深度 a_p 分别取 0.20mm 、 0.50mm 、

表1 刀具型号及几何参数

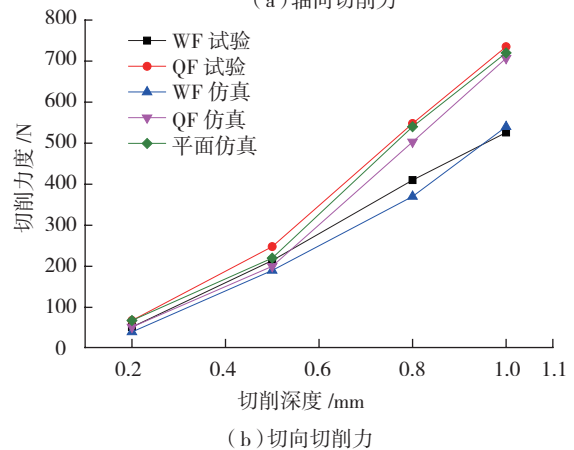
几何参数	刀具	
	CNMG120408-WF4015	CNMG120408-QF4015
W_r/mm	1.0	1.0
r_s/mm	0.8	0.8
br_1/mm	0.10	0.15
$\gamma_f/(\circ)$	15	10
$\lambda_s/(\circ)$	0	0
$\kappa_f/(\circ)$	45	45
涂层	TiN	TiN

0.80mm 和 1.00mm 时,分析不同槽型对切削力与切削温度的影响规律。

图 5 所示为切削力随着切削深度的增加而增大,但槽型刀片的轴向力和径向力都低于平刀片; WF 槽型刀片的切削力小于 QF 槽型。这是因为试验用的两种刀片为具有前角的涂层硬质合金刀片,在切削过程中涂层起到一定润滑作用,从而降低了摩擦系数,切削力变小;同时,由于前角的存在使得切削变得轻快,当前角增大时,切削层的金属变形将减小,刀-屑间摩擦力和正应力也减小,导致切削力减小,而 WF 刀片的前角为 15° ,



(a) 轴向切削力



(b) 切向切削力

图5 切削深度对切削力影响的仿真与试验对比图
Fig.5 Comparison of measured and simulated cutting force

QF 刀片的前角为 10° ，故前者的切削力小于后者。

如图 6 所示为随着切削深度的增加，切削温度呈缓慢增大的趋势；槽型刀片的切削温度高于平刀片，QF 槽型刀片的切削温度高于 WF 槽型刀片。这是因为平刀片在切削加工中，切屑自然卷曲，切屑变形程度较低，因变形而产生的热量较少，从而切削温度较低；而槽型刀片在切削中，尽管涂层在一定程度上改善了刀屑间的摩擦条件，但是断屑槽强制切屑卷曲，即切屑卷曲半径减小，增加了切屑变形，导致因变形产生的热量显著增加，因此切削温度较高，所以槽型刀片的切削温度高于平刀片；从试验中发现 QF 槽型刀片切削时切屑变形程度高于 WF 槽型刀片，因而前者切削时温度较高。

2.3 复杂槽型对已加工表层残余应力影响试验分析

从图 7 中可以看出，切削深度对残余应力变化的影响较小。轴向残余应力和切向残余应力均是拉应力，其中切向残余应力明显大于轴向残余应力。采用 WF 槽型刀片切削时工件已加工表面的残余应力高于 QF 槽型刀片。

2.4 涂层对已加工表层残余应力影响试验分析

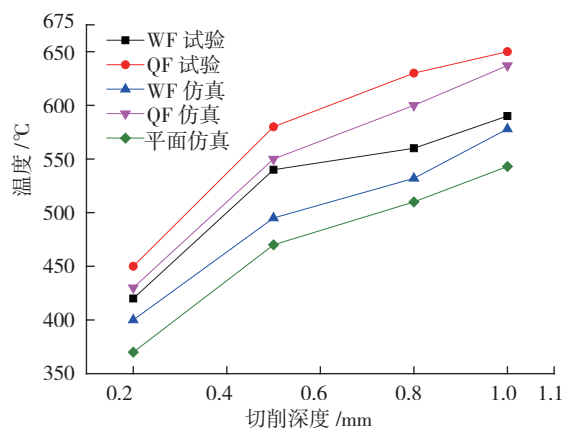


图6 切削深度对切削温度影响的仿真与试验对比图

Fig.6 Comparison of measured and simulated cutting temperature

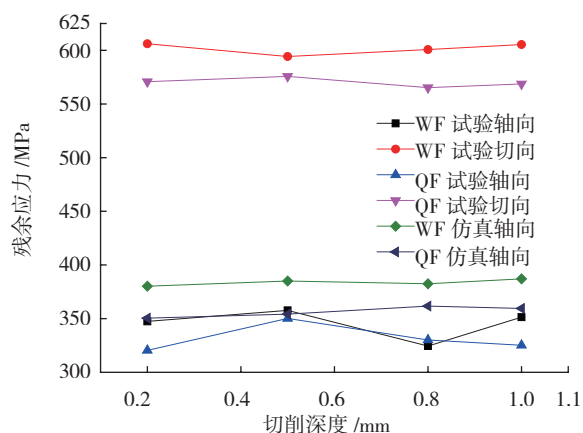


图7 不同槽型表层残余应力试验值与仿真值对比

Fig.7 Comparison of measured and simulated residual stress

由图 8 可知，随着切削深度的增大，已加工表面的残余应力变化趋势不明显，且轴向残余应力和切向残余应力均为拉应力。TiN 涂层刀片切削时已加工表面的残余拉应力比无涂层刀片低，可见，涂层刀片切削可获得更好的加工表面质量。

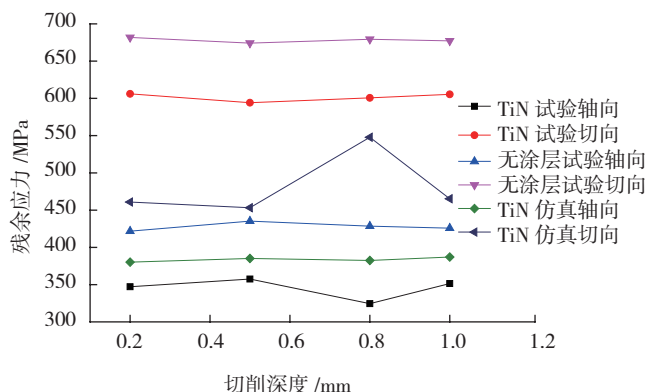


图8 有无涂层对表层残余应力试验值与仿真值对比

Fig.8 Comparison of measured and simulated coating and uncoating

3 结论

本文通过有限元仿真和切削试验，研究了复杂槽型对切削过程中力、温度、残余应力变化规律的影响作用，得到了以下结论。

(1) 仿真结果表明：前角增大，表面残余应力减小；残余拉应力层的厚度约在 0.1mm 左右；涂层刀片降低了已加工表面的残余拉应力。

(2) 研究发现：随着切削深度的增加，切削力和切削温度随之增大；采用 QF 槽型刀片切削时的切削力和切削温度均高于 WF 槽型刀片。

(3) 切削深度对残余应力影响作用不明显，但是采用 WF 或者 QF 槽型刀片切削时，轴向残余应力和切向残余应力都是拉应力，且切向残余应力比轴向残余应力大；WF 槽型刀片切削时已加工表面残余应力高于 QF 槽型刀片。

参考文献

- [1] JAEOBUS J K. Modeling of the in-plane biaxial stresses from machining [D]. Chicago: University of Illinois, 1995.
- [2] BARASH M M, SCHOECH W J. A semi-analytical model of the residual stress zone in orthogonal machining[C]//Proceeding of 11th International MTDR Conference. Oxford: Pergamon Press, 1970, A: 1132-1148.
- [3] 覃孟扬. 基于预紧力切削的加工表面残余应力控制研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2012: 11-12.

TAN Mengyang. Residual stress control research on machined

(下转第 109 页)