

超高强度钢 30Cr3SiNiMoVA 高速铣削加工性能分析

沈毅¹, 宋健¹, 咎林², 郭国强¹, 黄文斌¹, 胡蒙³, 明伟伟³, 陈明³

¹上海航天精密机械研究所; ²上海航天技术研究院; ³上海交通大学

摘要: 作为航空航天工业中广泛使用的低合金超高强度钢, 30Cr3SiNiMoVA 具有优异的综合性能, 但材料的切削加工性能差, 是一种典型的难加工材料。为了解决传统磨削加工表面硬化和效率低下等问题, 采用高速硬铣削来实现超高强度钢的精切代磨。为此, 本文对热处理后的超高强度钢开展了高速铣削加工试验, 对不同试验参数下的切削力、切削振动和加工表面质量结果以及变化规律进行了分析, 同时还分析了切屑的形态转变趋势。试验结果表明, 随着切削速度和径向切宽的增加, 径向切削力有所增大, 同时切削速度和径向切宽对切削振动的影响也最明显。通过合理选择切削参数, 高速铣削加工超高强度钢能够获得较好的加工表面质量。

关键词: 超高强度钢; 高速铣削; 切削力; 切削振动

中图分类号: TG543; TH161; TH142.2

文献标志码: A

Analysis on High Speed Milling Performance of Ultra-High Strength Steel 30Cr3SiNiMoVA

Shen Yi, Song Jian, Zan Lin, Guo Guoqiang, Huang Wenbin, Hu Meng, Ming Weiwei, Chen Ming

Abstract: As a kind of low alloy high strength steel, which is widely used in aerospace industry, 30Cr3SiNiMoVA has excellent comprehensive performance, but it is a kind of typical difficult-to-machine material. In order to solve the problems of surface hardening and low efficiency of the traditional grinding, high speed milling is used to machine the ultra-high strength steel. In this paper, the high speed milling experiments for heat-treated high strength steel are carried out to analyze the variation of cutting force, cutting vibration and surface roughness under different experimental parameters. The results show that the radial cutting force increases with the increase of radial cutting width and cutting speed, which have the biggest influence on cutting vibration. By choosing cutting parameters reasonably, better machining surface quality can be obtained by high speed milling.

Keywords: ultra-high strength steel; high speed milling; cutting force; cutting vibration

1 引言

30Cr3SiNiMoVA 材料具有优异的综合性能: 其屈服强度与疲劳强度高, 冲击韧性良好, 断裂韧性和焊接性能较好, 具有较好的塑性和缺口强度, 同时具有一定的抗腐蚀性能。因此, 30Cr3SiNiMoVA 大量应用于发动机壳体、飞机起落架等航空航天重要零部件, 应用范围正在不断扩大。但该材料在热处理后的硬度达到 50 - 55HRC, 强度超过 1.7GPa^[1], 钢

中添加的 Cr、Ni、Mo、V、Mn 等合金元素使材料的导热性降低, 切削加工性能变差, 使之成为一种典型的难加工材料。

热处理后的材料由于硬度较高, 传统加工多采用磨削加工方式, 但存在磨削力大、磨削温度高的问题, 加之材料的导热性能较差, 致使加工表面大量存在磨削烧伤和加工硬化的问题, 硬化层的深度可达 0.1 - 0.3mm。为了获得较好的加工质量, 往往采用较小的磨削用量, 却又降低了加工效率, 大大延长生产周期。

为了解决 30Cr3SiNiMoVA 热处理后材料的高效加工质量问题, 应用高速硬铣削的加工方法, 实现

基金项目: 国家自然科学基金(51405290); 上海市青年科技启明星计划(16QB1400900); 国家科技重大专项(2015ZX04002102)

收稿日期: 2017年7月

[4] 徐滨士, 刘世参, 梁秀兵. 纳米表面工程的进展与展望 [J]. 机械工程学报, 2003(10): 21 - 26.

[5] 何嘉武, 马世宁, 巴德玛. 表面滚压强化技术研究与应用进展 [J]. 装甲兵工程学院学报, 2013(3): 75 - 81.

[6] 王义, 佟宇, 鲍绍箕. 超声振动挤压工艺与常规挤压工艺的对比分析 [J]. 大连理工大学学报, 1994, 34(5): 573 -

577.

第一作者: 高延峰, 博士, 副教授, 南昌航空大学航空制造工程学院, 330063 南昌市

First Author: Gao Yanfeng, Doctor, Associate Professor, School of Aeronautic Manufacturing Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China

以铣代磨。但是在高速切削超高强度钢方面,尤其是高速硬铣削加工技术的研究较少,故本文以热处理后的 30Cr3SiNiMoVA 超高强度钢材料为研究对象,对其高速铣削加工性能开展了基础试验研究,研究了不同试验加工参数下切削力、加工振动和加工表面粗糙度的变化规律以及切屑形态的转变趋势等,为超高强度钢的高速硬铣削加工提供指导。

2 试验条件与方案

2.1 工件材料

30Cr3SiNiMoVA 材料中含有总量不超过 6.0% 的合金元素,具体化学成分如表 1 所示。铬、钼等合金元素的加入能够提高钢的淬透性,钒、铌元素能够细化晶粒,而镍、锰有助于提高回火马氏体组织的稳定性^[2]。材料的热处理工艺如下:正火(930℃)+油淬(910℃)+回火(250℃,保温 2 小时后空冷)。热处理后材料的力学性能见表 2。30Cr3SiNiMoVA 高强钢的抗拉强度、冲击强度以及屈服强度是普通 45 钢的 3-4 倍,材料的高强度和高韧性将对加工过程造成较大影响,使得其加工性能远远差于普通钢材。

表 1 30Cr3SiNiMoVA 的化学成分 (wt%)

成分	C	Si	Mn	Cr	Ni
含量	0.28/0.34	0.9/1.2	0.5/0.8	2.8/3.2	0.8/1.2
成分	Mo	V	S	P	
含量	0.6/0.8	0.05/0.15	<0.02	<0.02	

表 2 30Cr3SiNiMoVA 钢的力学性能

材料	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	σ_b (MPa)	ψ (%)	δ_5 (%)	Ak/J(V 型)
30Cr3SiNiMoVA	1640	1854	53.8	12.8	80
45 钢	355	600	40	16	39

图 1 为淬火后工件材料组织的金相显微照片。由图可见,工件材料淬火后的显微组织主要为粗针状马氏体,该组织具有较少的显微裂纹和优秀的机械性能。此外,马氏体组织中有很多细小黑色颗粒,是材料淬火处理后析出的碳化物,这些碳化物可以细化晶粒、增加材料强度。

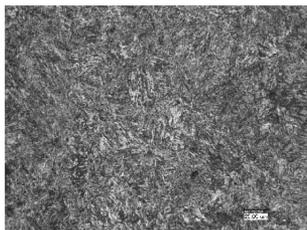


图 1 热处理后材料的金相组织结构

2.2 试验刀具与方案

铣削加工试验采用 SECO - JS522 整体硬质合

金立铣刀,选用超细晶粒度硬质合金,涂层为 TiAlN 材质。刀具直径为 12mm,两刃,前角 10°,螺旋角 40°,为了满足超高强度钢的高速切削加工要求,对刀具刃口进行了特殊强化处理。

试验采用干式侧铣切削,加工过程均为顺铣,铣削试验分为两个阶段进行。第一阶段以轴向切深 a_p 为变化对象进行单因素试验,分析并比较轴向切深 a_p 对超高强度钢铣削加工性能的影响。轴向切深共分四个水平,分别为 5mm、10mm、20mm、30mm,其余参数为 $v_c = 75\text{m/min}$ 、 $f_z = 0.05\text{mm/z}$ 、 $a_e = 0.01\text{mm}$ 。第二阶段对切削参数进行正交试验,在单因素试验基础上选择 a_p 为优化对象,分析比较切削速度 v_c 、每齿进给量 f_z 和径向切宽 a_e 三个因素对铣削力和加工表面质量的影响规律。在第一阶段试验优选出的轴向切深的基础上采用正交试验设计方法,设计了 3 因素 3 水平正交试验,加工因素水平表如表 3 所示。

表 3 加工因素水平表

水平	v_c (m/min)	f_z (mm/z)	a_e (mm)
1	50	0.04	0.1
2	70	0.05	0.3
3	90	0.06	0.5

在 DMU70V 立式高速加工中心上进行铣削试验,采用 Kistler9272 测力仪、Kistler5017B 放大器对加工过程中不同铣削用量的切削力进行在线测量。加速度传感器选用 Kistler 8704B500,其换算准则为 99.8mV/g,通过测量刀具加工过程中的振动加速度信号,以此说明超高强度钢铣削加工过程中的刀具振动程度。采用三丰 SJ201 型表面粗糙度仪对加工表面粗糙度进行测量,采用 Keyence VHX-600 显微镜观察不同切削参数下的切屑形态,试验加工现场图如图 2 所示。

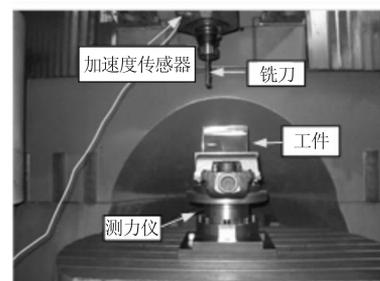


图 2 铣削试验加工现场

3 试验结果分析

3.1 轴向切深单因素试验结果分析

在侧铣加工过程中,总切削力 F_s 可以被分解到

三个相互垂直方向上的分力,即:主切削力(切向力) F_c 、径向力 F_r 、轴向力 F_o ,这三个分力共同组成铣削合力 F 。采用测力仪测量得到作用在工件上的三向分力: x 方向(横向)进给分力 F_x , y 方向(纵向)进给分力 F_y 以及轴向分力 F_z 。由于 a_e 与刀具半径 R 的比值很小,刀尖点与工件的接触角很小,因此 F_x 和 F_y 可以近似看作 F_c 和 F_r 。

图3给出了切削力随轴向切深 a_p 的变化关系。主切削力、径向力和铣削合力均随着轴向切深的增加而增大,轴向力的值较小且变化幅度不大。超高强度钢具有较高的屈服强度以及抗拉强度,在材料去除过程中需要较大的切削力。铣削试验中采用具有较大前角的刀具,能够获得较大的剪切角,从而降低铣削力^[3,4],但不宜过分增大刀具前角,这会导致刀具刃尖强度下降,从而加剧刀具的崩刃失效。

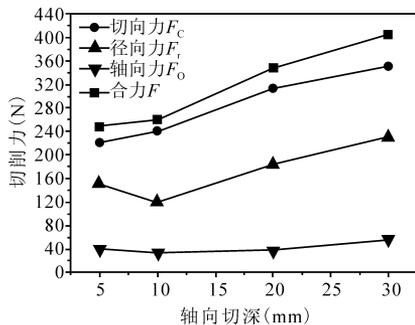


图3 切削力随轴向切深的变化

图4给出了轴向切深与铣削振动及加工表面粗糙度之间的变化关系。可以看出,在切削振动和加工表面粗糙度的关系曲线中均存在一个拐点,即当轴向切深为10mm时,切削振动和加工表面粗糙度达到最小值;超过该拐点后,随着轴向切深的增加,切削振动加速度和加工表面粗糙度值增加明显。这表明在高速硬铣削加工超高强度钢的过程中,轴向切深 a_p 对加工表面粗糙度和切削加工稳定性的影响较明显,但通过选择合适的切削参数能够有效抑制切削振动,获得较为良好的加工表面质量。

对比左、右两图中切削振动和加工表面粗糙度的变化趋势,可以看出二者具有相似的特征。轴向切深作为切削加工的重要参数与加工表面粗糙度没有直接关联,但是轴向切深会直接影响刀具在铣削中的振动程度,刀具的振动变化对加工表面质量会产生明显的影响^[5]。

3.2 切削参数正交试验结果分析

(1) 切削力分析

在轴向切深单因素试验的基础上,通过优选,确定使用10mm的轴向切深进行后续切削参数正

交试验。对正交试验数据采用极差分析法进行分析,得到切削力受各个参数变化影响的结果如图5所示。图5c表明,减小径向切宽能够有效降低切削力,这是因为随着径向切削宽度的减小,切屑厚度变薄,材料去除率减小,切削功减小。图5a表明,增加切削速度,对切向力的影响较小,并且随着切削速度继续增加,切向力呈下降趋势,但径向力和切削合力增长较快。因此为了控制切削合力和径向力,切削速度不宜过高,径向切削宽度也宜选择较小值。

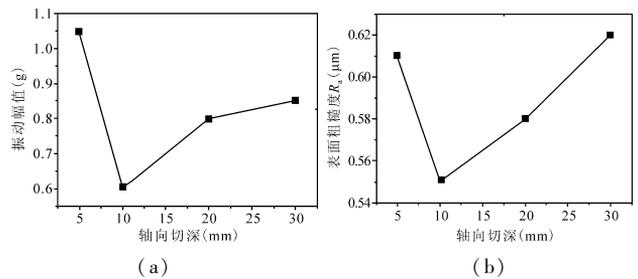


图4 切削振动及加工表面粗糙度随轴向切深的变化

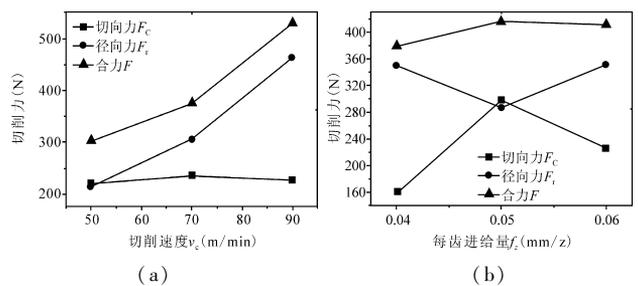


图5 切削力随切削参数的变化

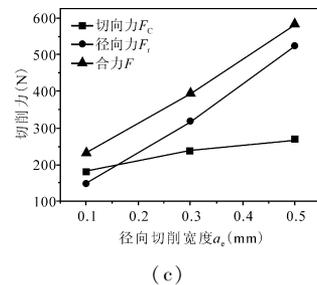


图5 切削力随切削参数的变化

从图5a和图5c可以看出,切削速度与径向切宽对切向力的影响不甚显著,随着每齿进给量的增加,切屑厚度随之增加,切向力呈增大趋势(见图5b)。而切屑厚度增加的同时使得切削区工件材料变形系数变小,摩擦系数减小,这两者的相互作用使得切向力呈现出先增大后减小的变化趋势。径向切宽对径向铣削力的影响最为显著,其次是切削速度,而每齿进给量对径向力的影响较小,切削合力的变化趋势与径向力的变化具有相似性^[6]。这也表明,在对超高强度钢进行侧铣加工时,径向力指标具有重要的参考价值。

(2) 切削振动分析

图6给出了不同铣削加工参数下切削振动(加速度)的变化趋势。从图6a和图6b可以看出,随着切削速度和径向切削宽度的增大,切削振动(加速度)的幅值均呈增长的趋势,且二者中切削速度对加工振动的影响最显著;随着每齿进给量的增加,切削振动的幅值不断递减。对比径向力随切削速度和径向切宽的变化趋势(图5a和图5b)以及切削振动(加速度)随切削速度和径向切宽的变化趋势(图6a和图6b),可以看出二者具有相似特征。表明在超高强度钢的侧铣加工中,径向力对切削振动的影响最大,较大的径向力会引起较大的切削振动。切削振动会增大加工表面粗糙度^[7,8],为了抑制振动,应采用径向力较小时的切削参数。图6表明,为了获得较小的切削振动,须选取较小的切削速度与径向切削宽度,并适当增大每齿进给量。

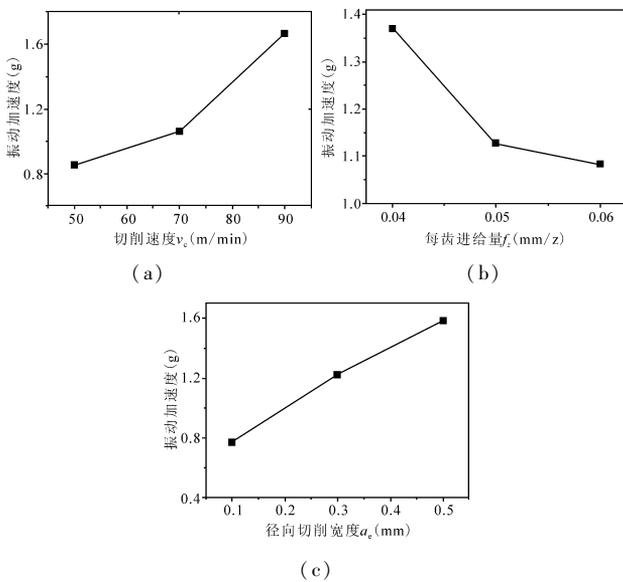


图6 切削振动(加速度)随铣削用量的变化

(3) 加工表面粗糙度分析

如图7所示,切削速度和径向切削宽度对加工表面粗糙度有显著影响,而每齿进给量对表面粗糙度的影响较小。联系图6a、图6c和图7a、图7c,加工表面粗糙度随铣削用量的变化,与切削振动随铣削用量变化趋势相同。加工过程中的切削振动会严重恶化加工表面粗糙度,切削振动增大,加工表面粗糙度也呈增大的趋势。因此,为了得到较好的加工表面粗糙度,应尽量将切削振动控制在较小程度。

(4) 切屑形态分析

超高强度钢的高速铣削加工属于一种硬切削过程,在该过程中产生的切屑为锯齿形,如图8所示,锯齿形切屑为硬态铣削过程中的明显特

征^[9-11]。锯齿形切屑的产生会同时引起切削力和切削振动的高频周期性变化,进而增大刀具加工过程中的磨损速率,缩短刀具寿命,并最终恶化加工表面质量^[12]。

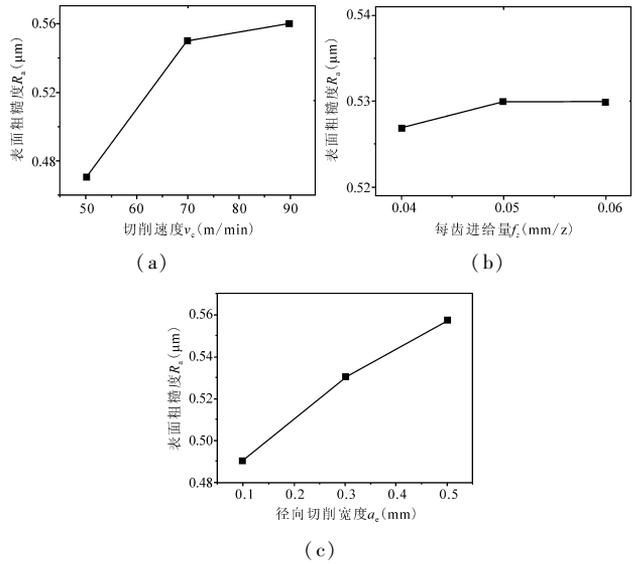


图7 加工表面粗糙度随切削用量的变化

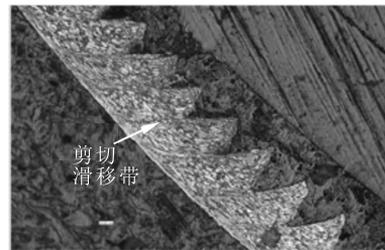


图8 30Cr3SiNiMoVA 高速铣削下的典型锯齿状切屑 ($v_c = 90m/min$)

如图9所示,不同切削参数下的正交试验中切屑形态基本一致,均为有规律的螺卷形切屑。切削加工过程中,排屑顺畅,表明在侧铣加工时,刀具和材料在切削过程中具有良好的断屑性能。但随着切削速度的提高,切屑的颜色逐渐由银白色转变为红褐色。当切削速度增加至90m/min以上时,切屑的颜色由红褐色转变为蓝紫色,表明此时的切削区温度很高,大量的热量经由切屑带走,从而在一定程度上避免了热量在切削加工区的积聚。

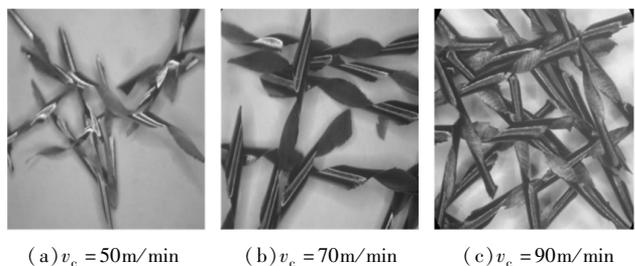


图9 不同切削速度下产生的切屑形态

4 结语

以切削力、切削振动、加工表面质量和切屑形态为研究对象,研究了 30Cr3SiNiMoVA 低合金超高强度钢的高速铣削加工表现和性能,总结并得到了材料切削性能在不同加工参数下的影响变化规律,得出了以下结论:

(1) 对于超高强度钢侧铣加工过程,采用 10mm 的轴向切深切削力相对较小。为了获得最好的加工质量,需要将切削合力和切削振动控制在较小范围内,从而需要采用较小的切削速度和径向切削宽度,并适当增大每齿进给量。

(2) 切削振动和加工表面粗糙度受切削用量影响的变化趋势相近;切削振动对加工表面粗糙度有较大影响,因此为了获得较好的加工表面粗糙度,需要选择能将切削振动控制在较小程度条件下的加工参数。

(3) 锯齿形与螺卷状切屑是超高强度钢高速铣削加工中的典型特征,随着切削速度的提高,切屑的颜色由银白色向红褐色、蓝紫色转变。

本文完成的 30Cr3SiNiMoVA 超高强度钢高速铣削机理研究工作,对后续超高强度钢工件“以铣代磨”工艺技术的应用将起到支撑作用。通过对刀具改进结构设计,提高刃口强度以及对切削加工参数的优化匹配,从而获得与磨削加工相当的表面粗糙度和加工精度等级。

参考文献

- [1] 厉勇,王春旭,田志凌,等. 一种低合金超高强度钢组织与性能的研究[J]. 钢铁,2008,43(5):75-79.
- [2] 干勇,田志凌,董瀚,等. 钢铁材料手册[M]. 北京:化学工业出版社,2009.
- [3] Ming Chen, Junli Li, Guoqiang Guo. An experimental and fem study on dry turning of rotor steel 26nicrmov145 using multilayer coated cemented carbide tool[J]. Machining Science and Technology: An International Journal, 2011, 15(2):243-261.
- [4] Haci Saglam, Faruk Unsacar, Suleyman Yaldiz. Investigation

of the effect of rake angle and approaching angle on main cutting force and tool tip temperature[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2006, 46(2):132-141.

- [5] Qinglong An, Changying Wang, Jinyang Xu, et al. Experimental investigation on hard milling of high strength steel using PVD-AlTiN coated cemented carbide tool[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2014, 43(3):94-101.
- [6] 营国福,陈燕,傅玉灿,等. Invar36 合金端面铣削力研究[J]. 南京航空航天大学学报,2014,46(5):713-719.
- [7] Y Altintas, M Eynian, H Onozuka. Identification of dynamic cutting force coefficients and chatter stability with process damping [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2008, 57(1):371-374.
- [8] 潘靖宇,徐九华,傅玉灿,等. 钛合金 TC9 正交车铣加工表面粗糙度研究[J]. 南京航空航天大学学报,2014,46(5):720-725.
- [9] 刘志兵,王西彬,杨洪建. 陶瓷刀具干铣削超高强度钢的试验研究[J]. 工具技术,2003,37(5):7-9.
- [10] 王锐,刘佳,王西彬,等. 硬质合金及涂层刀具干铣削高强度钢的磨破机理研究[J]. 工具技术,2005,39(8):25-29.
- [11] Barry J, Byrne G. The mechanisms of chip formation in machining hardened steels[J]. Journal of Engineering, 2002, 124:528-535.
- [12] Halil Callskan, Cahit Kurbanoğ lub, Peter Panjan, et al. Wear behavior and cutting performance of nanostructured hard coatings on cemented carbide cutting tools in hard milling[J]. Tribology International, 2013, 62(6):215-222.
- 第一作者:沈毅,高级工程师,上海航天精密机械研究所,201600 上海市
First Author: Shen Yi, Senior Engineer, Shanghai Spaceflight Precision Machinery Institute, Shanghai 201600, China
- 通信作者:郭国强,博士,高级工程师,上海航天精密机械研究所,201600 上海市
Corresponding Author: Guo Guoqiang, Doctor, Senior Engineer, Shanghai Spaceflight Precision Machinery Institute, Shanghai 201600, China