表面质量控制及检测

300M超高强钢车削加工表面质量

张慧萍，张校雷，张洪霞，任毅，刘国梁

（哈尔滨理工大学 机械动力工程学院，哈尔滨 150080）

摘　要：目的　研究切削参数对300M超高强度钢加工表面质量的影响。**方法**　选用硬质合金刀具车削加工300M超高强度钢，研究切削参数对表面加工硬化、残余应力及表面粗糙度的影响。通过HXD-1000显微硬度检测仪、X-350A型X射线应力测试系统、TR240表面粗糙度测量仪对实验过程进行检测分析。通过单因素试验研究影响表面粗糙度的主次因素，并通过正交试验，以进给量f、切削速度v、刀尖圆弧半径r_ε、背吃刀量a_p为变量建立表面粗糙度的预测模型。**结果**　背吃刀量a_p=0.2 mm，切削速度v为60～120 m/min，进给量f为0.1～0.25 mm/r时，300M钢经切削加工后，维氏硬度在467～550HV范围内变化。切削速度从60 m/min增大至200 m/min时，表面残余应力从压应力−59.13 MPa变为拉应力257.33 MPa，次表层残余应力的最大残余压应力从−147.46 MPa增大到−422.65 MPa，并且层深至50 μm左右处，工件材料的加工变质层结束。**结论**　表面硬度随着进给量和切削速度的增大而减小，并且越往里层，硬度越低，直至达到基体的硬度。影响表面粗糙度的最主要因素为进给量，其次是刀尖圆弧半径，再次为切削速度，背吃刀量对表面粗糙度的影响最小。建立的表面粗糙度预测模型通过了试验验证，具有很高的加工精度。

关键词：300M超高强钢；表面加工硬化；残余应力；硬度；表面粗糙度；预测模型

中图分类号：TG51　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1001-3660(2016)02-0181-07

DOI：10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2016.02.029

Surface Quality of High-speed Turning 300M Ultrahigh Strength Steel

ZHANG Hui-ping, ZHANG Xiao-lei, ZHANG Hong-xia, REN Yi, LIU Guo-liang

(School of Mechanical and Power Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

ABSTRACT: Objective To study the influence of cutting parameters on the processed surface quality of 300M ultrahigh strength steel. **Methods** Carbide tool was selected for the turning processing of 300M ultrahigh strength steel, then to study the influence of cutting parameters on surface hardening, residual stress and surface roughness. HXD-1000 micro-hardness measuring instrument,

收稿日期：2015-12-01；**修订日期：**2016-01-03

Received：2015-12-01；**Revised**：2016-01-03

基金项目：国家自然科学基金(51105118,51575145)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China(51105118, 51575145)

作者简介：张慧萍(1973—)，女，博士，副教授，主要从事高速切削及难加工材料切削加工技术方面的研究。

Biography: ZHANG Hui-ping(1973—), Male, Ph. D., Associate professor, Research focus: high speed cutting and the machining technology of difficult-to-machining materials.

X-ray stress test system and the surface roughness measuring instrument TR240 were used for measuring and analyzing the experimental process. Through single factor experiment, the primary and secondary factors affecting surface roughness were studied. Through orthogonal experiment, with feed f, cutting speed v, tip arc radius r_ε, turning back a_p as variables, the forecast model of surface roughness was established. **Results** When the cutting parameters were turning back $a_p = 0.2$ mm, cutting speed $v = 60 \sim 120$ m/min, feed $f = 0.1 \sim 0.25$ mm/r, after machining, the Vickers hardness of 300 M steel changed in the range of 467HV ~ 550HV. When the cutting speed increased from 60 m/min to 120 m/min, the surface residual compressive stress increased from −59.13 MPa to 257.33 MPa, the subsurface residual compressive stress increased from −147.46 MPa to −422.65 MPa, and the deepest affected layer of workpiece materials was about 50 microns. **Conclusion** With increasing feeding and cutting speed, the surface hardness decreased and the farther from the surface layer, the lower the hardness until reaching the hardness of the matrix. The main influencing factor of surface roughness was feeding, followed by the tip arc radius and cutting speed, while the depth of cut had the minimal influence on surface roughness. The surface roughness prediction model established in this paper passed the experimental verification, and had very high machining accuracy.

KEY WORDS: 300M ultrahigh strength steel; surface hardening; residual stress; hardness; surface roughness; prediction model

300M 钢是国内外航空领域广泛使用的中碳低合金超高强度钢 40CrNi2Si2MoVA,为 40CrNiMoVA 钢的改进型,由于提高了硅和镍的含量,增加了钒元素,因此淬透性很高,是目前飞机结构中使用强度最高的钢种,被广泛用于制造飞机主起落架的外筒、活塞杆等重要承力构件[1],表面质量要求很高。表面加工硬化、表面残余应力、表面粗糙度是影响表面质量的三个重要因素[2],对其进行深入研究具有重要意义。

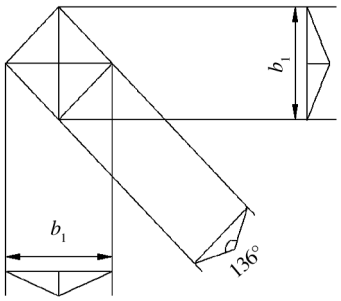
车削加工时,刀具与工件接触处及其附近部位会产生塑性变形,随之便不可避免地在工件表层产生残余应力。车削加工产生的残余应力不仅直接影响零件的加工精度等表面质量,而且影响零件尺寸的稳定性、疲劳强度、抗腐蚀能力等使用性能[3]。加工硬化是塑性变形和切削热综合作用的结果,加工表面的显微硬度越高,一般其耐磨性也越高,但在某些条件下,过多的冷作硬化使金属组织变得稀松,严重的可能导致裂纹出现和耐蚀性下降,使零件寿命和机械性能受到影响[4]。文中主要研究在不同切削条件下 300M 钢的表面质量问题,建立表面粗糙度的预测模型,揭示表面加工硬化和残余应力大小、性质以及表层微观结构的变化[5],进而揭示切削参数和加工表面质量之间的关系,并通过数据的整理和分析选出合适的参数,达到加工表面质量要求,从而提高表面质量和生产效率[6]。

1 表面加工硬化实验研究

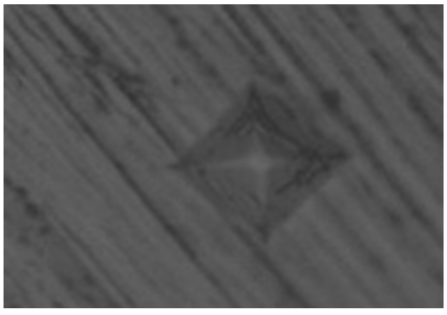
表面加工硬化是影响表面质量的一个重要因素。它是在机械加工过程中,工件表层金属受到切削力的作用,产生强烈的塑性变形,使金属的晶格严重扭曲,晶粒破碎、拉长和纤维化,从而阻碍金属进一步变形,使工件表面硬度提高,塑性降低。金属已加工表面最后的加工硬化是这种硬化、软化和相变作用的综合结果[7],通常零件寿命和机械性能都有可能受加工硬化的影响[8]。笔者通过实验手段研究切削速度、进给量对表面加工硬化的影响规律,并分析其成因。

1.1 测试原理

所用仪器为 CKA6150 数控车床和 HXD-1000 显微硬度检测仪。实验材料为航空难加工材料 300M 超高强度钢。如图 1 所示,利用显微镜测量压痕对角线的长度,显微镜放大倍数为 600 倍。根据计算公式



a 压痕几何模型



b 压痕SEM图像

图 1 显微硬度测试原理

Fig. 1 Micro-hardness measuring principle: a) indentation geometric model, b) indentation SEM image

得出被测点的显微硬度 HV:

$$HV=\frac{1854.4P}{d^2} \quad (1)$$

式中:d 为对角线长度(μm);P 为施加的载荷(mN)。

1.2　测试结果及分析

首先测试基体的硬度,得出基体的平均硬度约为467HV,再采用斜边法沿深度方向进行显微硬度测试,研究加工硬化层深度方向上的显微硬度分布规律。

图 2 为切削速度 v 为 60,100,150,200 m/min,进给量 f=0.1 mm/r,背吃刀量 a_p=0.2 mm 时,试样沿层深方向的显微硬度分布。可以看出,曲线大体呈下降趋势,即随着深度增加,靠近表面的最边缘显微硬度最大,从表面层往下,显微硬度逐渐降低,直至基体硬度。这是因为塑性变形逐渐减小,硬化程度随之逐渐减小。切削加工过程中,切屑带走大部分热量,只有少部分热量传入工件内部。从图 2 可以看出,切削加工 300M 钢时,加工硬化程度变化并不是很大。

图 3 为切削速度 v=100 m/min, 背吃刀量 a_p=

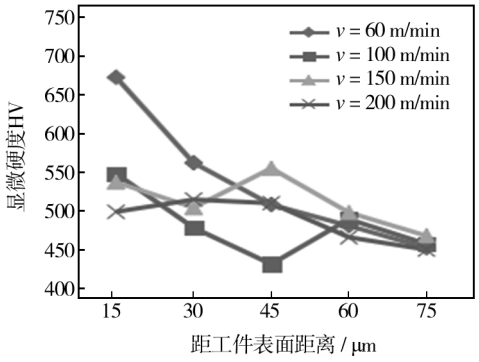


图 2　不同切削速度下显微硬度随层深的变化

Fig. 2 Curves of different cutting speed along with the layer depth

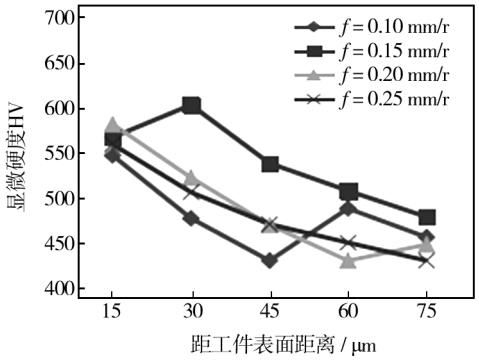


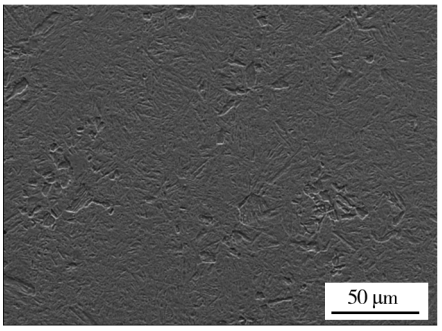
图 3　不同进给量下显微硬度随层深的变化

Fig. 3 Curves of different feed rate with the layer depth

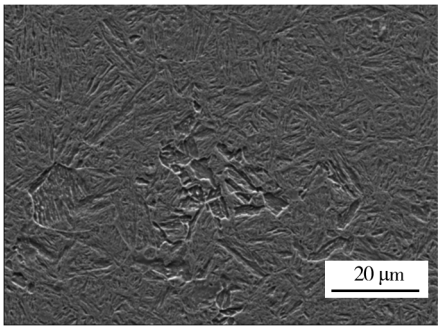
0.2 mm,进给量 f 为 0.1,0.15,0.2,0.25 mm/r 时,试样沿层深方向的显微硬度分布。在进给量 f=0.15 mm/r 时,距工件表面 30 μm 处的显微硬度比距工件表面 15 μm 处的显微硬度高。这可能是因为表层材料发生的热软化作用使表层组织发生了变化,从材料学角度考虑,表层材料的强度和硬度下降,塑性变形下降。在其他进给量时,变化呈常规趋势。

1.3　已加工表面表层组织

利用扫描电子显微镜(SEM)对表面形貌进行观察。图 4 为基体原有表面晶体组织形态,可见组织均由较细的板条状马氏体和少量片状马氏体组成。



a　500×

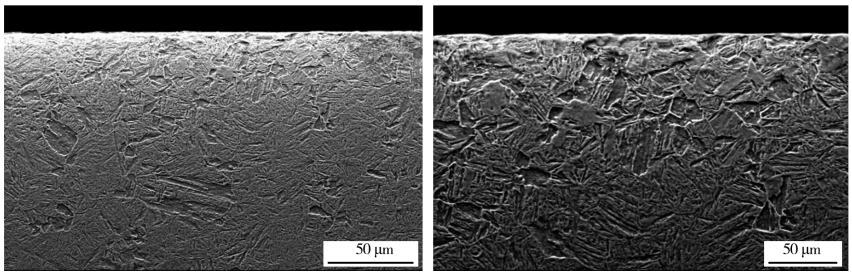


b　1000×

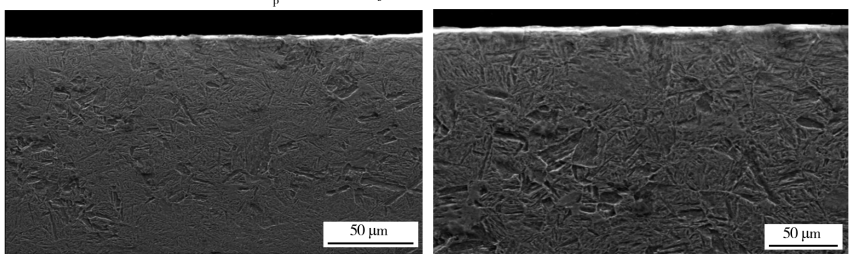
图 4　原基体表面形貌

Fig. 4 Surface morphology of the original substrate

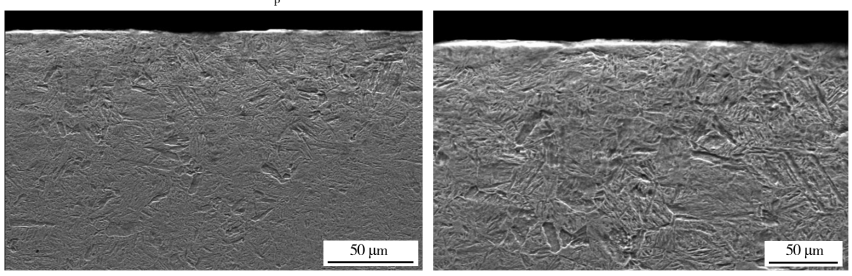
图 5 为 300M 钢切削加工后表层的 SEM 照片。进行观察的表面为垂直于进给方向的表面,该表面与切削刃在已加工表面上的运动方向相同,显示的是切削刃在切削过程中对工件材料表层金相组织造成的影响。对比图 5a 和 b 可见,速度的增加没有使晶粒扭曲变形。可能的原因是在进给方向的力变化不大,说明在较高的切削速度下,变质层会减小或者不形成变质层,这对提高表面完整性有利。对比图 5a 和 c 可知,同样由于进给方向的切削力变化不大,也没有达到相变温度,所以晶粒组织没有发生显著变化。



a a_p = 0.2 mm, f = 0.1 mm/r, v = 100 m/min



b a_p = 0.2 mm, f = 0.1 mm/r, v = 200 m/min



c a_p = 0.2 mm, f = 0.15 mm/r, v = 100 m/min

图 5 300M 钢切削加工后的表层显微组织(左图:500×;右图:1000×)

Fig. 5 SEM picture of the 300M steel machined surface microstructure

2 残余应力的测试及结果分析

残余应力的研究是工程界国内外学者的研究热点,对表面层和内部残余应力值的测量也一直是难点,测试方法更是结合了多学科。笔者将利用 X 射线衍射测试技术对 300M 钢进行测量,研究 300M 超高强钢在切削加工过程中,背吃刀量、切削速度、进给量对工件表面残余应力及其沿层深方向的大小和分布的影响,探索影响规律,分析残余应力的形成机理。

2.1 测试原理

测定残余应力采用 X 射线衍射法,根据布拉格定律[9—10]求得应力大小。布拉格定律为:

$$2d\sin\theta = n\lambda \tag{2}$$

式中:λ 为 X 射线波长,θ 为入射角,d 为晶面间距。

为了测得晶面间距与入射角之间的变化关系,应测量衍射角 2θ 与晶面间距的确定关系和材料弹性应变的变化规律。应力产生在材料中时,晶面间距也必然发生变化,2θ 角度随之改变,通过测量 2θ 角度可求得应力值 σ。当材料金相组织晶格常数确定时,推导出主应力 σ_1,σ_2 及方向角 α 关系为:

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_{\varphi+90} - \sigma_\varphi \cot^2\alpha}{1 - \cot^2\alpha} \tag{3}$$

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_{\varphi+90} - \sigma_\varphi \tan^2\alpha}{1 - \tan^2\alpha} \tag{4}$$

$$\alpha = \frac{1}{2}\arctan\frac{\sigma_\varphi + \sigma_{\varphi+90} - 2\sigma_{\varphi+45}}{\sigma_\varphi + \sigma_{\varphi+90}} \tag{5}$$

在实际测试时,往往采用 0°~45°进行 X 射线测试,即入射 X 射线与材料试样表面呈垂直和 45°的方向。设 φ=45°,则任意方向 $\varphi+\eta$ 的应力为:

$$\sigma_\varphi = \frac{E}{(1+v)[\sin^2(45+\eta) - \sin^2\eta]} \times \frac{d_{\varphi,45+\eta} - d_{\varphi,\eta}}{d_{\varphi,\eta}} \tag{6}$$

2.2 测试结果及分析

图 6 为不同切削速度下,在周向和径向上沿层深的残余应力分布曲线。图 6a 中,切削速度为 60 m/min 时,表面残余压应力为-59.13 MPa;切削速度增大至 100 m/min 时,压应力转化成拉应力;切削速度

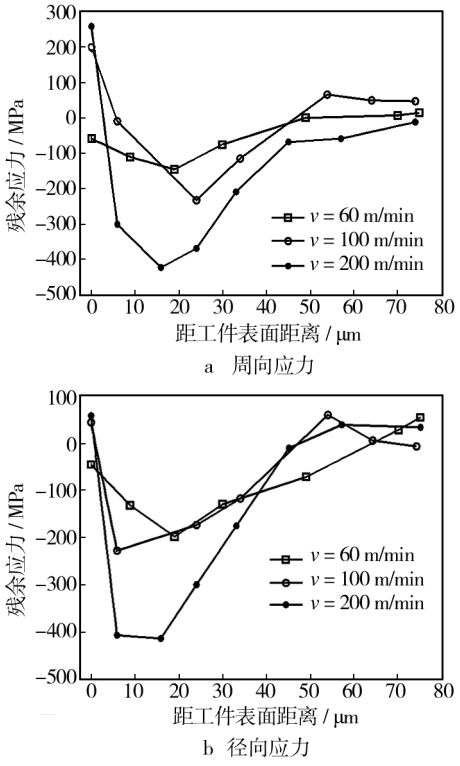
继续增大,则表面拉应力逐渐增大,至 200 m/min 时达到 257.33 MPa。这是热应力作用的结果,且切削区域生成的热量升高,切削力减小,塑性变形小,所以在表面形成了残余拉应力[11],而 $v=60$ m/min 时,切削温度不高,热应力没有占主导地位,所以表面呈残余压应力。在次表层,随着切削速度的增加,产生的最大残余压应力从 -147.46 MPa 增大到 -422.65 MPa。这是因为虽然单位切削力减小,但刀具刃倾角对被切削加工金属层的挤压和延展作用使得摩擦力增大,残余压应力随之增大。层深至 50 μm 左右,工件材料的加工变质层结束。

由图 6b 可知,表层残余径向应力有与图 6a 同样的变化规律,也是随着切削速度的提高,从残余压应力变化到残余拉应力,但径向应力的大小和影响深度与周向应力的差别很大,表面残余径向应力从-44.60 MPa 增大到 58.09 MPa,其值比周向应力值小很多。这是因为径向为车削加工的进给方向,表面产生的大量切削热被切屑带走,传入工件内部的较少,所以残余径向拉应力值较小。不同切削速度下的内部最大压应力在-98.76 ~ -414.20 MPa。从表面到距工件表面 18 μm 的范围内,残余应力值变化很大,说明其塑性变形也最为严重[12]。层深至 60 μm 时,残余应力曲线趋于平缓,此处塑性变形结束。

图 7 为背吃刀量 $a_p=0.2$ mm、切削速度 $v=100$ m/min、不同进给量下,在周向和径向上沿层深的残余应力分布曲线。由图 7a 可知,随着进给量 f 从 0.1 mm/r 增大 0.2 mm/r,表面残余应力一直表现为拉应力。因为切削力增大,塑性变形面积增大,而此时热应力引起的残余拉应力占优势,所以工件表面呈现拉应力。次表层残余应力值迅速转化为压应力,并达到压应力峰值,随着层深的增大,压应力值再慢慢减小,直至达到基体原有的应力值。残余应力塑性变形层厚度约为 70 μm。

图 7b 中,在进给方向上随着进给力的增加,表面残余应力从-44.07 MPa 增大到 316.85 MPa,即从压应力转化为拉应力并逐渐增大。这是因为切削力随着进给量增加而增大,此时切削温度也增大,但尚未达到相变温度,所以表层残余应力呈增大趋势。

到目前为止,学术界对于背吃刀量对表面残余应力的影响尚无统一定论。由于背吃刀量引起的弹性变形较小,因此对切削力引起塑性变形的影响是现在讨论的焦点。文献[13]中认为,背吃刀量增加,切削力随之增大,但刀刃在单位长度上对切削力的影响变

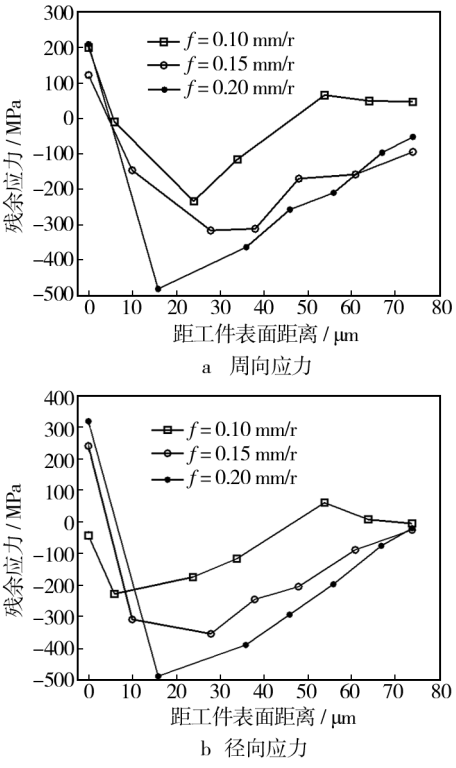


a　周向应力

b　径向应力

图 6　切削速度对残余应力层深分布的影响

Fig. 6 Influence of cutting speed on layer depth distribution of residual stress: a) circumferential stress, b) radial stress



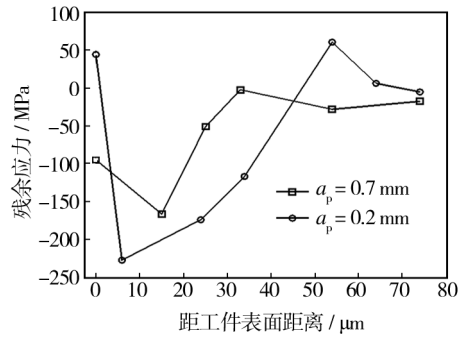
a　周向应力

b　径向应力

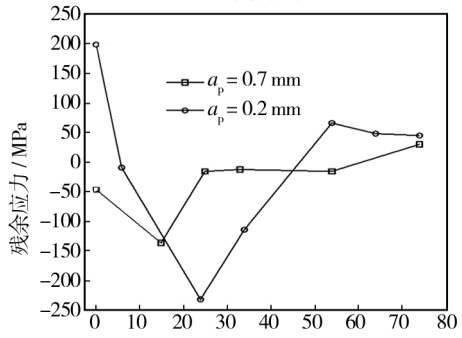
图 7　进给量对残余应力层深分布的影响

Fig. 7 Influence of feed rate on layer depth distribution of residual stress

化不大,所以对塑性变形影响较小。文献[14]和[15]中认为,背吃刀量增加,工件表面金属的切削面积及体积随之增大,从而切削刃前面的塑性变形范围和程度增加。图8为进给量f=0.1 mm/r,切削速度v=100 m/min,背吃刀量分别为0.2,0.7 mm时的残余应力。可见随着背吃刀量的增加,表面的残余应力由拉应力转变成压应力。在本实验中可以确定,增大背吃刀量可以使表面出现残余压应力,有利于形成较好的表面质量。随着背吃刀量的增加,周向最大残余压应力峰值深度由23 μm减小到15 μm,而径向变化为5~15 μm。



a 周向应力



b 径向应力

图8 背吃刀量对残余应力层深分布的影响

Fig. 8 Influence of depth of cut on layer depth distribution of residual stress

3 表面粗糙度模型的建立

表面粗糙度是评价产品质量的重要指标之一,更是精加工零件必要的技术要求。影响表面粗糙度的因素很多,如切削参数变量、刀具变量及工件变量等,而且事实上,这些因素对粗糙度大小具有交互影响作用。笔者通过单因素试验研究进给量、切削速度、背吃刀量及刀尖圆弧半径对表面粗糙度的影响,表面粗糙度的检测采用TR240表面粗糙度测量仪。分析结果显示,影响表面粗糙度的最主要因素为进给量f,其次是刀尖圆弧半径r_ε,再次为切削速度v,背吃刀量a_p对表面粗糙度的影响最小。

参照文献[16]中建立表面粗糙度模型的方法,采用四因素四水平正交试验设计,根据车削实际需要,以f,v,r_ε,a_p为变量建立表面粗糙度的预测模型,表面粗糙度Ra和各切削参数之间存在着复杂的指数关系,表示为:

$$Ra = C \cdot v^k \cdot a_p^m \cdot r_\varepsilon^n \cdot f^l \tag{7}$$

式中:C为决定于加工材料、切削条件的修正系数;k,m,n,l为待定的各变量指数。

当切削速度v为60~90 m/min,a_p为0.2~0.5 mm,f为0.1~0.2 mm/r时,通过建立多元线性回归方程,带入正交试验数值,并运用Matlab软件中Regress函数剔除异常点,进行回归分析,得到表面粗糙度预测模型(见(8)式),并对模型进行F检验验证。

$$Ra_1 = 32.5312 v^{-0.2845} a_p^{-0.0728} r_\varepsilon^{-0.6102} f^{1.4832} \tag{8}$$

由经验公式的方差分析(表1)得出,F统计量为23.9764。给定显著水平α=0.05,并根据F分布表查得$F(p, n-p-1) = F_{0.05}(4, 11) = 3.36$。模型的$F$值大于3.36,所以经验模型是显著的。

表1 表面粗糙度预测模型方差分析

Tab. 1 ANOVA table for the surface roughness prediction model

方差来源	平方和(SS)	自由度(df)	均方(MS)	统计量 F 值
因素 Ra_2	0.7702	4	0.1926	36.5793
残差	0.0526	10	0.0053	
总计	0.8229	14		

4 结论

1) 表面硬度随着进给量和切削速度的增大而减小,并且越往里层,硬度越低,最后直至基体的硬度。300M钢切削加工后的表面形貌分析显示,切削速度和进给量对表面形貌没有太大影响,晶粒没有发生扭曲变形。

2) 建立了表面粗糙度的预测模型,该模型通过了试验验证,具有很高的加工精度,为生产加工过程中工艺参数的选择提供了有力的依据。

参考文献

[1] 张慧萍,王崇勋,杜旭. 飞机起落架用300M钢超高强钢发展及研究现状[J]. 哈尔滨理工大学学报,2011(6):73—76.

ZHANG Hui-ping, WANG Chong-xun, DU Xu. Aircraft Landing Gear with the Development of 300M Ultra High

Strength Steel and Research[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology,2011(6):73—76.

[2] DEVILLEZ A,COZ G Le,DOMINIAK S,et al. Drymachining of Inconel 718, Workpiece Surface Integrity[J]. Journal of Materials Processing Technology,2011,211:1590—1598.

[3] GUILLEMOT N,MAWUSSI B K,LARTIGUE C. A First Approach to Characterize the Surface Integrity Generated by Ball-end Finishing Milling[J]. Int J Adv Manuf Technol, 2013(64):269—279.

[4] KING J E, KNOTT J F. The Effects of Crack Length and Shape on the Fracture Toughness of a High Strength Steel 300M[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1980,28(3):191—200.

[5] M′SAOUBI R,CHANGEUX B,LEBRUN J L,et al. Residual Stress Analysis in Orthogonal Machining of Standard and Resulfurized AISI 316L Steels[J]. Journal of Materials Processing Technology,1999(96):225—233.

[6] 米谷茂(日). 残余应力的产生和对策[M]. 朱荆璞,邵会孟,译. 北京:机械工业出版社,1983.
MI Gu-mao. The Generation and Countermeasures of Residual Stress[M]. ZHU Jing-pu, SHAO Hui-meng, translation. Beijing:Mechanical Industry Press,1983.

[7] MMBRELLO Domenico. Investigation of Surface Integrity in Dry Machining of Inconel 718[J]. Int J Adv Manuf Technol,2013(7):23—26.

[8] COKER S A,SHIN Y C. In Process Control of Surface Roughness due to Tool Wear Using a New Ultrasonic System[J]. Int J Mach Tools Manuf,1996(36):411—422.

[9] 张定铨,何家文. 材料中残余应力的 X 射线衍射分析和作用[M]. 西安:西安交通大学出版社,1999.
ZHANG Ding-cuo, HE Jia-wen. X-ray Diffraction Analysis and Function[M]. Xi′an:Xi′an Jiaotong University Press, 1999.

[10] 袁发荣,伍尚礼. 残余应力测试与计算[M]. 长沙:湖南大学出版社,1987.
YUAN Fa-rong,WU Shang-li. Test and Calculation of the Residual Stress[M]. Changsha:Hunan University Press,1987.

[11] OKUSHIRNA K,KAKINO I. The Residual Stress Produced by Melal Cutting[J]. Annals of the CIRP,1971,21(1): 13—14.

[12] OUTEIRO J C,DIAS A M,JAWAHIR I S. On the Effects of Residual Stresses Induced by Coated and Uncoated Cutting Tools with Finite Edge Radii in Turning Operations[J]. Annals of the CIRP,2006,55(1):167—172.

[13] 韩容第. 金属切削原理与刀具[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1998:7—9.
HAN Rong-di. Metals Slices to Pare Principle and Knife[M]. Harbin:Harbin Institute of Technology Press,1998:7—9.

[14] 方傅武. 金属冷热加工的残余应力[M]. 北京:高等教育出版社,1991.
FANG Fu-wu. The Residual Stress of Metal Hot and Cold Processing[M]. Beijing:Higher Education Press,1991.

[15] OKUSHIRNA K,KAKINO I. The Residual Stress Produced by Metal Cutting[J]. Annals of the CIRP,1971,21(1): 13—14.

[16] 赵显嵩. TC4 合金高速切削的表面粗糙度与切削力实验研究[D]. 大连:大连理工大学,2013.
ZHAO Xian-song. Experimental Study on Surface Roughness and Cutting Force of High Speed Cutting TC4 Titanium Alloy[D]. Dalian:Dalian University of Technology,2013.

(上接第 138 页)

[15] MEGUID S A, KLAIR M S. An Examination of the Relevance of Co-indentation Studies to Incomplete Coverage in Shot-peening Using the Finite-element Method[J]. J Mechanical Working Technology,1985,11(1):87—104.

[16] MEGUID S A,KLAIR M S. Elasto-pastic Co-indentation Analysis of a Bounded Solid Using Finite Element Method [J]. Int J Mech Sci,1985,27(3):157—168.

[17] GARIEPY A, LAROSE S, PERRON C. Shot Peening and Peen Forming Finite Element Modeling Towards a Quantitative Method[J]. International Journal of Solids and Structures,2011,48:2859—2877.

[18] BHUVARAGHAN B, SRINIVASAN S, MAFFEO B, et al. Shot Peening Simulation Using Discrete and Finite Element Methods[J]. Advances in Engineering Software,2010,41: 1266—1276.

[19] JOHNSON G R,COOK W H. A Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strain, High Strain Rates and High Temperatures[J]. The Hague Nether Lands, 1983:541—547.

[20] 周霞,赵昌美,李利,等. 基于 SHPB 实验的挤压 AZ91D 镁合金动态力学行为数值模拟[J]. 中国有色金属学报, 2014,24(8):1968—1975.
ZHOU Xia,ZHAO Chang-mei,LI Li,et al. Numerical Simulation of Dynamic Behavior of Extruded AZ91D Magnesium Alloy Based on SHPB Experiment[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals,2014,24(8):1968—1975.

[21] HAN K,OWEN D R J,PERIC D. Combined finite/Discrete Element and Explicit/Implicit Simulations of Peening Forming Process[J]. Engineering Computations,2002,19(1): 92—118.

[22] MIAO H Y,LAROSE S,PERRON C,et al. On the Potential Applications of 3D Random Finite Element Model for the Simulation of Shot Peening [J]. Advances in Engineering Software,2009(40):1023—1038.