

表面质量控制及检测

Al6061 铣削精加工表层残余应力分布试验研究

龚军振, 马泳涛, 吴政协, 安乐乐

(郑州大学 机械工程学院, 郑州 450001)

摘要: **目的** 探索铣削精加工工艺参数对 Al6061 工件表层残余应力的影响, 提高零件的疲劳寿命。**方法** 设计研究了只改变其中一个参数, 其他参数不变的情况下, 铣削精加工 Al6061 工件表层残余应力的分布情况。**结果** 在平行于铣削进给方向 (x direction) 和垂直于铣削进给方向 (y direction), 所得表层残余应力均为压应力。随主轴转速的增大, 所得工件表面残余压应力减小, 残余应力最大值深度增加。当改变每齿进给时, 随着每齿进给的增加, 工件表面残余压应力减小, 残余应力最大值出现在表面; 随着铣削深度的增加, 工件表面残余压应力减小, 对残余应力最大值影响不大; 随着铣削宽度的增加, 工件表面残余压应力先减小后增大, 残余应力最大值从表面向深度层移动。当主轴转速为 10 000 r/min、每齿进给为 0.015 mm、铣削深度为 0.5 mm、铣削宽度为 11.8 mm 时, 对表层残余应力的影响最大, 影响层深约 245 μm , 残余压应力最大值为 147.67 MPa, 其峰值深度约为 80 μm 。**结论** Al6061 铣削精加工时, 如果要获得较大的表面残余压应力, 应该选择主轴转速、每齿进给、铣削深度、铣削宽度都较小。在切深方向, 如果要获得较大残余压应力, 应该选择较大的主轴转速和铣削宽度、较小的每齿进给、合适的铣削深度。

关键词: Al6061; 铣削精加工; 残余应力; 峰值; 应力分布; 工艺参数

中图分类号: TG54 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)04-0281-05

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.04.041

Test of Surface Residual Stress Distribution in Al6061 after Fine Milling

GONG Jun-zhen, MA Yong-tao, WU Zheng-xie, AN Le-le

(School of Mechanical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

ABSTRACT: The work aims to extend fatigue life of parts by exploring effects of milling finishing process parameters on Al6061 surface residual stress of Al6061 workpiece. With only one parameter changed while other parameters unchanged, the distribution of surface residual stress on Al6061 workpiece receiving milling finishing was studied. The surface residual stress was mainly compressive stress in the directions parallel to milling feed direction (x direction) and perpendicular to milling feed direction (y direction). As spindle speed increased, surface residual compressive stress decreased, and the maximum depth of residual stress increased. As feed per tooth changed, the surface residual compressive stress of workpiece decreased as feed per tooth increase, and the maximum residual stress appeared on the surface. With the increase of milling depth, the surface residual compressive stress decreased, the maximum residual stress was slightly affected. With the increase of milling width, the surface residual compressive stress first decreased and then increased, the maximum residual stress moved from the surface to deep lay-

收稿日期: 2017-12-09; 修订日期: 2018-03-09

Received: 2017-12-09; Revised: 2018-03-09

基金项目: 河南省高等学校重点科研项目 (15A460030); 国家自然科学基金 (51650110502)

Fund: Supported by the Education Bureau of Henan Province with Grant Number (15A460030) and NSF of China (51650110502)

作者简介: 龚军振 (1989—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为抗疲劳制造。

Biography: GONG Jun-zhen (1989—), Male, Master student, Research focus: anti-fatigue manufacturing.

通讯作者: 马泳涛 (1975—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为抗疲劳制造。

Corresponding author: MA Yong-tao (1975—), Male, Doctor, Lecturer, Research focus: anti-fatigue manufacturing.

er. Provided with spindle speed of 10 000 r/min, feed per tooth of 0.015 mm, milling depth of 0.5 mm and milling width of 11.8 mm, the surface residual stress was affected profoundly, depth of affected layer was about 245 μm , the maximum compressive residual stress was 147.67 MPa, and peak depth was about 80 μm . In case of Al6061 finish milling, in order to obtain higher surface residual compressive stress, lower spindle speed, feed per tooth, milling depth and milling width shall be selected. In the direction of cutting depth, in order to obtain higher surface residual compressive stress, higher spindle speed and milling width, lower feed per tooth and appropriate milling depth shall be selected.

KEY WORDS: Al6061; milling finishing; residual stress; peak value; distribution conditions; process parameters

Al6061 是应用最广泛的有色金属材料之一。此材料经过热处理预拉伸工艺制造的高品质铝合金产品,具有良好的加工性能、耐腐蚀性能,且密度小、强度高。铝合金表面的终加工一般采用非磨削方法,在实际应用中一般以铣削精加工作为最终加工手段。从已有研究基础来看,机加工工艺对表层残余应力的分布有较大影响,但是如何通过机加工在铝合金表层引入残余应力,并对引入的残余应力进行控制,已是当前研究的热点问题之一。机加工工艺对工件各部位的影响比较大^[1-2],尤其是加工后工件表层残余应力的分布,直接影响零件的使用寿命,如何通过铣削精加工的方式控制表层残余应力的引入显得尤其重要。Lajczok M. R.^[3]和 K. H. Fuh^[4]相继提出采用有限元模型模拟分析铣削过程,在此基础上, Olivier Desmaison^[5]采用 3D 软件仿真的方法说明了铣削工艺对表层残余应力分布的影响。Changfeng Yao^[6]通过实验方法控制冷却条件、刀具前角、切削参数来研究工件表面残余应力的分布,优化切削参数。Y. E. Li 等人^[7]采用实验方法说明了铣削对工件表面残余应力的影响,并得出残余应力呈梯度分布,残余应力和微观三维表面无关的结论。上海交通大学孙嘉继^[8]对 6061 铝合金薄壁件进行铣削加工试验研究,考虑表面残余应力对薄壁件的影响,对试验参数进行了优化,得到了薄壁件最优的参数。浙江大学王立涛^[9]以给定的刀具特性和工件材料为对象,建立了表面残余应力与铣削参数的关系式,并采用有限元方法对加工过程进行模拟。上海大学张庆阳^[10]对 6061 铝合金高速铣削过程中的表面残余应力场和温度场进行了研究,对表面残余应力形成机理进行了分析。

近几年的研究大都停留在工件表面,而对工件表面残余应力的研究已不能全面反映其对零件寿命的影响。相关研究表明,深度层残余应力的分布状态对于零件服役条件下的疲劳寿命有直接的影响。当前对 Al6061 铣削精加工控制引入表层深度残余应力分布的研究开展较少。本文通过试验方法对 Al6061 工件铣削精加工后,对工件表面残余应力和深度方向残余应力进行检测,得到残余应力的分布规律,通过优化参数,从而控制引入残余应力,为机加工 Al6061 此

类零件引入残余应力的控制提供依据。

1 Al6061 铣削加工残余应力试验

1.1 试验条件

以表 1 所述实验条件进行试验及试验后进行残余应力的检测。

表 1 试验条件
Tab.1 Test condition

Test condition	Performance model	Parameter
Machine tool	Vertical NC machining center	Max. spindle speed 15 000 r/min
Tool	Four tooth carbide integral end milling cutter	Diameter 12 mm, Helix angle 30°, Rake angle 7°, Relief angle 10°, Tool length 73 mm
Workpiece	Al6061	High 74 mm, Wide 110 mm, Length 50 mm
Milling method	Down milling	
Residual stress tester	Proto LXRD diffractometer, Electrolytic polishing stripping	Power 1200 W, Piezoelectric tube 30 kV, Tube current 25 mA

1.2 试验前工件处理

试件为图 1 所示的雁尾块,顶端是经过铣削加工处理过的表面,加工时的最小深度为 0.25 mm,大量实验证明铣削加工后的残余应力不受初始应力的影响。

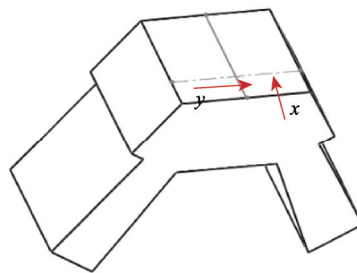


图 1 工件
Fig.1 Test specimens

将每块分左右两个区域,每个区域各自进行试验,试验完成后选取图中虚线上的点进行工件表层及深度层残余应力的测量。本文采用单因素变量试验方法进行实验,所有影响因素均在文中给出。

2 结果与分析

2.1 主轴转速对工件表层残余应力的影响

采用每齿进给 0.015 mm、铣削深度 0.5 mm、铣削宽度 11.8 mm,考察主轴 4000、6000、8000、10 000 r/min 时,工件表层残余应力的变化规律。图 2 是不同机床主轴转速对工件表层残余应力的影响曲线。图 2 显示,在铣削加工后,工件在平行进给方向的表面残余应力 σ_x 、垂直于进给方向的残余应力 σ_y 均为残余压应力。在平行于进给方向的工件表面残余压应力随主轴转速的增大而减小。主轴转速为 4000 r/min 时,工件表面残余应力 σ_x 约为 -112.67 MPa; 主轴转速为 10 000 r/min 时,工件表面残余应力 σ_x 约为 -87.75 MPa。在垂直于进给方向的工件表面残余应力随主轴转速的增加变化不大,在 -21.8~-0.19 MPa 之间。

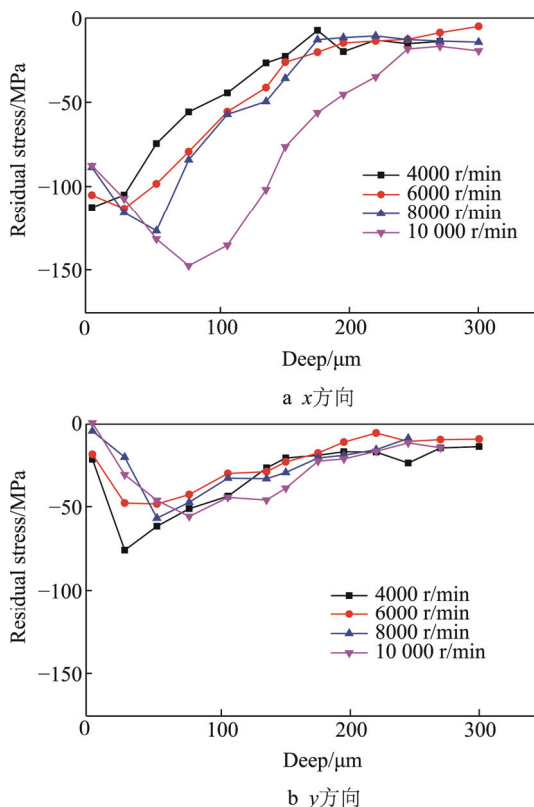


图 2 表层残余应力随主轴转速的变化曲线
Fig.2 Variation of surface residual stress with the spindle speed: a) x direction, b) y direction

沿着工件表面向里层观察曲线得到: σ_x 和 σ_y 都表现为残余压应力, 曲线图形中残余压应力先增大后减小。图 2a (x direction) 中, 随着主轴转速的提高,

工件残余应力的最大值距表面的深度逐渐增加; 当主轴转速为 10 000 r/min 时, 工件残余应力值最大, 距表面的深度约为 80 μm , 其值为 -147.67 MPa。铣削加工时, 在 4000、6000、8000 r/min 主轴转速下, 对工件残余应力的影响层深度为 195 μm 左右, 之后应力值达到平衡; 主轴转速为 10 000 r/min 时, 对工件残余应力的影响层深度为 245 μm , 之后应力值达到平衡。图 2b (y direction) 中残余应力变化不大。原因是随着机床主轴转速的增加, 铣削速度和进给速度也增加, 切屑流出的速度相应地增加, 铣削时传入工件的热随主轴转速的增加而减少, 热塑性变形也相应地减小, 导致表面产生的残余压应力随主轴转速的增加而减小^[11-13]。随着主轴转速的增加, 在此主轴范围内, 铣削力增加, 导致工件表层的塑性变形深度增加。由图 2a (x direction) 可以看出, 主轴转速为 4000~10 000 r/min 时, 残余应力影响的最大深度越来越大; 机床主轴转速在 10 000 r/min 以上时需要进一步研究。由图 2b (y direction) 可知, 工件残余应力变化不大, 这是由于 Al6061 是经过热处理预拉伸工艺生产的, 其纤维组织在两个测量方向是不同的。由此可看出, 铣削加工能引入及改变工件已有表层残余应力的分布。当主轴转速为 10 000 r/min、每齿进给为 0.015 mm、铣削深度为 0.5 mm、铣削宽度为 11.8 mm 时, 所产生的残余应力最理想。

2.2 每齿进给对工件表层残余应力的影响

采用主轴转速 10 000 r/min、铣削深度 0.5 mm、铣削宽度 11.8 mm, 考察每齿进给 0.007、0.009、0.011、0.013 mm 时, 工件表层残余应力的变化规律。图 3 是不同每齿进给量对工件表层残余应力的影响曲线。可知铣削加工后, 在工件表面, 随着每齿进给的增加, 工件残余压应力 σ_x 越来越小, 残余压应力最大值出现在表面。当每齿进给为 0.007 mm 时, 工件表面残余应力为 -96.05 MPa; 当每齿进给为 0.013 mm 时, 工件表面残余应力为 -69.21 MPa。沿工件表面向深度层, 残余压应力随距表面深度的增加, 残余应力越来越小, 在 50 μm 之后, 残余应力基本趋于平衡。每齿进给的增加对 σ_y 影响不大。原因是随每齿进给的增大, 单位时间内, 材料切除增多, 刀具与工件之间的摩擦增大, 导致铣削力增大, 产生的热增多, 由此引起的塑性凸出效应增大, 产生的残余拉应力增加, 而此时塑性变形与挤光效应产生的残余压应力仍占据主导地位^[14-16]。从图 3 也可以看出, 综合表现仍为残余压应力。随每齿进给的减小, 铣刀单位面积覆盖的次数有所增加, 导致所产生的挤光效应比较显著, 使其表面残余压应力也增加, 这也导致残余压应力最大值出现在表面。当每齿进给为 0.007 mm、主轴转速为 10 000 r/min、切深为 0.5 mm、切宽为 11.8 mm 时,

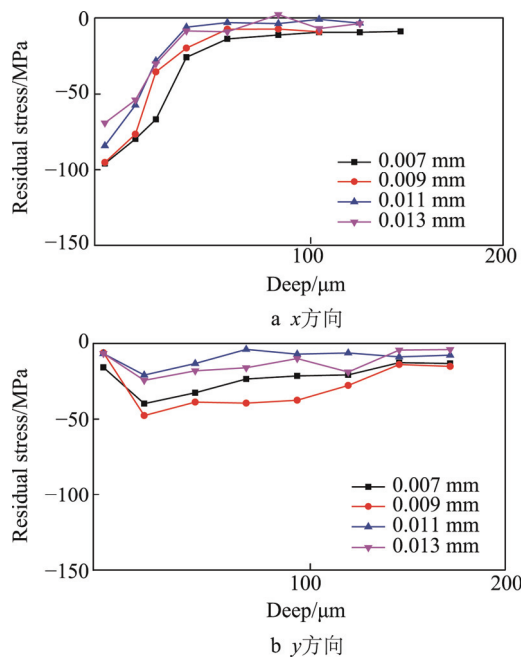


图3 表层残余应力随每齿进给的变化曲线

Fig.3 Variation of surface residual stress with the feed per tooth: a) x direction, b) y direction

所产生的残余应力最理想, 最大值出现在表面, 为 -96.05 MPa 。

2.3 铣削深度对工件表层残余应力的影响

采用主轴转速为 $10\,000 \text{ r/min}$ 、每齿进给为 0.015 mm 、铣削宽度为 11.8 mm , 考察铣削深度为 0.25 、 0.5 、 0.6 、 0.7 、 0.8 mm 时, 工件表层残余应力的变化规律。图4是不同铣削深度对工件表层残余应力的影响曲线。可知铣削加工后, 在工件表面, 工件在平行进给方向的表面残余应力 σ_x 和垂直于进给方向的残余应力 σ_y 均为残余压应力。残余压应力 σ_x 随铣削深度的增大而减小, 当铣削深度从 0.25 mm 增加到 0.8 mm 时, σ_x 从 86.01 MPa 下降到 66.62 MPa ; 残余应力 σ_y 随铣削深度的增加变化不大。沿工件表面深度层, 工件残余应力 σ_x 和 σ_y 都为压应力。随层深度的增加, σ_x 和 σ_y 都先增大后减少。 σ_x 在层深大约 $20 \mu\text{m}$ 处达到工件残余压应力的峰值, 在 $20\sim 95 \mu\text{m}$ 范围内, 残余应力的变化梯度最大, 工件残余应力深度到达 $95 \mu\text{m}$ 之后, 残余压应力 σ_x 基本趋于平稳状态, 残余压应力 σ_y 随铣削深度的增加变化不大。因为其他因素确定的情况下, 随着铣削深度的增大, 单位时间内轴向铣削量增多, 铣削阻力增大, 轴向铣削力增大, 所引起的剪切塑性凸出效应越来越明显, 产生的残余拉应力越来越大, 而此时冷热塑性变形和挤光效应引起的工件表面残余压应力还占据主导地位, 所以随着铣削深度的增大, 工件表面的残余压应力有减小的趋势。当铣削深度为 0.25 mm 、主轴转速为 $10\,000 \text{ r/min}$ 、每齿进给为 0.015 mm 、铣削宽度为 11.8 mm 时, 所

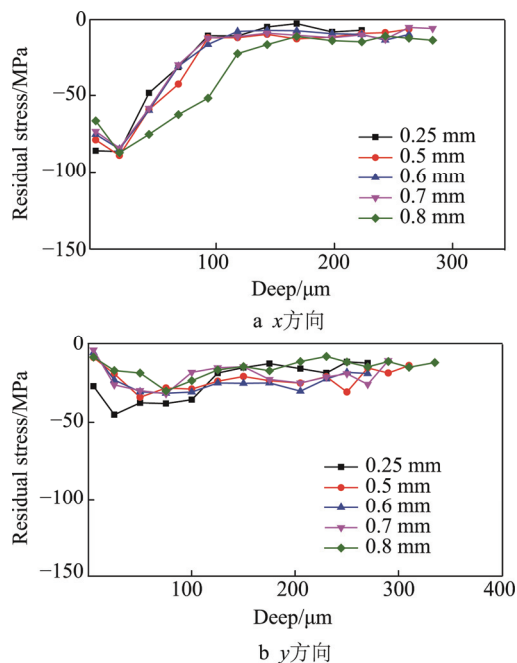


图4 表层残余应力随铣削深度的变化曲线

Fig.4 Variation of surface residual stress with the milling depth: a) x direction, b) y direction

产生的残余应力最理想。

2.4 铣削宽度对工件表层残余应力的影响

采用主轴转速为 $10\,000 \text{ r/min}$ 、每齿进给为 0.015 mm 、铣削深度为 0.5 mm , 考察铣削宽度为 1 、 3 、 11.8 mm 时, 工件表层残余应力的变化规律。图5是不同铣削宽度对工件表层残余应力的影响曲线。可知在工

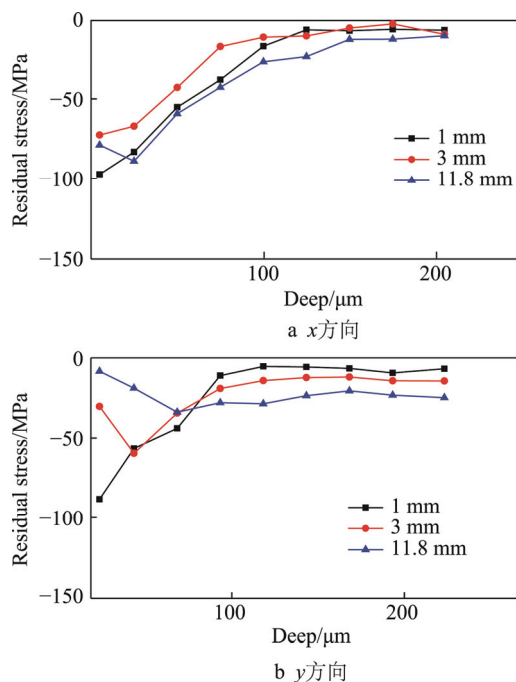


图5 表层残余应力随铣削宽度的变化曲线

Fig.5 Variation of surface residual stress with the milling width: a) x direction, b) y direction

件表面,随着铣削宽度的增加,工件 x 向表面残余压应力 σ_x 先减小后增大。当铣削宽度为 1 mm 时, σ_x 为 -97.4 MPa; 铣削宽度为 3 mm 时, σ_x 为 -72.65 MPa; 当铣削宽度为 11.8 mm 时, σ_x 为 -78.94 MPa。随着铣削宽度的增加,工件 y 向表面残余压应力减小。当铣削宽度为 1 mm 时, σ_y 为 -88.36 MPa, 与 σ_x 相差不大; 当铣削宽度为 3、11.8 时,对 y 向残余应力影响不大。沿工件表面深度层,随距表面深度的增大,残余应力 σ_x 、 σ_y 分别在 100、70 μm 处基本趋于平衡。原因是随着铣削宽度的减小,金属的去除率减小,使形成切屑的阻力减小,使塑性凸出效应及热塑性变形不明显,由后刀面产生的挤光效应处于主导地位,所以工件表现为残余压应力。图 5 显示, σ_x 、 σ_y 残余应力相差减小,这是由于随着切削宽度的减小,刀痕与刀痕之间的交叉增多,交叉处残余应力重新分布。当铣削宽度为 11.8 mm、主轴转速为 10 000 r/min、每齿进给为 0.015 mm、铣削深度为 0.5 mm 时,所产生的残余应力最理想。

3 结论

1) 在此种刀具参数下, Al6061 铣削精加工所得工件在平行于铣削进给方向 (x 方向) 和垂直于铣削进给方向 (y 方向) 的残余应力均为压应力。

2) 对 Al6061 铣削精加工后, 参数主轴转速、每齿进给、铣削深度对工件平行于铣削进给方向 (x 方向) 和垂直于铣削进给方向 (y 方向) 的残余应力影响较大, 对垂直于铣削进给方向 (y 方向) 的残余应力影响较小。但铣削宽度较小时, 工件平行于铣削进给方向 (x 方向) 和垂直于铣削进给方向 (y 方向) 的残余应力相差不大。

3) Al6061 铣削精加工表面残余压应力随着主轴转速、每齿进给、铣削深度的增加而减小, 随着铣削宽度的增加, 先减小后增大。工件残余应力最大值深度随主轴转速和铣削宽度的增大而增大, 随着每齿进给的增大而减小, 铣削深度对残余应力最大值深度影响不大。

参考文献:

- [1] MA J W, WANG F J, JIA Z Y, et al. Machining Parameter Optimization in High-speed Milling for Inconel 718 Curved Surface[J]. Materials & Manufacturing Processes, 2016, 365: 658.
- [2] 焦锋, 牛赢, 赵波. 难加工材料铣削残余应力研究进展[J]. 表面技术, 2017(3): 267-273.
JIAO Feng, NIU Ying, ZHAO Bo. Research Progress of Residual Stresses in Milling of Difficult to Machine Materials[J]. Surface Technology, 2017(3): 267-273.
- [3] LAJZOK M R. A Study of Some Aspects of Metal Cutting by the Finite Element Method[D]. Raleigh: NC State University, 1980.
- [4] FUH K H, WU C F. A Residual-stress Model for the Milling of Aluminium Alloy (2014-T6)[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1995, 51(1): 87-105.
- [5] DESMAISON O, MOCELLIN K, JARDIN N. Modelling of Residual Stresses Induced by High Speed Milling Process[C]//American Institute of Physics Conference Series. New York: American Institute of Physics, 2011: 597-602.
- [6] YAO C F, YANG Z C, HUANG X C, et al. The Study of Residual Stresses in High-speed Milling of Titanium Alloy TC11[J]. Advanced Materials Research, 2012, 443-444: 160-165.
- [7] LI Y E, ZHAO J, YAN C Q, et al. Surface Residual Stress Gradient Distribution in High Speed Milling of H13 Die Steel[J]. Materials Science Forum, 2009, 365: 183-188.
- [8] 孙嘉继. 6061 铝合金薄壁件铣削加工试验研究与参数优选[D]. 上海: 上海交通大学, 2011: 1-83.
SUN Jia-ji. 6061 Aluminum Alloy Thin-walled Milling Experiments and Parameter Optimization[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2011: 1-83.
- [9] 王立涛, 柯映林, 黄志刚, 等. 铝合金材料数控加工残余应力的分析[J]. 机械工程学报, 2004, 40(4): 123-126.
WANG Li-tao, KE Ying-lin, HUANG Zhi-gang, et al. Analysis of the Residual Stress of Aluminum Alloy Material NC Processing[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2004, 40(4): 123-126.
- [10] 张庆阳. 6061 铝合金高速铣削过程温度场及残余应力场研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2014.
ZHANG Qing-yang. Study of Temperature Field and Residual Stress Field of the 6061 Aluminum Alloy High-speed Milling Process[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2014.
- [11] HOU J, ZHOU W, DUAN H, et al. Influence of Cutting Speed on Cutting Force, Flank Temperature, and Tool Wear in End Milling of Ti-6Al-4V Alloy[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 70(9): 1835-1845.
- [12] WADA T, TOIHARA T. Cutting Performance of CBN Tools in Cutting of Sintered Steel[J]. J Powder Metallurgy, 2002, 49: 773-779.
- [13] LU X, LU Y, WANG F, et al. Research on Surface Residual Stress of Micro-milling Nickel-based Super Alloy Inconel 718[J]. International Journal of Nanomanufacturing, 2016, 12(1): 82.
- [14] 李锋, 李亚胜, 刘维伟, 等. GH4169 高速铣削加工残余应力分布规律试验[J]. 表面技术, 2016(12): 199-203.
LI Feng, LI Ya-sheng, LIU Wei-wei, et al. Experiment of Residual Stress Distribution of GH4169 High Speed Milling Machining[J]. Surface Technology, 2016(12): 199-203.
- [15] NOORI H, JAIN M, NIELSEN K, et al. Effect of Deformation-induced Residual Stress on Peel Strength of Polymer Laminated Sheet Metal[J]. Journal of Adhesion, 2016, 150: 703.
- [16] MILENIN A, KUZIAK R, PIDVYSOTSKYY V, et al. Model of Relaxation of Residual Stresses In Hot-rolled Strips[J]. Archives of Metallurgy & Materials, 2015, 60(3): 1935-1940.