

# GH4169 高速铣削加工残余应力分布规律试验

李锋<sup>1</sup>, 李亚胜<sup>1</sup>, 刘维伟<sup>2</sup>, 杜崇辉<sup>3</sup>, 夏杨欢<sup>4</sup>

(1.西安航空学院, 西安 710089; 2.西北工业大学, 西安 710072;  
3.西安航空发动机(集团)有限公司, 西安 710021; 4.贵州航空动力有限公司, 贵州 遵义 563000)

**摘要:**目的 通过研究 GH4169 高速铣削过程中切削工艺参数对加工残余应力的影响规律, 改进工艺参数的选取, 提高此类零件的疲劳寿命。方法 设计了 GH4169 高速铣削工艺参数与加工残余应力之间的单因素试验。通过仅改变一个切削参数、其余切削参数不变的方式, 得到了工件表面残余应力和切削深度方向残余应力与切削参数之间的变化规律。结果 铣削进给方向( $x$  方向)和垂直进给方向( $y$  方向)的表面残余应力主要表现为拉应力, 且随着铣削深度和每齿进给量的增加而增加, 随着铣削速度的增加而减小; 在切削深度方向上, 不同切深值所在平面的  $x$  方向和  $y$  方向的残余应力主要表现为压应力, 随着层深的增加先增大后减小。残余应力峰值随铣削深度和每齿进给量的增大而增大, 随铣削速度的增大而减小, 残余应力最大深度基本在 80  $\mu\text{m}$  以内。结论 GH4169 高速铣削加工中, 如果要获得较小的表面残余拉应力, 应该选用较小的铣削深度和每齿进给量, 较大的铣削速度; 在切深方向, 如果要获得较大的残余压应力, 应该选用较大的铣削深度和每齿进给量, 较小的铣削速度。反之亦然。

**关键词:** 高温合金; GH4169; 高速铣削; 残余应力; 分布规律; 切削用量

**中图分类号:** TG502.15 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2016)12-0199-05

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2016.12.032

## Distribution Law Test of Residual Stress in High-speed Milling GH4169

LI Feng<sup>1</sup>, LI Ya-sheng<sup>1</sup>, LIU Wei-wei<sup>2</sup>, DU Chong-hui<sup>3</sup>, XIA Yang-huan<sup>4</sup>

(1.Xi'an Aviation College, Xi'an 710089, China; 2.Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;  
3.Xi'an Aero Engine (Group) Ltd., Xi'an 710021, China; 4. Guizhou Aviation Power Ltd., Zunyi 563000, China)

**ABSTRACT:** GH4169 is a high temperature resistant nickel based alloy with excellent properties, which is widely used in the manufacture of hot components of aircraft and spacecraft. Therefore, it shall be provided with high anti-fatigue properties. The residual stress in machining has great influence on the fatigue strength of the parts. The work aims to improve the selection of cutting parameters and further improve the fatigue life of these parts by studying the effects of cutting parameters on the residual stress during GH4169 high speed milling. A single-factor experiment was designed between GH4169 high-speed milling parameters and machining-induced residual stress. The varying pattern among residual stress on the workpiece surface, residual stress in direction of cutting depth and cutting parameters was obtained by adjusting one cutting parameter only with others unchanged. The surface residual stress in feed direction of milling ( $x$ -direction) and the vertical feed direction ( $y$ -direction) was

收稿日期: 2016-05-24; 修订日期: 2016-11-11

Received: 2016-05-24; Revised: 2016-11-11

基金项目: 西安航空学院项目 (2016KY1207)

Fund: Supported by the Science and Technology Support Program of Xi'an Aviation College(2016KY1207)

作者简介: 李锋 (1982—), 男, 讲师, 主要研究方向为高速高效切削技术。

Biography: LI Feng (1982—), Male, Lecturer, Research focus: high efficient cutting technology.

mainly present as tensile stress, which increased as milling depth and feed per tooth increased, and decreased as the milling speed increased. Along the direction of cutting depth, the residual stress in two directions of the plane in which different cutting depth values were present was mainly compressive stress, which firstly increased and then decreased with the increase of cutting depth. Peak value of the residual stress increased with the increase of milling depth and feed per tooth, decreased with the increase of milling speed, the maximum depth of residual stress was less than 80  $\mu\text{m}$ . To obtain less surface residual tensile stress during GH4169 high-speed milling, less milling depth, feed per tooth and larger milling speed shall be selected. In addition, in order to obtain a large residual compressive stress in the direction of cutting depth, larger milling depth, feed per tooth and smaller milling speed shall be selected and vice versa.

**KEY WORDS:** high temperature alloy; GH4169; high-speed milling; residual stress; distribution law; cutting parameters

GH4169 是一种高硬度、高强度、耐腐蚀、耐高温的镍基合金材料,具有良好的抗疲劳、抗蠕变、抗氧化和耐腐蚀性能,被广泛应用于航空航天领域。GH4169 材料通常应用在航空器和航天器的高温区域,工作环境苛刻,承受的应力和载荷较大,容易出现疲劳现象。机械加工中残余应力的存在对零件的疲劳强度、抗应力腐蚀能力以及形状精度、尺寸稳定性等有很大的影响<sup>[1-3]</sup>,这是因为较好的残余应力分布可以有效阻止疲劳裂纹的延伸,延缓疲劳破坏的产生,提高工件的疲劳寿命。此外,工件内的残余应力,随着切削过程的进行不断地释放并重新分布,导致零件形状不稳定,影响加工精度,而且在加工结束后,残余应力的释放也很缓慢,由于内部残余应力的释放也会发生变形,进而降低零件加工精度。

国内外学者对于加工残余应力进行了大量的研究。Henriksen<sup>[4]</sup>通过加工不同条件下的钢和铸铁,对其加工表面的残余应力进行了研究,研究发现已加工表面的残余应力为拉应力,表面残余应力随着切削厚度的增加而加大,随着刀具前角的增大而减小。Jeelani 等<sup>[5]</sup>研究发现在低速切削时,冷却液的使用可以降低最大残余应力的值并减小应力层的深度,而高速切削时,冷却液的润滑对残余应力的影响并不大。哈尔滨工业大学孙雅洲<sup>[6]</sup>等根据弹-塑性有限元分析理论,建立了三维切削仿真分析模型,对航空铝合金进行切削加工有限元分析,并对已加工表面的残余应力进行预测。山东大学刘战强<sup>[7]</sup>等建立了双刃斜角变切削厚度有限元模型,研究了高速铣削铝合金时,不同的切削速度、进给量和后刀面磨损对工件表面的残余应力分布的影响规律。王西彬<sup>[8-9]</sup>等通过高速铣削高强高硬钢实验,研究了切削参数对表面残余应力的影响规律,并得出由切削热所引起的金相组织变化是残余压

应力产生的主要原因。

残余应力作为工件加工后表面质量的重要特征参数,是衡量工件加工质量的重要技术指标。研究残余应力的分布,对于应用在航空器热端部件、承受着较大应力和载荷的 GH4169 部件尤为重要。文中通过试验的方法,对 GH4169 高速铣削加工后的表面残余应力和加工深度方向残余应力的分布规律进行了研究,为 GH4169 高速铣削加工过程中残余应力的控制及切削参数的选取提供依据。

## 1 GH4169 高速铣削加工残余应力试验

### 1.1 试验条件

试验机床选用乔福机械 VMC850 三坐标立式数控铣床,最大转速 8000 r/min,功率 22 kW;试验刀具选用四齿硬质合金球头铣刀,牌号 K40,直径 8 mm,螺旋角 40°,前角 10°,后角 10°,刀柄长 80 mm;试验材料选用高温合金 GH4169,梯形块,几何尺寸见图 1,其中  $\phi=60^\circ$ ;采用顺铣加工方式,Blasor 切削液冷却;采用加拿大 PROTO LXR-D-MG2000 残余应力测试分析系统测量表面残余应力,采用 X 射线衍射法和电解抛光剥层法对试件沿深度方向的残余应力进行检测。测量前先使用标块对仪器进行校准,以此来确定准直器到样品表面的最佳距离。

### 1.2 试验方案

采用单因素试验的方法进行铣削加工试验,试验方案见表 1。试件为图 1 所示的 3 个梯形块,每块分成 A, B, C, D 等 4 个区域,每个区域进行一组

试验，共 12 组试验。每组试验完成后测量铣削加工后的表面残余应力及沿深度方向的残余应力。试验采用统一切削宽度为 0.2 mm。

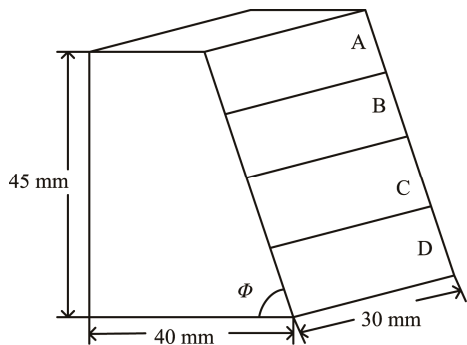


图 1 试件  
Fig.1 Test specimens

表 1 残余应力试验方案  
Tab.1 Residual stress test scheme

序号	切削速度 /(m·min <sup>-1</sup> )	切削深度 /mm	每齿进给量 /mm
1 <sup>#</sup>	60	0.5	0.06
2 <sup>#</sup>	80	0.5	0.06
3 <sup>#</sup>	100	0.5	0.06
4 <sup>#</sup>	120	0.5	0.06
5 <sup>#</sup>	100	0.1	0.06
6 <sup>#</sup>	100	0.3	0.06
7 <sup>#</sup>	100	0.5	0.06
8 <sup>#</sup>	100	0.7	0.06
9 <sup>#</sup>	100	0.5	0.02
10 <sup>#</sup>	100	0.5	0.04
11 <sup>#</sup>	100	0.5	0.06
12 <sup>#</sup>	100	0.5	0.08

## 2 试验结果及分析

### 2.1 铣削速度对残余应力的影响规律

不同的铣削速度下，沿层深方向测得的残余应力的分布曲线见图 2。由图 2 可知，当  $d=0$  时（加工表面），进给方向的表面残余应力  $\sigma_x$  为拉应力，垂直进给方向的表面残余应力  $\sigma_y$  由拉应力逐渐变为压应力，而且都随着铣削速度的增加逐渐减小。

当  $d>0$  时（加工深度方向）观察得到： $\sigma_x$  和  $\sigma_y$  主要表现为压应力，在距离表面较浅的加工层上表现为局部拉应力；随着层深  $d$  的增加， $\sigma_x$  和  $\sigma_y$  先增大后减小，呈“勺子”形状，且在距离表面小于 15  $\mu\text{m}$  的区域内，加工深度方向残余应力的变化梯度最大；另外， $\sigma_x$  和  $\sigma_y$  残余压应力峰值总体上随着铣削速度的增加而减小。当  $v_c=100\text{ m/min}$  时， $\sigma_x$  在  $d=25\text{ }\mu\text{m}$  时取得压应力

峰值，达到 -650.45 MPa， $\sigma_y$  在  $d=20\text{ }\mu\text{m}$  时取得压应力峰值，达到 -634.89 MPa。 $\sigma_x$  和  $\sigma_y$  在  $d=80\text{ }\mu\text{m}$  时残余应力曲线趋于平缓，基本达到了基体的应力值(近似为 0 的应力状态)。

随着铣削速度的增加，切屑流出的速度也相应增加，减少了切削产生的热量扩散到工件表面的时间，较高的表面温度来不及渗入到工件内部，热塑性效应引起的拉应力减小<sup>[10]</sup>；切削力减小不明显，由热塑性变形引起的拉应力与机械应力产生的压应力相互抵消一部分，因此表现出来的就是试件表面的残余拉应力水平下降。

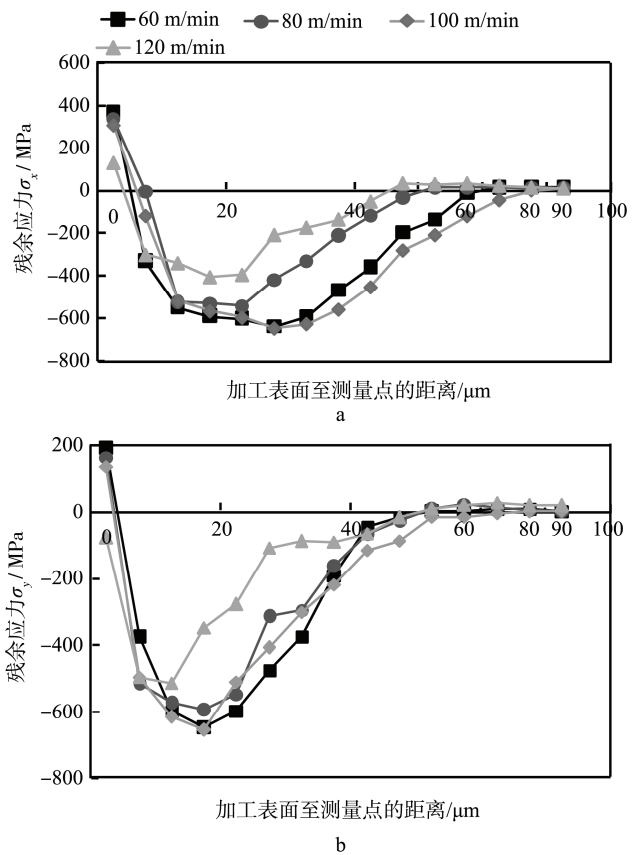


图 2 表层残余应力随铣削速度的变化曲线  
Fig.2 Variation of surface residual stress with milling speed

### 2.2 铣削深度对残余应力的影响规律

不同的铣削深度下，沿层深测得的残余应力的分布曲线见图 3。由图 3 可知，当  $d=0$  时， $x$  方向上，表面残余应力  $\sigma_x$  表现为拉应力， $y$  方向上，表面残余应力  $\sigma_y$  由压应力逐渐变为拉应力，且两者都随着铣削深度的增加逐渐增大。当铣削深度从 0.1 mm 增加到 0.7 mm 时， $\sigma_x$  从 267.71 MPa 增加到 489.21 MPa，当铣削深度从 0.1 mm 增加到 0.7 mm 时， $\sigma_y$  从 -6.81 MPa 增大到 209.11 MPa。

当  $d > 0$  时,  $\sigma_x$  和  $\sigma_y$  主要表现为压应力, 在距离表面较浅的加工层上表现为局部拉应力; 随着层深  $d$  的增加,  $\sigma_x$  和  $\sigma_y$  先增大后减小,  $\sigma_x$  在距离表面小于  $20\ \mu\text{m}$  的区域内, 表层残余应力的变化梯度最大,  $\sigma_y$  在距离表面小于  $25\ \mu\text{m}$  的区域内, 表层残余应力的变化梯度最大;  $\sigma_x$  和  $\sigma_y$  残余压应力峰值随着铣削深度的增加而增加。 $\sigma_x$  峰值压应力最大为  $-669.06\ \text{MPa}$ , 对应深度为  $30\ \mu\text{m}$ ,  $\sigma_y$  峰值压应力最大为  $-701.86\ \text{MPa}$ , 对应峰值深度为  $25\ \mu\text{m}$ ; 层深至  $80\ \mu\text{m}$  时,  $\sigma_x$  残余应力和  $\sigma_y$  残余应力曲线趋于平缓, 趋近于 0, 基本达到了基体的应力值。

因为随着铣削深度的增大, 铣削加工时, 单位时间内刀具铣削面积增大, 切削力增大, 塑性凸出效应引起的拉应力增加, 而试件表面热塑性变形效应引起的残余拉应力变化不明显, 综合表现为表面残余应力为拉应力, 且成增大趋势<sup>[11-12]</sup>。随着铣削深度的增加, 工件表面变质层深度变大, 所以表层残余应力最大值的深度也相应增大。

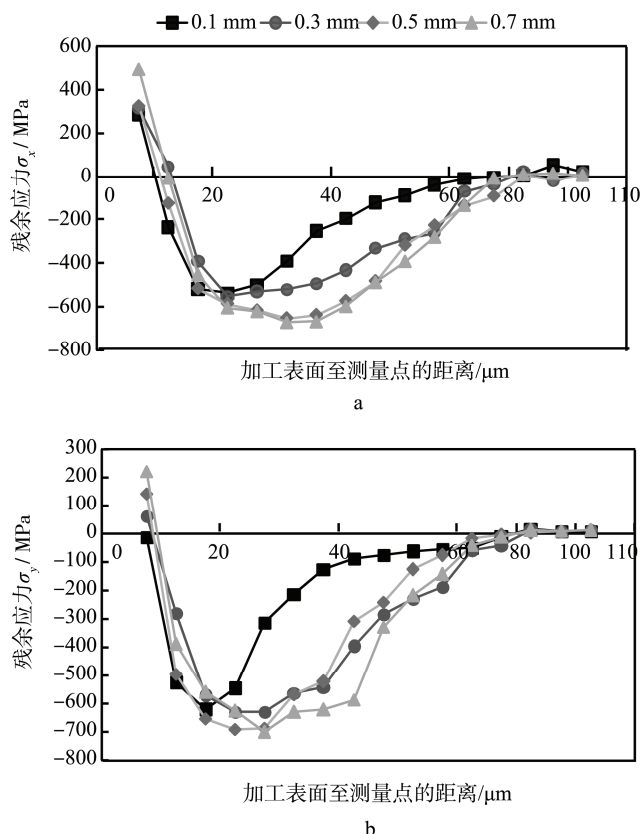


图3 表层残余应力随铣削深度的变化曲线

Fig.3 Variation of surface residual stress with milling depth

### 2.3 每齿进给量对残余应力的影响规律

不同的每齿进给量下, 沿层深测得的残余应力的分布曲线见图4。由图4可知, 当  $d=0$  时,  $x$  方

向上的表面残余应力  $\sigma_x$  和  $y$  方向上的表面残余应力  $\sigma_y$  均表现为拉应力, 且都随着每齿进给量的增加而增加。当每齿进给量从  $0.02\ \text{mm}$  增加到  $0.08\ \text{mm}$  时,  $\sigma_x$  从  $302.18\ \text{MPa}$  增加到  $576.12\ \text{MPa}$ 。当每齿进给量从  $0.02\ \text{mm}$  增加到  $0.08\ \text{mm}$  时,  $\sigma_y$  从  $90.23\ \text{MPa}$  增加到  $283.64\ \text{MPa}$ 。

当  $d > 0$  时,  $\sigma_x$  和  $\sigma_y$  主要表现为压应力; 随着层深  $d$  的增加,  $\sigma_x$  和  $\sigma_y$  先增大后减小,  $\sigma_x$  在距离表面小于  $15\ \mu\text{m}$  的区域内, 表层残余应力的变化梯度最大,  $\sigma_y$  在距离表面小于  $20\ \mu\text{m}$  的区域内, 表层残余应力的变化梯度最大; 另外,  $\sigma_x$  和  $\sigma_y$  残余压应力峰值随着每齿进给量的增加而增加。 $\sigma_x$  峰值压应力最大为  $-714.91\ \text{MPa}$ , 对应深度为  $15\ \mu\text{m}$ ;  $\sigma_y$  峰值压应力最大为  $-725.62\ \text{MPa}$ , 对应深度为  $20\ \mu\text{m}$ ; 层深至  $80\ \mu\text{m}$  时,  $\sigma_x$  残余应力趋近于 0, 层深至  $60\ \mu\text{m}$  时,  $\sigma_y$  残余应力曲线趋于平缓, 基本达到了基体的应力值。

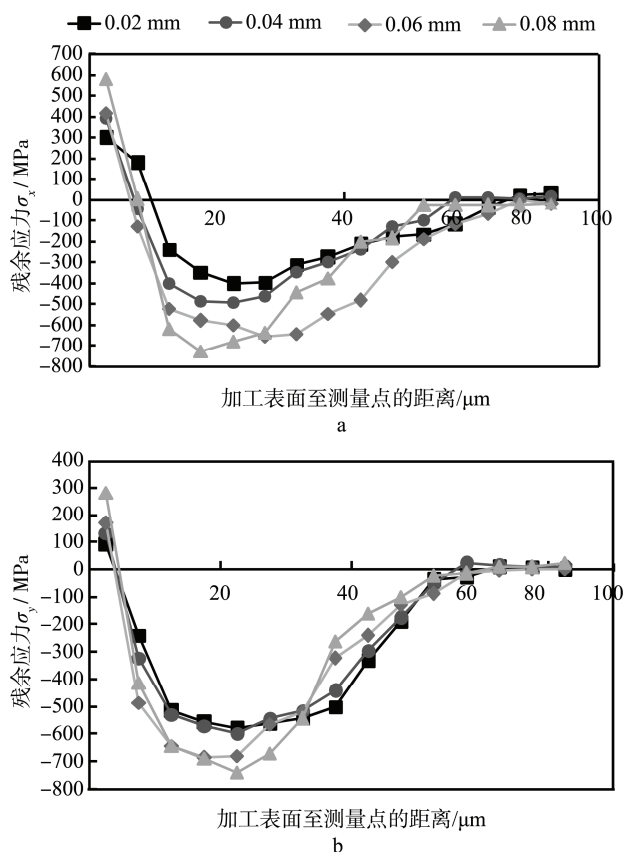


图4 表层残余应力随每齿进给量的变化曲线

Fig.4 Variation of surface residual stress with feed rate per tooth

随着每齿进给量的增加, 未变形切屑厚度随之增大, 金属的切除率增大, 形成切屑所要克服的阻力增大, 刀具与工件材料的摩擦也会增大, 导致铣削温度升高, 热塑性变形产生的残余应力占主导地

位,在试件已加工表面呈现出残余拉应力状态,且切削力增加,塑性凸出效应增加,综合表现为表面残余应力为拉应力,呈现增大趋势。随着每齿进给量的增加,工件表面变质层深度变大,表层残余应力最大值的深度也表现为增大<sup>[14—16]</sup>。

### 3 结论

1) 高温合金 GH4169 高速铣削进给方向( $x$  方向)和垂直进给方向( $y$  方向)的表面残余应力主要表现为拉应力,加工深度方向的残余应力主要表现为压应力。

2) GH4169 高速铣削表面残余应力随着铣削深度和每齿进给量的增加而增加,随着铣削速度的增加而减小;加工深度方向的层深残余应力随着层深的增加先增大后减小,呈“勺子”形。

3) GH4169 高速铣削加工深度方向的层深残余应力峰值随铣削深度和每齿进给量的增大而增大,随铣削速度的增大而减小,残余应力最大深度基本在 80  $\mu\text{m}$  以内。

### 参考文献

- [1] 郭培燕,王素玉,冯桢,等. 高速切削加工表面残余应力的产生和控制[J]. 工具技术, 2007, 41(3): 46—48.  
GUO Pei-yan, WANG Su-yu, FENG Zhen, et al. Results and Controlling Techniques of Residual Stress in Machined Layer for High Speed Machining[J]. Tool Engineering, 2007, 41(3): 46—48.
- [2] KLAUS M, GENZEL C, HOLZSCHUH H. Residual Stress Depth Profiling in Complex Hard Coating Systems by X-Ray Diffraction[J]. Thin Solid Films, 2008, 517(3): 1172—1176.
- [3] TANG Z T, LIU Z Q, PAN Y Z, et al. The Influence of Tool Flank Wear on Residual Stresses Induced by Milling Aluminum Alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(9): 4502—4508.
- [4] DEVILLE Sylvain, CHEVALIER Jérôme, GREMIL-LARD Laurent. Influence of Surface Finish and Residual Stresses on the Ageing Sensitivity of Biomedical Grade Zirconia[J]. Biomaterials, 2005, 27(10): 2186—2192.
- [5] JEELANI S, BAILEY J A. Residual Stress Distribution in Machining Annealed 18 Percent Nickel Maraging Steel [J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 1986, 108(2): 93—98.
- [6] 孙雅洲, 刘海涛, 卢泽生. 基于热力耦合模型的切削加工残余应力的模拟及试验研究[J]. 机械工程学报, 2011, 47(1): 187—193.  
SUN Ya-zhou, LIU Hai-tao, LU Ze-sheng. Finite Element Simulation and Experimental Research of Residual Stresses in the Cutting Based on the Coupled Thermo-mechanical Model[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(1): 187—193.
- [7] 唐志涛, 刘战强, 艾兴. 高速铣削加工铝合金表面残余应力研究[J]. 中国机械工程, 2008, 19(6): 699—703.  
TANG Zhi-tao, LIU Zhan-qiang, AI Xing. Experimentation on the Superficial Residual Stresses Generated by High-speed Milling Aluminum Alloy[J]. China Mechanical Engineering, 2008, 19(6): 699—703.
- [8] 龙震海, 赵文祥, 王西彬. 基于切削热-力耦合效应的表面强化技术及其工艺试验研究[J]. 航空材料学报, 2007, 27(6): 45—49.  
LONG Zhen-hai, ZHAO Wen-xiang, WANG Xi-bin. Experimental Research on Surface Reinforcement Mechanism Introduced By coupling Effect of Cutting Forces and Heat[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2007, 27(6): 45—49.
- [9] 辛民, 解丽静, 王西彬, 等. 高速铣削高强高硬钢加工表面残余应力研究[J]. 北京理工大学学报, 2010(1): 19—23.  
XIN Min, XIE Li-jing, WANG Xi-bin, et al. Study on the Surface Residual Stress of High Hardness and Strength Alloy Steel in High Speed Milling[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2010(1): 19—23.
- [10] QIN Meng-yang, YE Bang-yan, JIA Xiong, et al. Experimental Investigation of Residual Stress Distribution in Pre-stress Cutting[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 65(1): 355—361.
- [11] 杨春梅, 刘睿, 任洪娥, 等. 竹材四面铣削三面剖分数控系统控制[J]. 包装工程, 2015, 36(13): 95—100.  
YANG Chun-mei, LIU Rui, REN Hong-e, et al. Numerical Control System of Four-side Milling and Three-side Splitting of Bamboo[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(13): 95—100.
- [12] MILENIN, KUZIAK A, PIDVYSOTS'KYY R, et al. Model of Relaxation of Residual Stresses in Hot-rolled Strips[J]. Archives of Metallurgy and Materials, 2015, 60(3): 1935—1940.
- [13] XIN Min, XIE Li-jing, WANG Xi-bin, et al. Study on the Surface Residual Stress of High Hardness and Strength Alloy Steel in High Speed Milling[J]. Transaction of Beijing Institute of Technology, 2010, 30(1): 19—23.
- [14] HADI Noori, MUKESH Jain, KENT Nielsen, et al. Effect of Deformation-induced Residual Stress on Peel Strength of Polymer Laminated Sheet Metal[J]. The Journal of Adhesion, 2016, 92(10): 862—876.
- [15] WANG Shi-ji, LI Xian, CHEN Zheng-han. Theoretical Study on the Influence of Residual Stress on Adhesion-induced Instability in MEMS[J]. Chinese Science Bulletin, 2009, 54(15): 2606—2609.
- [16] KANCHANOMAI C, LIMTRAKARN W. Effect of Residual Stress on Fatigue Failure of Carbonitrided Low-carbon Steel[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2008, 17(6): 879—887.