

难加工材料铣削残余应力研究进展

焦锋, 牛赢, 赵波

(河南理工大学 机械与动力工程学院, 河南 焦作 454003)

摘 要: 镍基高温合金、钛合金等材料具有良好的高温强度、耐热性和耐腐蚀性等优异性能, 已广泛应用于航空航天领域, 然而这些材料属于典型的难加工材料, 其相对切削加工性能很差, 且已加工表面易产生显著残余拉应力, 严重影响零部件使用寿命及性能。通过适当的方法调整和控制已加工表面的残余压应力, 可以明显提高零件疲劳强度和耐腐蚀性。压应力制造技术是指以获得残余压应力为目标的制造技术, 是一种典型的抗疲劳方法。将超声技术与其他加工方法复合实现残余压应力的主动控制, 是目前抗疲劳制造技术的主要方法之一。然而, 由于受超声加工的临界速度限制, 超声与高速复合加工的研究相对较少, 但两者均是目前压应力制造领域高度关切的先进加工方法, 如果两者能有效复合, 必将使核心部件制造在保证更加优良的抗疲劳性能的同时, 获取更高的效率。通过分析铣削加工、高速加工以及超声振动加工中残余应力的研究现状, 提出可将高速加工和超声振动加工相结合, 从而实现难加工材料的高效压应力制造。

关键词: 难加工材料; 压应力; 高速加工; 超声振动加工; 残余应力; 抗疲劳制造

中图分类号: TG54 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2017)03-0267-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.03.040

Research Progress of Residual Stress in Milling of Difficult-to-machine Materials

JIAO Feng, NIU Ying, ZHAO Bo

(School of Mechanical and Power Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China)

ABSTRACT: Since nickel-base superalloy and titanium alloy feature in good high temperature strength, heat resistance, corrosion resistance and other excellent properties, they have been widely used in the field of aeronautics. However, these were typical difficult-to-machine materials of poor machinability, significant residual tensile stress could be easily generated on the machined surface, seriously affecting service life and performance of parts and components. It could obviously improve fatigue strength and corrosion resistance of the parts by adjusting and controlling the residual compressive stress. Compressive stress manufacturing technology, a typical antifatigue method, refers to a manufacturing technology aiming to obtain residual compressive stress. Active control of residual compressive stress by combining ultrasonic technology compound with other processing methods was one of the main methods of antifatigue manufacturing technology. However, due to critical speed limit of ultrasonic machining, a few researches were carried out on ultrasonic and high speed

收稿日期: 2016-10-14; 修订日期: 2016-11-08

Received: 2016-10-14; Revised: 2016-11-08

基金项目: 国家自然科学基金 (51475148); 河南省基础与前沿技术研究计划项目资助 (152300410102)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China(No. 51475148), Henan Research Program of Fundamental and Frontier Technology (No. 152300410102)

作者简介: 焦锋 (1971—), 男, 教授, 主要研究方向为精密超精密加工技术与装备。

Biography: JIAO Feng(1971—), Male, Professor, research focus: precision machining technology.

通讯作者: 赵波 (1956—), 男, 教授, 主要研究方向为精密超精密加工技术与装备。

Corresponding author: ZHAO Bo(1956—), Male, professor, Research focus: precision machining technology.

composite manufacturing. However, both of them were the advanced manufacturing methods in compressive stress field. If the two methods could be integrated effectively, production of key parts could achieve higher efficiency while guaranteeing superior antifatigue performance. By the analyzing residual stress research progress of milling, high-speed machining and ultrasonic vibration machining, it was proposed that high speed machining and ultrasonic vibration machining could be combined in order to achieve efficient compressive stress manufacture of difficult-to-machine materials.

KEY WORDS: difficult-to-machine material; compressive stress; high speed machining; ultrasonic vibration machining; residual stress; antifatigue manufacture

镍基高温合金、超高强度钢、高强度铝合金、钛合金等由于具有良好的高温强度、耐热性和耐腐蚀性等优异性能,已广泛应用于航空航天领域,如用于制造航空发动机的涡轮叶片、涡轮盘和凸轮轴等耐高温零部件^[1,2]。然而,这些材料属于典型的难加工材料,其相对切削加工性能很差,并且零件加工后会在已加工表面分布显著的残余拉应力,严重影响零件的使用性能及寿命。

残余应力是一种以平衡状态存在于物体内部的力,且是一种不稳定的应力状态。研究与实践结果表明,通过适当的方法调整和控制已加工表面的残余压应力,可以明显提高零件疲劳强度和耐腐蚀性^[3-5]。而所谓压应力制造技术是指以获得残余压应力为目标的制造技术。

目前,压应力制造技术最新研究较多的是预应力切削技术、高速切削、超声挤(滚)压等,通过研究切削参数与表面层建模来获得表面残余应力的有效控制。然而这些加工方法均存在一定的缺陷:预应力加工方法虽然在一定范围内可以实现表面残余应力的控制,但需要增加专用的预应力工装,并且对复杂零件受限^[6,7];高速切削、低温切削和微润滑切削等低应力加工技术不仅需要增加专用装备^[8,9],而且对表面残余应力的控制范围有限。近期研究较多的超声挤(滚)压和超声冲击压应力制造方法,其优点是表面残余压应力增加显著,零件疲劳强度可提高2个量级以上,不足是控制困难,表面残余应力有时会过大,引起表面过度硬化,反而降低零件的冲击韧度。

根据上述问题,本文着重分析了铣削加工下压应力制造技术的研究现状,同时对高速加工、超声振动辅助加工条件下压应力制造的研究现状进行分析,提出可将高速加工和超声振动相复合作为新的压应力制造技术。

1 铣削残余应力研究现状

通过适当的方法调整和控制已加工表面的残余压应力,可以明显提高零件疲劳强度和耐腐蚀性。为

了获得较大的残余压应力,国内外很多学者对此进行了大量研究,从研究方法大致分为三个类型:1)试验研究;2)理论建模;3)仿真模拟。

1.1 试验研究

在铣削加工过程中,学者对残余应力进行了大量的试验研究。

Henrikse^[10]是较早进行切削加工残余应力研究的学者,通过分析直角切削条件下产生的残余应力,得出机械效应在残余应力的形成过程中起主导作用,同时热效应也会对残余应力产生影响。

SUN^[11]对 Ti-6Al-4V 进行端面铣削,通过试验研究了在不同铣削条件下已加工表面的完整性,得出铣削速度和进给量对残余应力的影响趋势有很大的差异性。Virginia^[12]研究了切削参数对加工表面残余应力的影响,发现随进给速度的增大,残余拉应力增大,残余压应力减小。史恺宁等^[13]也研究了进给速度对残余应力的影响,同时考虑了径向切深的影响。Tâmpu^[14]进一步丰富了工艺参数对残余应力的影响,得出小切深可以得到较小的残余应力值。

陈建岭等人^[15]发现,受后刀面和已加工表面的挤光作用,在顺铣加工时多表现为残余压应力,田荣鑫^[16]、任成祖^[17]、周子同^[18]、张定华^[19]等也验证了该结论,并进一步得出在刀具剧烈磨损阶段,加工过程中的热塑性变形引起的拉应力占主导地位。

SHEN^[20]将激光加热技术运用到铣削加工氮化硅陶瓷中,重点研究了加热温度对表面残余应力的影响,得出高的加热温度能够有效降低残余应力,而同时 Balkrishna^[21]等研究了端铣 Ti-6Al-4V 沿进给方向加工时表面层下 40 μm 的残余应力分布,发现有切削液冷却时的残余应力要比干切削时小很多。陈惠贤^[22]得出温度热应力对残余拉应力起着主导作用。

GUILLEMOT^[23]利用球头铣刀对高强度钢进行精加工,得出刀具倾斜角度对表面残余应力有较大的影响,并以此建立了刀具倾斜角对加工过程影响的几何模型。CELLIER^[24]也得出相似结论,并发现负切削角易形成残余压应力。Huang^[25]研究了不同刀具几

何参数对残余应力的影响, 得出不同的刀具圆弧半径、前后角对残余应力存在很大影响。

通过试验研究, 人们对残余应力有了整体认识, 近年来的研究成果主要可以分为几个方面: (1) 工艺参数对残余应力的影响; (2) 热-力对残余应力的影响; (3) 刀具形状及姿态对残余应力的作用。而对残余应力机理的研究仍有较大的空间, 尤其是关于铣削过程中力、热对残余应力的影响比例鲜有研究。

1.2 理论研究

试验方法需要大量的人力和物力, 同时不能深入研究残余应力的产生机理, 因此很多学者从理论角度对残余应力的产生机理进行研究。

1986 年, Fisher^[26]提出过一个低速切削时, 考虑热-力产生不均匀塑性变形情况下的残余应力近似计算模型。在此基础上, 研究人员做出了大量研究。

Valiorgue^[27]考虑动态再结晶现象, 建立了残余应力数学模型。Ratchev^[28]通过数学模型计算了亚表面残余应力的分布大小, 并通过有限元仿真和试验验证了计算结果。Zhang^[29]将系统数据处理模糊模型和非劣排序遗传算法相结合, 建立了铝合金加工过程中残余应力的预测模型, 并对加工过程进行优化, 从而获得残余应力的最小值。这些研究通过对残余应力的影响因素进行分析, 并结合数学算法, 较好地实现了对残余应力的预测, 但由于残余应力的影响因素较多, 模型有一定的局限性。

Afazov^[30]建立了残余应力的数学算法, 从而实现了残余应力从微观描述到大尺度有限元模型的转换。宋妮妮等^[31, 32]将铣削机理与弹塑性理论相结合, 研究铣削力与残余应力之间的关系, 建立了相应的数学模型。Aliakbari^[33]建立了 7075 铝合金的非线性应变硬化数学模型, 从而实现了残余应力的预测。Fergani^[34]基于 Neumann-Duhamel 准则建立热力耦合模型, 对残余应力进行预测, 并验证了模型的准确性。虽已对模型不断改进, 同时考虑热-力影响, 但由于在铣削加工过程中, 未变形层厚度不断改变, 因此模型对铣削加工仍有不适应性。

虽然从理论上分析残余应力取得了一定进展, 但学者们越来越倾向于采用更严谨的理论和更复杂的方式来力图改善近似的方法, 并致力于建立更完善、更接近于实际过程的数学-力学模型, 以期得到更全面的分析结果。

1.3 仿真研究

随着计算机水平的发展和有限元技术的进步, 越来越多的学者开始用有限元法进行切削过程和残余应力的分析建模。

陈晓晓、赵军等^[35-37]通过有限元仿真和试验相结合的方法获得了铣削力、铣削热、残余应力等, 分析了铣削参数对残余应力的影响, 得出在进给方向, 残余应力随着每齿进给量的增加而增大。郑耀辉^[38]采用更接近实际的铣刀结构模型对铣削 Ti-6Al-4V 的表面残余应力进行了仿真分析。

SALONITIS^[39]通过有限元仿真方法研究了在不同的润滑条件下残余应力的分布情况。Mamedov^[40]用有限元对微铣削钛合金的加工情况进行了仿真分析, 研究了刀具和工件的温度场分布情况, 得出了温度对残余应力分布的影响, 并用试验对仿真结果进行了验证。Yang^[41]利用 ABAQUS 对钛合金进行周铣仿真分析, 运用粒子群算法 (particle swarm optimization method) 对残余应力的分布大小、位置及深度进行了研究, 并验证了模型的精度。

通过有限元分析方法得出众多研究成果, 为更全面研究残余应力奠定了坚实的基础, 但受制于时间消耗、模型精度及对硬件有较高的要求, 有限元研究方法仍有较大的提升空间。

2 高速铣削加工残余应力研究现状

高速加工是近年来发展起来的先进制造技术, 众多研究表明, 高速加工可以显著改善加工表面完整性, 提高表面残余压应力, 是一种高效的压应力制造技术。

杜随更等^[42]在铣削 TC4 时发现, 铣削速度在一定范围内提高时, 表面质量越来越好。龙震海^[43]、谢小正^[44]、任成祖^[45]等也得出了相似结论。Salahshoor^[46]发现当采用高铣削速度 (2800 m/min)、低进给量 (0.05 mm/rev) 时, 可以获得较大的压应力。Hioki^[47]得出铣削速度对残余应力有着最重要的影响。

王维^[48]发现不同的刀具姿态对表面残余应力幅值有较大影响, 而采用相同的刀具姿态时, 不同的切削方式也会影响表面残余应力的变化趋势。Diaz^[49]和 Daymi^[50]对该结论也进行了验证。Akhtar^[51]得出, 在高速加工中, 采用硬质合金刀具能够获得较好的表面完整性。

Jiang^[52]发现在高速加工中, 加工区域的残余应力具有不均匀性, 通过分析非切削层厚度对残余应力的影响规律, 得出非切削层厚度对残余应力有较大影响, 可以通过控制非切削层的厚度去改善残余应力的分布情况。牟海阔^[53]发现了液氮冷却对残余压应力有极大的提升作用。

Huang^[54]通过试验研究了刀具几何形状对残余应力分布的影响, 发现在高速端铣加工后, 亚表面产生了压应力, 并得出刀具球头半径以及前后角对残余

应力的分布有较大影响。李波^[55]研究了高速铣削中工艺参数及刀具几何形状对表面层残余应力分布的影响。凌杰^[56]进一步建立了表面粗糙度和表面残余应力预测模型。Hood^[57]对铝合金进行高速端面铣削加工,得出当铣削速度达到 320 m/min、铣削深度 0.6 mm 时,表面残余压应力能够达到 120 MPa。

3 超声振动铣削加工残余应力研究现状

超声振动辅助加工技术由于刀具-工件间的高频振动敲击,因此在压应力制造技术中有着无可比拟的先天优势,是不容忽视的一种压应力制造技术。

孙青等^[58]分析了在超声振动作用下,残余应力随深度的变化规律。乔国朝^[59]发现,超声振动技术可以在不加刷表面/亚表面损伤程度的前提下采用较大的切削深度。赵云峰^[60]从热-力耦合的角度研究了超声振动辅助铣削加工表面残余应力的产生机理,得出超声振动可以实现对表面残余应力的释放,降低加工表面残余应力。河南理工大学赵波、焦锋等^[61-64]的研究表明,在不同切削条件下,超声振动辅助加工技术均能够有效改善残余应力状态。

Ganiev^[65]研究了超声振动对加工过程的影响,并通过分析金相组织得出材料力学性能的变化,同时观测了表面硬化层和残余应力的分布。Navas^[66]运用旋转超声技术对陶瓷材料进行加工,得出采用微细晶粒的金刚石刀具、较小的轴向铣削深度以及较大的进给量可以获得较低的表面粗糙度,而减小进给量和增大铣削深度可以在 Al_2O_3 表面获得较大的压应力。Maurotto^[67]采用刀具轴向振动对 AISI 316L 进行铣削加工,研究了超声振动频率对残余应力的影响规律。

研究成果表明,超声辅助手段是一种高效获得残余压应力的方法,一方面避免了使用较复杂的工艺装备,另一方面能显著增加残余压应力的量值。

4 结论

在传统铣削加工中,为获得压应力,通常经过改变工艺参数(切削速度、切深、进给量等)、加工方式(顺铣、逆铣、周铣、端铣等)、刀具姿态(几何形状、倾斜角度等)以及冷却方式等,但对残余应力控制的范围有限。采用超声辅助技术虽能明显改善残余应力状态,但受制于临界切削速度要求,加工效率较低。如果能将超声振动和高速加工技术有效复合,必将使核心部件制造在保证更加优良的抗疲劳性能的同时,获取更高的效率。为达到该目标,需要进一步研究下述问题:

1) 超声与高速加工能否复合,这需要研究施振方向如何选择及解决刀屑分离与不分离对加工效果的影响。

2) 高速超声复合加工产生的压应力能否稳定,这需要声学振动系统和高速切削系统的稳定性。

3) 切削时超声振动产生的冲击能量是否足够大,与高速加工复合后能否达到合适残余应力的量值条件(尤其是对于钛合金高温合金等航空材料)。

4) 高速超声复合加工能否在表面层形成优良的压应力组织(纳米晶球状马氏体或其他性能优良的致密组织)。这需要研究表面层的组织状态与加工过程物理化学及其耦合演化的规律,以揭示高速超声复合作用下压应力的形成本质。

5) 压应力状态和组织形成是否有规律性。这需要研究高速加工参数、超声频率、振幅对应力场状态的影响。

参考文献:

- [1] ULUTAN D, OZEL T. Machining Induced Surface Integrity in Titanium and Nickel Alloys: A Review[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2011, 51(3): 250—280.
- [2] 张彩珍, 杨健, 魏磊, 等. 航空发动机钛合金叶片喷丸强化残余应力研究[J]. 表面技术, 2016(4): 208—212.
ZHANG Cai-zhen, YANG Jian, WEI Lei. Shot-peened Residual Stress of Aeroengine Titanium Alloy Blades[J]. Surface Technology, 2016(4): 208—212.
- [3] ZHOU J Z, HUANG S, ZUO L D, et al. Effects of Laser Peening on residual Stresses and Fatigue Crack Growth Properties of Ti-6Al-4V Titanium Alloy[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2014, 52(3): 189—194.
- [4] 何少杰, 杨文玉, 郭步鹏, 等. 机加工表面残余应力及其疲劳寿命评价的研究进展[J]. 表面技术, 2015(6): 120—126.
HE Shao-jie, YANG Wen-yu, GUO Bu-peng, et al. Research Progress on Evaluation of Surface Residual Stress and Fatigue Life of Machined Products[J]. Surface Technology, 2015(6): 120—126.
- [5] 蒋聪盈, 黄露, 王婧辰, 等. TC4 钛合金激光冲击强化与喷丸强化的残余应力模拟分析[J]. 表面技术, 2016(4): 5—9.
JIANG Cong-ying, HUANG Lu, WANG Jing-chen, et al. Simulation Analysis of the Residual Stress Field of TC4 Ti Alloy under Laser Shock Peening and Shot Peening[J]. Surface Technology, 2016(4): 5—9.
- [6] QIN M Y, YE B Y, JIA X, et al. Experimental Investigation of Residual Stress Distribution in Pre-stress Cutting[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 65(1—4): 355—361.
- [7] QIN M, YE B, HE A. Investigation into Residual Stress of Pre-stress Cutting Based on Thermo-mechanical Coupling Analysis[J]. Huanan Ligong Daxue Xuebao/Journal of

- South China University of Technology (Natural Science), 2012, 40(1): 47—52.
- [8] PUSAVEC F, HAMDI H, KOPAC J, et al. Surface Integrity in Cryogenic Machining of Nickel Based Alloy-Inconel 718[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2011, 211(4): 773—783.
 - [9] DA SILVA L R, BIANCHI E C, FUSSE R Y, et al. Analysis of Surface Integrity for Minimum Quantity Lubricant-MQL in Grinding[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2007, 47(2): 412—418.
 - [10] THORNTON H R, HENRIKSEN M. Effect of Load Rate on the Fatigue Life of Graphite/Epoxy Composites[J]. *Sampe Quarterly*, 1979, 10(4): 1—5.
 - [11] SUN J, GUO Y B. A Comprehensive Experimental Study on Surface Integrity by end Milling Ti-6Al-4V[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, 209(8): 4036—4042.
 - [12] NAVAS V G, GONZALO O, BENGOTXEA I. Effect of Cutting Parameters in the Surface Residual Stresses Generated by Turning in AISI 4340 Steel[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2012, 61: 48—57.
 - [13] 史恺宁, 靳琪超, 武导侠, 等. 钛合金 TB6 铣削参数对表面完整性的影响研究[J]. *航空制造技术*, 2013(7): 83—87.
SHI Kai-ning, JIN Qi-chao, WU Dao-xia, et al. Effect of Milling Parameter on Surface Integrity of TB6 Titanium Alloy[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2013 (7): 83—87.
 - [14] TAMPUN C, CHIRITA B, HERGHELEGIU E, et al. Influence of the Cutting Regime on the Residual Stresses Generated by Carbon Steel Milling[J]. *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*, 2014, 21(3SI): 283—288.
 - [15] 陈建岭, 李剑峰, 孙杰, 等. 钛合金铣削加工表面残余应力研究[J]. *机械强度*, 2010(1): 53—57.
CHEN Jian-ling, LI Jian-feng, SUN Jie. Surface Residual Stress of Titanium Alloy Induced by Milling[J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2010(1): 53—57.
 - [16] 田荣鑫, 史耀耀, 杨振朝, 等. TC17 钛合金铣削刀具磨损对残余应力影响研究[J]. *航空制造技术*, 2011(Z1): 134—138.
TIAN Rong-xin, SHI Yao-yao, YANG Zhen-chao. Effect of Tool Wear on Residual Stress in Milling of Titanium Alloy TC17[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2011 (Z1): 134—138.
 - [17] 杨晓勇, 任成祖, 陈光. 钛合金铣削刀具磨损对表面完整性影响研究[J]. *机械设计*, 2012(11): 22—26.
YANG Xiao-yong, REN Cheng-zu, CHEN Guang. Tool Wear and Surface Integrity of Titanium Alloy Milling[J]. *Journal of Machine Design*, 2012(11): 22—26.
 - [18] 周子同, 崔季, 陈志同, 等. TB6 钛合金铣削表面完整性试验研究[J]. *航空制造技术*, 2015(8): 66—69.
ZHOU Zi-tong, CUI Ji, CHEN Zhi-tong. Experimental Research on Surface Integrity of TB6 Titanium Alloy[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2015(8): 66—69.
 - [19] 谭靓, 张定华, 姚倡锋, 等. 刀具几何参数对钛合金铣削力和表面完整性的影响[J]. *中国机械工程*, 2015(6): 737—742.
TAN Liang, ZHANG Ding-hua, YAO Chang-feng, et al. Influence of Tool Geometrical Parameters on Milling Force and Surface Integrity in Milling Titanium Alloy[J]. *China Mechanical Engineering*, 2015(6): 737—742.
 - [20] SHEN X, LEI S. Experimental Study on Operating Temperature in Laser-assisted Milling of Silicon Nitride Ceramics[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2011, 52(1—4): 143—154.
 - [21] RAO B, DANDEKAR C R, SHIN Y C. An Experimental and Numerical Study on the Face Milling of Ti-6Al-4V Alloy: Tool Performance and Surface Integrity[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2011, 211(2): 294—304.
 - [22] 陈惠贤, 杨富强, 冯海涛, 等. 1Cr12Ni2W1Mo1V 铣削过程参数对残余应力影响研究[J]. *工具技术*, 2012, 46(3): 12—15.
CHEN Hui-xian, YANG Fu-qiang, FENG Hai-tao, et al. Research of 1Cr12Ni2W1Mo1V Stainless Steel Residual Stress Impact on Milling Process Parameters[J]. *Tool Engineering*, 2012, 46(3): 12—15.
 - [23] GUILLEMOT N, MAWUSSI B K, LARTIGUE C, et al. A First Approach to Characterize the Surface Integrity Generated by Ball-end Finishing Milling[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, 64(1—4): 269—279.
 - [24] CELLIER A, CHALON F, GRIMAL V, et al. Effects of Cutting Angles in Ti-6Al-4V Milling Process on Surface Integrity: Influence of Roughness and Residual Stresses on Fatigue Limit[J]. *Machining Science and Technology*, 2014, 18(4): 565—584.
 - [25] HUANG X, SUN J, LI J. Experimental Investigation of the Effect of Tool Geometry on Residual Stresses in High Speed Milling 7050-T7451 Aluminium Alloy[J]. *International Journal of Surface Science and Engineering*, 2015, 9(4): 359—369.
 - [26] FISHER R D, ALLAN J C, PRESSESKEY J L. Magnetic Properties and Longitudinal Recording Performance of Corrosion-resistant Alloy Films[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1986, 22(5): 352—354.
 - [27] VALIORGUE F, RECH J, BERGHEAU J M. Modeling of Residual Stress State in Turning of 304L[J]. *Materiaux et Techniques*, 2010, 98(5): 361—368.
 - [28] RATCHEV S M, AFAZOV S M, BECKER A A, et al. Mathematical Modelling and Integration of Micro-scale Residual Stresses into Axisymmetric FE Models of Ti6Al4V Alloy in Turning[J]. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2011, 4(1): 80—89.
 - [29] ZHANG Q, MAHFOUF M, YATES J R, et al. Modeling and Optimal Design of Machining-Induced Residual Stresses in Aluminium Alloys Using a Fast Hierarchical Multiobjective Optimization Algorithm[J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2011, 26(PII 9361357193): 508—520.
 - [30] AFAZOV S M, BECKER A A, HYDE T H. Mathematical Modeling and Implementation of Residual Stress Mapping from Microscale to Macroscale Finite Element Models[J].

- Journal of Manufacturing Science and Engineering—Transactions of the ASME, 2012, 134: 0210012.
- [31] SONG W W, WANG H F, WANG J L, et al. Study on the Mathematical Model of the Milling Force and Residual Stress[J]. Key Engineering Materials, 2013, 568: 103—107.
- [32] 宋妮妮, 汪建利, 汪洪峰. 数控铣削加工过程中残余应力分布模型分析[J]. 黄山学院学报, 2014(3): 17—20.
SONG Wei-wei, WANG Jian-li, WANG Hong-feng. Numerical Simulation and Analysis of Symmetry and Step-symmetry Milling of Aerospace Thin-walled Workpiece[J]. Journal of Huangshan University, 2014(3): 17—20.
- [33] ALIAKBARI K, FARHANGDOOST K. The Investigation of Modeling Material Behavior in Auto-frettagged Tubes Made from Aluminium Alloys[J]. International Journal of Engineering, Transactions B: Applications, 2014, 27(5): 803—810.
- [34] FERGANI O, JIANG X, SHAO Y, et al. Prediction of Residual Stress Regeneration in Multi-pass Milling[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 83(5—8): 1153—1160.
- [35] CHEN X, ZHAO J, LI Y, et al. Investigation on Ball End Milling of P20 Die Steel with Cutter Orientation[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 59(9—12): 885—898.
- [36] CHEN X, ZHAO J, ZHANG W. Influence of Milling Modes and Tool Postures on the Milled Surface for Multi-axis Finish Ball-end Milling[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 77(9—12): 2035—2050.
- [37] CHEN X, ZHAO J, DONG Y, et al. Research on the Machined Surface Integrity under Combination of Various Inclination Angles in Multi-axis Ball End Milling[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2014, 228(1): 31—50.
- [38] 郑耀辉, 王京刚, 王明海, 等. 钛合金高速铣削加工表面残余应力的模拟研究[J]. 机床与液压, 2015(1): 41—44.
ZHENG Yao-hui, WANG Jing-gang, WANG Ming-hai, et al. Simulation and Study on Surface Residual Stress of Titanium Alloy in High-speed Milling[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2015(1): 41—44.
- [39] SALONITIS K, KOLIOS A. Experimental and Numerical Study of Grind-hardening-induced Residual Stresses on AISI 1045 Steel[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 79(9—12): 1443—1452.
- [40] MAMEDOV A, LAZOGLU I. Thermal Analysis of Micro Milling Titanium Alloy Ti-6Al-4V[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 229: 659—667.
- [41] YANG D, LIU Z, REN X, et al. Hybrid Modeling with Finite Element and Statistical Methods for Residual Stress Prediction in Peripheral Milling of Titanium Alloy Ti-6Al-4V[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2016, 108/109: 29—38.
- [42] 杜随更, 吕超, 任军学, 等. 钛合金 TC4 高速铣削表面形貌及表层组织研究[J]. 航空学报, 2008(6): 1710—1715.
- DU Sui-geng, LV Chao, REN Jun-xue, et al. Study on Surface Morphology and Microstructure of Titanium Alloy TC4 under High-speed Milling[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2008(6): 1710—1715.
- [43] 龙震海, 赵文祥, 王西彬. 高速端面铣削加工引入残余压应力场的试验研究[J]. 航空材料学报, 2008(2): 24—29.
- LONG Zhen-hai, ZHAO Wen-xiang, WANG Xi-bin. Experimental Research on the Residual Compressive Stress Field in High Speed End Milling Process[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2008(2): 24—29.
- [44] 谢小正, 赵荣珍, 陈惠贤. 高速铣削汽轮机叶片表面残余应力影响因素研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2012(11): 15—17.
- XIE Xiao-zheng, ZHAO Rong-zhen, CHEN Hui-xian. Residual Stress Factors Analysis in High-speed Milling of Turbine Blade[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2012(11): 15—17.
- [45] WANG F, ZHAO J, LI A, et al. Experimental Study on Cutting Forces and Surface Integrity in High-speed Side Milling of Ti-6Al-4V Titanium Alloy[J]. Machining Science and Technology, 2014, 18(3): 448—463.
- [46] SALAHSHOOR M, GUO Y B. Surface Integrity of Biodegradable Orthopedic Magnesium-Calcium Alloy by High-speed Dry Face Milling[J]. Production Engineering, 2012, 6(2): 641—650.
- [47] HIOKI D, DINIZ A E, SINATORA A. Influence of HSM Cutting Parameters on the Surface Integrity Characteristics of Hardened AISI H13 Steel[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2013, 35(4): 537—553.
- [48] 王维, 赵军, 李月恩. 刀具姿态对 H13 模具钢加工表面残余应力的影响[J]. 工具技术, 2010, 44(2): 19—22.
WANG Wei, ZHAO Jun, LI Yue-en. Effects of Cutter-orientations on Machined Surface Residual Stress during H13 Die Steel Milling[J]. Tool Engineering, 2010, 44(2): 19—22.
- [49] DIAZ F V, MAMMANA C A, GUIDOBONO A P M, et al. Analysis of Residual Strain and Stress Distributions in High Speed Milled Specimens Using an Indentation Method[J]. World Academy of Science, Engineering and Technology, 2011, 82: 30—36.
- [50] DAYMI A, BOUJELBENE M, BENAMARA A, et al. Surface Integrity in High Speed End Milling of Titanium Alloy Ti-6Al-4V[J]. Materials Science and Technology, 2011, 27(1): 387—394.
- [51] AKHTAR W, SUN J, CHEN W. Effect of Machining Parameters on Surface Integrity in High Speed Milling of Super Alloy GH4169/Inconel 718[J]. Materials & Manufacturing Processes, 2014, 31(5): 1—8.
- [52] JIANG X, LI B, YANG J, et al. An Approach for Analyzing and Controlling Residual Stress Generation During High-speed Circular Milling[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 66(9—12): 1439—1448.
- [53] 牟海阔, 黄信达, 袁益楚, 等. 铝锂合金高速铣削表面完整性实验研究[J]. 中国科学: 技术科学, 2014(1):

- 89—98.
- MOU Hai-Kuo, HUANG Xin-Da, YUAN Yi-Chu. Investigation of Surface Integrity of Aluminum Lithium Alloy in Highspeed Machining[J]. *Scientia Sinica (Technologica)*, 2014(1): 89—98.
- [54] HUANG X, SUN J, LI J. Experimental Investigation of the Effect of Tool Geometry on Residual Stresses in High Speed Milling 7050-T7451 Aluminum Alloy[J]. *International Journal of Surface Science and Engineering*, 2015, 9(4): 359—369.
- [55] 李波. 镍基高温合金 GH4169 高速铣削表面完整性研究[D]. 太原: 中北大学, 2015.
- LI Bo. A Constitutive Parameters Model of Ti6Al4V and Finite Element Simulation Study[D]. Taiyuan: North University of China, 2015.
- [56] 凌杰, 辛志杰. SiC_p/Al 复合材料的高速铣削试验与表面缺陷研究[J]. *科学技术与工程*, 2015(2): 217—221.
- LING Jie, XIN Zhi-jie. High-speed Milling Experiment and Surface Indefects of SiC_p/Al Composites[J]. *Science Technology and Engineering*, 2015(2): 217—221.
- [57] HOOD R, SOO S L, SAGE C, et al. High Speed End Milling of a Zirconium Alloy[J]. *CIRP Annals—Manufacturing Technology*, 2015, 64(1): 105—108.
- [58] 孙青. 超声振动微细铣削残余应力的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- SUN Qing. Study on Surface Residual Stress of Ultrasonic Vibration Milling Ti6Al4V[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
- [59] 乔国朝. 氮化硅陶瓷超声振动铣磨加工表面完整性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- QIAO Guo-chao. Research on Machined Surface Integrity in Ultrasonic Vibration Mill-Grinding of Silicon Nitride Ceramics[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [60] 赵云峰. 超声振动辅助铣削 LY12 铝合金表面质量研究[D]. 济南: 山东大学, 2011.
- ZHAO Yun-feng. Surface Quality Study on Ultrasonic Vibration Assisted Milling LY12[D]. Jinan: Shandong University, 2011.
- [61] 薛进学, 赵波, 吴雁. 二维超声磨削纳米复相陶瓷表面残余应力研究[J]. *兵工学报*, 2010, 31(5): 636—640.
- XUE Jin-xue, ZHAO Bo, WU Yan. Research on Surface Residual Stress of Nano-composite Ceramics after Two-dimensional Ultrasonic Grinding[J]. *Acta Armamentarii*, 2010, 31(5): 636—640.
- [62] 刘向. 超声辅助硬态车削 GCr15 轴承钢物理机械性能的试验研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2011.
- LIU Xiang. Experimental Study on Physical and Mechanical Properties of GCr15 Bearing Steel in Ultrasonic Assisted Hard Turning[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2011.
- [63] 韩杰. 纵-扭复合振动超声深滚加工声学系统研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2012.
- HAN Jie. Research on Acoustic System of Ultrasonic Deep Rolling with Longitudinal-Torsional Vibration [D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2012.
- [64] 赵明利, 程雪利, 赵波, 等. 多频率超声磨削工程陶瓷表面残余应力特征研究[J]. *河南理工大学学报(自然科学版)*, 2013(2): 170—173.
- ZHAO Ming-li, CHENG Xue-li, ZHAO Bo. Study on Residual Stress of Engineering Ceramics Surface in Multi-frequency Ultrasonic Grinding[J]. *Journal of Henan Polytechnic University(Natural Science)*, 2013(2): 170—173.
- [65] GANIEV M, GAFUROV I, VAGAPOV I. Impact Vibrations of Ultrasonic Multistriker Hand Tool[C]//*Vibration Engineering and Technology of Machinery—Proceedings of VETOMAC X*. United Kingdom: Kluwer Academic Publishers, 2015.
- [66] NAVAS V G, SANDA A, SANZ C, et al. Surface Integrity of Rotary Ultrasonic Machined ZrO₂-TiN and Al₂O₃-TiC-SiC Ceramics[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2015, 35(14): 3927—3941.
- [67] MAUROTTO A, WICKRAMARACHCHI C T. Experimental Investigations on Effects of Frequency in Ultrasonically-assisted End-milling of AISI 316L: A feasibility Study[J]. *Ultrasonics*, 2016, 65: 113—120.