

超声振动辅助 ELID 磨削淬硬 12Cr2Ni4A 合金钢表面特性的研究

向道辉, 雷小飞, 彭培成, 牛肖肖, 赵波, 高国富

(河南理工大学 机械与动力工程学院, 河南 焦作 454000)

摘 要: **目的** 提高淬硬 12Cr2Ni4A 钢的加工质量, 消除工件表面残余应力。**方法** 采用普通磨削 (OG)、超声振动辅助磨削 (UVAG) 以及超声振动辅助 ELID 磨削 (UVAEG) 3 种磨削方式, 分别对淬硬 12Cr2Ni4A 合金钢进行加工, 分析 3 种加工方式下被加工工件的表面粗糙度以及残余应力。**结果** 在超声振动辅助磨削、超声振动辅助 ELID 磨削下, 工件表面粗糙度都低于普通加工, 而超声振动辅助 ELID 磨削后的工件表面质量最高, 相对普通磨削加工, 超声振动辅助 ELID 磨削后的表面粗糙度降低了 66%, 相对于超声振动辅助磨削, 超声振动辅助 ELID 磨削后, 表面粗糙度降低了约 41%。对工件表面进行残余应力测定发现, 普通磨削加工后工件表面为残余拉应力, 而超声振动辅助磨削、超声振动辅助 ELID 磨削后的工件表面都产生了残余压应力, 超声振动辅助 ELID 磨削后, 工件表面的残余压应力高于超声振动辅助磨削约 30%。普通磨削加工中, 随磨削深度的增加, 残余拉应力一直变大, 而超声振动辅助磨削和超声振动辅助 ELID 磨削的残余压应力总体呈现减小的趋势。在磨削深度达到 22.5 μm 后, 超声振动辅助磨削加工表面的残余压应力转变为残余拉应力。在超声振动辅助磨削和超声振动辅助 ELID 磨削后, 随超声振幅的增大, 表面残余压应力增大, 超声振动辅助 ELID 磨削表面的残余压应力随占空比的增大而增大。**结论** 超声振动辅助 ELID 磨削加工后, 能得到更小的表面粗糙度及更大的表面残余压应力。

关键词: 超声振动辅助 ELID 磨削; 表面质量; 粗糙度; 残余应力

中图分类号: TG580.69 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2021)09-0333-09

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2021.09.035

Study on Surface Characteristics of 12Cr2Ni4A Alloy Steel by Ultrasonic Vibration Assisted ELID Grinding

XIANG Dao-hui, LEI Xiao-fei, PENG Pei-cheng, NIU Xiao-xiao, ZHAO Bo, GAO Guo-fu

(School of Mechanical and Power Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

ABSTRACT: This paper aims to improve the machining quality of hardened 12Cr2Ni4A steel, improve the machining accuracy

收稿日期: 2020-10-30; 修订日期: 2021-01-15

Received: 2020-10-30; Revised: 2021-01-15

基金项目: 国家自然科学基金 (51975188); 河南省自然科学基金 (182300410200); 高性能复杂制造国家重点实验室开放基金 (KFKT2017-09)

Fund: The National Natural Science Foundation of China (51975188), Henan Provincial Natural Science Foundation of China (182300410200), Open Foundation of High Performance Complex Manufacturing State Key Laboratory (KFKT2017-09)

作者简介: 向道辉 (1971—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为精密、超精密 (特种) 加工技术, 化学气相沉积金刚石涂层技术。

Biography: XIANG Dao-hui (1971—), Male, Doctor, Professor, Research focus: precision, ultra precision (special) machining technology and CVD diamond coating technology.

引文格式: 向道辉, 雷小飞, 彭培成, 等. 超声振动辅助 ELID 磨削淬硬 12Cr2Ni4A 合金钢表面特性的研究[J]. 表面技术, 2021, 50(9): 333-341.
XIANG Dao-hui, LEI Xiao-fei, PENG Pei-cheng, et al. Study on Surface Characteristics of 12Cr2Ni4A Alloy Steel by Ultrasonic Vibration Assisted ELID Grinding[J]. Surface technology, 2021, 50(9): 333-341.

and eliminate the residual stress on the workpiece surface. The hardened 12Cr2Ni4A alloy steel was processed by ordinary grinding (OG), ultrasonic vibration assisted grinding (UVAG) and ultrasonic vibration assisted ELID grinding (UVAEG) respectively. The surface roughness and residual stress of the workpiece machined under the three grinding modes were analyzed. The result was that the surface roughness of workpiece in UVAG and UVAEG was lower than that of OG, while the surface quality of workpiece after UVAEG was the highest. Compared with OG, the surface roughness decreased by 66% and 41% compared with UVAG; the residual stress measurement of workpiece surface showed that the surface of workpiece was residual tensile stress after OG, while residual compressive stress was produced after UVAG and UVAEG. The residual compressive stress of workpiece surface after UVAEG was about 30% higher than that of UVAG; in OG machining, the residual tensile stress had been increasing with the increase of the grinding depth, while the residual compressive stress of UVAG and UVAEG generally showed a decreasing trend. After the grinding depth reached 22.5 μm , the residual compressive stress on the machined surface of UVAG was transformed into residual tensile stress. The surface residual stress of UVAG and UVAEG increased with the increase of ultrasonic amplitude, and the surface residual stress of UVAEG increased with the increase of duty cycle. The conclusion is that UVAEG can obtain smaller surface roughness and larger surface residual compressive stress.

KEY WORDS: ultrasonic vibration assisted ELID grinding; surface quality; roughness; residual stress

12Cr2Ni4A 是一种强度高、韧性好、淬透性良好的合金钢, 经过渗碳-淬火-低温回火后, 心部强度和塑韧性能够较好地配合, 表面硬度和耐磨性得到了很大提高, 因此被广泛应用于制作蜗轮、蜗杆、齿轮以及轴类等受载、受交变应力等元件^[1-6]。但淬硬 12Cr2Ni4A 的硬度和耐磨性的提高也使其加工性能变差, 传统方法加工的 12Cr2Ni4A 钢表面质量差, 工件表面会产生较大的残余拉应力, 严重影响工件的疲劳使用寿命。超声振动辅助加工是一种特种加工技术, 它是一种超声振动与传统机械加工相结合的加工方式, 是将超声高频振动附加在刀具或者工件上, 利用超声振动产生的能量来改变材料去除机理, 改善其加工过程及加工效果^[7]。ELID 磨削加工技术可以在加工过程中对砂轮进行持续电解修锐, 保持磨粒的锋利性, 预留一定的容屑空间, 同时, 电解修锐后的砂轮磨粒等高性好, 因此可以实现工件表面的精密与超精密加工^[8-9]。近年来, 许多研究者对 ELID 磨削技术和超声振动辅助磨削钢的表面性能作了相应的实验探究。张飞虎^[10]采用 ELID 磨削加工技术对 GCr15 钢进行加工, 结果表明, 采用铸铁结合剂 CBN 砂轮进行 ELID 磨削时, 可以获得很低的表面粗糙度, 实现了对 GCr15 钢的超精密镜面磨削。关佳亮^[11]对不锈钢进行 ELID 磨削, 发现当采用铸铁基金刚石砂轮进行 ELID 磨削时, 其磨削力和粗糙度相对于普通磨削都会大大降低, 实现了对不锈钢的精密镜面磨削。Zhang^[12]建立了超声振动辅助磨削下表面粗糙度的计算模型, 并对超声振动辅助磨削和传统磨削进行了表面粗糙度对比实验, 结果表明, 磨料尺寸对表面粗糙度的影响最明显, 超声振动辅助磨削下的表面粗糙度更小。张静^[13]对 42CrMo 钢进行了平面磨削加工实验, 研究了磨削速度、磨削深度、进给速度对残余应力的影响, 总结了磨削速度、磨削深度、进给速度对残余应力的影响规律, 揭示了淬硬层残余应力与显微

硬度分布之间的关系。Chen^[14]研究了超声振幅加工工艺下, 磨削深度和磨削速度对大型 CBN 砂轮超声辅助干磨 12Cr2Ni4A 时表面粗糙度的影响, 发现在轴向和径向振动的共同作用下, 工件表面粗糙度先减小, 然后随着磨削深度的增加而增加。栗育琴^[15]对普通磨削和超声辅助磨削进行了残余应力分析, 发现随着砂轮线速度的增大, 超声对表面残余压应力的提高会减弱。关佳亮^[16]采用电解在线修整磨削技术, 对铝基金刚石复合材料进行了磨削加工, 通过二次正交旋转组合法研究了磨削深度、砂轮线速度、占空比和电解电流对表面粗糙度的影响规律和影响程度。

综上所述, 目前研究人员主要是对普通磨削加工、超声振动辅助磨削以及电解在线修整磨削技术单独进行加工后的工件表面特性研究, 对超声振动辅助 ELID 磨削表面特性的研究鲜有报道。由于采用传统的磨削加工方法, 加工后的工件表面质量差、工件表面会产生残余拉应力, 导致工件的抗疲劳使用寿命低, 严重影响其使用性能^[17-21]。为了保证加工质量、提高加工效率以及改善工件表面的应力状态, 本文采用普通磨削、超声振动辅助磨削、超声振动辅助 ELID 复合磨削 3 种加工方式, 分别对淬硬 12Cr2Ni4A 合金钢进行磨削实验, 探究不同加工方式下工件表面粗糙度及表面残余应力的变化情况, 对后续淬硬 12Cr2Ni4A 合金钢的广泛运用和高效精密加工有重要的指导意义。

1 超声振动辅助 ELID 磨削加工原理

超声振动辅助 ELID 磨削加工是超声振动辅助磨削与 ELID 在线电解修整技术相结合的一种新型复合加工方式, 它具备超声振动加工及在线电解修整的双重优点。超声振动辅助 ELID 磨削系统主要由超声振动系统、ELID 在线电解修锐系统两大部分组成, 如

图 1 所示。超声振动系统主要给刀具或工件提供了高频的小振幅振动，改善了加工条件，而 ELID 磨削系统主要是让砂轮磨粒在加工过程中能够进行修锐，从而保持其持续加工的能力，因此能实现对材料的高效精密加工。

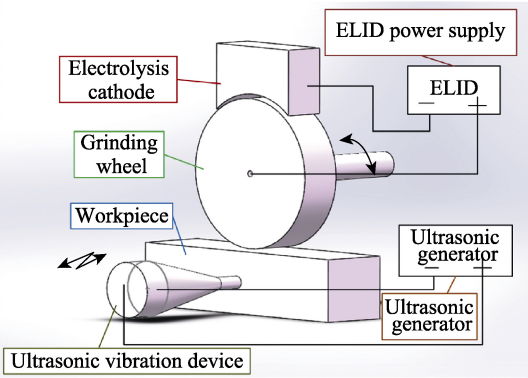


图 1 工作原理图
Fig.1 Working principle diagram

（SZ12）以及压电式纵向振动换能器、圆锥圆柱形复合变幅杆组成的超声振动机构，超声功率是 20 kHz。ELID 电源采用的是哈尔滨工业大学研制的直流脉冲电源（HDMD-V）。实验平台为精密磨床。超声振动施加在工件轴向方向，换能器与变幅杆通过螺栓进行连接，变幅杆与振动平台进行螺纹连接，工件通过夹紧机构，固定在振动平台上，振动平台通过电磁吸力吸附在工作台上，具体磨削实验现场如图 2 所示。

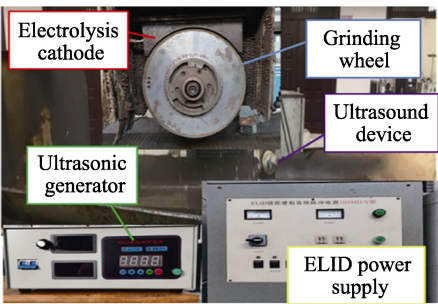


图 2 磨削实验现场图
Fig.2 Field diagram of grinding test

2 实验

2.1 实验条件

考虑到实验采用超声振动辅助 ELID 磨削方式，实验材料为淬硬 12Cr2Ni4A 合金钢，因此采用导电性好、适用于合金钢加工的铸铁基 CBN 砂轮，电解液采取内供式。超声振动系统采用智能超声发生器

淬硬 12Cr2Ni4A 合金钢具有强度高、表面硬度高、耐磨性好、韧性好等优异性能，其主要化学成分如表 1 所示。

本文选择的磨削加工实验参数有工作台速度、超声振幅、砂轮线速度、磨削深度以及占空比。通过对比分析，确定了 3 种不同加工方式对工件表面质量及残余应力的影响。具体单因素实验方案如表 2 所示。

表 1 淬硬 12Cr2Ni4A 合金钢的化学成分
Tab.1 Chemical composition of hardened 12Cr2Ni4A alloy steel

C	Cr	Ni	Mn	Si	P	S	Cu
0.10~0.16	1.25~1.65	3.25~3.65	0.30~0.60	0.17~0.37	≤0.035	≤0.035	≤0.030

表 2 磨削实验方案
Tab.2 Grinding test scheme

Grinding parameters	Test conditions
Grinding method	Ultrasonic assisted ELID grinding, ultrasonic vibration assisted grinding and ordinary grinding
Grain size of grinding wheel/ μm	W40
Grinding method	Wet grinding
Linear speed of grinding wheel (V_s)/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	22.6
Workpiece moving speed (V_w)/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	0.3
Grinding depth (a_p)/ μm	5, 10, 15, 20, 25
ELID duty cycle	0, 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9
Ultrasonic amplitude (A)/ μm	0, 1, 2, 2.5, 3, 4

2.2 测试方法

采用超景深观测系统与布鲁克三维表面轮廓仪（Contour GT-K）对磨削后工件的表面粗糙度进行测试

量分析。采用超景深显微系统测量表面微观形貌时，放大倍数选择为 700 倍。采用布鲁克三维表面轮廓仪测量工件表面粗糙度值的大小，精度最高可以达到 0.1 nm，本文选择普通白光模式，放大倍数为 10 倍，

测量精度为 1 nm。为了提高表面微观形貌与白光测量结果的精度,每个工件选取 5 个实验点进行测量,取平均值。

采用 X 射线残余应力分析仪 (CanadaProto Manufacturing Ltd, LXR D) 测试样品残余应力分布,其主要是通过 X 射线对工件的表面进行检测,检测原理如图 3 所示。A 表示入射光线, B 为衍射光线, N 代表衍射晶面法线, S₁、S₂ 分别代表探头 1 和探头 2, ϕ 表示所测应变方向, θ 表示衍射角。衍射角的大小可以根据材料特性进行选择,本文采用的 X 射线残余应力分析仪具有 2 个探头,可以同时测量 2 个残余应力值,计算得出的残余应力值更加精确。

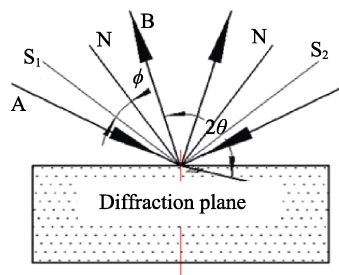


图3 X射线测量原理示意图

Fig.3 Schematic diagram of X-ray measurement principle

通过多次增益实验调试,最终确定的检测淬硬 12Cr2Ni4A 合金钢表面的残余应力参数见表 3。

表 3 残余应力检测参数
Tab.3 Residual stress detection parameters

Target material	Wavelength	Bragg angle/(°)	Bete	Facula /mm	Voltage /kV	Electric current/mA	Time of exposure/s	Exposure times
Cr	2.291	156	0	1	30	25	0.5	10

通过 X 射线衍射分析仪进行曲线拟合,结果如图 4 所示。检测曲线与增益拟合程度高,峰值突出,说明材料检测参数选取良好。

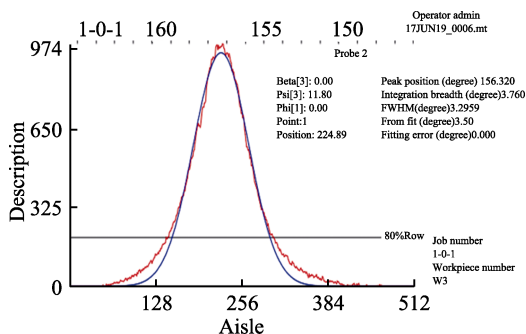


图4 高斯拟合曲线

Fig.4 Gaussian fitting curve

首先通过平面磨床对工件进行粗磨加工,保证所有工件的初始残余应力及表面粗糙度相同。再通过计算机对预加工处理的工件进行表面残余应力测量,测

试多个工件后,取平均值作为实验参照标准。经过高斯拟合,将预处理工件表面的残余拉应力平均值 ($\sigma = (161.79 \pm 7.45) \text{ MPa}$) 作为实验参照标准。然后进行实验,为降低实验结果的误差,在工件磨削区随机选取一条斜线,并保证所有零件在相同位置取测量的斜线,在线上取 3 个点进行残余应力检测,取平均值。

3 结果及分析

3.1 表面粗糙度

3.1.1 不同磨削加工方式下工件表面残留面积高度结果分析

工件表面残留面积的高度是影响表面粗糙度的一个重要因素,采用超景深显微系统对实验后的工件进行表面微观形貌测量,分别得到了 3 种磨削方式加工后工件表面的三维形貌,如图 5 所示。其对应的加工参数为: $v_w = 0.3 \text{ m/s}$, $v_s = 22.6 \text{ m/s}$, $a_p = 10 \text{ }\mu\text{m}$, $A =$

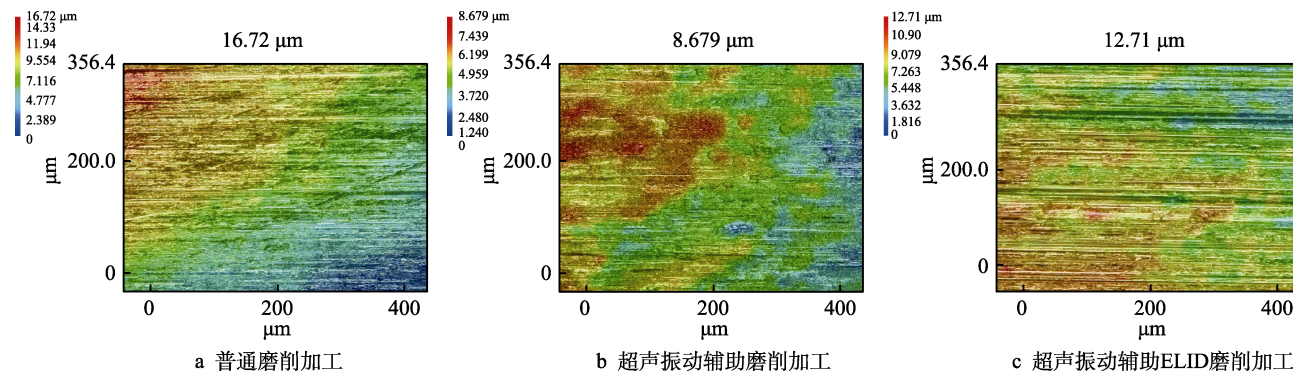


图5 超景深 3D 形貌

Fig.5 3D topography beyond depth of field: a) general grinding; b) ultrasonic vibration assisted grinding; c) ultrasonic vibration assisted ELID Grinding

3 μm , 占空比 0.3。图中左上角的颜色柱状图代表残留高度, 蓝色最低, 红色最高; 右上角的值代表整个磨削表面的残留面积高度。由图 5 可知, 普通磨削表面残留面积高度最大, 为 16.72 μm ; 而在超声振动辅助磨削和超声振动辅助 ELID 磨削加工后, 工件表面的沟痕比普通磨削加工有明显的减少, 表面残留面积高度也有所降低, 分别为 8.679 μm 和 12.71 μm , 但超声振动辅助 ELID 磨削的残留面积高度比超声辅助磨削大。这是因为, 普通磨削加工中, 砂轮与工件一直接触, 脱落的磨粒容易堵塞砂轮, 使磨削力增大、磨削温度升高、散热条件差, 极易造成工件表面烧伤。此外, 脱落的磨粒会对表面进行二次划擦, 所以工件表面有明显的沟痕存在, 因此残留高度最大。而超声振动辅助磨削和超声振动辅助 ELID 磨削都在轴向方向上施加了高频超声振动, 使得连续磨削变成了高频的接触-分离断续磨削, 改善了加工条件, 提高了磨粒与工件之间的接触弧长。同时超声振动使不同磨粒的运动轨迹变长且存在交叉, 因此磨粒的密集程度变高, 不同磨粒会对工件表面同一地方进行多次磨削, 使超声振动辅助 ELID 磨削和超声振动辅助磨削的加工表面残留面积高度都低于普通磨削。超声振动辅助 ELID 磨削的残留面积高度比超声振动辅助磨削大, 这是因为在 ELID 磨削过程中, 磨粒细化形成了一定高度的切削刃, 磨粒在连续修锐时, 切入工件的深度由短变长, 使残留面积高度略高于超声振动辅助磨削加工。

3.1.2 不同磨削加工方式下工件表面粗糙度结果分析

通过布鲁克三维轮廓仪对工件表面轮廓进行测量, 得到三维形貌以及表面粗糙度值的大小, 如图 6 所示。其对应的加工参数为: $v_w=0.3 \text{ m/s}$, $a_p=10 \mu\text{m}$, $v_s=22.6 \text{ m/s}$, $A=3 \mu\text{m}$, 占空比 0.5。由图 6 可知, 在

普通磨削表面提取的轮廓线振动幅度约为 3 μm , 在整个轮廓线范围内, 存在多个尖锐峰以及沟壑。而超声辅助磨削与超声 ELID 复合磨削表面的轮廓线波动幅度都约为 1 μm , 并且在整个范围内, 波动次数大幅度增加, 但没有明显的尖锐峰与沟壑, 这进一步说明, 超声高频振动使不同磨粒的运动轨迹重叠, 加强了磨粒之间的干涉作用, 因此不同磨粒会对工件表面同一区域进行多次磨削加工, 工件表面残留面积减小, 粗糙度小。另外, 超声高频振动会使工件表面发生一定程度的软化, 使材料更容易以塑性去除的方式去除, 加之磨粒会多次重复磨削工件表面, 使得工件表面的凸起与凹坑经过多次重复磨削而变得平整, 降低了加工表面的粗糙度。超声 ELID 复合磨削除了超声振动作用, 还具有电解加工的优点, 在复合磨削过程中, 砂轮表面的磨粒由于电解而变得细化, 在砂轮表面形成了一定空间的容屑槽, 所以磨粒易于排出, 能够避免脱落的磨粒划伤工件, 降低了工件表面的粗糙度。此外, 砂轮表面形成了 1 层致密而稳定的氧化膜, 由于其具有润滑性且含有一定数量的磨粒, 对工件表面具有抛光加工的作用, 能够进一步降低工件表面的粗糙度。

在 3 种不同加工方式中, 超声辅助磨削与普通磨削工件表面轮廓线均在 0 刻度线附近上下波动, 说明在这两种磨削加工方法下, 磨粒实际切入深度基本相同, 而超声 ELID 复合磨削工件表面轮廓线均在 0.5 μm 的刻度线附近上下波动, 这是因为, 砂轮与工件之间的磨削液中还存有游离的磨粒, 砂轮表面覆盖着混有大量磨粒的氧化膜, 游离的磨粒以及氧化膜会对磨削表面进行再次磨削加工, 使超声 ELID 复合磨削加工的实际磨削深度低于超声磨削和普通磨削的实际磨削深度, 产生轮廓线上移现象。

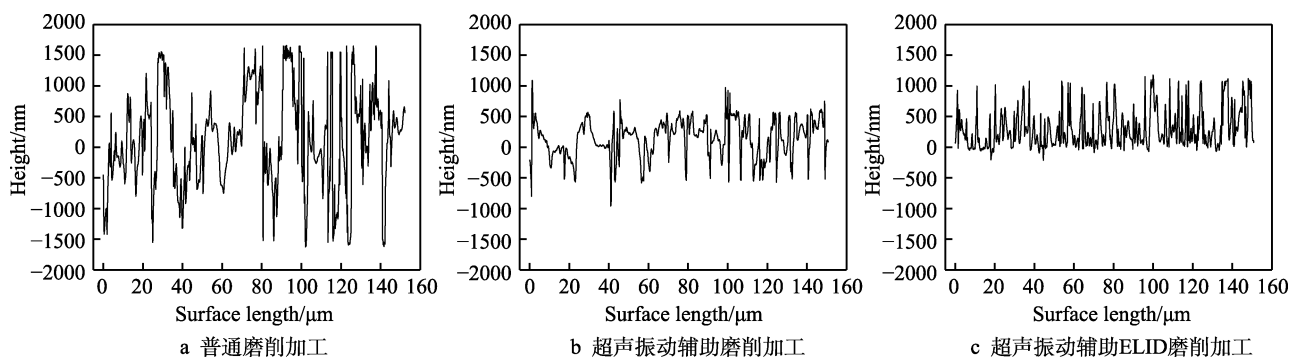


图 6 工件表面轮廓线

Fig.6 Outline of workpiece surface: a) ordinary grinding; b) ultrasonic vibration assisted grinding; c) ultrasonic vibration assisted ELID Grinding

3.1.3 不同磨削加工方式下磨削深度对工件表面粗糙度的影响

磨削深度是影响加工效率的重要因素之一, 在不同磨削深度下, 对表面粗糙度的变化趋势进行分析。

随着磨削深度的变化, 加工后工件表面粗糙度也发生了不同的变化。为减小实验误差, 每个工件选取 5 个实验点进行测量, 取平均值, 结果如图 7 所示。其对应的加工参数为: $v_w=0.3 \text{ m/s}$, $v_s=22.6 \text{ m/s}$, $A=4 \mu\text{m}$,

占空比 0.5。

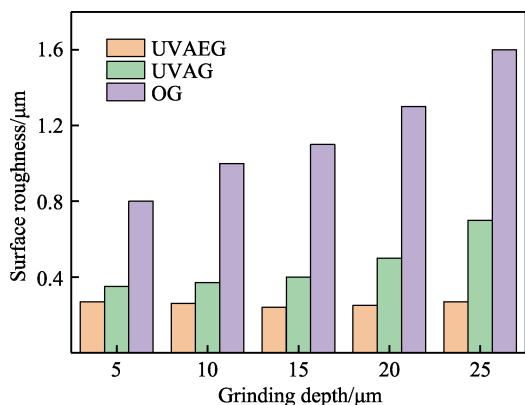


图7 磨削深度与表面粗糙度的关系

Fig.7 Relationship between grinding depth and surface roughness

从图7可以看出,随着磨削深度的不断增加,普通和超声辅助磨削方式下的粗糙度都呈现上升的趋势,而超声ELID复合磨削加工后的粗糙度先减小后增大,且上升趋势非常缓慢。普通磨削加工后,工件表面的粗糙度在不断变大,且上升幅度较高。而在磨削深度小于 $15\mu\text{m}$ 之前,超声辅助磨削后的工件表面粗糙度增加较为缓慢,超声ELID复合磨削后的粗糙度呈现减小的趋势。在磨削深度达到 $15\mu\text{m}$ 后,超声ELID复合磨削的粗糙度又缓慢增加,但总体变化不大。

在普通磨削加工方式下,随着磨削深度的增加,磨粒切入工件的数量增加,磨粒与工件之间的接触抗力增大,导致磨削力增大,加速工件表面裂纹的产生和扩展,使工件表面材料以较大颗粒的形式被去除,在工件表面形成较大的凹坑或凸起,导致工件粗糙度急剧增加。另外,由于普通磨削过程中磨粒不易排出,使得脱落的磨粒会划伤工件表面,因此会使表面粗糙度增大,还会引起磨削区温度升高,从而引起工件表面烧伤。而超声辅助磨削与超声ELID复合磨削在磨削深度未到达 $15\mu\text{m}$ 之前,由于超声高频振动的作用,磨屑更容易排出,砂轮不易堵塞,不同的磨粒运动轨迹变长且存在交叉,所以不同磨粒会对工件表面同一地方进行多次重复磨削,使粗糙度无明显变化。在磨削深度达到 $15\mu\text{m}$ 后,磨粒进入工件的数量急剧增加,磨粒与工件间的抗力迅速增大,法向磨削力也随着增大,这削弱了超声高频振动的效果,因此磨削后,表面粗糙度有所增加。但超声ELID复合磨削加工过程中,通过电解,砂轮磨粒可以不断修锐,磨粒细化导致磨削力上升较小,从而抑制了裂纹的扩展。此外,超声砂轮结合剂电解形成的氧化膜能够带走磨屑,避免划伤已加工表面,氧化膜中含有砂轮电解后脱落的大量小磨粒,能在磨削过程中对工件表面进行研磨和抛光等二次加工,因而粗糙度上升缓慢。

3.1.4 不同占空比对工件表面粗糙度的影响

在一个脉冲放电周期内,放电时间占放电周期的

时间比重称为占空比。占空比的变化代表放电时间改变,使砂轮电解程度改变,形成的氧化膜质量不同,对砂轮磨粒修锐质量也不同,从而影响加工磨削后工件表面质量。选择不同占空比参数进行超声ELID复合磨削加工,得到表面粗糙度变化趋势,如图8所示。其对应的加工参数为: $v_w=0.3\text{ m/s}$, $v_s=22.6\text{ m/s}$, $A=4\mu\text{m}$, $a_p=10\mu\text{m}$ 。

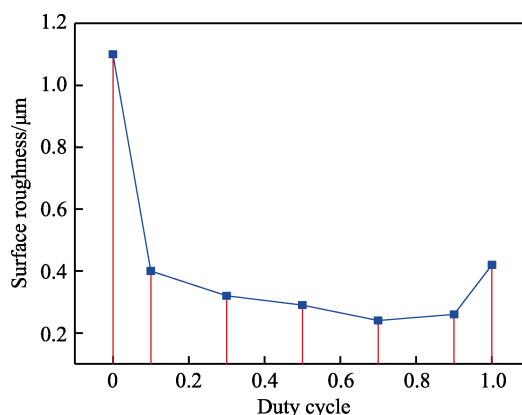


图8 不同占空比与表面粗糙度的关系

Fig.8 Relationship between different duty cycles and surface roughness

图8中,占空比为0代表普通磨削,占空比为1代表超声辅助磨削,占空比为0.3、0.5与0.7分别代表超声ELID复合磨削加工,红线的高度表示表面粗糙度值。

从图8中能够看出,普通磨削的粗糙度值为 $1.1\mu\text{m}$,超声辅助磨削粗糙度值为 $0.42\mu\text{m}$,而超声ELID复合磨削的粗糙度均低于超声辅助磨削。当占空比为0.7时,超声ELID复合磨削的表面粗糙度值最低,约为 $0.24\mu\text{m}$ 。此时,砂轮表面生成的氧化膜密度高、绝缘性好,同时砂轮表面裸露的锋利磨粒数最多,磨粒等高性好。加上氧化膜的挤压抛光作用,因而加工后工件表面粗糙度最低。

3.2 表面残余应力的分析

3.2.1 不同磨削加工方式下工件表面残余应力

采用X射线衍射法检测工件表面的残余应力,在3种磨削加工方式下,工件表面的残余应力值如图9所示,其对应的加工参数为: $v_w=0.3\text{ m/s}$, $v_s=22.6\text{ m/s}$, $a_p=15\mu\text{m}$, $A=4\mu\text{m}$,占空比0.5。

从图9可以看出,普通磨削加工后,工件表面表现为残余拉应力,约为 114.79 MPa ;超声辅助磨削加工后,工件表面表现为残余压应力,约为 -82.92 MPa ;超声ELID复合磨削后,工件表面的残余压应力约为 -107.58 MPa 。普通磨削加工中,磨粒钝化严重,造成磨削机械力增大,同时磨屑堵塞砂轮,使磨削温度急剧升高。当磨削加工停止时,工件表面冷却速度大于内表层,所以工件表面的收缩速度就会受到工件内

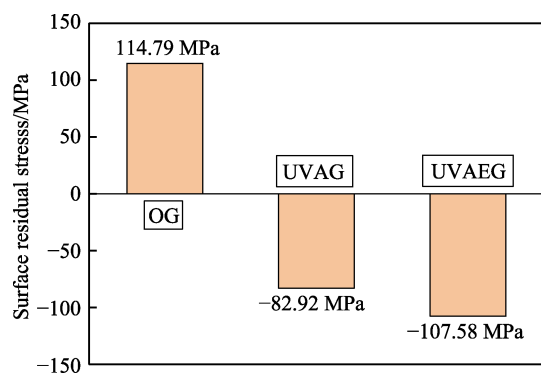


图 9 不同加工方式与残余应力的关系

Fig.9 Relationship between different processing methods and residual stress

表层的阻碍,因而在两者耦合作用下,工件表面表现为残余拉应力。而超声辅助磨削与超声 ELID 复合磨削加工都施加了超声高频振动,磨粒的运动轨迹长度增加,磨粒磨削的宽度增加,磨粒在工件磨削区的磨削次数增加,对工件表面的挤压摩擦增加,同时超声振动使得磨屑细化,降低了砂轮堵塞的可能性,从而降低了磨削温度。当磨削加工停止后,工件外表面的冷却速度低于内表层的冷却速度,因而工件表面会受到内表层的拉力,表现为残余压应力。另外,超声 ELID 磨削加工中,除了超声振动作用外,还有砂轮磨粒的修锐以及砂轮结合剂电解形成的氧化膜作用,这使得磨削后工件的表面温度进一步降低,工件表面受到内表层的拉力越大,所以其残余压应力高于超声辅助磨削加工。

3.2.2 磨削深度对残余应力的影响

不同磨削深度对不同加工方式下工件表面残余应力的影响如图 10 所示,其对应的加工参数为: $v_w=0.3$ m/s, $v_s=22.6$ m/s, $A=4$ μ m, 占空比 0.5。可以看出,普通磨削加工工件表面的残余应力表现为拉应力,而且随着磨削深度的增加,残余拉应力不断升高。这是因为随着磨削深度的增加,磨粒切入工件的数量急剧增加,工件受到的磨削力增大,磨粒磨损加剧,

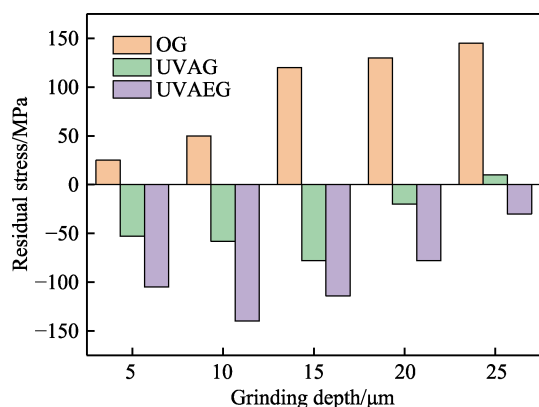


图 10 磨削深度与残余应力的关系

Fig.10 Relationship between grinding depth and residual stress

同时脱落的磨粒与磨屑难以排出,造成砂轮堵塞,磨削温度升高,在这些因素共同作用下,工件表面出现残余拉应力并呈现上升趋势。

超声辅助磨削与超声振动辅助 ELID 磨削后,工件表面残余应力表现为压应力,随着磨削深度的增大,工件表面残余压应力先增大后降低。在磨削深度较小时,超声振动作用体现不显著,磨削深度增加后,超声振动的作用逐渐体现,磨粒对工件表面材料的塑性切削作用增强,降低了磨削力。同时磨粒运动轨迹增加,使磨削宽度增加,超声的高频振动能够带走更多的磨屑,降低砂轮堵塞的可能性,从而降低了磨削过程中产生的磨削热,使温度降低,工件表现为残余压应力。在磨削深度增大到 15 μ m 时,超声辅助磨削加工后的工件表面残余压应力达到最大值,为 -78 MPa,而超声振动辅助 ELID 磨削的工件表面残余压应力值为 -114 MPa,约是超声辅助磨削的 1.4 倍。这是因为超声振动辅助 ELID 磨削除了有超声振动作用外,生成的氧化膜对工件表面也存在挤压抛光作用,使超声振动辅助 ELID 磨削表面的残余压应力高于超声振动辅助磨削。

3.2.3 超声振幅对表面残余应力的影响

超声辅助加工时,超声振幅的变化会引起表面残余应力的改变。图 11 为不同超声振幅下,超声辅助磨削与超声 ELID 复合磨削加工工件表面的残余应力变化,其对应的加工参数为: $v_w=0.3$ m/s, $v_s=22.6$ m/s, $a_p=15$ μ m, 占空比 0.5。

从图 11 可知,随着超声振幅的增大,两种磨削加工后的工件表面残余压应力均呈增大趋势。这是由于超声振幅越大,磨粒之间的干涉作用增加,工件表面有效磨削宽度增大,工件表面材料塑性变形比例越高,同时超声振幅增加使磨粒更易排除,磨削区域温度降低,残余压应力越大。当超声振幅从 0 μ m 变化到 2 μ m 时,工件表面受到高频冲击,应力状态发生改变,两种磨削加工的表面残余应力都从残余拉应力

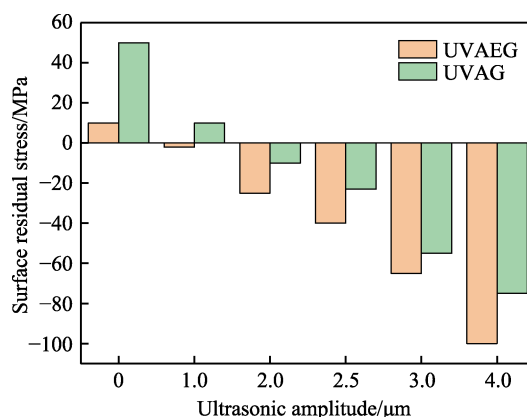


图 11 超声振幅与残余应力的关系

Fig.11 Relationship between ultrasonic amplitude and residual stress

变为残余压应力。超声振动辅助 ELID 磨削加工的残余压应力始终高于超声辅助磨削,这是因为超声振动辅助 ELID 磨削加工时砂轮磨粒能够一直修锐,保持锋利状态,同时氧化膜中的游离磨粒对磨削表面的抛光作用增强;另外,超声振动使砂轮表面容屑槽中的磨粒更容易脱落,降低了磨削温度。

3.2.4 不同占空比对残余应力的影响

在超声振动辅助 ELID 磨削中,不同占空比对残余应力也会产生不同的影响。占空比参数主要影响砂轮表面氧化膜的质量,选取磨削深度为 $10\text{ }\mu\text{m}$,超声振幅为 $4\text{ }\mu\text{m}$,在不同占空比下对超声振动辅助 ELID 磨削加工表面进行残余压应力分析,如图 12 所示,其对应的加工参数为: $v_w=0.3\text{ m/s}$, $v_s=22.6\text{ m/s}$, $a_p=15\text{ }\mu\text{m}$, $A=4\text{ }\mu\text{m}$ 。

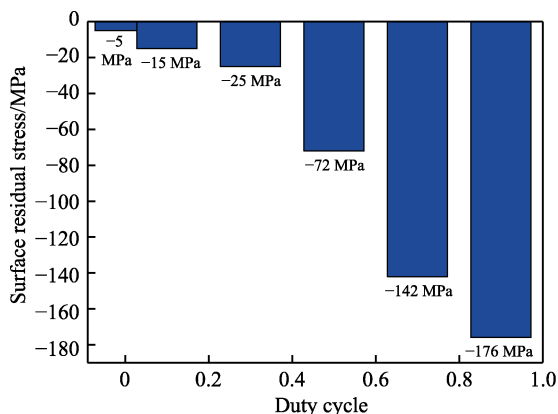


图 12 占空比与残余应力的关系

Fig.12 Relationship between duty cycle and residual stress

从图 12 中能够看到,随着占空比的增大,磨削后工件表面残余应力增大。这是因为占空比越高,生成的氧化膜越致密,绝缘性好,能够抑制过度电解,磨粒锋利。超声振动辅助 ELID 磨削中,由于砂轮修锐形成的容屑空间以及超声振动的作用,能够有效降低砂轮堵塞,降低磨削区域的温度,同时氧化膜中游离的磨粒对工件表面也起到抛光作用,有利于残余压应力进一步增高。因此,超声振动辅助 ELID 磨削后,工件表面残余压应力最高。

4 结论

1) 3 种磨削加工后,对工件表面残留面积高度以及粗糙度分析得到,在相同磨削条件下,超声振动辅助磨削加工与超声振动辅助 ELID 磨削加工下工件表面的残留面积高度以及粗糙度均小于普通磨削加工,这是由于超声振动使不同磨粒的运动轨迹变长且存在交叉,因此不同磨粒会在工件表面同一地方进行多次磨削,能够提高工件表面质量,降低表面粗糙度。

2) 通过分析 3 种磨削加工方式下磨削深度对工件表面粗糙度的影响得到,在相同磨削条件下,随着

磨削深度不断增加,普通磨削加工后工件表面的粗糙度不断变大,且上升幅度较高,而超声辅助磨削与超声 ELID 复合磨削在磨削深度小于 $15\text{ }\mu\text{m}$ 之前,工件表面粗糙度基本不变化,在磨削深度达到 $15\text{ }\mu\text{m}$ 后才有所增加,并且超声 ELID 复合磨削加工表面的粗糙度上升更为缓慢。

3) 在相同的磨削条件下,超声振动辅助磨削和超声振动辅助 ELID 磨削加工工件表面产生的是残余压应力,而普通磨削加工工件表面产生的是残余拉应力。普通磨削加工中,残余拉应力随磨削深度的增加一直变大,而超声振动辅助磨削和超声振动辅助 ELID 磨削的残余压应力总体呈现减小的趋势,在磨削深度达到 $22.5\text{ }\mu\text{m}$ 后,超声振动辅助磨削加工表面的残余压应力转变为残余拉应力。超声振动辅助 ELID 磨削加工工件表面的残余压应力高于超声辅助磨削。随超声振幅的增大,超声振动辅助磨削和超声振动辅助 ELID 磨削表面的残余应力增大,且超声振动辅助 ELID 磨削表面的残余应力也随占空比的增大而增大。

参考文献:

- [1] 张琼,徐奉鑫,刘英环.降低 12Cr2Ni4A 材料渗碳后心部硬度研究[J].科技与企业,2014(8): 301.
ZHANG Qiong, XU Feng-xin, LIU Ying-huan. Research on reducing the core hardness of 12Cr2Ni4A after carburizing[J]. Science-technology enterprise, 2014(8): 301.
- [2] 刘文斌. 12Cr2Ni4A 传动齿轮的失效原因分析及预防探讨[J]. 失效分析与预防, 2015, 10(1): 31-35.
LIU Wen-bin. Failure analysis and prevention of 12Cr2Ni4A driver gear[J]. Failure analysis and prevention, 2015, 10(1): 31-35.
- [3] 中国航空材料手册编辑委员会. 中国航空材料手册[M]. 北京: 中国标准出版社, 1999.
Editorial Committee of China Aviation Materials Handbook. China Aviation Materials Handbook[M]. Beijing: China Standard Press, 1999.
- [4] 于雪梅,冯立超,王海,等. 12Cr2Ni4 钢齿轮断裂失效分析[J]. 金属热处理, 2015, 40(11): 191-194.
YU Xue-mei, FENG Li-chao, WANG Hai, et al. Fracture failure analysis of 12Cr2Ni4 steel gear[J]. Heat treatment of metals, 2015, 40(11): 191-194.
- [5] 王延忠,李岩,刘旸,等. 初始残余应力对齿轮磨削后应力分布的影响[J]. 新技术新工艺, 2016(8): 31-36.
WANG Yan-zhong, LI Yan, LIU Yang, et al. Influence on stress distribution of initial residual stress after gear grinding[J]. New technology & new process, 2016(8): 31-36.
- [6] 王延忠,王段. 航空齿轮热处理工艺优化试验研究[J]. 机械设计与制造, 2019(4): 189-191.
WANG Yan-zhong, WANG Duan. Experimental study on optimization of heat treatment process of aviation gears[J].

- Machinery design & manufacture, 2019(4): 189-191.
- [7] 曹凤国. 超声加工技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- CAO Feng-guo. Ultrasonic processing technology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.
- [8] 张飞虎, 朱波, 栾殿荣, 等. ELID 磨削硬脆材料精密和超精密加工的新技术[J]. 宇航材料工艺, 1999, 29(1): 51-55.
- ZHANG Fei-hu, ZHU Bo, LUAN Dian-rong, et al. ELID Grinding A new technology for precision and ultraprecision machining of hard and brittle materials[J]. Aerospace materials & technology, 1999, 29(1): 51-55.
- [9] 宁生科, 柯镭. ELID 磨削工艺控制研究[J]. 机械研究与应用, 2014, 27(1): 60-61.
- NING Sheng-ke, KE Lei. ELID grinding process control research[J]. Mechanical research & application, 2014, 27(1): 60-61.
- [10] 张飞虎, 曹红波, 栾殿荣, 等. GCr15 钢的 ELID 磨削性能实验研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2005, 25(6): 57-61.
- ZHANG Fei-hu, CAO Hong-bo, LUAN Dian-rong, et al. Research on ELID grinding performance of GCr15 steel[J]. Diamond & abrasives engineering, 2005, 25(6): 57-61.
- [11] 关佳亮, 杨亚兰, 孙志杰, 等. 不锈钢的 ELID 磨削实验研究[J]. 现代制造工程, 2009(10): 17-18.
- GUAN Jia-liang, YANG Ya-lan, SUN Zhi-jie, et al. Research on ELID grinding performance of stainless steel[J]. Modern manufacturing engineering, 2009(10): 17-18.
- [12] ZHANG Hong-li, SHAN Shao-fu, ZHANG Jian-hua. Investigation on machined surface roughness in ultrasonic vibration assisted grinding (I)[J]. Advanced materials research, 2011, 230-232: 829-833.
- [13] 张静, 裴宏杰, 王贵成. 磨削用量对 42CrMo 钢淬硬层残余应力的影响[J]. 金属热处理, 2018, 43(9): 238-241.
- ZHANG Jing, PEI Hong-jie, WANG Gui-cheng. Effect of grinding parameters on residual stress of hardened layer of 42CrMo steel[J]. Heat treatment of metals, 2018, 43(9): 238-241.
- [14] CHEN Hai-feng, TANG Jin-yuan, SHAO Wen, et al. An investigation of surface roughness in ultrasonic assisted dry grinding of 12Cr2Ni4A with large diameter grinding wheel[J]. International journal of precision engineering and manufacturing, 2018, 19(6): 929-936.
- [15] 栗育琴, 肖罡, 李涛. 超声振动辅助磨削 GCr15 轴承钢的表面残余应力[J]. 机械工程材料, 2019, 43(6): 50-52.
- LI Yu-qin, XIAO Gang, LI Tao. Surface residual stress of GCr15 bearing steel by ultrasonic vibration assisted grinding[J]. Materials for mechanical engineering, 2019, 43(6): 50-52.
- [16] GUAN Jia-liang, ZHANG Long-yue, LIU Shu-jun, et al. Research on ELID grinding mechanism and process parameter optimization of aluminum-based diamond composites for electronic packaging[J]. Science and engineering of composite materials, 2019, 26(1): 550-562.
- [17] 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.
- [18] 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, 30(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, 30(1): 19-23.
- [19] 胡永会, 吴运新, 陈磊, 等. X 射线法测量淬火铝合金厚板表面残余应力[J]. 中国材料进展, 2011, 30(2): 51-55.
- HU Yong-hui, WU Yun-xin, CHEN Lei, et al. Experimental measurement of surface residual stresses of quenched aluminum alloy thick plate by X-ray method[J]. Materials China, 2011, 30(2): 51-55.
- [20] 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, 46(3): 267-273.
- JIAO Feng, NIU Ying, ZHAO Bo. Research progress of residual stress in milling of difficult-to-machine materials[J]. Surface technology, 2017, 46(3): 267-273.
- [21] 牛赢, 焦锋, 赵波, 等. 钛合金 Ti-6Al-4V 纵扭超声铣削残余应力试验研究[J]. 表面技术, 2019, 48(10): 41-51.
- NIU Ying, JIAO Feng, ZHAO Bo, et al. Experiment of machining induced residual stress in longitudinal torsional ultrasonic assisted milling of Ti-6Al-4V[J]. Surface technology, 2019, 48(10): 41-51.