

引文格式: 邱雨桐, 丁文锋, 曹洋. 齿轮钢淬硬表面超声振动辅助磨削试验研究[J]. 航空制造技术, 2022, 65(19): 80–86, 93.

QIU Yutong, DING Wenfeng, CAO Yang. Experimental study on ultrasonic vibration-assisted grinding of hardened gear steel surface[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(19): 80–86, 93.

齿轮钢淬硬表面超声振动辅助磨削试验研究*

邱雨桐, 丁文锋, 曹 洋

(南京航空航天大学, 南京 210016)

[摘要] 为解决齿轮钢淬硬表面在传统磨削中加工效率低、表面完整性差的难题,引入超声振动辅助磨削加工技术。开展了淬硬齿轮钢 AISI 9310 和轴承钢 GCr15 切向超声振动辅助平面磨削加工对比试验,通过分析磨削力和磨削表面质量,对齿轮钢淬硬表面超声振动辅助磨削加工工艺进行研究。结果表明,超声振动辅助磨削能有效降低磨削力和比磨削能,随着材料去除率的增大,超声磨削力比更加稳定,有利于提高加工效率。利用本次试验数据建立的经验公式可以有效预测白刚玉砂轮磨削 AISI 9310 与 GCr15 淬硬表面时的法向磨削力大小,误差在 10% 以内。当磨削速度、工件进给速度和磨削深度分别为 15 m/s、8 m/min 和 15 μm 时,相比于传统磨削,超声振动辅助磨削中 AISI 9310 与 GCr15 的表面粗糙度分别降低了 9.47% 和 7.39%,并减少了加工表面缺陷,有利于提高工件表面完整性。

关键词: 超声振动; 淬硬齿轮钢; 磨削性能; 磨削力; 表面质量

Experimental Study on Ultrasonic Vibration-Assisted Grinding of Hardened Gear Steel Surface

QIU Yutong, DING Wenfeng, CAO Yang

(Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

[ABSTRACT] Ultrasonic vibration-assisted grinding processing technology is introduced to solve the problems of low processing efficiency and poor surface integrity of hardened gear steel surfaces in conventional grinding. The comparison experiment of tangential ultrasonic vibration-assisted surface grinding of hardened gear steel AISI 9310 and bearing steel GCr15 were carried out. The ultrasonic vibration-assisted grinding process of gear steel hardened surface is researched through the analysis of grinding force and grinding surface quality. The results show that ultrasonic vibration assisted grinding can effectively reduce the grinding force and specific grinding energy. With the increase of material removal rate, the ultrasonic grinding force ratio is more stable, which is beneficial to improve the grinding efficiency. The experience formulas of the normal grinding force with white alundum grinding wheels in grinding hardened surface of AISI 9310 and GCr15 are obtained, and the relative error is less than 10%. Compared with conventional grinding, the surface roughness of AISI 9310 and GCr15 in ultrasonic vibration-assisted grinding is reduced by 9.47% and 7.39%, when the grinding speed, workpiece infeed speed and grinding depth are 15 m/s, 8 m/min and 15 μm , respectively. Under this condition, few defects are observed on the surface machined by the ultrasonic vibration-assisted grinding. This finding indicates that the surface integrity of the workpiece is improved by the ultrasonic vibration.

Keywords: Ultrasonic vibration; Hardened gear steel; Grinding performance; Grinding force; Surface quality

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2022.19.080

齿轮作为各类传动系统的核心关键零件,常工作在高速、重载、腐蚀性强的环境中,其表面质量对整个系统

的使用性能有着至关重要的影响^[1-2]。齿轮钢材料常通过热处理等方式达到表面强化的目的,其淬硬表面可达

* 基金项目: 南京航空航天大学研究生开放基金(KFJJ20200506)。

HRC58~62,属于难加工材料^[3-4],在普通磨削加工中存在着磨削力大、表面易烧伤、工具易磨损等问题^[5-7]。基于此,本文对齿轮钢材料淬硬表面的磨削性能进行研究,以期制定磨削加工工艺提供技术支持。

超声振动辅助磨削技术是一种集普通磨削与超声加工于一体的高性能复合加工技术,近年来快速发展,在提升难加工材料加工效率、改善加工质量等方面显示出积极效果^[8-10]。Bhaduri等^[11]对比了SiC砂轮和金刚石砂轮在超声振动条件下对钛铝金属间化合物的磨削加工效果,结果表明,超声振动可以降低35%的磨削力,工件表面粗糙度降低10%。Nik等^[12]采用数学建模、有限元分析和遗传算法相结合的方法,对超声装置进行了设计、优化和制造,并开展了超声振动辅助磨削Ti-6Al-4V试验,比较了常规磨削和超声磨削工艺的磨削力和表面粗糙度,结果表明,超声条件下Ti-6Al-4V的磨削力更小,表面质量更好。Wei等^[13]通过建立微破碎产生区域比例计算模型和信息尺寸模型分析了旋转超声振动辅助磨削条件下工程陶瓷表面微破碎的轮廓大小,结果表明,超声振动的施加降低了表面破碎的尺寸,提高了表面质量。鉴于当前将超声辅助加工技术应用于磨削齿轮钢淬硬表面的研究较少,开展齿轮钢淬硬表面超声振动辅助磨削研究工作对提高齿轮表面质量有重要意义。

本文对比了淬硬齿轮钢AISI 9310和轴承钢GCr15的超声振动辅助磨削加工性。通过搭建齿轮钢淬硬表面超声振动辅助磨削试验平台,设计单因素试验研究磨削加工工艺参数对磨削力、表面粗糙度的影响规律及作用机制,并分析了磨削表面微观形貌及其影响因素,为制定超声振动辅助磨削加工策略奠定基础。

1 试验及方法

1.1 试验材料及装置

试验所用工件材料为渗碳淬火齿轮钢AISI 9310和淬火轴承钢GCr15,其化学成分如表1所示。通过电火花线切割加工(WEDM)制备尺寸为30 mm×10 mm×12 mm的工件。其中,10 mm为砂轮宽度方向,30 mm为工件进给方向,12 mm为磨削深度方向,30 mm×10 mm即为平面磨削试验表面,且在试验前通过铣削将该表面粗糙度降低至 $R_a 0.8 \mu\text{m}$,如图1所示。图2为试验前工件

表层/亚表层的硬度分布,在距表层500 μm 的深度内,两种钢材料热处理后的硬度能够达到HRC60~65。

试验装置如图3所示。磨削试验采用BLOHM Profit MT-408高速精密平面成形磨床,其最大输出功率为45 kW,最大转速为8000 r/min,并配有冷却系统。砂轮采用已广泛用于磨削淬硬钢的白刚玉砂轮,牌号为WA80F6V35M,其最大线速度为35 m/s,磨粒粒度为80#,外径为400 mm,宽度为20 mm。工件通过螺栓固定于自研的超声振动平台上,将该平台连接至超声电源并设置频率为平台的谐振频率19.6 kHz,以产生平行于工作台进给方向的高频振动。此外,在调节超声电源功率的同时,利用单点激光测振仪LV-S01测量工件的振

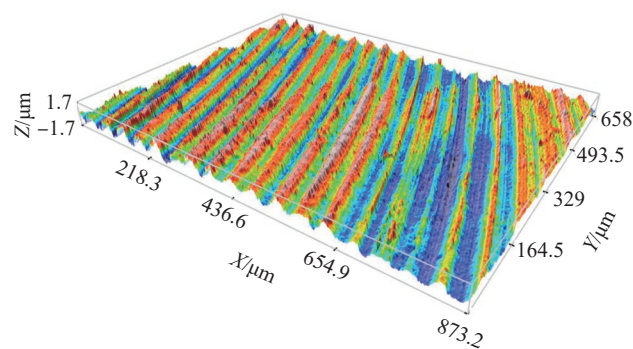


图1 试验前工件表面形貌

Fig.1 Surface morphology of workpiece before experiment

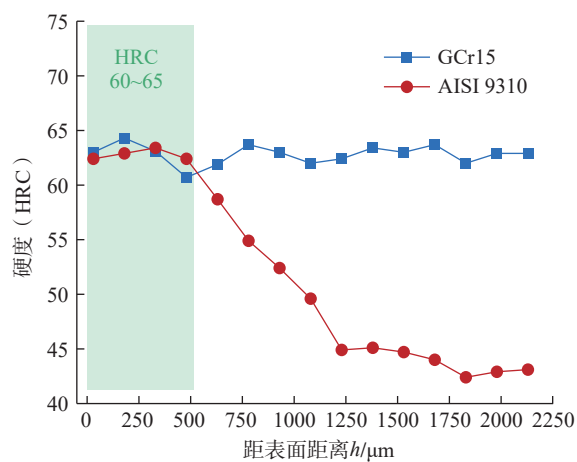


图2 试验前工件表层/亚表层的硬度分布

Fig.2 Hardness distribution of surface/subsurface layers of workpiece before experiment

表1 AISI 9310和GCr15钢的化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of AISI 9310 and GCr15 (mass fraction)

材料	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Fe
AISI 9310	0.161	0.254	0.367	0.01	0.011	0.658	3.03	0.013	余量
GCr15	1.03	0.227	0.353	0.007	0.003	1.46	0.015	0.0096	余量

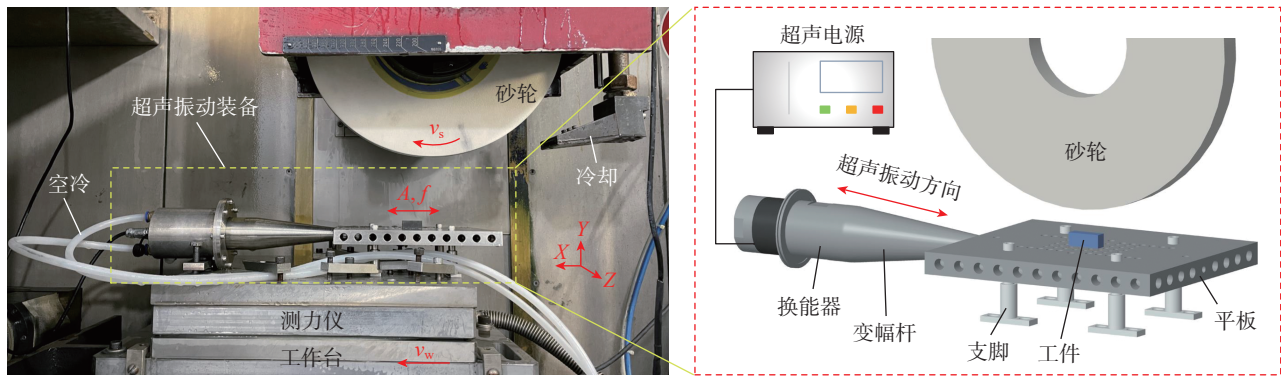


图3 超声振动辅助磨削试验装置
Fig.3 Experimental setup of ultrasonic vibration-assisted grinding

幅,如图4所示,两种材料的实际振幅与超声电源输出功率呈现良好的线性关系,在试验中通过控制超声电源功率使振幅为6 μm。此外,磨削环境非常复杂,磨削过程中工件周围被冷却液覆盖,导致无法采集到磨削过程中的动态振幅信号,所以本研究中采用了无磨削热负载条件下的振幅值。

1.2 试验条件及方案

为探究齿轮钢 AISI 9310 淬硬表面超声振动辅助磨削加工性,设计以磨削3要素为变量的单因素对比试验,即砂轮线速度 v_s 、进给速度 v_w 和切深 a_p 。所有试验均采用顺磨的方式,在试验过程中,交替关闭和开启超声电源以实现普通磨削和切向超声磨削。每组试验前,使用相同的磨削参数对工件进行平整,并使用单点金刚石笔对白刚玉砂轮进行修整,以确保试验条件的一致性。具体的试验条件如表2所示。

试验中的磨削力经由 Kistler 9253B 型三向压电测力仪采集,后通过 Kistler 5080A 型电荷放大器放大电信号,最终在计算机软件上进行显示和处理。选取3次稳定磨削阶段力信号的平均值作为文中的磨削力值。对工件表面质量检测前使用无水乙醇对已加工表面进行清洗并干燥,加工后表面粗糙度 R_a 采用 MAHR M2 型手持式粗糙度仪进行测量,检测时,使金刚石触针处在垂直于被测表面的上方,并做垂直于磨削方向的运动。为使测量数据更加准确,在每个被测表面区域内各随机测量3次,取其平均值作为最终表面粗糙度的数据。表面微观形貌特征采用 Quanta 200 型扫描电子显微镜进行表征。

2 结果与讨论

2.1 磨削力及其经验公式的建立

磨削力常用于描述磨削过程和分析磨削机理,反映了加工期间砂轮与工件之间的相互作用,是评价材料磨削性能的一项重要指标,与材料本身力学性能、磨削工艺参数、加工装备等都有着密切的关系。本文采用平面磨削,轴

向力可忽略不计,且磨削参数中的切深较小,测力仪力系与实际磨削力系间无须转换,即由测力仪测得的 y 、 z 两个方向的力为切向磨削力 F_t 与法向磨削力 F_n 。

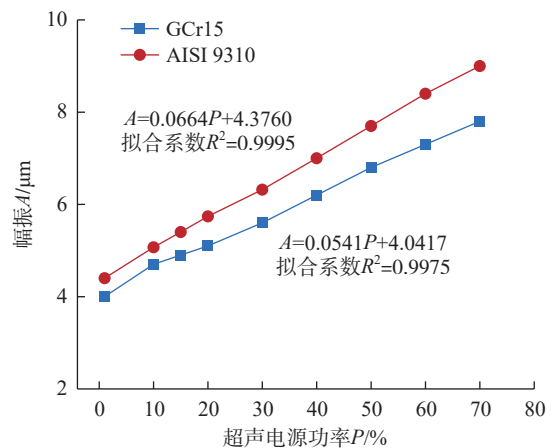


图4 超声振幅与超声电源功率的关系
Fig.4 Relationship between ultrasonic amplitude and ultrasonic power

表2 试验条件
Table 2 Experimental conditions

参数	值
磨削方式	顺磨
磨削宽度	10 mm
冷却条件	5% 乳化液, 流量 90 L/min, 压力 1.5 MPa
砂轮修整参数	砂轮线速度 20 m/s, 进给速度 200 mm/min; 单次修整量 0.02 mm, 总修整量 0.2 mm
工件平整参数	砂轮线速度 20 m/s, 进给速度 200 mm/min; 平整切深 0.02 mm
砂轮线速度 $v_s / (m \cdot s^{-1})$	15、20、25、30
进给速度 $v_w / (m \cdot min^{-1})$	4、6、8、10
切深 $a_p / \mu m$	10、15、20、25
超声振幅 $A / \mu m$	6
材料去除率 $Q'_w / (mm^3 \cdot mm^{-1} \cdot s^{-1})$	1、1.5、2、2.5

淬硬钢平面磨削过程中,磨削参数对切向磨削力和法向磨削力的影响规律如图 5 所示。超声磨削降低磨削力效果显著(图 5 (a)),随着砂轮线速度从 15 m/s 增大至 30 m/s,普通磨削和超声磨削的法向和切向磨削力均呈减小的趋势,与普通磨削相比,超声条件下, GCr15 与 AISI 9310 的切向磨削力最高降低 13.64% 与 15.04%,法向磨削力最高降低 14.08% 与 9.1%; 如图 5 (b) 所示,随着进给速度从 4 m/min 增大至 10 m/min,普通磨削和超声磨削的法向和切向磨削力均呈增大的趋势,与普通磨削相比,超声条件下, GCr15 与 AISI 9310 切向磨削力最高降低 20.51% 与 13.17%,法向磨削力最高降低 18.91% 与 10.87%; 如图 5 (c) 所示,随着磨削深度从 10 μm 增大至 25 μm ,普通磨削和超声磨削的法向和切向磨削力均呈增大的趋势,与普通磨削相比,超声条件下, GCr15 与 AISI 9310 切向磨削力最高降低 19.07% 与 17.36%,法向磨削力最高降低 14.08% 与 14.6%。张洪丽^[14]指出,切向超声振动对单颗磨粒切削深度的影响甚微,但切向超声振动的断续磨削特性能够提高砂轮磨粒的微破碎,使磨削过程中磨粒切削刃一直锋利,实现了磨削力的降低。

此外, GCr15 作为高碳铬钢,有较多的网状和片状渗碳体组织,且 Cr 元素含量高导致磨削温度升高后伴有二次硬化的作用,因此其磨削力高于低碳钢 AISI 9310。磨削力数学模型的建立能够预测在不同磨削条件下的加工性能,从而有利于找到最佳的磨削工艺参数。磨削力由法向和切向两部分组成,在本次试验中两者的变化趋势相同,并且本次试验测得的磨削力符合一般磨削的基本规律,测量数据可靠,本文以法向磨削力为目标,建立经验公式以指导加工参数的选择。根据经验公式的普适模型^[15]可表达为

$$F_n = k_0 v_s^{k_1} v_w^{k_2} a_p^{k_3} \quad (1)$$

通过对等号两边同时取对数得到多元线性回归方程,即

$$\ln F_n = \ln k_0 + k_1 \ln v_s + k_2 \ln v_w + k_3 \ln a_p \quad (2)$$

从本次 10 组试验所得的法向磨削力数据中,取出 9 组作为样本数据,经统计回归后得到两种淬硬钢表面法向磨削力经验式(3)~(6)。

GCr15 普通磨削:

$$F_n = 26.482 v_s^{-0.560} v_w^{0.582} a_p^{0.840} \quad (3)$$

GCr15 超声磨削:

$$F_n = 22.616 v_s^{-0.681} v_w^{0.712} a_p^{0.895} \quad (4)$$

AISI 9310 普通磨削:

$$F_n = 10.764 v_s^{-0.413} v_w^{0.727} a_p^{0.854} \quad (5)$$

AISI 9310 超声磨削:

$$F_n = 13.547 v_s^{-0.403} v_w^{0.728} a_p^{0.733} \quad (6)$$

如表 3 所示,将最后一组试验参数代入经验公式,

对比计算值与试验值,可见其误差均在 10% 以内,说明所建立的法向磨削力数学模型与试验数据拟合度较好。此外,普通磨削的误差小于超声磨削,这是由于超声条件下磨粒常因冲击产生随机破碎,仅考虑 3 个输入变量的经验公式不足以描述磨削力与磨削参数间的关系。

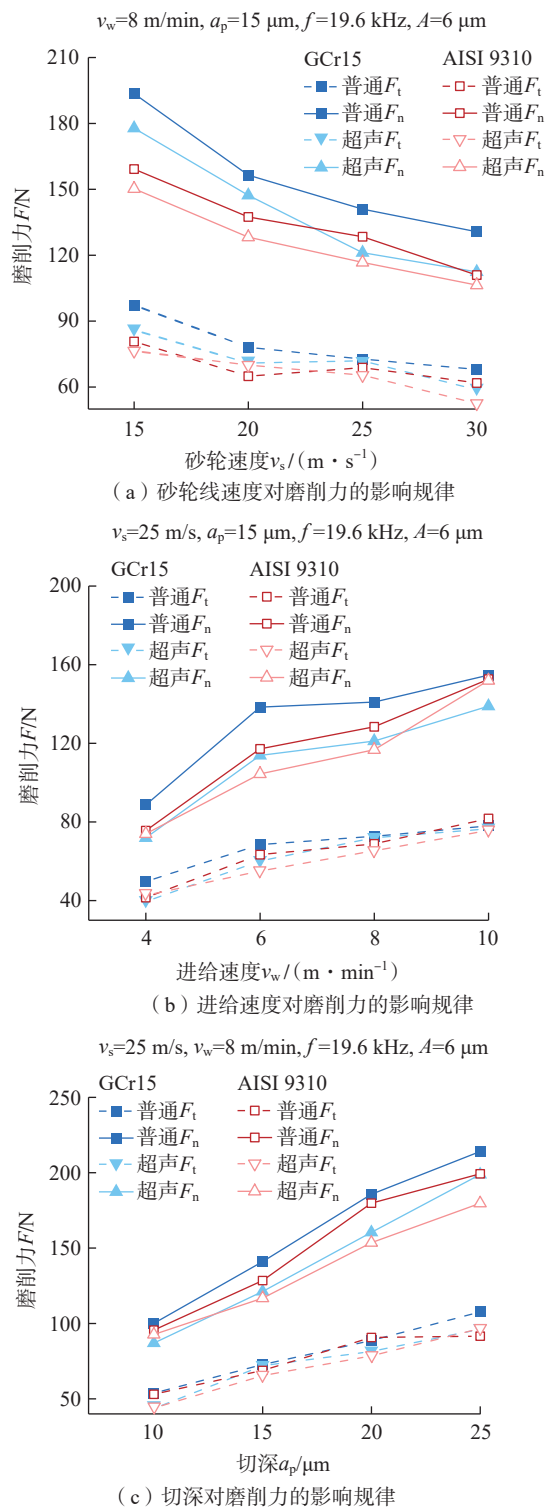


图 5 磨削参数对磨削力的影响规律
Fig.5 Influence of grinding parameters on grinding force

若误差过大则可以考虑采用神经网络法,处理超声磨削中复杂的输入输出关系,以指导磨削加工用量的制定。

2.2 磨削力比与比磨削能

与磨削力相同,磨削力比也是评价磨削过程中材料磨削性能的重要指标。图6显示了材料去除率对磨削力比的影响。普通磨削中力比的变化范围较大,GCr15和AISI 9310在普通磨削中力比的变化范围分别是1.79~2.02和1.74~2.01,而在超声磨削中力比则较为稳定,变化范围分别是1.82~1.89和1.82~1.87,显示出白刚玉砂轮在超声磨削淬硬齿轮钢时优良的磨削性能。当材料去除率为 $1\text{ mm}^3/(\text{mm}\cdot\text{s})$ 时,超声磨削中砂轮磨粒因受到冲击而破碎,其磨损程度大于普通磨削中砂轮的正常磨损,导致超声磨削力比大于普通磨削;当材料去除率为 $2.5\text{ mm}^3/(\text{mm}\cdot\text{s})$ 时,普通磨削中砂轮磨损加剧,GCr15和AISI 9310表面的磨削力比分别增大11.07%和15.71%,而超声磨削力比变化不大,且比普通磨削减少了8.46%和7.04%。由此,证明了超声振动辅助磨削工艺有助于增大磨削加工参数,并将材料去除率提高了2.5倍,提高了加工效率。

比磨削能 e_s 作为磨削过程中最重要的物理量之一,由磨削力与加工工艺参数推导而来,反映了去除单

位体积工件材料的过程中所消耗的能量。图7显示了材料去除率对比磨削能的影响,GCr15与AISI 9310淬硬表面的比磨削能曲线由最小二乘法拟合得到,可表示为式(7)~(10)。

$$\text{GCr15 普通磨削: } e_s = 173.74Q_w'^{-0.314} \quad (7)$$

$$\text{GCr15 超声磨削: } e_s = 122.40Q_w'^{-0.170} \quad (8)$$

$$\text{AISI 9310 普通磨削: } e_s = 132.94Q_w'^{-0.196} \quad (9)$$

$$\text{AISI 9310 超声磨削: } e_s = 127.92Q_w'^{-0.217} \quad (10)$$

可以看出,AISI 9310的比磨削能在多数条件下小于GCr15,说明AISI 9310淬硬表面的磨削性能好于GCr15淬硬表面。两种材料在普通磨削与超声磨削条件下,随着材料去除率的增大,比磨削能均呈现降低的趋势。当材料去除率为 $1\text{ mm}^3/(\text{mm}\cdot\text{s})$ 时,GCr15普通磨削与超声磨削的比磨削能分别为 124.08 J/mm^3 和 100.14 J/mm^3 ,AISI 9310普通磨削与超声磨削的比磨削能分别为 106.47 J/mm^3 和 103.77 J/mm^3 ;当材料去除率增大至 $2.5\text{ mm}^3/(\text{mm}\cdot\text{s})$ 时,GCr15普通磨削和超声磨削的比磨削能分别降低至 77.96 J/mm^3 和 76.47 J/mm^3 ,AISI 9310普通磨削和超声磨削的比磨削能分别降低至 81.72 J/mm^3 和 75.63 J/mm^3 ,这是由于尺寸效应造成的^[16],是材料硬化和热软化效应综合作用的结果。材料去除率较小时,磨粒的钝圆半径与最大未变形切厚的比值较大,在成屑前磨粒反复挤压待加工表面,磨削区材料应变硬化起主要作用,比磨削能较大。此外,高频振动的引入实现了砂轮的微破碎,从而提高了砂轮的自锐性^[17],使得超声磨削的比磨削能始终小于普通磨削,改

表3 磨削力 F_n 计算值与试验值的比较

Table 3 Comparison of calculated and measured grinding force F_n N

试验条件	磨削力	GCr15		AISI 9310	
		普通磨削	超声磨削	普通磨削	超声磨削
$v_s=25\text{ m/s}$, $v_w=8\text{ m/min}$, $a_p=15\text{ }\mu\text{m}$	计算值	142.67	125.42	130.63	122.91
	试验值	140.98	121.13	128.39	116.71
	误差/%	1.20	3.54	1.74	5.31

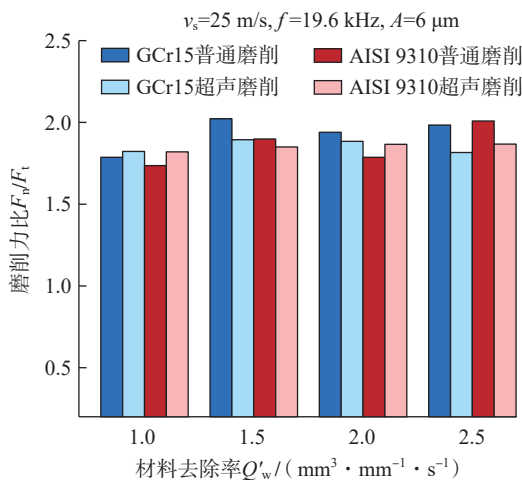


图6 材料去除率对磨削力比的影响

Fig.6 Influence of material removal rate on grinding force ratio

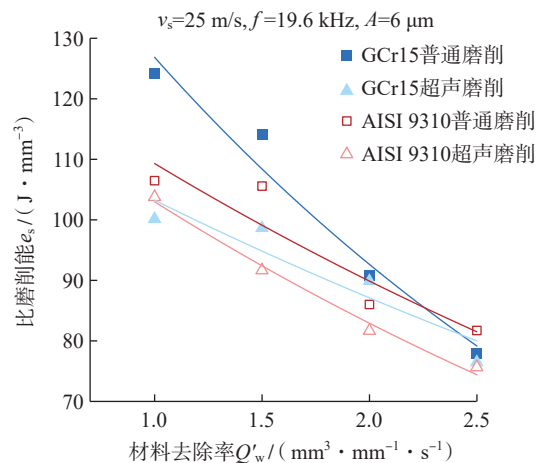


图7 材料去除率对比磨削能的影响

Fig.7 Influence of material removal rate on specific grinding energy

善了材料的磨削性能。

2.3 表面粗糙度与表面微观形貌特征

工件表面粗糙度是衡量磨削加工表面完整性的一个重要指标。磨削参数对表面粗糙度的影响规律如图8所示。超声磨削能够降低表面粗糙度,如图8(a)所示,随着砂轮线速度从15 m/s增大至30 m/s,表面粗糙度呈减小的趋势,超声条件下,GCr15与AISI 9310表面粗糙度最高降低7.39%与9.47%;如图8(b)所示,随着进给速度从4 m/min增大至10 m/min,表面粗糙度呈增大的趋势,超声条件下,GCr15与AISI 9310表面粗糙度最高降低8.62%与6.41%;如图8(c)所示,随着磨削深度从10 μm 增大至25 μm ,表面粗糙度呈增大的趋势,超声条件下,GCr15与AISI 9310表面粗糙度最高降低7.79%与7.03%。表面粗糙度 R_a 与已加工表面的材料残留高度有关,切向超声振动辅助磨削中砂轮对工件反复熨烫^[14],有助于降低表面粗糙度。

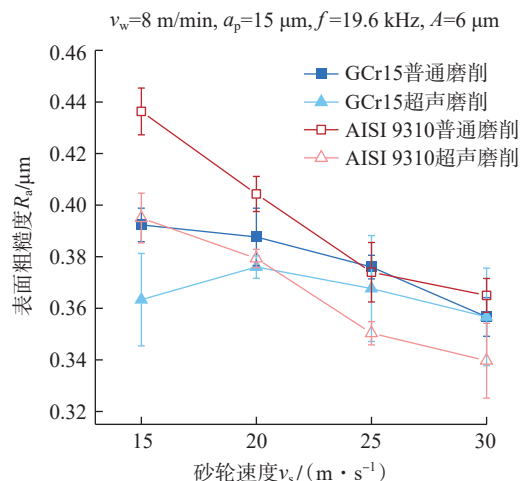
图9为加工后工件表面的微观形貌。在热、机械复合作用条件下,普通磨削中存在较大范围的材料断裂、破损、再沉积及涂覆等表面缺陷(图9(a)和(c));与普通磨削相比,超声加工表面呈现出良好的表面纹理,无明显的表面损伤(图9(b)和(d))。磨削表面形貌是由砂轮上的众多磨粒对工件表面进行摩擦、耕犁、切削等综合作用的结果。磨粒通常被认为具有负前角的特性,磨屑从前刀面流出,图10(a)显示了负前角切削时的金属流动。如图10(b)所示,普通磨削中磨粒不断接触工件,导致冷却液无法进入前刀面,前刀面的热量增加,材料的塑性流动作用增强,磨屑容易黏附在砂轮表面,产生再沉积缺陷,未成屑材料黏附在加工表面上,产生涂覆缺陷。此外,由于砂轮的挤压,冷却液中混入的大尺寸磨屑及破碎磨粒相当于游离磨料,容易对已加工表面造成材料的断裂、破损等缺陷。超声磨削中磨屑及破碎磨粒的尺寸更小,并且通过磨粒和工件的周期性分离改变冷却液的流场,及时带走热量和磨削产物。因此,超声振动中断续磨削和往复熨烫的特性可以改善加工表面缺陷,有利于提高工件表面完整性。

3 结论

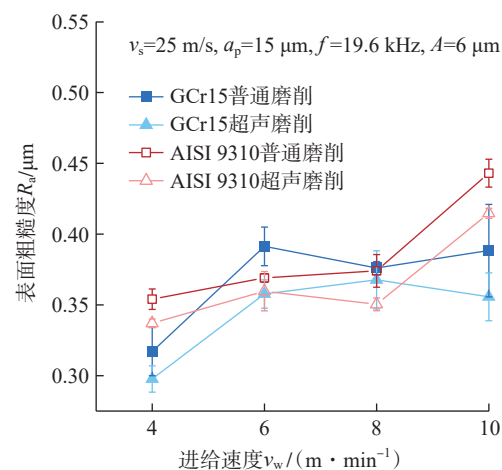
(1) 超声振动辅助磨削因其断续磨削和往复熨烫的特性,能有效降低磨削力和比磨削能,且随着材料去除率的增大,超声磨削力比更加稳定,有助于提高材料的磨削加工性、增大磨削加工参数并提高加工效率。

(2) 利用本次试验数据建立的经验公式可以预测白刚玉砂轮磨削GCr15与AISI 9310淬硬表面时的法向磨削力大小,误差在10%以内。

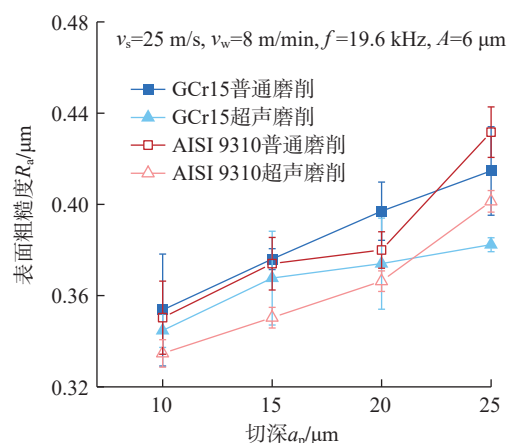
(3) 当磨削速度、工件进给速度和磨削深度分别为



(a) 砂轮线速度对表面粗糙度的影响规律



(b) 进给速度对表面粗糙度的影响规律

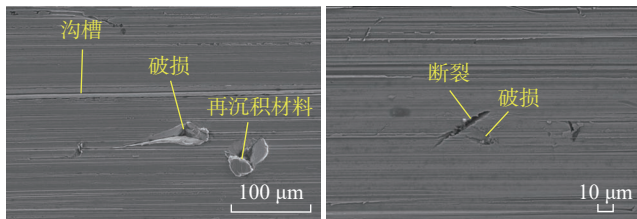


(c) 切深对表面粗糙度的影响规律

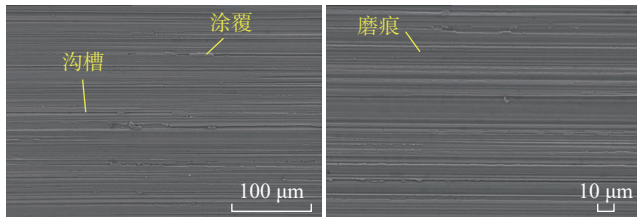
图8 磨削参数对表面粗糙度的影响规律

Fig.8 Influence of grinding parameters on surface roughness

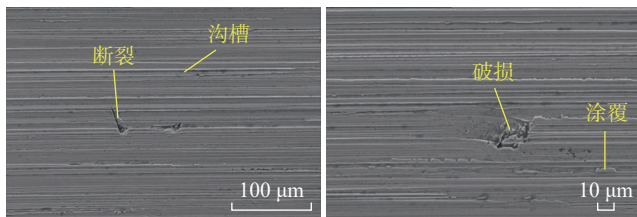
15 m/s、8 m/min 和 15 μm 时,与普通磨削相比,GCr15 和 AISI9310 淬硬表面切向超声振动辅助磨削条件下表面粗糙度降低了7.39%和9.47%,且加工表面无缺陷,提高了工件表面完整性。



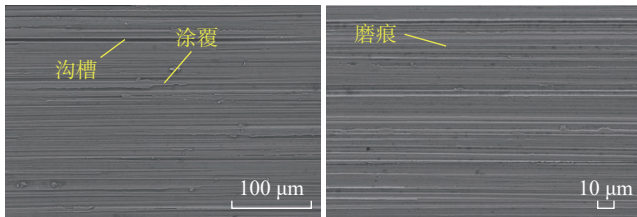
(a) GCr15普通磨削表面微观形貌



(b) GCr15超声振动辅助磨削表面微观形貌



(c) AISI 9310普通磨削表面微观形貌



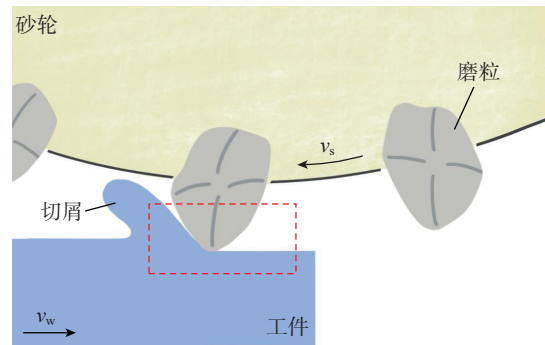
(d) AISI 9310超声振动辅助磨削表面微观形貌

图9 加工表面微观形貌特征

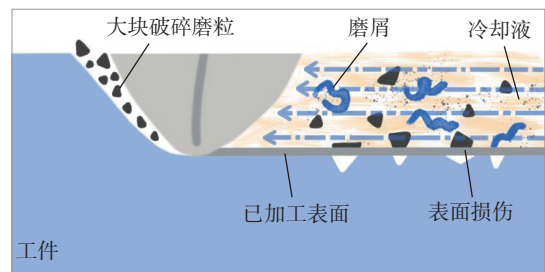
Fig.9 Micromorphology characteristics of machined surface

参考文献

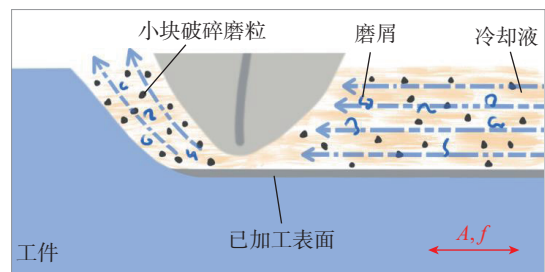
[1] 王俊, 潘文斌. 直升机传动系统面齿轮传动技术的发展 [J]. 航空动力, 2018(5): 44-46.
 WANG Jun, PAN Wenbin. The development of face gear transmission technology of helicopter transmission system[J]. Aerospace Power, 2018(5): 44-46.
 [2] WALLER M D, MCINTYRE S M, KOUDELA K L. Composite materials for hybrid aerospace gears[J]. Journal of the American Helicopter Society, 2020, 65(4): 1-11.
 [3] 付海峰, 李俏, 徐跃明. 重载齿轮热处理及应用 [J]. 金属热处理, 2020, 45(3): 178-185.
 FU Haifeng, LI Qiao, XU Yueming. Heat treatment technologies and its application of heavy duty gears[J]. Heat Treatment of Metals, 2020, 45(3): 178-185.
 [4] SALES W F, SCHOOP J, DA SILVA L R R, et al. A review of surface integrity in machining of hardened steels[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 58: 136-162.



(a) 负前角切削时的金属流动



(b) 图10 (a) 红框中普通磨削磨粒与工件的接触



(c) 图10 (a) 红框中超声磨削磨粒与工件的接触

图10 磨削表面形成示意图

Fig.10 Schematic of grinding surface generation

[5] 梁志强, 黄迪青, 周天丰, 等. 齿轮钢 18Cr₂Ni₄WA 磨削烧伤实验及仿真预测研究 [J]. 兵工学报, 2017, 38(10): 1995-2001.
 LIANG Zhiqiang, HUANG Diqing, ZHOU Tianfeng, et al. Experiment and simulation prediction of grinding burn of gear steel 18Cr₂Ni₄WA[J]. Acta Armamentarii, 2017, 38(10): 1995-2001.
 [6] TALON A G, LOPES J C, TAVARES A B, et al. Effect of hardened steel grinding using aluminum oxide wheel under application of cutting fluid with corrosion inhibitors[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 104(1-4): 1437-1448.
 [7] 刘瑶, 李睿, 赵亦东, 等. 20CrMnTi 磨削表面质量试验研究 [J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2020, 40(4): 70-75.
 LIU Yao, LI Rui, ZHAO Yidong, et al. Experiment study on the 20CrMnTi ground surface performances[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2020, 40(4): 70-75.
 [8] CAO Y, ZHU Y J, HAO N L, et al. Development and performance of a novel ultrasonic vibration plate sonotrode for grinding[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 57: 174-186.
 [9] 代兵. 基于二维超声振动辅助的钛合金切削加工分析与试验研究 [J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2020, 40(6): 92-96.

(下转第 93 页)

for certain airplane nose landing gear return cam[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2012, 33(10): 1931–1937.

[3] 任佳, 牟让科, 杨建波. 某型无人机起落架缓冲器卡滞故障分析[J]. 西北工业大学学报, 2017, 35(S1): 98–103.

REN Jia, MU Rangke, YANG Jianbo. Binding failure analysis for an unmanned aircraft landing gear shock absorber[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2017, 35(S1): 98–103.

[4] 吴江, 杨兆军, 周毅. 飞机起落架位置误差计算与分析[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(18): 5409–5414.

WU Jiang, YANG Zhaojun, ZHOU Yi. Calculation and analysis of aircraft landing gear position error[J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13(18): 5409–5414.

[5] 王钰龙, 魏小辉, 印寅, 等. 某起落架收放试验故障分析及间隙影响分析[J]. 机械科学与技术, 2015, 34(2): 325–328.

WANG Yulong, WEI Xiaohui, YIN Yin, et al. Failure analysis and gap impact analysis of a landing gear's extension-retraction test[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2015, 34(2): 325–328.

[6] 茅健. 基于数学定义的公差建模与误差评定技术的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.

MAO Jian. Study on the modeling of tolerance based on mathematical definition and form errors evaluation[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007.

[7] ISLAM M N. Functional dimensioning and tolerancing software for concurrent engineering applications[J]. Computers in Industry, 2004, 54(2): 169–190.

[8] 蔡延波, 曹增强, 李志成. 复杂装配尺寸链的分析计算[J]. 现代制造工程, 2008(4): 81–84.

CAI Yanbo, CAO Zengqiang, LI Zhicheng. The research of complex assembly dimensional chain analyses and calculation[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2008(4): 81–84.

[9] 赵皇进, 郑国磊, 段丽华. 数字化环境下装配尺寸链分析的几何方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2008, 20(1): 104–108.

ZHAO Huangjin, ZHENG Guolei, DUAN Lihua. A geometric method for assembly dimension-chain analysis in digital environment[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2008, 20(1): 104–108.

[10] 王洋, 徐诚, 郭胜, 等. 三维公差分析技术在机枪脱链机构公差设计中的应用[J]. 兵器装备工程学报, 2017, 38(10): 36–39.

WANG Yang, XU Cheng, GUO Sheng, et al. Three dimensional tolerance analysis technology in machine gun bullet discarding mechanism tolerance design[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2017, 38(10): 36–39.

[11] 阚天水, 徐明洋, 徐旭松, 等. 3DCS 在汽车底盘尺寸与公差分析中的应用[J]. 现代制造工程, 2017(5): 97–101, 109.

KAN Tianshui, XU Mingyang, XU Xusong, et al. Application of 3DCS in automobile chassis dimension and tolerance analysis[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2017(5): 97–101, 109.

[12] 王恒, 宁汝新, 唐承统. 三维装配尺寸链的自动生成[J]. 机械工程学报, 2005, 41(6): 181–187.

WANG Heng, NING Ruxin, TANG Chengtong. Automatic generation of 3D assembly dimension chains[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(6): 181–187.

[13] 孟巧凤, 张林鎔, 尹琳峥, 等. 基于 3DCS 的三维尺寸公

差的分析与优化[J]. 系统仿真学报, 2018, 30(5): 1730–1738.

MENG Qiaofeng, ZHANG Linxuan, YIN Linzheng, et al. Three dimension tolerance analysis and optimization based on 3DCS[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(5): 1730–1738.

通讯作者: 郭超朋, 工程师, 硕士, 主要研究方向为飞机数字化装配。

(责编 七七)

(上接第 86 页)

DAI Bing. Analysis and experimental research on titanium alloy cutting based on two-dimensional ultrasonic vibration assistance[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2020, 40(6): 92–96.

[10] 韩璐, 康仁科, 张园, 等. GH4169 超声辅助磨削表面完整性研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2021, 41(5): 46–51.

HAN Lu, KANG Renke, ZHANG Yuan, et al. Research on surface integrity of GH4169 machined by ultrasonic assisted grinding[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2021, 41(5): 46–51.

[11] BHADURI D, SOO S L, ASPINWALL D K, et al. Ultrasonic assisted creep feed grinding of gamma titanium aluminide using conventional and superabrasive wheels[J]. CIRP Annals, 2017, 66(1): 341–344.

[12] NIK M G, MOVAHHEDY M R, AKBARI J. Ultrasonic-assisted grinding of Ti6Al4V alloy[J]. Procedia CIRP, 2012, 1: 353–358.

[13] WEI S L, ZHAO H, JING J T, et al. Investigation on surface micro-crack evaluation of engineering ceramics by rotary ultrasonic grinding machining[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 81(1–4): 483–492.

[14] 张洪丽. 超声振动辅助磨削技术及机理研究[D]. 济南: 山东大学, 2007.

ZHANG Hongli. Study on the technology and mechanism of ultrasonic vibration assisted grinding[D]. Jinan: Shandong University, 2007.

[15] 杨长勇, 徐九华, 顾坤坤, 等. 陶瓷 CBN 砂轮磨削镍基铸造高温合金 K418 磨削力研究[J]. 机械科学与技术, 2014, 33(5): 657–661.

YANG Changyong, XU Jiuhua, GU Shenshen, et al. Investigation on the grinding force of the casted nickel-based superalloy K418 with a vitrified CBN wheel[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2014, 33(5): 657–661.

[16] QIAN N, DING W F, ZHU Y J. Comparative investigation on grindability of K4125 and Inconel718 nickel-based superalloys[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 97(5–8): 1649–1661.

[17] WU B F, ZHAO B, DING W F, et al. Investigation of the wear characteristics of microcrystal alumina abrasive wheels during the ultrasonic vibration-assisted grinding of PTMCs[J]. Wear, 2021, 477: 203844.

通讯作者: 丁文锋, 教授, 博士生导师, 博士, 主要研究方向为难加工材料的高效精密加工技术。

(责编 七七)