

SG 砂轮磨削镍基合金 GH4169 砂轮磨损机理与磨削性能的实验评价

黄保腾¹, 张彦彬¹, 王晓铭¹, 陈云², 曹华军³,
刘波⁴, 聂晓霖⁵, 李长河¹

(1. 青岛理工大学 机械与汽车工程学院, 山东 青岛 266520; 2. 成都工具研究所有限公司, 成都 610500; 3. 重庆大学 机械工程学院, 重庆 400044; 4. 四川明日宇航工业有限责任公司, 四川 什邡 618400; 5. 南京科润工业介质股份有限公司, 南京 211106)

摘要: 目的 减少磨削镍基合金 GH4169 过程中砂轮磨损和堵塞现象, 提高工件表面质量。方法 采用 WA 和 SG 砂轮磨削镍基合金 GH4169, 通过观察磨削前后砂轮表面微观形貌, 研究两种砂轮表面材料粘附、堵塞以及磨粒破碎等主要磨损机制。从磨削力、工件表面形貌、磨削比能 3 个方面评价两种砂轮的磨削性能, 并探究磨削参数对砂轮磨削力、工件表面形貌、磨削比能的影响规律。结果 在去除相同体积材料时, SG 砂轮的磨削力较小, 所消耗的能量较 WA 砂轮低 21.5%, SG 砂轮所加工工件表面的粗糙度明显低于 WA 砂轮所加工工件表面的粗糙度, 两者表面粗糙度差值均在 1 μm 以上。SG 砂轮表面材料粘附现象较轻, WA 砂轮表面出现了大面积的材料粘附, 造成了砂轮堵塞。结论 SG 磨粒因内部致密的微小晶粒所决定的微破碎机制, 使 SG 砂轮在磨削镍基合金 GH4169 过程中保持了锋利的磨削刃, 减少了砂轮表面的材料粘附, 同时也获得了良好的工件表面质量。另外, SG 磨粒较 WA 磨粒具有更佳的力学性能, 使其在去除相同体积材料时所消耗的能量更少。

关键词: SG 砂轮; 镍基合金 GH4169; 磨削; 砂轮磨损; 微观形貌

中图分类号: TG582 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2021)12-0062-09

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2021.12.006

Experimental Evaluation of Wear Mechanism and Grinding Performance of SG Wheel in Machining Nickel-based Alloy GH4169

HUANG Bao-teng¹, ZHANG Yan-bin¹, WANG Xiao-ming¹, CHEN Yun²,
CAO Hua-jun³, LIU Bo⁴, NIE Xiao-lin⁵, LI Chang-he¹

收稿日期: 2021-09-30; 修订日期: 2021-11-26

Received: 2021-09-30; Revised: 2021-11-26

基金项目: 国家重点研发计划(2020YFB2010500); 山东省重大科技创新工程项目(2019JZZY020111); 国家自然科学基金面上项目(51975305); 国家自然科学基金青年基金(51905289)

Fund: National Key Research and Development Plan (2020YFB2010500), Major Science and Technology Innovation Engineering Projects of Shandong Province (2019JZZY020111), General Project of National Natural Science Foundation of China (51975305), Youth Program of National Natural Science Foundation of China (51905289)

作者简介: 黄保腾(1996—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为磨削与精密加工。

Biography: HUANG Bao-teng (1996—), Male, Master, Research focus: grinding and precision machining.

通讯作者: 李长河(1966—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为磨削与精密加工。

Corresponding author: LI Chang-he (1966—), Male, Doctor, Professor, Research focus: grinding and precision machining.

引文格式: 黄保腾, 张彦彬, 王晓铭, 等. SG 砂轮磨削镍基合金 GH4169 砂轮磨损机理与磨削性能的实验评价[J]. 表面技术, 2021, 50(12): 62-70.

HUANG Bao-teng, ZHANG Yan-bin, WANG Xiao-ming, et al. Experimental evaluation of wear mechanism and grinding performance of SG wheel in machining nickel-based alloy GH4169[J]. Surface technology, 2021, 50(12): 62-70.

(1.School of Mechanical and Automotive Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, China;
2.Chengdu Tool Research Institute Co., Ltd., Chengdu 610500, China; 3.School of Mechanical Engineering,
Chongqing University, Chongqing 400044, China; 4.Sichuan Future Aerospace Industry LLC., Shifang 618400, China;
5.Nanjing Kerun Lubricants Co., Ltd., Nanjing 211106, China)

ABSTRACT: The study aims to reduce the wear and blockage of grinding wheel in the process of grinding nickel-based alloy GH4169, and to improve the surface quality of workpiece. In this paper, WA and SG grinding wheels are used to grind nickel-based alloy GH4169. The main wear mechanisms of the two SG grinding wheels, such as adhesion, blockage and particle breakage, are studied by observing the surface morphology of the grinding wheel before and after grinding. The grinding performance of the two grinding wheels is evaluated from three aspects: grinding force, workpiece surface morphology and grinding specific energy, and the influence of grinding parameters on grinding force, workpiece surface morphology and grinding specific energy is explored. The grinding force of SG grinding wheel was smaller and the energy consumed is 21.5% lower than that of WA grinding wheel. The surface roughness of the workpiece processed by SG grinding wheel was significantly lower than that of WA grinding wheel, and the difference between the two is 1 μm or more. The material adhesion on the surface of SG grinding wheel is light, and there is a large area of material adhesion on the surface of WA grinding wheel, resulting in the blockage of the grinding wheel. The micro crushing mechanism of SG abrasive particles determined by its dense micro grains makes the SG grinding wheel maintain a sharp grinding edge in the process of grinding nickel base alloy GH4169, reduce the material adhesion on the surface of the grinding wheel, and obtain good workpiece surface quality at the same time. In addition, SG abrasive particles have better mechanical properties than WA abrasive particles, so that they consume less energy under the condition of removing the same volume of materials.

KEY WORDS: SG grinding wheel; nickel-based alloy GH4169; grinding; grinding wheel wear; micromorphology

航空公司的需求和飞机制造商之间的竞争,预示着未来几年航空航天市场的强劲发展,发动机作为航空飞机的核心驱动部件,决定了航空飞机的航程、稳定性、动力性能、经济性^[1]。镍基高温合金以其耐高温、抗冲击、抗热疲劳、耐腐蚀等优异性能,广泛应用于航空发动机的零部件^[2-4]以及化工设备、核电站等行业的高温结构材料^[5-6]中。航空发动机零件对精密度、表面质量和完整性要求十分严苛,而磨削作为一种以表面众多磨粒参加切削的加工方式,磨削力更小,更容易获得良好的加工表面,所以磨削在航空发动机核心零部件的加工中发挥着十分重要的作用^[7-9]。但是,镍基高温合金材料的特性易导致砂轮表面出现材料粘附现象,进而造成砂轮出现磨削效率低、使用寿命低等问题。另外,磨削区产生的高温易导致镍基高温合金材料出现表面烧伤,因此如何降低加工温度、提高零件表面质量已成为镍基合金精密加工所面临的难题^[10]。

现代磨削技术的不断发展,主要原因之一是新型磨料和磨具的出现^[11-12]。尽管影响加工质量的因素很多,但目前的主要研究方向还是对特殊磨料性能进行改进^[13]。磨料是决定磨具加工性能的重要因素,其必须具备高硬度、高韧性、高强度、优异的化学稳定性和热稳定性。目前,常用的磨料主要分为超硬磨料和普通磨料,虽然超硬磨料的使用性能优于普通磨料,但是由于较高的制造和使用成本,实际应用较少。而碳化硅和氧化铝可用于喷砂、珩磨、研磨、抛光等加

工方式,适用的加工方式范围比超硬磨料更广^[14]。超硬磨料因为高耐磨性和高材料去除率而备受瞩目,但是较高的成本和砂轮修整难度限制了它们的使用。航空发动机制造公司多采用大气孔刚玉砂轮,这是由于其低成本、修整工作简单等因素决定的^[15]。1986 年,诺顿公司研发了 Seeded Gel (SG) 磨料,与超硬、普通磨料相比,SG 磨料不仅保持了较高的硬度和优异的化学稳定性,在断裂韧性方面也有出色的表现,是一种性价比非常高的磨料^[16]。

大量研究表明^[17-19],深切缓进给方式加工镍基合金材料具有较高的材料去除率,然而缓进给磨削镍基合金过程常伴随着严重的砂轮堵塞、高磨削力、高磨削温度、磨削烧伤等问题。本文首先利用白刚玉(WA)和 SG 砂轮对镍基合金在相同磨削参数下进行往复平面式磨削,然后使用显微镜观察磨削前后的砂轮表面,对两种砂轮磨削前后的磨损形式进行表征分析,探究 WA、SG 砂轮和磨粒的磨损机制,分析主要磨削参数对磨削力的影响规律,观察不同磨削参数下两种砂轮加工的工件表面形貌及表面粗糙度,为提高镍基合金 GH4169 材料的表面质量提供科学依据。

1 实验

1.1 实验设备

两种砂轮分别为白刚玉磨粒含量 100% 的 WA 砂轮、陶瓷刚玉磨粒含量 100% 的 SG 砂轮。砂轮

尺寸(外径×厚度×内径)均为 $\phi 300\text{ mm}\times 20\text{ mm}\times \phi 76.2\text{ mm}$, 磨粒粒度均为80#, 实验采用的两种砂轮如图1、2所示。



图1 WA 砂轮

Fig.1 White corundum grinding wheel



图2 SG 砂轮

Fig.2 SG grinding wheel

磨削实验在斯来福临精密数控磨床KP-36上进行(图3), 该磨床砂轮最高圆周速度为50 m/s, 磨削范围为60 cm×300 cm, 主轴功率为4.5 kW, 最高主轴转速为2000 r/min。

实验中的磨削力利用三项磨削力测力仪YDM-III99进行测量, 分别记录砂轮的法向力、轴向力和切向力, 如图4所示。使用奥林巴斯激光共焦显微镜(OLS5000)测量工件表面形貌, Toupcam工业显微镜(相机为U3CMOS)测量砂轮表面形貌, 利用配套的视频和图像处理软件Touview, 可以进行快速图像传输, 精确记录所拍摄图像。

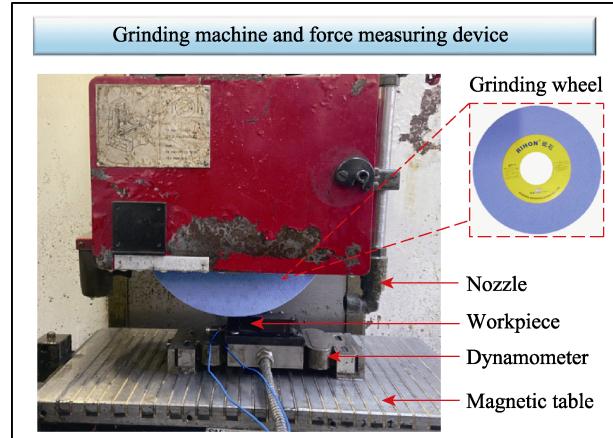


图3 磨削加工设备

Fig.3 Grinding equipment

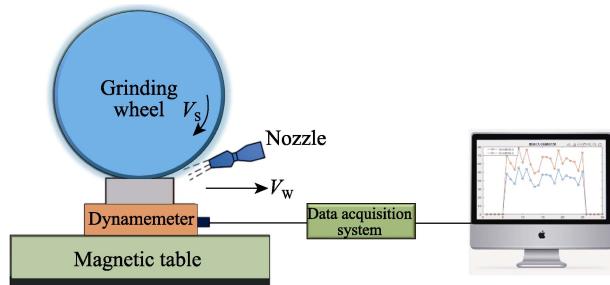


图4 磨削力测量系统

Fig.4 Grinding force measurement system

1.2 实验材料

实验材料为镍基合金GH4169($40\text{ cm}\times 30\text{ cm}\times 30\text{ cm}$), 工件如图5所示。镍基高温合金GH4169的化学成分和物理力学性能如表1—3所示。

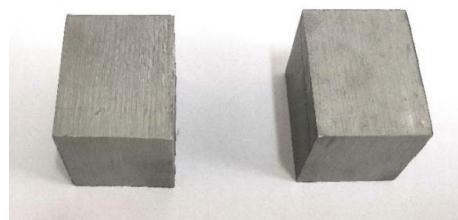


图5 实验工件

Fig.5 Experimental workpiece

表1 镍基合金化学成分^[20]
Tab.1 Chemical composition of nickel base alloy^[20]

	C	Ni	Cu	Mn	Mo	Cr	Al	Co	Ti	Nb	wt.%
	0.08	50~55	0.3	0.35	2.8~3.3	17~21	0.91	1.0	0.96	5.25	

表2 镍基合金物理性能^[21]
Tab.2 Physical properties of nickel base alloy^[21]

Melting point/°C	Thermal conductivity k/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	Specific heat capacity/(J·kg ⁻¹ ·°C ⁻¹)	Elastic modulus/GPa	Shear modulus/GPa	Thermal expansion coefficient α ($\times 10^{-6}$ °C ⁻¹)
1260	14.7	435	199.9	772	11.8(20~100 °C)

表 3 镍基合金力学性能^[20,22]
Tab.3 Mechanical properties of nickel base alloy^[20,22]

Tensile strength σ_b /MPa	Yield strength $\sigma_{0.2}$ /MPa	Density ρ /(kg·m ⁻³)	Poisson's ratio	Brinell hardness (HBS)
1430	1260	8240	0.3	≥363

1.3 实验方案

润滑工况统一为干磨削, 采用 SG、WA 砂轮分别对工件进行平面往复式磨削实验, 磨削深度 a_p 、工件进给速度 V_w 、砂轮转速 V_s , 实验参数设计如表 4。

表 4 实验方案
Tab.4 Experimental scheme

Grinding wheel	Serial number	a_p / μm	V_w /(m·min ⁻¹)	V_s /(m·s ⁻¹)
WA	1	10	2	30
	2	15	2	30
	3	20	2	30
	4	25	2	30
	5	20	2	15
	6	20	2	20
	7	20	2	25
	8	20	2	30
SG	9	10	2	30
	10	15	2	30
	11	20	2	30
	12	25	2	30
	13	20	2	15
	14	20	2	20
	15	20	2	25
	16	20	2	30

采用固定行程和磨削参数研究两种砂轮和表面磨粒的磨损形式, 利用 ToupCam 工业显微镜记录两种砂轮磨削前后的磨损状态, 分析两种砂轮的磨损形式及原因。在实验过程中, 为降低实验误差, 每种砂轮往复磨削工件 5 次, 并记录每一次的磨削力。每种砂轮磨削实验完成后, 利用 OLS 显微镜观测工件表面质量, 测量工件表面粗糙度。

2 结果及分析

2.1 两种砂轮的磨损状态

2.1.1 砂轮磨损

利用 ToupCam 工业显微镜观测两种砂轮加工前后的表面形貌, 通过改变观测倍数分别分析砂轮的堵塞和磨粒磨损状态, WA 砂轮和 SG 砂轮磨削前后的表面形貌如图 6 所示。两种砂轮在磨削镍基合金 GH4169 前, 砂轮表面磨粒裸露明显, 分布均匀, 气孔清晰可见。磨削后, SG 和 WA 砂轮表面均有镍基合金材料的粘附。其中, WA 砂轮表面粘附较为严重, 表面磨粒被材料覆盖明显, 大面积的材料粘附也导致砂轮堵塞, 为保证加工质量, 需要多次修整, 降低了砂轮的使用寿命。SG 砂轮表面粘附情况较轻, 未出现大面积的材料粘附现象, 其表面裸露磨粒较多, 这

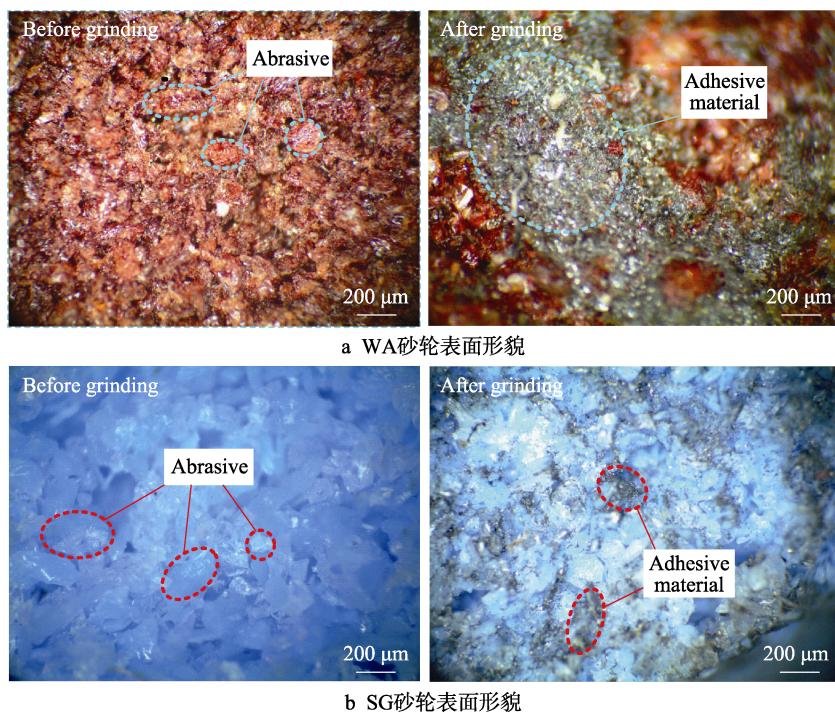


图 6 两种砂轮磨削前后的表面形貌

Fig.6 Surface morphology of two grinding wheels before and after grinding: a) surface morphology of WA grinding wheel; b) surface morphology of SG grinding wheel

不仅保证了砂轮的磨削效率，而且减少了砂轮的修正次数，提高了砂轮的使用寿命。

2.1.2 磨粒磨损

图7为两种砂轮磨削前后磨粒的微观形貌。通过图7a可以发现，砂轮表面磨粒磨损严重，部分磨粒出现了磨平的现象，产生了磨耗磨损，而且磨平后的磨粒顶端出现了材料粘附的现象，部分磨粒破碎，呈整块断裂状态。通过图7b可以发现，SG砂轮表面磨粒固结性好，经过磨削后的磨粒表面仍保持尖锐的顶

端，未出现磨耗磨损，SG磨粒出现了均匀的微破碎，但并未产生大块破碎的现象。造成这种差别的原因主要是，溶胶凝胶法制备的SG磨粒内部晶粒细小均匀，且未出现异常长大，而传统熔融刚玉磨料内部晶粒较大且伴有晶粒的异常长大。研究表明，SG磨粒断裂机制主要是沿晶断裂，而WA磨粒主要是穿晶断裂，这导致了WA磨料的韧性比SG磨料差^[23]。但是SG砂轮存在大量的微晶，从而使破碎后的磨粒仍可以保持锋利的切削刃，具有较高的自锐性。

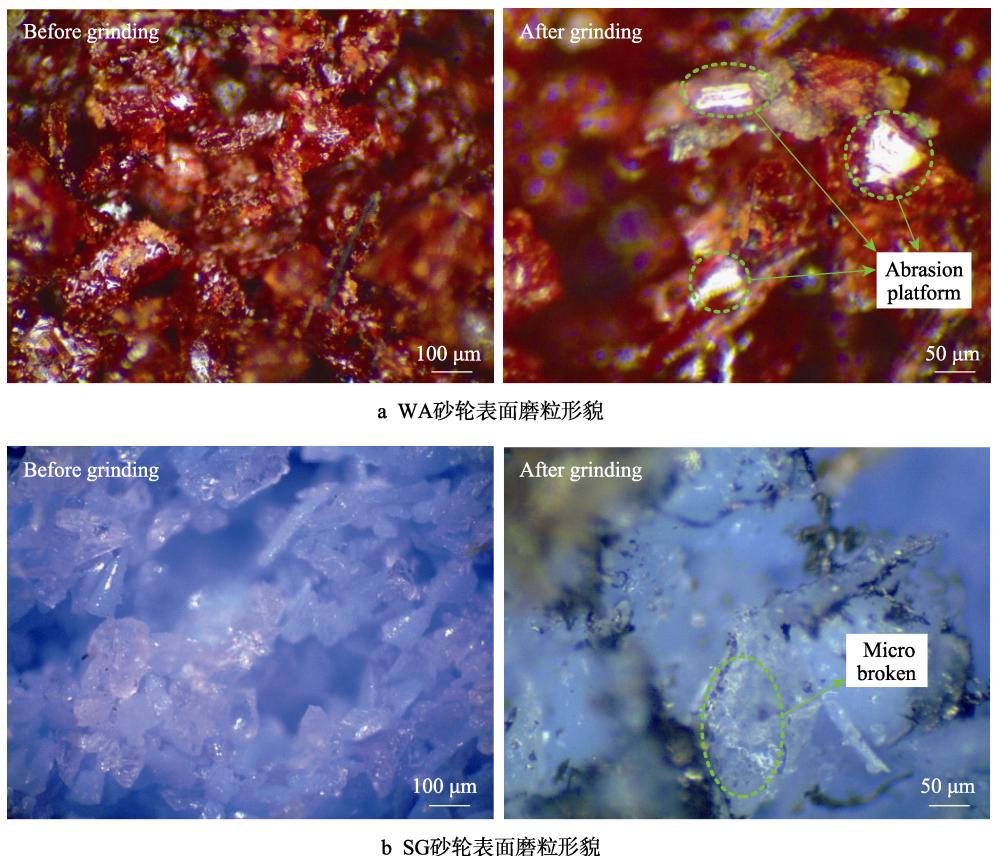


图7 两种砂轮磨削前后的磨粒表面形貌

Fig.7 Surface morphology of grinding particles before and after grinding with two grinding wheels: a) morphology of abrasive particles on the surface of WA grinding wheel; b) morphology of abrasive particles on the surface of SG grinding wheel

2.2 磨削参数对磨削力的影响

磨削力与砂轮磨损状态密切相关，而且方便测量，因此它在评价砂轮使用寿命、预测工件表面质量等方面发挥着非常重要的作用。砂轮的磨削力主要包括耕犁力、切削力、接触摩擦力和磨损摩擦力，而它们又可以分解为各自的法向力和切向力，因轴向磨削力 F_a 较小，可忽略不计^[24]，因此磨削力主要由切向磨削力 F_t 和法向磨削力 F_n 组成，如图8所示。

2.2.1 磨削深度对磨削力的影响规律

实验设置砂轮转速为30 m/s，工件进给速度为2 m/min，切削深度分别为10、15、20、25 μm，探究切削深度对两种砂轮切向力和法向力的影响，并对比

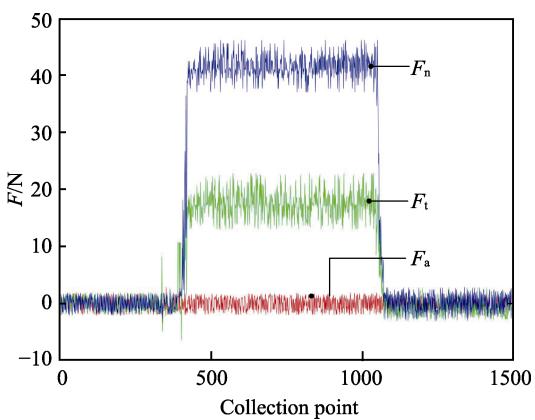


图8 磨削力原始采集数据
Fig.8 Raw data of grinding force

两种砂轮磨削力变化趋势, 分析磨削力产生不同变化趋势的原因。如图 9 所示, 随着磨削深度的增加, 两种砂轮的切向力和法向力几乎都呈线性增长。当保持砂轮转速和工件进给速度不变, 随着切削深度的增加, 砂轮表面参与磨削的磨粒数量增加, 增大了磨粒与砂轮的接触弧长, 增加了未变形切削厚度, 磨削力进而增大。

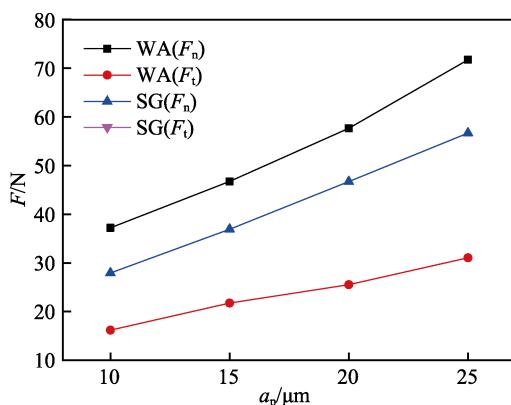


图 9 不同切深对砂轮磨削力的影响

Fig.9 Effect of different cutting depth on grinding force of grinding wheel

2.2.2 砂轮转速对磨削力的影响规律

实验设置切削深度为 20 μm , 工件进给速度为 2 m/min , 砂轮转速分别为 15、20、25、30 m/s , 探究砂轮转速对两种砂轮切向力和法向力的影响。如图 10 所示, 当砂轮转速增加后, 法向力和切向磨削力大致呈现相同趋势的下降。当砂轮转速增加时, 相同时间内参加磨削的磨粒数目也随之增加, 有效磨粒数目上升。砂轮转速增加, 单颗磨粒的未变形切削厚度减少, 使工件材料的变形力减小, 磨削力降低。从图 10 也可以看出, SG 砂轮的法向力和切向力均小于 WA 砂轮, 由于磨削参数和润滑工况相同, 所以造成磨削力差异的原因主要来源于砂轮, 说明 SG 砂轮在磨削镍基合金 GH4169 材料时, 其磨削性能较传统

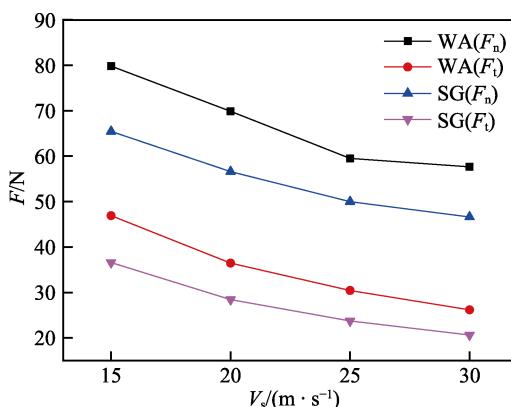


图 10 不同转速对砂轮磨削力的影响

Fig.10 Effect of different rotational speeds on grinding force of grinding wheel

WA 砂轮有明显的提升。

2.3 磨削比能分析

磨削比能指去除单位体积工件材料所耗费的能量, 去除单位体积材料所消耗的能量越高, 磨削比能越大, 也可将其随着磨削时间的变化作为判断磨削性能的依据。磨削比能公式见式(1)^[25]。

$$E_s = \frac{P}{Q_w} = \frac{V_s \cdot F_t}{V_w \cdot a_p \cdot b} \quad (1)$$

式中: E_s 为比磨削能; Q_w 为单颗磨粒去除的单位材料体积; P 为单颗磨粒去除单位体积材料所做的功; F_t 为切向磨削力; V_s 为砂轮转速; V_w 为工件进给速度; a_p 为砂轮的磨削深度; b 为工件宽度。

如图 11 所示, 两种砂轮加工镍基合金 GH4169 的比磨削能会随着磨削深度的增加而降低, 而且下降趋势会随着磨削深度的增加逐渐变缓。砂轮转速和磨削深度保持稳定, 增大砂轮转速会导致最大未变形切屑厚度减小, 去除单位体积材料所需要的能量减少, 所以磨削比能会下降。砂轮表面的磨粒在经过快速磨损后会出现顶端钝圆, 未变形切削厚度变小, 这也加大了磨粒实际的负前角, 提高了金属的剪切流动应力, 比磨削能的下降会出现变缓的趋势。

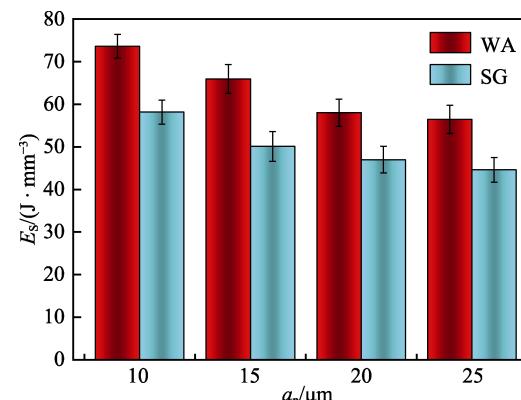


图 11 磨削深度对两种砂轮磨削比能的影响

Fig.11 Effect of grinding depth on grinding specific energy of three grinding wheels

如图 12 所示, 磨削深度和工件进给速度保持不变, 提高砂轮转速后, 两种砂轮的磨削比能呈现平稳上升的趋势。这是由于砂轮转速的增加, 磨粒的最大未变形切屑厚度减小, 增强了材料的剪应变效应和剪应变率效应, 减弱了热软化效应, 需要更高的能量去除单位体积材料。通过计算两种砂轮的磨削比能, 得出 SG 砂轮的平均磨削比能较 WA 砂轮约低 21.5%。去除相同体积材料时的磨削比能越小代表砂轮越锋利, 相比传统熔融刚玉, SG 磨粒的内部晶粒非常小, 而且不同于传统刚玉的大面积破碎磨损, SG 磨粒呈微破碎, 这显著提高了 SG 砂轮的自锐性, 使 SG 砂轮在磨削过程中保持锋利的磨削刃。

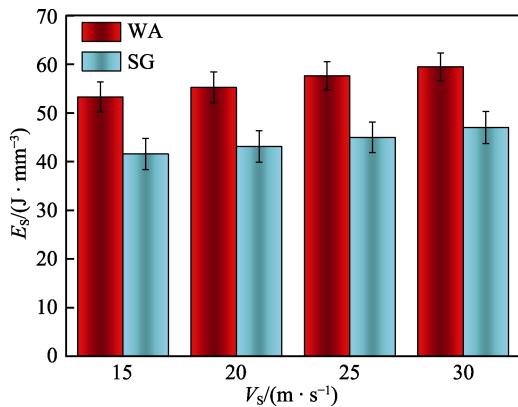


图 12 砂轮转速对两种砂轮磨削比能的影响

Fig.12 Effect of wheel rotating speed on grinding specific energy of three kinds of wheels

2.4 工件表面微观形貌

2.4.1 工件表面粗糙度

工件表面粗糙度是评价工件表面质量的有效手段。通过高度特征参数 R_a 值定量表征工件表面质量, 图 13 为垂直于磨削痕迹方向的工件表面粗糙度轮廓曲线。

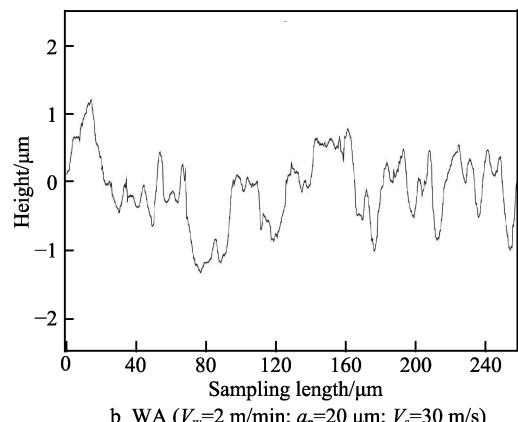
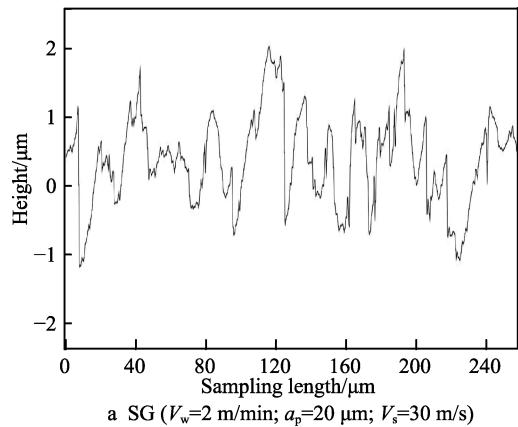


图 13 工件表面粗糙度轮廓

Fig.13 Surface roughness profile of workpiece

工件经两种砂轮磨削后的表面粗糙度如图 14 所示, 保持工件进给速度和切深不变, 随着砂轮转速的提高, 工件表面粗糙度 R_a 值出现了不同程度的下降。在相同砂轮转速下, 经 WA 磨削后的工件表面粗糙度均远高于 SG 砂轮磨削后的工件表面粗糙度, 另外, 结合图 13 也可以看出, WA 砂轮加工的工件表面轮廓峰值间距更大。这是由于 WA 磨料脆性大, 加工过程中磨粒破碎迅速且严重, 部分磨粒呈大面积破碎状态, 导致砂轮表面磨粒突出, 高度分布更不均, 另外磨粒顶端粘附的磨屑也会进一步增大工件的表面粗糙度。SG 磨粒的韧性约为 WA 磨料的两倍, 加之 SG 磨料在加工过程中呈微破碎状态, 所以 SG 砂轮所加工工件的表面粗糙度低, 而且砂轮转速的变化并不会引起工件表面粗糙度的剧烈变化。

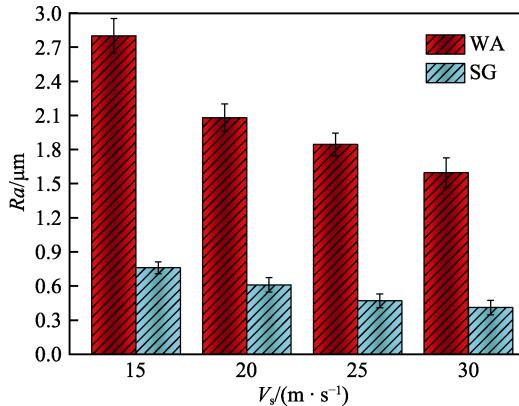


图 14 经两种砂轮磨削后的工件表面粗糙度对比图

Fig.14 Comparison of workpiece surface roughness after grinding by three kinds of grinding wheels

2.4.2 工件表面形貌

图 15 为两种砂轮在切深 20 μm 、工件进给速度 2 m/min 时, 不同砂轮转速加工后的工件表面形貌。首先可以看出, 随着砂轮转速的升高, 两种砂轮的表面质量都得到了一定程度的提高。随着砂轮转速的提高, WA 砂轮加工工件表面的深犁沟数量、材料堆积、斑状烧伤等损伤逐渐减轻, 而随着砂轮转速的升高, SG 砂轮所加工工件表面的深犁沟数量和粘附面积也逐渐减少。其次, 通过对相同磨削参数下两种砂轮所加工工件表面可以发现, 出现相同表面损伤的情况下, WA 砂轮所加工工件表面损伤更严重, 在转速为 15 m/s 和 20 m/s 时, 工件表面出现了黄色斑状烧伤。另外, WA 砂轮所加工工件表面的划痕宽度均匀性差, 而且 WA 磨粒严重的磨耗磨损导致工件表面划痕宽度比 SG 砂轮所加工工件表面更宽。

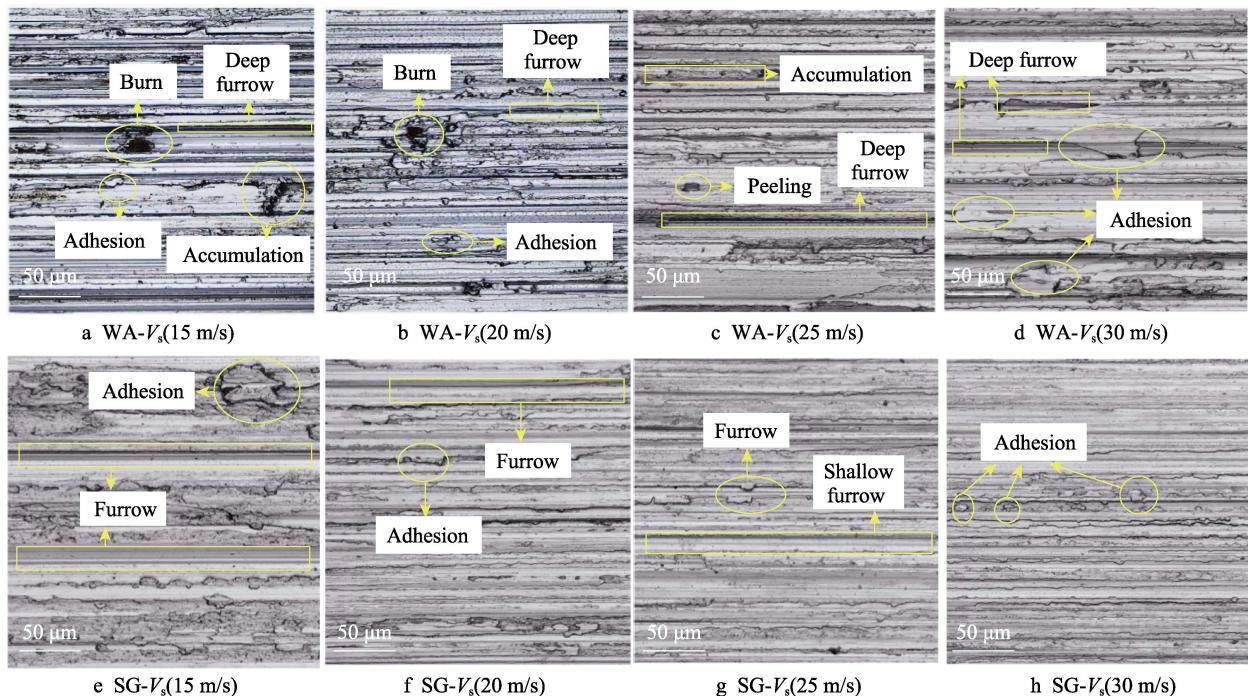


图 15 两种砂轮磨削后的工件表面形貌

Fig.15 Workpiece surface morphology after grinding with three kinds of grinding wheels

3 结论

通过对 WA 和 SG 砂轮的力特性研究, 测量了相同磨削参数下两种砂轮的磨削力, 并分析了导致两种砂轮磨削性能差异的原因, 得出以下结论:

1) 保持磨削行程和磨削用量一定, 加工镍基合金 GH4169 发现, SG 砂轮表面材料粘附比 WA 砂轮轻, WA 砂轮出现了大面积的材料粘附, 甚至造成了砂轮堵塞; WA 磨粒呈大块破碎状态, 较多磨粒出现了磨耗平台, SG 磨粒多呈微破碎状态, 仍保持了锋利的切削刃。

2) 随着切深的增加、砂轮转速的升高, 两种砂轮切向和法向磨削力都发生了符合磨削规律的变化, 而相同磨削参数下, SG 砂轮的磨削力明显小于 WA 砂轮的磨削力; 去除相同体积材料时, SG 砂轮所消耗的能量较 WA 砂轮下降了约 21.5%。

3) 随着转速的升高, 工件表面粗糙度出现了不同程度的下降, 工件表面损伤程度也得到一定减轻。对比相同磨削参数下两种砂轮所加工工件表面形貌发现, SG 砂轮所加工工件表面粗糙度明显低于 WA 砂轮所加工工件表面粗糙度, 两者表面粗糙度差值均在 1 μm 以上。

参考文献:

- [1] 廖文豪, 郭金鑫, 刘小勇, 等. 超燃冲压发动机性能参数测量不确定度分析[J]. 航空动力学报, 2020, 35(11): 2421-2428.

LIAO Wen-hao, GUO Jin-xin, LIU Xiao-yong, et al. Uncertainty analysis in scramjet performance parameters measurements[J]. Journal of aerospace power, 2020, 35(11): 2421-2428.

- [2] DENG Kun-yuan, ZHANG Xiao-yong, CHENG Yi-jun, et al. A remaining useful life prediction method with long-short term feature processing for aircraft engines[J]. Applied soft computing, 2020, 93: 106344.
- [3] SHRIVASTAVA A, S KUMARS A, RAO S, et al. Remanufacturing of nickel-based aero-engine components using metal additive manufacturing technology[J]. Materials today: Proceedings, 2021, 45: 4893-4897.
- [4] 李丹阳, 殷凤仕, 王晓明, 等. 镍基高温合金修复强化技术研究现状及发展趋势[J]. 表面技术, 2020, 49(8): 105-122.
- LI Dan-yang, YIN Feng-shi, WANG Xiao-ming, et al. Research status and development trend of reinforcement technique of nickel-based superalloy[J]. Surface technology, 2020, 49(8): 105-122.
- [5] BERGS T, ROMMES B, SMEETS G, et al. ECM roughing of profiled grooves in nickel-based alloys for turbomachinery applications[J]. Procedia manufacturing, 2019, 40: 22-26.
- [6] KUZMIN V, KORNIENKO E, GULYAEV I, et al. Application of supersonic air plasma torch for metallic nickel-based alloys spraying[J]. Materials today: Proceedings, 2019, 11: 423-429.
- [7] 李伯民, 赵波. 现代磨削技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- LI Bo-min, ZHAO Bo. Modern grinding technology[M]. Beijing: China Machine Press, 2003.

- [8] 李长河, 修世超. 磨粒、磨具加工技术与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012.
LI Chang-he, XIU Shi-chao. Processing technology and application of abrasive and abrasive tools[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2012.
- [9] 邓朝晖, 万林林, 张荣辉. 难加工材料高效精密磨削技术研究进展[J]. 中国机械工程, 2008, 19(24): 3018-3023.
DENG Zhao-hui, WAN Lin-lin, ZHANG Rong-hui. Research progresses of high efficiency and precision grinding for hard to machine materials[J]. China mechanical engineering, 2008, 19(24): 3018-3023.
- [10] 徐九华, 张志伟, 傅玉灿. 镍基高温合金高效成型磨削的研究进展与展望[J]. 航空学报, 2014, 35(2): 351-360.
XU Jiu-hua, ZHANG Zhi-wei, FU Yu-can. Review and prospect on high efficiency profile grinding of nickel-based superalloys[J]. Acta aeronautica et astronautica sinica, 2014, 35(2): 351-360.
- [11] LIU Wei, DENG Zhao-hui, SHANG Yuan-yuan, et al. Effects of grinding parameters on surface quality in silicon nitride grinding[J]. Ceramics international, 2017, 43(1): 1571-1577.
- [12] SINHA M K, SETTI D, GHOSH S, et al. An investigation on surface burn during grinding of Inconel 718[J]. Journal of manufacturing processes, 2016, 21: 124-133.
- [13] BAIDAKOVA N V, ORLOVA T N. Influence of abrasive grain geometrical characteristics on the grinding quality [J]. Procedia engineering, 2017, 206: 194-199.
- [14] LINKE B. Life cycle and sustainability of abrasive tools [M]. Switzerland: Springer International Publishing, 2016.
- [15] 丁文锋, 苗情, 李本凯, 等. 面向航空发动机的镍基合金磨削技术研究进展[J]. 机械工程学报, 2019, 55(1): 189-215.
DING Wen-feng, MIAO Qing, LI Ben-kai, et al. Review on grinding technology of nickel-based superalloys used for aero-engine[J]. Journal of mechanical engineering, 2019, 55(1): 189-215.
- [16] HUANG Bao-teng, LI Chang-he, ZHANG Yan-bin, et al. Advances in fabrication of ceramic corundum abrasives based on sol-gel process[J]. Chinese journal of aeronautics, 2021, 34(6): 1-17.
- [17] MIAO Qing, DING Wen-feng, GU Yu-long, et al. Comparative investigation on wear behavior of brown alumina and microcrystalline alumina abrasive wheels during creep feed grinding of different nickel-based superalloys[J]. Wear, 2019, 426-427: 1624-1634.
- [18] MIAO Qing, DING Wen-feng, KUANG Wei-jie, et al. Comparison on grindability and surface integrity in creep feed grinding of GH4169, K403, DZ408 and DD6 nickel-based superalloys[J]. Journal of manufacturing processes, 2020, 49: 175-186.
- [19] ZHANG Shuai-qi, YANG Zhong-xue, JIANG Rui-song, et al. Effect of creep feed grinding on surface integrity and fatigue life of Ni₃Al based superalloy IC10[J]. Chinese Journal of aeronautics, 2021, 34(1): 438-448.
- [20] 李本凯, 丁文锋, 马艳艳, 等. 新型刚玉砂轮磨削 GH4169 镍基高温合金的性能评价研究[J]. 航空制造技术, 2021, 64(4): 14-19.
LI Ben-kai, DING Wen-feng, MA Yan-yan, et al. Performance evaluation on grinding of nickel-based superalloy GH4169 using new corundum abrasive wheel[J]. Aeronautical manufacturing technology, 2021, 64(4): 14-19.
- [21] 董坤阳, 黄树涛, 于晓琳, 等. GH4169 镍基高温合金薄壁钻削过程中的应力及变形研究[J]. 机床与液压, 2021, 49(13): 153-160.
DONG Kun-yang, HUANG Shu-tao, YU Xiao-lin, et al. Research on stress and deformation in the process of drilling Ni-based superalloy thin-walled workpiece[J]. Machine tool & hydraulics, 2021, 49(13): 153-160.
- [22] 何坚, 余杰, 戴晨伟, 等. 微晶刚玉砂轮缓进给磨削镍基高温合金 GH4169 及花键研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2016, 36(5): 26-31.
HE Jian, YU Jie, DAI Chen-wei, et al. Creep-feed grinding of nickel-based superalloy GH4169 spline using micro-crystalline alumina wheels[J]. Diamond & abrasives engineering, 2016, 36(5): 26-31.
- [23] XU Li-hua, XIE Zhi-peng, GAO Li-chun, et al. Synthesis, evaluation and characterization of alumina ceramics with elongated grains[J]. Ceramics international, 2005, 31(7): 953-958.
- [24] 马新毅. 三维超声辅助平面磨削力研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2016, 36(5): 69-74.
MA Xin-yi. Study on three-dimensional ultrasonic-aided grinding force[J]. Diamond & abrasives engineering, 2016, 36(5): 69-74.
- [25] 王艳, 徐九华, 杨路. 高速精密磨削 9CrWMn 冷作模具钢的磨削力和比磨削能[J]. 光学精密工程, 2015, 23(7): 2031-2042.
WANG Yan, XU Jiu-hua, YANG Lu. Grinding force and specific grinding energy of high speed grinding of 9CrWMn cold work die steel[J]. Optics and precision engineering, 2015, 23(7): 2031-2042.