文章编号:1674-2974(2024)04-0035-08 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2024168

高温合金磨削热损伤的形成机理及对表面完整性的影响

尹佑康[1,2],徐锦泱[1,2†],明伟伟[1,2],安庆龙[1,2],陈明[1,2]
(1. 上海交通大学 机械与动力工程学院,上海 200240;
2. 上海交通大学 机械系统与振动国家重点实验室,上海 200240)

摘 要:高温合金磨削加工过程中易出现热损伤缺陷,严重降低零件的疲劳寿命,为解决该工程问题,采用锆刚玉砂轮与微晶刚玉砂轮对高温合金开展了深切缓进磨削试验.研究磨削工艺参数对磨削温度、磨削力,表面形貌与表面粗糙度的影响规律,揭示高温合金磨削热损伤的形成机理与有效抑制措施,对比分析磨削热损伤对表面完整性造成的影响.结果表明,加工弧区瞬时高温是引起高温合金磨削热损伤的本质原因,微晶刚玉砂轮因自锐性优势能有效抑制磨削热损伤,高温合金磨削热损伤表面呈现氧化变色、鱼鳞状涂覆纹理、硬度下降与残余拉应力等表面缺陷.实现高温合金无热损伤磨削的有效手段是降低磨削热量的产生与加工弧区的强化换热.

关键词:热效应;磨削加工;形成机理;表面完整性
中图分类号:TH161 **文献标志码**:A

Generation Mechanisms of Thermal Damages in Superalloy Grinding and Its Effect on Surface Integrity

YIN Youkang[1,2], XU Jinyang[1,2†], MING Weiwei[1,2], AN Qinglong[1,2], CHEN Ming[1,2]
(1. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;
2. State Key Laboratory of Mechanical System and Vibration, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Thermal damage defects are prone to occur during the grinding process of superalloys, which seriously reduces the fatigue life of parts. To address this engineering issue, this paper uses zirconium corundum grinding wheels and microcrystalline corundum grinding wheels to carry out creep-deep grinding experiments on superalloys. The effects of grinding process parameters on grinding temperature, grinding force, surface morphology, and surface roughness were studied. The formation mechanisms and effective suppression measures of thermal damage in superalloy grinding were revealed. The influence of grinding thermal damages on surface integrity was compared and analyzed. The results indicate that the instantaneous high temperature in the processing arc zone is the essential cause of the thermal damage of superalloy grinding. Microcrystalline corundum grinder can suppress grinding thermal damages productively due to its self-sharpening advantage. The surface of superalloy alloy grinding with thermal damages exhibits oxidation discoloration, fish scale-like coating texture, decreased hardness, and

* **收稿日期**:2023-10-14
基金项目:航空发动机及燃气轮机重大专项基础研究资助项目(Y2019-Ⅶ-0018-0160),Aero-engine and Gas Turbine Major Special Basic Research Program (Y2019-Ⅶ-0018-0160)
作者简介:尹佑康(1994—),男,山东临沂人,上海交通大学博士研究生
† 通信联系人,E-mail:xujinyang@sjtu.edu.cn

residual tensile stress. An effective means to realize the thermal damage-free grinding of superalloys is to reduce the generation of grinding heat and strengthen the heat transfer in the machining arc region.

Key words: thermal effects; grinding process; generation mechanisms; surface integrity

高温合金凭借优异机械性能成为航空发动机叶片叶根榫槽与涡轮盘端齿常用制备材料,而磨削加工通常是此类高端零部件制造的最后一道精密机加工工序[1-2].与其他加工模式相比,深切缓进磨削技术在保证尺寸精度与表面质量的前提下,极大提高了材料去除率,在制造业中得到了广泛应用[3-4].然而,当磨削参数和冷却条件未经优化而凭经验使用时,易在磨削弧区累积过多的热量并对加工表面造成热损伤,例如磨削烧伤、白层与微裂纹等[5-6].这些加工缺陷会显著降低零件的疲劳寿命.

目前,学术界针对上述工程问题已开展了诸多研究工作.Aslan等[7]建立了热-机械力以及表面粗糙度预测模型,发现锋利磨粒出露高度越大,力-热耦合作用下划痕和材料凸起就越显著.Ruzzi等[8]通过试验设计发现高温合金在磨削过程中具有较高的加工硬化倾向,其表面完整性易受砂轮速度的影响.Zeng等[9]研究发现高温合金磨削表面完整性对磨削深度更为敏感,降低磨削深度可抑制表面残余应力与硬度的变化以及裂纹萌生.可见当前的研究热点多集中在磨削条件对加工响应的影响方面,而对高温合金深切缓进磨削热损伤的形成机理及对表面完整性影响的研究成果鲜有报道,致使工业无法提出有效的磨削热损伤检测指标与抑制手段.此外,高温合金磨削常用的刚玉磨料砂轮易出现黏附堵塞,而超硬磨料砂轮制备成本高且修整困难.近年推出的微晶刚玉磨料砂轮韧性与自锐性好,且价格适中,已成为高温合金等难加工材料大负荷磨削砂轮的重要发展方向.

本文采用普通刚玉与微晶刚玉砂轮对航空工业常用镍基高温合金(GH4169)进行深切缓进磨削试验研究,揭示其热损伤形成机理,分析磨料性能和磨削参数对过程参量和与热损伤相关的表面完整性的影响.研究结果可为高温合金无热损伤磨削工艺条件的进一步优化提供参考.

1 试验条件与方法

试验在MKL7132强力数控磨床上开展,磨削加工试验现场布局如图1所示.被加工件GH4169镍基合金的成分和机械性能分别如表1和表2所示.试件尺寸为15 mm×10 mm×10 mm(长×宽×高).加工过程中,采用Kistler 9272四向压电式测力仪在线采集轴向磨削力F_y、切向磨削力F_x与径向磨削力F_z.由FLIR A615红外热像仪对磨削弧区最高温度进行实时采集.分析磨削参数对磨削力与磨削温度的影响,揭示高温合金磨削热损伤形成机制.磨削加工以后,对出现热损伤与未出现热损伤的工件进行表面完整性对比分析,主要评价指标包括表面形貌、表面粗糙度、残余应力、显微硬度.其中,VK-X3000材料型正置激光共聚焦显微镜用于检测被磨表面二维和三维形貌以及表面粗糙度;采用VEGA 3 - XMU(LaB6)型扫描电子显微镜分析被磨表面点元素;采用Proto-LXRD型X射线应力分析仪测量被磨表面残余应力;采用HXD-2000TM/LCD显微硬度计测量表层显微硬度.

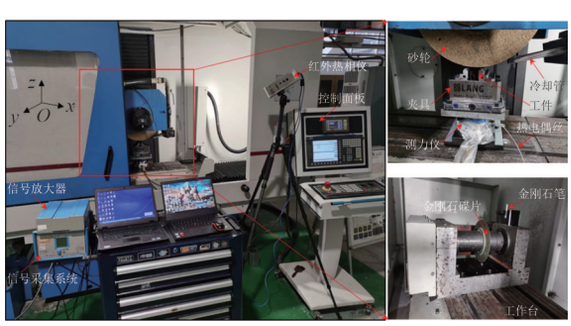


图1 磨削加工试验现场布局

Fig.1 Layout of grinding experiment site

表1 GH4169镍基合金的成分[10]

Tab.1 Composition of GH4169 Ni-based alloy[10]

w_C/%	w_{Ni}/%	w_{Fe}/%	w_{Cu}/%	w_{Mn}/%	w_{Mo}/%	w_{Cr}/%	w_{Al}/%	w_{Co}/%	w_{Si}/%
0.08	50.00~55.00	余量	0.30	0.35	2.80~3.30	17.00~21.00	0.95	1.00	0.35

表 2　GH4169 镍基合金的机械性能[10]

Tab.2　Mechanical properties of GH4169 Ni-based alloy[10]

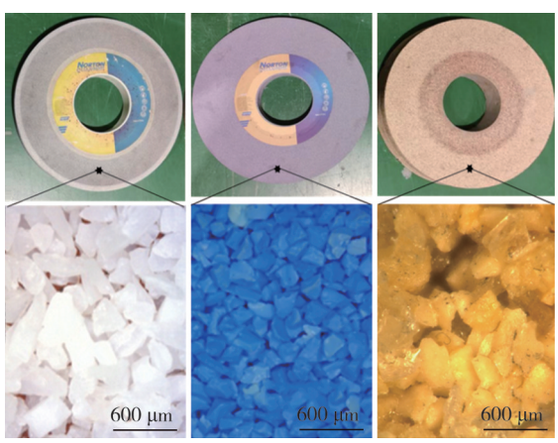
密度/(g·cm^{-3})	弹性模量/GPa	导热系数/(W·m^{-1}·K^{-1})	比热容/(J·kg^{-1}·K^{-1})	屈服强度/MPa	拉伸强度/MPa	泊松比
8.24	199.9	14.7	435	550	965	0.3

试验模式为深切缓进平面磨削加工,其试验参数设置如表 3 所示.磨削工具采用普通锆刚玉(ZF)与陶瓷微晶刚玉砂轮(SG 与 NQ),砂轮与磨粒形貌如图 2 所示,砂轮磨料的特征如表 4 所示.其中,SG 磨料主要成分为 α-Al_2O_3,是使用溶胶-凝胶工艺制造的刚玉磨料,构成磨料的最小晶体单元尺寸处在纳米级(50~500 nm)范围内,具有硬度高、韧性好、锋利度强等优点.NQ 磨料在其基础上进行了化学改性,能避免 SG 磨料微晶体在高温情况下出现熔融和生长.此外,NQ 磨料脆性得到提升,在更小压力作用下就能发挥更高的微破碎性能.

表 3　深切缓进磨削试验参数设置

Tab.3　Experimental parameter settings for creep-feed grinding

加工指标	指标详情
被加工材料	高温合金(GH4169)
工件进给速度 V_w/(mm·min^{-1})	50、100、150、200
砂轮转速 V_s/(m·s^{-1})	15、20、25、30
磨削深度 a_p/mm	0.4、0.6、0.8、1.0
磨削长度 b/mm	15
磨削方式	平面磨、顺磨
冷却液工况	巴索 vasco7000 水溶性高性能切削液,压力 8×10^8 Pa,流量 120 L/min
砂轮修整工况	金刚石碟片,修整速度 200 mm/min,修整深度 0.2 mm



(a)NQ 砂轮　(b)SG 砂轮　(c)ZF 砂轮

图 2　砂轮与磨粒形貌

Fig.2　Morphology of grinding wheel and abrasives

表 4　砂轮磨料的特征

Tab.4　Characteristics of grinding wheel abrasives

砂轮	磨粒成分	磨粒粒度/mm	结合剂种类	砂轮制备方式	砂轮外径/mm	砂轮内径/mm	砂轮轴向厚度/mm
ZF	ZrO_2, Al_2O_3						
SG	α-Al_2O_3	0.177	陶瓷	烧结	400	127	50
NQ	α-Al_2O_3						

2　结果和讨论

2.1　可磨削性分析

2.1.1　磨削力分析

在深切缓进磨削过程中,磨削力是反映磨削性能的重要指标,可分为摩擦力、耕犁力和切屑形成力.一般用最大未变形切屑厚度 a_{gmax} 来评估材料去除,它对磨削力与材料去除模式有很大影响[11],如式(1)所示.实际上 a_{gmax} 越小,磨削力越低.Song 等[12]将此原因归结于较小的 a_{gmax} 导致单颗磨粒的材料去除率相对较低,结果是机械载荷减小致使磨削力降低.

$$a_{gmax}=\left[\frac{4}{CN_d}\cdot\frac{V_w}{V_s}\left(\frac{a_p}{d_s}\right)^{0.5}\right]^{0.5} \tag{1}$$

式中:C 为与有效磨粒尖端半角相关的系数;N_d 为有效切削刃的密度;d_s 为砂轮直径.

磨削合力 F 与 F_y、F_x 以及 F_z 的关系为:

$$F=\sqrt{(F_x)^2+(F_y)^2+(F_z)^2} \tag{2}$$

磨削参数对磨削合力的影响如图 3 所示.由图 3(a)和图 3(c)可知,F 随着 V_w 和 a_p 的增大而上升,其中 a_p 的影响更为显著.由式(1)可知,V_w 和 a_p 的增加都会导致 a_{gmax} 和材料去除率增加;但 a_p 的增加还会导致工件与砂轮的接触弧长增大,从而产生更多的有效磨粒.由图 3(b)可知,由于 a_{gmax} 的减小,V_s 的增加导致 F 显著降低.3 种砂轮呈现相同的变化趋

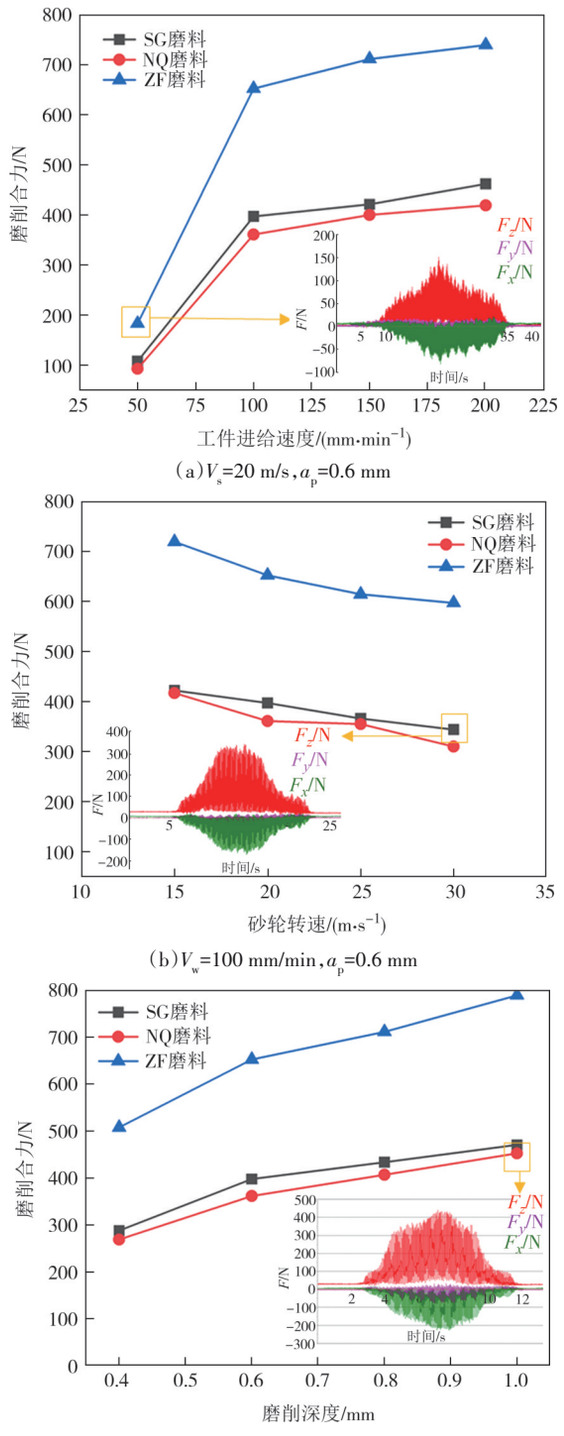


图 3 磨削参数对磨削合力的影响

Fig.3 Effects of grinding parameters on grinding resultant force

势,SG 与 NQ 磨料相同工况下产生的磨削力均比 ZF 磨料低.这是因为 SG 与 NQ 磨料的磨削机理与常规 ZF 磨料不同,陶瓷刚玉氧化铝纯度高,硬度也相对较高,且其在磨削力挤压作用下易发生沿晶断裂,从而以纳米级微破碎方式剥落并不断露出新的磨削刃[13].因此切削刃强行降低了摩擦因数与黏附磨损,因此磨削力减小.

2.1.2 磨削温度分析

磨削加工很特殊,大部分能量消耗会转化为热量积聚在加工弧区,并传入工件已加工表面,导致磨削弧区温度急剧上升,工件表层特性发生改变.磨削参数对磨削温度的影响如图 4 所示.由图 4(a)和

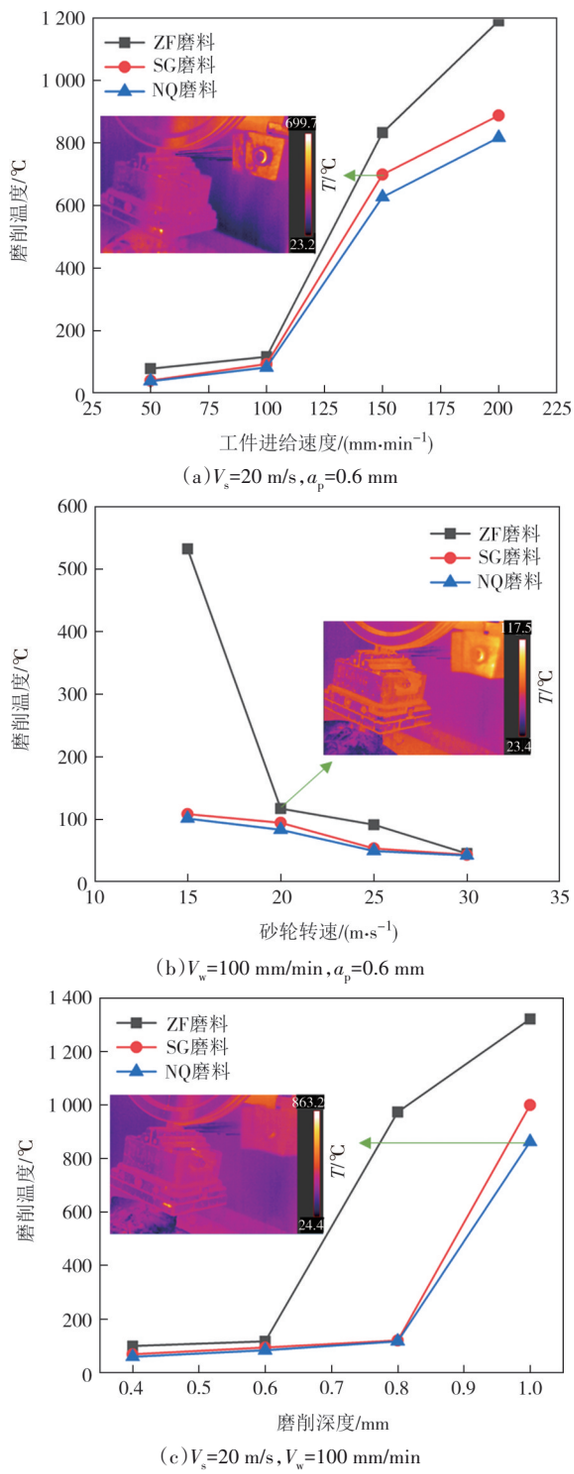


图 4 磨削参数对磨削温度的影响

Fig.4 Effects of grinding parameters on grinding temperature

图 4(c)可知,随着 V_w 和 a_p 的增加,磨削温度迅速上升.出现这种现象的原因是 a_{gmax} 的增加会加大磨削载荷并产生大量热量.a_p 增加造成磨削弧长增大,磨削液难以进入摩擦界面发挥冷却作用.而 V_s 的增加导致单位时间通过磨削弧区的有效磨粒数增多,并且 a_{gmax} 变得更薄,从而减少了磨削负载.此外,更高的 V_s 增加了磨削区中的传热频率.图 4(b)验证了上述说法,随着 V_s 的增加,磨削温度逐渐降低.改变不同的加工参数,3 种不同类型的砂轮展现出相同的变化趋势,且在相同工况下 SG 与 NQ 磨料的磨削温度均比 ZF 磨料低.这是因为 SG 与 NQ 磨料是由极为均匀的亚微晶体构成的,受压时可通过微破碎不断提供新的切削刃,较高的自锐性使剥落的磨料能带走更多磨削时产生的热量,因此具备了冷切削效果.

综上所述,磨粒在去除材料的过程中,材料的塑性变形与界面摩擦产生磨削热,伴随着加工弧区温度上升.磨削参数通过调节最大未变形切屑厚度决定磨削力与磨削温度的变化趋势,对两者的作用效果是一致的.砂轮磨料的性能对磨削热量的产生具有显著影响.相比于普通刚玉砂轮,微晶刚玉磨料砂轮因自锐性优势可以显著降低磨削温度与磨削力.

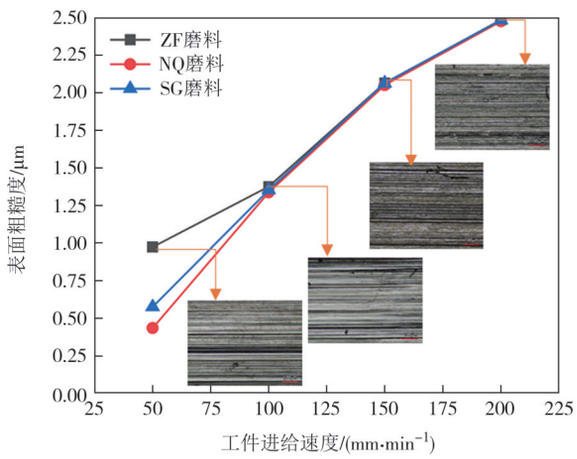
从图 4(a)和图 4(c)可以发现,当磨削温度上升至 130 ℃左右时,会出现大幅度上升.这是因为此时冷却液的换热状态从成核沸腾转换至成膜沸腾,传热系数急剧下降,致使磨削温度迅速攀升.因此,可以推断高温合金磨削热损伤产生的机理就是被加工件的高强韧与低热导率特性使得机械加工过程中产热量大,再加上磨削弧区散热困难导致磨削热量快速累积.当加工弧区的热流密度超过临界值时,磨削液换热能力近乎丧失.此时,磨削弧区瞬时高温超过被加工件相变温度,引起工件表层金相组织发生变化.同时可以推断,抑制磨削热损伤的方式可以通过保障砂轮锋利程度,从源头直接减少磨削热的产生.或者从热量的传导环节入手,即实行强化换热,加强磨削弧区的热量疏散,从而减少加工弧区传入工件表层的热流密度.目前工业上应用于高温合金等难加工材料磨削加工的强化换热方法主要有低温冷风[14],液氮冷却[15],低温气动喷雾[16]等.其主要思路是通过低温介质或流动空气进行强化换热.

2.2　表面完整性分析

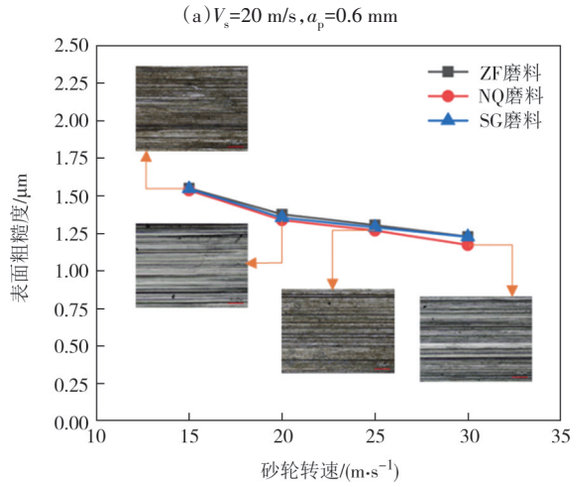
2.2.1　表面形貌与表面粗糙度

表面粗糙度 R_a 和形貌是评估砂轮性能与磨削质量的重要指标.在高端零部件制造方面,往往较低的 R_a 更有利于提高零件的服役性能.采用 VK-X3000 材料型正置激光共聚焦显微镜观察被磨表面二维与三维形貌,并沿垂直于砂轮进给方向测量其表面粗糙度,测量 3 次取平均值.

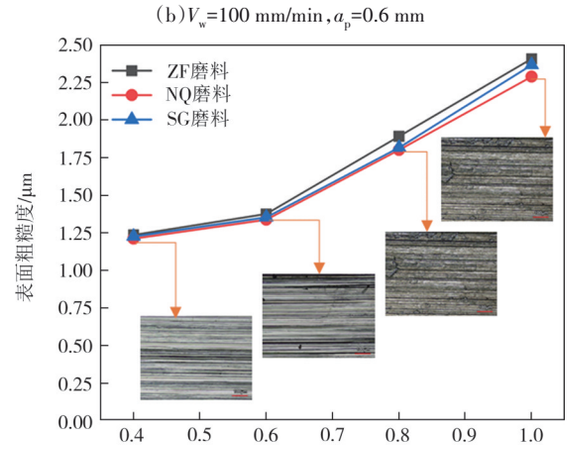
磨削参数对加工件表面粗糙度的影响如图 5 所示.由图 5(a)和图 5(c)可知,随着 V_w 和 a_p 的增加,R_a 呈增加趋势.相反,V_s 与 R_a 呈负相关,如图 5(b)所示.



(a)V_s=20 m/s,a_p=0.6 mm



(b)V_w=100 mm/min,a_p=0.6 mm



(c)V_s=20 m/s,V_w=100 mm/min

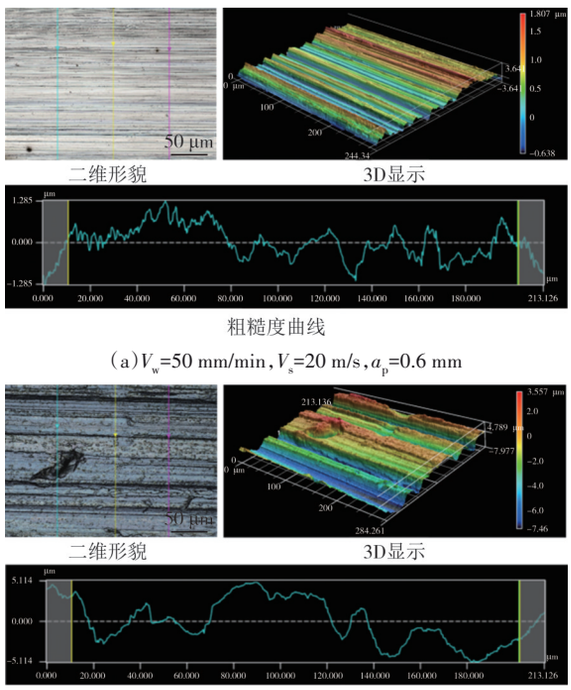
图 5　磨削参数对加工件表面粗糙度的影响

Fig.5　Effects of grinding parameters on surface roughness

由于a_{gmax}的变化,R_a受到砂轮和工艺参数综合的影响.降低a_{gmax}可带来较小的R_a,但要以牺牲加工效率为代价.Li等[17]认为在热-力耦合的影响下,材料去除机制的变化导致不同的R_a.相应地,可以发现3种砂轮R_a随磨削参数的变化趋势与磨削力和温度的变化趋势均相似.同样地,SG与NQ磨料砂轮相比于ZF砂轮在降低R_a方面表现稍好.NQ磨料因自锐性最好,砂轮锋利度保持性好,所获得的R_a最小,加工精度最高.从图5可以看出,所有被磨表面都是磨料与工件材料相互作用留下的轨迹所叠加形成的,有时伴有材料涂覆、磨屑冷焊黏附与破碎凹坑等缺陷.

研究表明,高温合金的相变温度为800~900 ℃,从图4可以推断,对于ZF砂轮,V_w=50 mm/min,V_s=20 m/s,a_p=0.6 mm工况下属于无热损伤表面;当V_w=200 mm/min,V_s=20 m/s,a_p=0.6 mm时,试件表面出现热损伤.

被磨表面形貌与粗糙度测量如图6所示.由图6(a)可知,此工艺参数下试件表面纹理清晰且致密度较高,塑性隆起程度较浅,相邻沟槽彼此重叠构成的已加工面较为平整,R_a值较低,表面质量较好.而随着磨削载荷的增加,纹理变得模糊,凹槽沿工件进给方向加深,破碎凹坑与微裂纹损伤缺陷更显著.此时工件表面呈紫青色,已经出现严重的氧化变色,如图6(b)所示.因此,这也验证了上述推断的正确性以及对磨削热损伤形成机制解释的合理性.下文通过对比两者的表面完整性,揭示磨削热损伤对表面完整性的影响.



(a)V_w=50 mm/min,V_s=20 m/s,a_p=0.6 mm

(b)V_w=200 mm/min,V_s=20 m/s,a_p=0.6 mm

图6 被磨表面形貌与粗糙度测量

Fig.6 Surface morphology and roughness of the ground surface

2.2.2 表面点元素

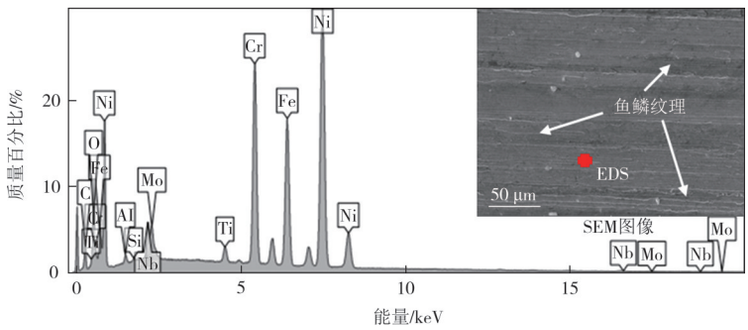
采用VEGA 3-XMU (LaB6)型扫描电子显微镜观测磨削热损伤表面的SEM二次电子形貌与EDS点元素,当V_w=200 mm/min,V_s=20 m/s,a_p=0.6 mm时,结果如图7所示.从被磨表面的SEM图像来看,犁削现象十分明显.在高磨削温度下,表层材料达到软化点并经历剧烈的塑性流动,从而形成鱼鳞状纹理表面.由图7与表1可知,工件内部的镍、铬与铁等强化相赋予了如表2所示的高温合金优异的机械性能.对比后可以发现,热损伤表面氧元素呈现且含量颇多,说明此时氧化物较多,高温下试件金相组织发生了变化.这也是热损伤造成高温合金零件性能发生变化的本质原因.

2.2.3 表面残余应力

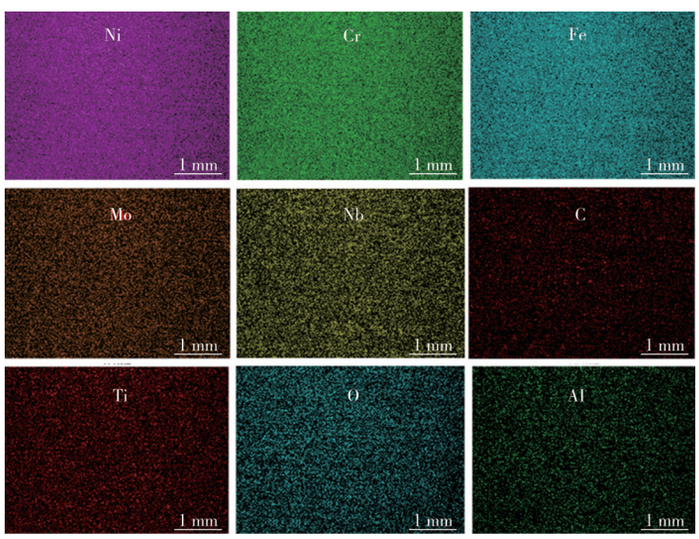
磨削过程中,不均匀温度场作用后仍会在工件内部留下自相平衡的内应力.因此残余应力成为反映磨削热损伤的重要指标,也是决定零件疲劳强度和耐磨性能的重要因素.研究表明,残余压应力可以抑制裂纹的产生和扩展,更有利于提高零件的疲劳性能[18].当V_s=20 m/s,a_p=0.6 mm时,采用Proto-LXRD型X射线应力分析仪测量被磨表面垂直于工件进给方向的残余应力,结果如图8所示.由图8可知,热损伤表面呈现残余拉应力,而无热损伤表面则表现为残余压应力.残余拉应力是因过高磨削温度引起的相变和热应力在被磨表面上形成的,应变速率上升和由a_{gmax}下降引起机械塑性变形是残余压应力形成的主要因素.Fathallah等[19]认为塑性变形、热应力和微观结构转变是残余应力的主要来源.当磨削温度较低时,机械效应对残余压应力起主导作用,反之热效应更加明显,残余拉应力占主导地位,机械效应与热效应的相互博弈决定最终的残余应力状态.因此可以推断,残余压应力与砂轮转速呈正相关,而残余拉应力则与工件进给速率和磨削深度呈正相关.

2.2.4 表面显微硬度

在磨削过程中,机械作用通常会导致加工硬化,而热效应会使被加工件表面产生类似于高温回火的软化效应,因此磨削表面的硬度是热-机械耦合效应的结果.需要声明的是,软化的表面层往往对零件的



(a)EDS点扫结果



(b)晶界析出相点扫结果

图 7　被磨表面二次电子与点元素分析

Fig.7　Analysis of secondary electrons and point elements on the ground surface

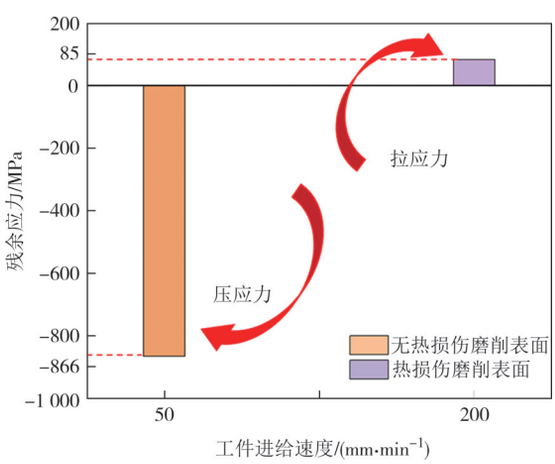


图 8　被磨表面残余应力对比分析

Fig.8　Analysis of residual stress on the ground surface

机械性能产生不利影响. 采用HXD-2000TM/LCD显微硬度计测量被磨表面的显微硬度,取 V_s=20 m/s, a_p=0.6 mm,试验力为5 N,保荷时间为15 s,试件中间稳定加工区域测量3次取平均,结果如图9所示. 由图9可知,无热损伤表面硬度高于GH4169基体,这表明此时存在加工硬化,机械效应对表面硬度的影响更为显著.存在热损伤被磨表面的硬度低于基体硬度,此时磨削高温导致大量强化相γ′被溶解,热软化效应强于塑性变形带来的加工硬化效应.这说明材料去除率与 a_{gmax} 变化,磨削温度与磨削力发生波动,加工硬化和热软化的相互角逐导致表面硬度波动. 已发布的研究成果也观察到了类似现象[20-21].

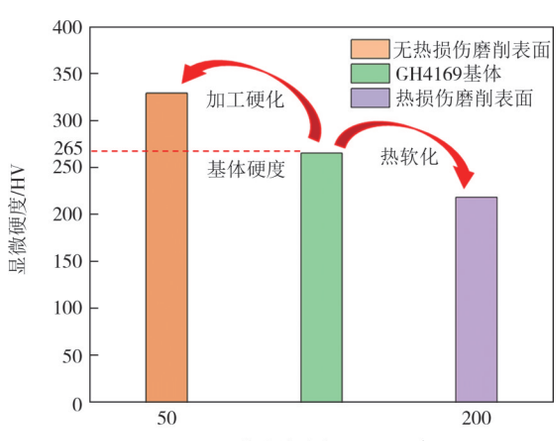


图 9　被磨表面显微硬度对比分析

Fig.9　Analysis of microhardness on the ground surface

3 结 论

1)高温合金磨削热损伤的形成机理是被加工件的高强韧与低热导率导致磨粒去除材料过程中产热量大,且加工弧区散热困难.磨削弧区热量累积,热流密度升高,使磨削液的换热状态从成核沸腾转变为成膜沸腾,传热系数急剧下降.弧区瞬时高温使工件表层金相组织发生变化,零件性能恶化.

2)工件进给速度和磨削深度与磨削温度、磨削力以及表面粗糙度呈正相关.而砂轮转速与磨削温度、磨削力以及表面粗糙度呈负相关.磨削参数通过调节最大未变形切屑厚度影响高温合金磨削过程参量与表面质量.

3)高温合金磨削热损伤表面呈现氧化变色、鱼鳞状涂覆纹理、破碎凹坑与微裂纹等外在缺陷.热效应压制机械效应造成表面硬度低于基体硬度,且表面出现残余拉应力.

4)相比于普通刚玉砂轮,微晶刚玉砂轮因自锐性优势有效降低高温合金磨削温度与磨削力,对抑制磨削热损伤具有显著效果.实现高温合金无热损伤磨削可从提高砂轮锋利程度与加工弧区强化换热入手.

参考文献

[1] WHELCHEL R L, KELEKANJERI V S K G, GERHARDT R A, et al. Effect of aging treatment on the microstructure and resistivity of a nickel-base superalloy [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2011, 42(5): 1362-1372.

[2] MA W B, LUO H Y, YANG X G. The effects of grain size and twins density on high temperature oxidation behavior of nickel-based superalloy GH738[J]. Materials, 2020, 13(18): 4166.

[3] JAMSHIDI H, ALI SADOUGH VANINI S, ATTARI A. Investigation of creep feed grinding parameters and heat treatment effects on the nickel-base superalloys [J]. Transactions of Materids and Heat Treatment, 2004, 25(5): 92-96.

[4] MIAO Q, DING W F, KUANG W J, et al. Grinding force and surface quality in creep feed profile grinding of turbine blade root of nickel-based superalloy with microcrystalline alumina abrasive wheels [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2021, 34(2): 576-585.

[5] 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.

[6] LIAO Z R, LA MONACA A, MURRAY J, et al. Surface integrity in metal machining-part Ⅰ: fundamentals of surface characteristics and formation mechanisms[J].International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2021, 162: 103687.

[7] ASLAN D, BUDAK E. Surface roughness and thermo-mechanical force modeling for grinding operations with regular and circumferentially grooved wheels [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 223: 75-90.

[8] RUZZI R, DA SILVA R B, DA SILVA L R R, et al. Influence of grinding parameters on Inconel 625 surface grinding [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 55: 174-185.

[9] ZENG Q R, LIU G, LIU L, et al. Investigation into grindability of a superalloy and effects of grinding parameters on its surface integrity [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2015, 229(2): 238-250.

[10] GAO T, ZHANG X P, LI C H, et al. Surface morphology evaluation of multi-angle 2D ultrasonic vibration integrated with nanofluid minimum quantity lubrication grinding[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 51: 44-61.

[11] LI C, LI X L, WU Y Q, et al. Deformation mechanism and force modelling of the grinding of YAG single crystals [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2019, 143: 23-37.

[12] SONG Y H, SHI K N, HE Z, et al. Investigation of grindability and surface integrity in creep feed grinding of GH738 alloy using different grinding wheels [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 123(11): 4153-4169.

[13] 曹克, 董志刚, 康仁科, 等. 微晶刚玉砂轮磨削钛合金TC17磨削力研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2016, 36(5): 1-7.
CAO K, DONG Z G, KANG R K, et al. Research on grinding force of titanium alloy TC17 with microcrystalline alumina grinding wheel[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2016, 36(5): 1-7.(in Chinese)

[14] 张高峰, 何杨, 鲁炎鑫, 等. 碳纤维增强复合材料低温冷风磨削试验研究[J]. 中国机械工程, 2016, 27(20): 2779-2784.
ZHANG G F, HE Y, LU Y X, et al. Experimental study on cryogenic cold air grinding of carbon fibre reinforced plastics[J]. China Mechanical Engineering, 2016, 27(20): 2779-2784.(in Chinese)

[15] ZHOU L, HUANG S T, YU X L. Machining characteristics in cryogenic grinding of SiCp/Al composites[J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2014, 27(5): 869-874.

[16] 安庆龙,傅玉灿,徐九华,等. 低温气动喷雾射流冲击冷却技术在钛合金磨削中的应用[J]. 中国机械工程,2006,17(11): 1117-1120.
AN Q L, FU Y C, XU J H, et al. Application of cryogenic pneumatic mist jet impinging in grinding of Ti-6Al-4V [J]. China Mechanical Engineering, 2006, 17(11): 1117-1120.(in Chinese)

[17] LI C, PIAO Y C, MENG B B, et al. Phase transition and plastic deformation mechanisms induced by self-rotating grinding of GaN single crystals [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2022, 172: 103827.

[18] LAAMOURI A, SIDHOM H, BRAHAM C. Evaluation of residual stress relaxation and its effect on fatigue strength of AISI 316L stainless steel ground surfaces: experimental and numerical approaches [J]. International Journal of Fatigue, 2013, 48: 109-121.

[19] FATHALLAH B B, NABIL B F, SIDHOM H, et al. Effects of abrasive type cooling mode and peripheral grinding wheel speed on the AISI D2 steel ground surface integrity[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2009, 49(3/4): 261-272.

[20] ÖSTERLE W, LI P X. Mechanical and thermal response of a nickel-base superalloy upon grinding with high removal rates[J]. Materials Science and Engineering: A, 1997, 238(2): 357-366.

[21] SHARMAN A R C, HUGHES J I, RIDGWAY K. Workpiece surface integrity and tool life issues when turning inconel 718™ nickel based superalloy[J]. Machining Science and Technology, 2004, 8(3): 399-414.