

文章编号:1000-8055(2013)03-0621-08

镍基高温合金 GH4169 磨削参数 对表面完整性影响

黄新春, 张定华, 姚倡锋, 任敬心

(西北工业大学 机电学院 现代设计与集成制造技术教育部重点实验室, 西安 710072)

摘 要: 研究了用单晶刚玉砂轮磨削镍基高温合金 GH4169 时,磨削参数对表面完整性中的表面特征(表面粗糙度、表面形貌、表面显微硬度和表面残余应力)的影响,以期优化磨削参数。砂轮速度依次选择 15, 20, 25 m/s,磨削深度分别选择 50, 100, 150 μm ,工件速度分别选择 5, 10, 15 m/min。研究结果表明:表面粗糙度对工件速度的变化最敏感,表面显微硬度对砂轮速度变化最敏感,表面残余应力对砂轮速度变化最敏感;同时表明了磨削参数对磨削表面形貌、显微硬度梯度、微观组织、残余应力梯度的影响,揭示了表面完整性中的变质层形成规律。其塑性变形层在 5~10 μm ,显微硬度变化影响层为 80~100 μm ,残余应力影响层厚度为 80~200 μm ,其为磨削镍基高温合金表面完整性控制研究提供相关的实验数据基础。

关 键 词: GH4169 高温合金; 表面完整性; 表面粗糙度; 表面形貌; 显微硬度; 残余应力

中图分类号: V261; TG54

文献标志码: A

Effects of grinding parameters on surface integrity of GH4169 nickel-based superalloy

HUANG Xin-chun, ZHANG Ding-hua, YAO Chang-feng, REN Jing-xin

(Ministry of Education Key Laboratory of Contemporary Design and Integrated
Manufacturing Technology, School of Mechatronics,
Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: The influence rules of grinding parameters on the surface topographic characters, including surface roughness, surface topography, surface microhardness and surface residual stresses of the surface integrity, were studied to optimize the grinding parameters when grinding the GH4169 nickel-based superalloy by using single crystal corundum grinding wheel. The wheel speed was selected as 15, 20, 25 m/s, the grinding depth selected as 50, 100, 150 μm , and the workpiece speed selected as 5, 10, 15 m/min. The results show that, the surface roughness is most sensitive to the workpiece speed, the surface microhardness and the surface residual stresses are most sensitive to the wheel speed. And the influence rules of grinding parameters on the surface morphology, the gradient of microhardness, microstructure and the gradient of residual stress were studied, revealing the formation rules of metamorphic layer of the surface integrity. The plastic deformation layer is in range of 5~10 μm , the depth of the microhardness change is 80~100 μm , the residual stress affected layer thickness is 80~200 μm , thus providing relevant experimental data base for research of the

收稿日期:2012-04-05

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20130326.1743.201303.621_021.html

基金项目:国家自然科学基金(50975237, 51005184)

作者简介:黄新春(1983—),男,河南南阳人,博士生,主要从事航空材料切削参数优化、表面完整性控制研究。

surface integrity control in grinding nickel-based superalloy.

Key words: GH4169 superalloy; surface integrity; surface roughness; microstructure; surface topography; microhardness; residual stresses

高温合金被广泛用于航空、宇航的耐高温部件,其具有优良的高温强度、热稳定性及抗热疲劳性。高温合金构件的最终服役表面为磨削表面或接近磨削表面,磨削表面质量直接影响构件的使用性能。但是高温合金的磨削加工性差,其磨削力大、磨削温度高;砂轮易黏附堵塞,易磨损;磨削比很低(磨削比 $G=1\sim 2$),这些都不利获得好的表面质量,影响高温合金构件的服役使用性能^[1]。表面完整性是受控制的加工方法的影响,导致加工的表面状态的损伤或者加强的效果,其是材料加工中很重要的评价指标,对构件的耐磨性能、疲劳性能、应力腐蚀性能等具有重要的决定作用^[2]。因此在高温合金材料的磨削加工中,必须注重对表面完整性的控制。

Kumar S 和 Choudhury S K 研究了磨削力对零件表面粗糙度的影响,结果表明为了获得较好的表面质量,应尽量减小振动、降低磨削力,同时还需适当提高砂轮的速度^[3]。Hecker R L 和 Liang S Y 研究了磨削参数(包括磨削深度、速率比、工件当量直径、砂轮的显微组织)对磨削表面粗糙度的影响,并建立了磨削表面粗糙度的预测模型^[4]。Peter 等研究了高温合金磨削过程中的磨削力和磨削温度对磨削表面的残余应力的影响^[5]。Guo 等研究了镍基高温合金在采用电镀氧化硼(CBN)砂轮磨削时砂轮磨损、加工参数对磨削性能的影响等,并建立了磨削功率模型^[6]。何玉怀等对直接时效 GH4169 高温合金的疲劳裂纹扩展性能进行了实验研究,分别研究了厚度、温度、应力比等因素对直接时效 GH4169 高温合金疲劳裂纹扩展性能的影响^[7]。徐西鹏等针对磨削温度对高温合金工件表面完整性影响进行了分析;并在一台精密平面磨床上分别采用 SiC、 Al_2O_3 和 CBN 砂轮对 TC4 和镍基高温合金 K417 进行平面磨削实验,解释了砂轮磨损机理^[8]。周志雄和毛聪等研究了磨削温度对表面质量的影响,结果发现:当磨削温度不足以使已磨表面出现明显烧伤时,磨削温度对表面粗糙度值的影响不大^[9]。康仁科等通过对单颗 CBN 磨粒和普通磨粒磨损特性的比较以及对陶瓷结合剂 CBN 砂轮磨损特性和磨削性能的分析,研究了 CBN 砂轮磨

削难加工材料时磨削液的作用,提出了陶瓷结合剂 CBN 砂轮磨削液的选择依据^[10]。任敬心等分析了高温合金 GH33A 磨削时传入工件表层热量的百分比;采用数值解析的方法计算不同深度处的磨削温度和残余应力,并进行了实验验证。同时还研究了高温合金 GH4169 的磨削特征。其磨削时砂轮表面存在严重的黏附物使磨削力和磨削温度显著增高,磨削比较低^[11-12]。杨茂奎等针对陶瓷结合剂立方氮化硼(CBN)砂轮磨削 GH4169 高温合金的磨削加工性和磨削表面完整性进行研究,研究了磨削参数对磨削力、磨削温度和磨削比的影响规律,建立了表面完整性指标与磨削参数之间的关系^[13]。黄新春等通过 GH4169 高温合金平面切入磨削实验,建立了表面粗糙度的经验公式,分析了表面粗糙度对磨削参数的灵敏度,获得了磨削参数稳定域和非稳定域^[14]。

在上述大部分研究中,主要是针对磨削力和磨削温度的作用机理,以及磨削表面粗糙度、表面残余应力与磨削工艺参数的关系进行了分析,仅是对表面完整性的个别表面指标进行研究,缺乏对于表面完整性系统的阐述和对于磨削表面变质层内的完整性指标进行测试分析。

本文采用正交实验方法,使用单晶刚玉砂轮平面切入磨削 GH4169 高温合金,选用表面完整性标准评价体系对磨削表面完整性(表面粗糙度、表面形貌、微观组织、显微硬度和残余应力)的影响进行了研究,以期在高温合金磨削参数及进行表面完整性控制研究提供相关的实验数据基础。

1 表面完整性的定义及评价

表面完整性是指零件由加工所形成的表面特征和表层特性。表面完整性定义见参考文献^[15]。美国机械加工切削数据手册,其对表面完整性的评价采用 3 个级别标准。表面完整性的评价指标如图 1 所示:①与表面纹理相关的几何特征(表面粗糙度、表面波纹度、表面纹理方向和表面缺陷);②变质层特征:包括表层硬度梯度、残余应力场、微观组织变化、塑性变形等^[15]。

本文选用标准数据组作为评价 GH4169 高温合金平面磨削的表面完整性的标准,主要分析磨削工艺参数对磨削表面特征、残余应力场、显微

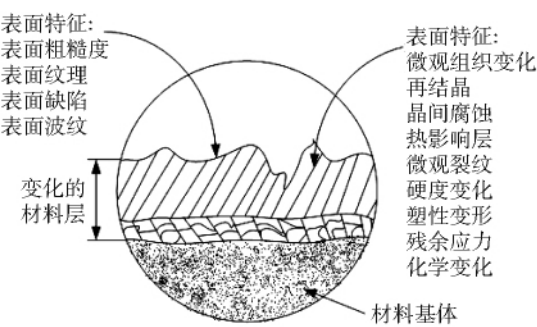


图 1 表面完整性示意图

Fig. 1 Schematic of surface integrity

硬度梯度和微观组织的影响规律.

2 GH4169 磨削实验

2.1 试件材料

研究采用的试件材料为 GH4169 锻造镍基

高温合金,其属 Ni-Cr-Fe 基时效硬化型合金,热处理工艺为:锻后水冷+720℃×8h 以 50℃/h 炉冷到 620℃×8h 空冷.其主要化学成份组成见表 1.GH4169 高温合金利用其高强度、高耐腐蚀性以及良好的高温力学性能,使其在航空工业中得到了广泛应用,其在室温/高温下的力学性能见表 2.

表 1 GH4169 高温合金的化学成分(单位:%)

Table 1 Chemical composition of GH4169 superalloy (unit : %)

Ni	Cr	Al	Mo	Ti	C	Nb
52.30	18.90	0.52	3.08	1.06	0.040	5.30
Mn	Si	Cu	Ta	Co	P	Fe
<0.20	<0.20	<0.20	<0.20	<0.20	<0.015	余量

表 2 GH4169 高温合金的力学性能

Table 2 Mechanical properties of GH4169 superalloy

温度/℃	抗拉强度 σ_b /MPa	弹性模量 E /GPa	延伸率 δ /%	冲击值 a_k / (J·cm ²)	熔点/℃	硬度/HB (室温)	热导率 λ / (W/m·℃)	收缩率 ψ /%
20	1392	205(20℃)		573(20℃)				
400	1324				1260~		14.65	
600	1295		15		1320	346~450	(100℃)	41
750	843							
800	618							

2.2 实验条件及实验过程

实验采用 MM7120A 平面磨床;砂轮采用 SA80KV,宽度为 25 mm;磨削方式为切入顺磨,采用乳化液冷却.本文旨在分析砂轮速度、磨削深度和工件速度对表面完整性的影响,实验采用正交实验方法,其磨削参数选择如表 3 所示.实验方案如图 2 所示.

表面粗糙度测量系统采用 TR240 便携式表面粗糙度仪,分别在磨削表面垂直磨削方向各取 5 个点测量粗糙度取平均值,取样长度为 0.8 mm,评定长度为 4.0 mm.表面形貌采用 VECO 三维轮廓仪和 AMRAY-1000B 的扫描电子显微镜观察.

显微硬度的测量采用 MHT-4 显微硬度测试计测试,实验力选择 200 g,保持载荷时间为 10 s,测量值为维氏硬度(HV),同时测量材料基体内的显微硬度为(440~480 HV).残余应力采用

XStress 3000 X 射线应力分析仪进行测试.

表 3 实验磨削参数

Table 3 Experimental grinding parameters

实验 序号	工件速度 v_w /(m/min)	磨削深度 a_p /μm	砂轮速度 v_s /(m/s)
1	5	50	15
2	5	100	20
3	5	150	25
4	10	50	20
5	10	100	25
6	10	150	15
7	15	50	25
8	15	100	15
9	15	150	20

沿着已加工试样磨削方向和垂直于磨削方向切割、制备金相试样。将切割断面研磨、抛光后进行腐蚀,腐蚀剂配比为盐酸:甲醇:过氧化氢(3%)等于 2.5:2.5:1,采用型号为 Leica DMI 5000M 倒置金相显微镜对断面微观组织进行观察。

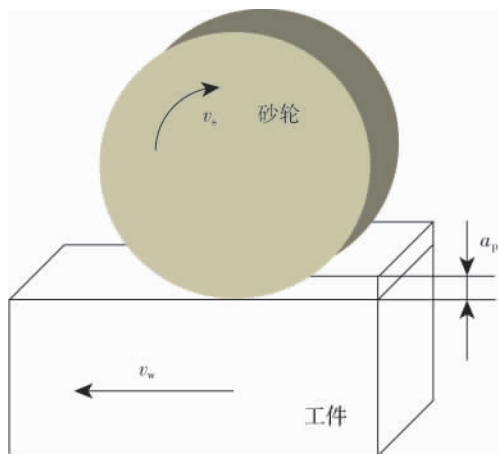


图 2 实验方案示意图

Fig. 2 Schematic of experimental program

加工完的试件如图 3 所示,试样尺寸为:30 mm×20 mm×10 mm,选用参数如表 3。



图 3 加工完试样

Fig. 3 Specimen after machining

3 实验结果及分析

表 4 为表面粗糙度 R_a 、表面显微硬度 H 和表面残余应力 σ 的测量结果,通过对表 4 中测量结果与磨削参数的直观分析,可以得到磨削参数对表面粗糙度 R_a 、表面显微维氏硬度 H 和表面残余应力 σ 的影响规律。

3.1 磨削参数对表面特征的灵敏度分析

利用线性回归分析方法,对表 3、表 4 中的工

艺参数数据和表面特征测试数据进行分析,建立了 GH4169 高温合金磨削表面特征随磨削加工参数变化的经验公式,如式(1)所示

表 4 表面特征测量结果

Table 3 Measurement results of surface characteristics

实验序号	表面粗糙度 R_a/nm	表面显微硬度/ HV	表面残余应力 σ/MPa
1	229.64	398.28	695.4
2	261.98	391.42	874.4
3	273.79	388.67	675.8
4	426.11	328.34	521.4
5	358.67	414.24	510.7
6	454.07	432.92	920.6
7	363.45	418.79	772.9
8	586.13	436.05	905.4
9	594.01	405.06	1003.8

$$\begin{cases} R_a = 10^{-0.408} v_w^{0.6516} \cdot a_p^{0.2441} \cdot v_s^{0.044} \\ H = 10^{2.8134} v_w^{0.0053} \cdot a_p^{0.0724} \cdot v_s^{-0.0878} \\ \sigma = 10^{3.5639} v_w^{0.0849} \cdot a_p^{0.1511} \cdot v_s^{-0.178} \end{cases} \quad (1)$$

对上述回归方程进行相关系数检验,其表面粗糙度的回归分析相关系数 $R^2 = 0.826$,说明其相关性是可信的,而且建立的回归模型是显著的;其表面显微硬度的回归分析相关系数 $R^2 = 0.557$,表面残余应力的回归分析相关系数 $R^2 = 0.764$,说明其为中度相关的;上述特征分析用于揭示与磨削工艺参数的关系是可行的。由上式(1)可得,表面特征对各磨削工艺参数的相对灵敏度即为参变量的指数,即

$$\begin{cases} S'_{R_a v_w} = 0.6516, S'_{R_a a_p} = 0.2441 \\ S'_{R_a v_s} = 0.044, S'_{H v_w} = 0.0053 \\ S'_{H a_p} = 0.0724, S'_{H v_s} = -0.0878 \\ S'_{\sigma v_w} = 0.0849, S'_{\sigma a_p} = 0.1511 \\ S'_{\sigma v_s} = -0.178 \end{cases} \quad (2)$$

由式(2)可知,在 GH4169 高温合金进行平面磨削时,表面粗糙度 R_a 对工件速度 v_w 的变化最敏感,对磨削深度 a_p 变化的敏感次之,对砂轮速度 v_s 的变化最不敏感;表面显微维氏硬度 H 对砂轮速度 v_s 的变化最敏感,对磨削深度 a_p 变化的敏感次之,对工件速度 v_w 的变化最不敏感;表面残余应力 σ 对砂轮速度 v_s 变化最敏感,对磨

削深度 a_p 变化的敏感次之,对工件速度 v_w 的变化最不敏感。

3.2 磨削参数对表面特征的影响

图4示出是对表4测试结果进行直观分析,得到磨削工艺参数对表面特征的影响。由于采用切入磨的方式,被加工试样较小,磨削时砂轮与工件作用面也较小,所以其磨削力和磨削温度的作用时间较短,对表层冷作硬化作用不十分明显,所以表面显微硬度变化不大,同时由于切入磨过程中由热塑性变形产生的残余拉应力效果多于有挤光效应产生的残余压应力,所以其磨削表面均为残余拉应力。

1) 由图4(a)可知,随着工件速度 v_w 的增加,使已加工表面轮廓算术平均偏差 R_a 增大,因为增大工件速度 v_w 会使单颗磨粒的未变形切削厚度 a_g 增大。同时,由于磨削力增大,发热量加大,从而使塑性变形增大,表层冷作硬化也随之增大,表

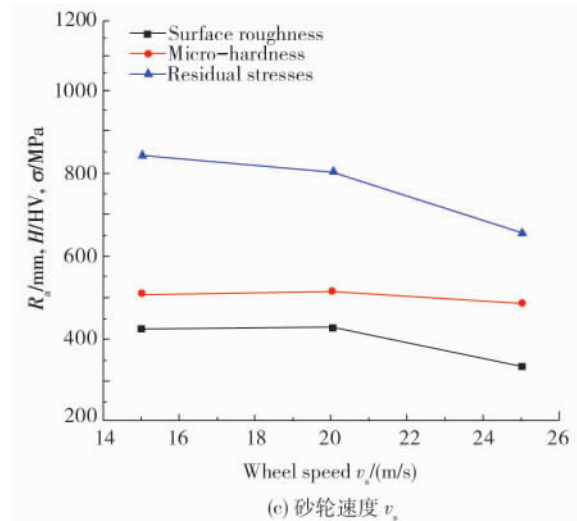


图4 磨削参数对表面特征的影响曲线

Fig. 4 Influence of grinding parameters on the surface characteristics

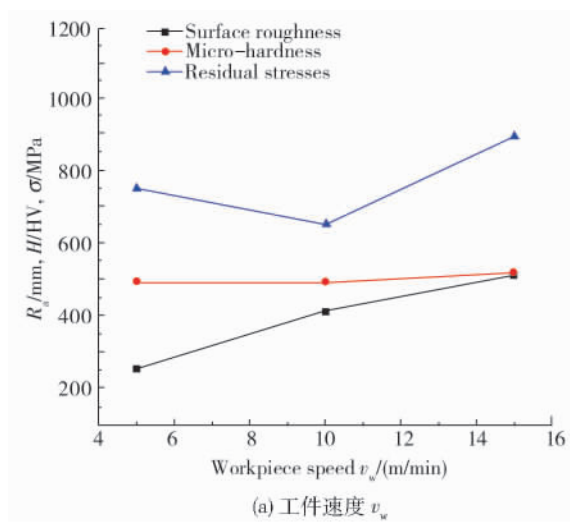
面显微硬度随之增大。但是随着工件速度增高,砂轮与工件接触的时间缩短,即热源沿加工表面的移动速度加快,热作用时间缩短,因而工件速度 v_w 的增加,对表层冷作硬化和热应力的影响很小,磨削表面残余应力略有升高。

2) 由图4(b)可知,随着磨削深度 a_p 的增加,会使单颗磨粒未变形磨削厚度 a_g 增大,磨削力加大,因而使表面粗糙度 R_a 值增大。同时由于砂轮与工件的磨削接触弧长加长,同时参加的工作磨粒数增多,磨削过程中的磨屑变形力及摩擦力均增大的关系,使工件表面温度升高,表层冷作硬化随之增大,表面显微硬度随之增大,表层塑性变形的作用加大,比磨能增大,磨削温度增高,热应力增大,因而使残余应力增大。

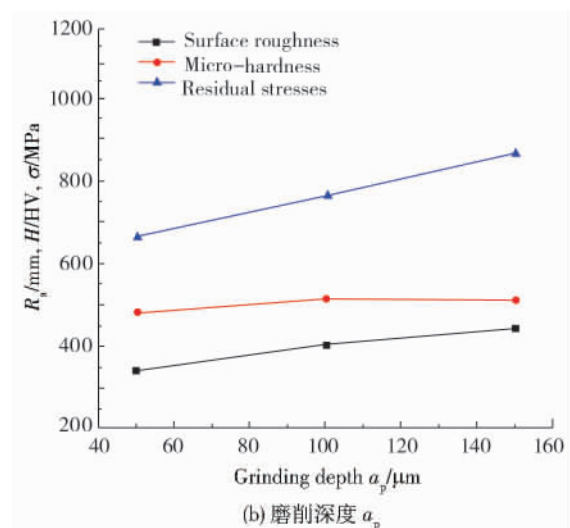
3) 由图4(c)可知,随着砂轮速度 v_s 的增加,单位时间内参加切削的总磨粒数增多,会使单颗磨粒未变形磨削厚度 a_g 减小,使已加工表面轮廓算术平均偏差 R_a 减小。但是由于单位时间内的工作磨粒数增多,磨削厚度变薄,即磨屑分割得较细,磨屑变形能增大,工件表面温度升高,在此交互作用下,表层冷作硬化变化小,表面显微硬度几乎不变,还由于此时磨削力造成的挤光效应,从而使磨削表面拉应力减小。

3.3 表面形貌分析

图5示出磨削表面三维形貌和磨削纹理照片,由于表面粗糙度对工件速度的变化最敏感,对磨削深度变化敏感次之,对砂轮速度的变化最不敏感,所以在研究表面形貌时固定磨削深度、改变工件速



(a) 工件速度 v_w



(b) 磨削深度 a_p

度,从而研究表面形貌随工件速度变化的规律。

由图 5(a)可知,在图示磨削条件下,其表面粗糙度为 273.79 nm,最大波峰高度为 1.43 μm ,最大波谷深度为 1.86 μm ,磨削纹路较清晰,在扫描电镜 200 倍和 800 倍条件下观察,可以发现耕犁和轻微的皱叠现象;由图 5(b)可知,其表面粗糙度为 454.07 nm,最大波峰高度为 2.28 μm ,最大波谷深度为 2.52 μm ,磨削纹路清晰,在扫描电镜 200 倍和 800 倍条件下观察,可以发现耕犁和皱叠现象,出现少量的黏附物;由图 5(c)可知,其表面粗糙度为 594.01 nm,最大波峰高度为 1.97 μm ,最大波谷深度为 3.94 μm ,磨削纹路清晰,在扫描电镜 200 倍和 800 倍条件下观察,可以发现

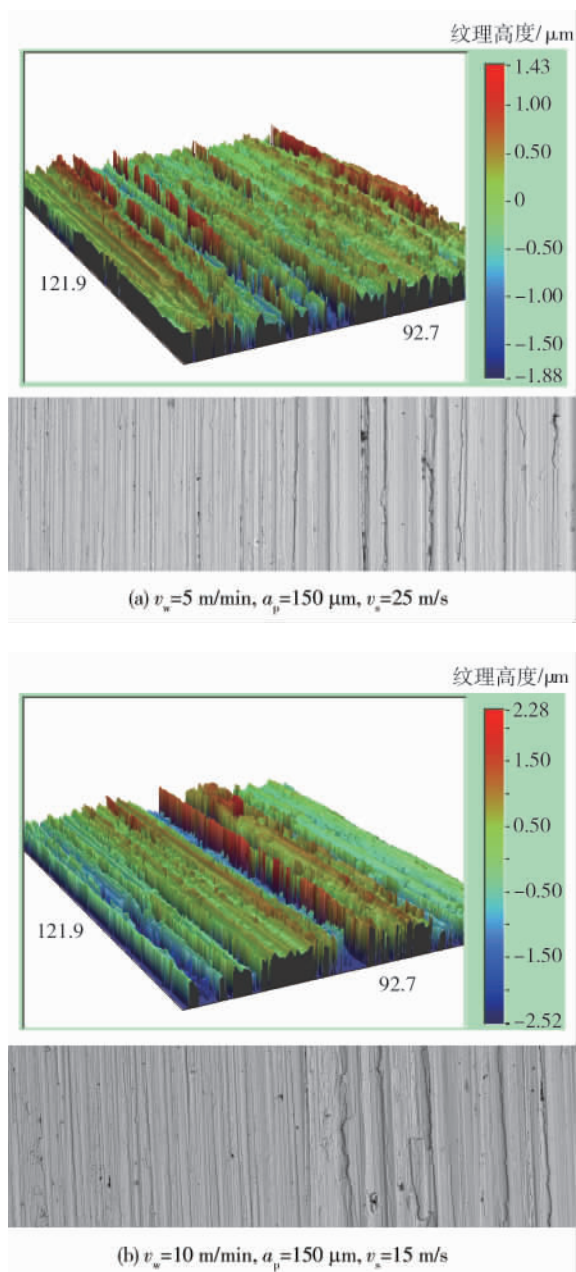


图 5 磨削表面形貌

Fig. 5 Topography of grinding surface

耕犁和皱叠现象,出现较多的黏附物。由此可知,随着工件速度的增加,因单颗磨粒的未变形切削厚度 a_g 增大,使已加工表面轮廓算术平均偏差 R_a 增大,同时由于磨削力增大,发热量加大,从而使塑性变形增大,工件表面耕犁和皱叠现象加强,磨削表面纹路有明显变化,黏附物增多。

3.4 显微硬度分布

如图 6 所示,为磨削表面显微硬度梯度分布。由于表面显微硬度对砂轮速度变化最敏感,对磨削深度变化敏感次之,对工件速度的变化最不敏感,所以在研究显微硬度梯度时固定磨削深度,取不同砂轮速度,从而研究显微硬度随砂轮速度变化的规律。

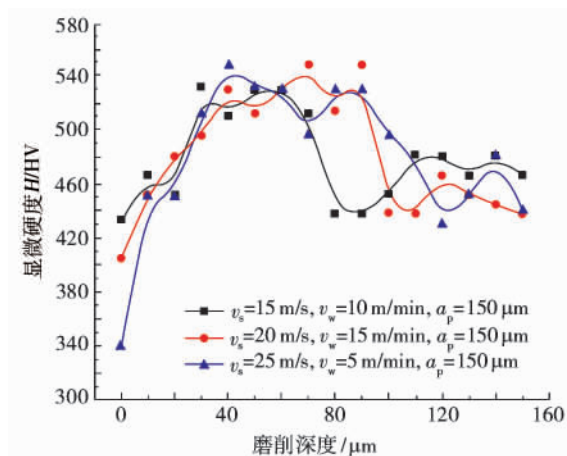


图 6 磨削表面显微硬度梯度

Fig. 6 Microhardness of grinding surface

由图6可知,磨削时磨粒的滑擦、耕犁和切削作用会使被磨表层发生塑性变形,塑性变形产生的硬化与磨削温度产生的软化相互综合,高温合金的硬度不高,磨削时塑性变形区的晶格严重扭曲,由于高温合金材料热导率低,使得磨削热集中在被磨工件表层的磨削接触区内,从而使磨削温度显著升高,合金材料中的 γ 晶粒内的 γ' 相聚集长大, γ'' 相长大成盘状。 γ'' 相是一种亚稳定相,当温度升高时,它会向 δ 相转化,因此,此时晶内有片状 δ 相析出。 δ 相不起强化作用,机体粗大的 γ' 相和 γ'' 相也不能起到强化作用,从而会导致被磨表面层软化,但随着距磨削表面距离的增加,磨削温度的影响变小,而磨削力的影响占主导,从而会出现硬化现象。随着砂轮速度 v_s 的增加,显微硬度的变化层厚度增大,由于单位时间内的工作磨粒数增多,磨削厚度变薄,即磨屑分割得较细,磨屑变形能增大,工件表面温度升高,在此交互作用下,显微硬度变化并不十分明显,显微硬度变化影响层深度为 $80\sim 100\mu\text{m}$ 左右。

3.5 残余应力分析

磨削高温合金时,将产生大量的磨削热,从而使磨削表层产生压缩性变形,在冷却过程中,表层会形成残余拉应力;同时由于磨削时产生很大的法向磨削力,其产生的挤光效对表层残余应力有明显的影

响。图7示出磨削表面残余应力场分布图,其是在热塑性变形和挤光效应产生的残余应力交互作用的结果。在研究残余应力时,固定砂轮速度,取不同的磨削深度,从而研究磨削深度随工件速度变化的规律。随着磨削深度 a_p 的增加,比磨能增大,磨削温度增高,热应力增大,残余应力影响层厚

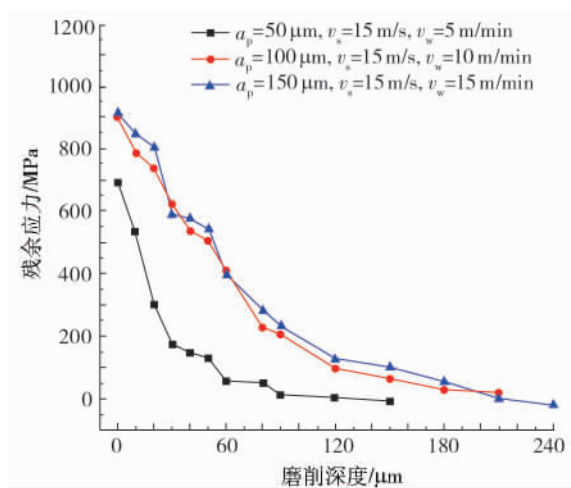


图7 磨削表面残余应力

Fig7 Residual stresses of grinding surface

度增加,在磨削深度为 $50\mu\text{m}$ 时,其残余应力影响深度在 $80\mu\text{m}$ 左右;在磨削深度为 $100\mu\text{m}$ 时,其残余应力影响深度在 $150\mu\text{m}$ 左右;在磨削深度为 $150\mu\text{m}$ 时,其残余应力影响深度在 $200\mu\text{m}$ 左右。

3.6 微观组织

图8示出显微镜下面观察得到的磨削表面显微组织,磨削高温合金时,由于被磨表面承受的压力超过材料的屈服极限时所产生的显微组织变化,其晶格产生滑移、畸变和歪曲,从而使晶粒破碎、拉长。本文由于采用切入磨的方式,被加工试样较小,磨削时砂轮与工件作用面也较小,所以其磨削力和磨削温度的作用时间较短,磨削表层显微组织变化并不大,晶格产生滑移、畸变和歪曲也不明显,其塑性变形层在 $5\sim 10\mu\text{m}$ 左右。只是随着磨削深度 a_p 的增加,磨削力加大,砂轮与工件的磨削接触弧长加长,同时参加的工件磨粒数增多,磨削过程中的磨屑变形力及摩擦力均增大的关系,工件表面温度升高,表层塑性变形的作用加大,塑性变形层越来越厚。

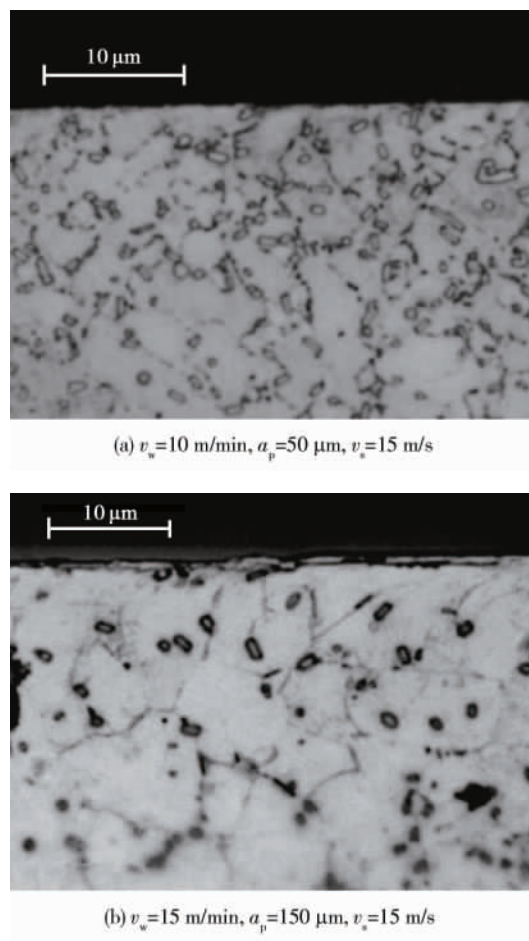


图8 磨削表面微观组织

Fig. 8 Microstructure of grinding surface

4 结 论

通过对 GH4169 高温合金磨削参数对表面完整性影响的研究,可以得出如下结论:

1) 采用正交实验方法,分析了磨削表面特征对磨削工艺参数的相对灵敏度,砂轮速度在 15~25 m/s 范围内,磨削深度在 50~150 μm 范围内,工件速度在 5~15 m/min 范围内,表面粗糙度对工件速度的变化最敏感,表面显微硬度对砂轮速度变化最敏感,表面残余应力对砂轮速度变化最敏感.随着工件速度 v_w 的增加,表面粗糙度、表面显微硬度和表面残余应力随之增大;随着磨削深度 a_p 的增加,表面粗糙度、表面显微硬度和表面残余应力随之增大;随着砂轮速度 v_s 的增加,表面粗糙度、表面显微硬度和表面残余应力随之减小.

2) 研究了磨削表面层显微硬度随砂轮速度变化的规律,随着砂轮速度 v_s 的增加,显微硬度的变化层厚度增大,显微硬度变化影响层深度为 80~100 μm .

3) 研究了磨削表面残余应力梯度随磨削深度变化的规律,随着磨削深度 a_p 的增加,热应力增大,残余应力影响层厚度增加,影响层范围为 80~200 μm .

4) 研究了磨削表面形貌和磨削表层微观组织随磨削参数变化的规律,随着工件速度 v_w 的增加,工件表面耕犁和皱叠现象加强,磨削表面纹路有明显变化,黏附物增多.随着磨削深度 a_p 的增加,磨削表层微观组织变化并不大,其塑性变形层在 5~10 μm ,表层塑性变形的作用加大,塑性变形层越来越厚.

参考文献

- [1] 任敬心,康仁科,王西彬.难加工材料磨削技术[M].北京:电子工业出版社,2011.
- [2] Paulo D J. Surface integrity in machining[M]. New York: Springer London Dordrecht Heidelberg, 2010.
- [3] Kumar S, Choudhury S K. Prediction of wear and surface roughness in electro-discharge diamond grinding [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 191 (1/2/3): 206-209.
- [4] Hecker R L, Liang S Y. Predictive modeling of surface roughness in grinding [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2003, 43(8): 755-761.
- [5] Peter J, Snoey R. Residual stress in plunge and cylindrical grinding [J]. Int. Conf. on Manufacturing Engineering, 1980, 80(5): 172-177.
- [6] Guo C, Shi Z, Attia H, et al. Power and wheel wear for grinding nickel alloy with plated CBN wheels [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2007, 56(1): 343-346.
- [7] 何玉怀,于慧臣,郭伟彬,等.直接时效 GH4169 高温合金疲劳裂纹扩展性能试验[J].航空动力学报,2006,21(2): 49-53.
HE Yuhuai, YU Huichen, GUO Weibin, et al. Experimental study on fatigue crack growth behavior of direct aging GH4169 superalloy [J]. Journal of Aerospace Power, 2006, 21(2): 49-53. (in Chinese)
- [8] Xu X P, Yu Y Q, Xu H J. Effect of grinding temperatures on the surface integrity of a nickel-based superalloy [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 129 (1/2/3): 359-363.
- [9] 周志雄,毛聪,周德旺,等.平面磨削温度及其对表面质量影响的实验研究[J].中国机械工程,2008,19(8): 980-984.
ZHOU Zhixiong, MAO Cong, ZHOU Dewang, et al. Experimental investigation of grinding temperature and its effects on surface quality in surface grinding [J]. China Mechanical Engineering, 2008, 19(8): 980-984. (in Chinese)
- [10] 康仁科,原京庭,任敬心.陶瓷结合剂 CBN 砂轮磨削难加工材料时磨削液的作用[J].西北工业大学学报,2000,18(4): 527-530. (in Chinese)
KANG Renke, YUAN Jingting, REN Jingxin. Effect of grinding fluid on grinding properties of vitrified bonded CBN wheel [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2000, 18(4): 527-530. (in Chinese)
- [11] 任敬心,孟庆国,陈景蕙. GH33A 高温合金的磨削温度与残余应力[J].航空工艺技术,1995,1(1): 3-7.
REN Jingxin, MENG Qingguo, CHEN Jinghui. Grinding temperature and residual stress of grinding superalloy GH33A [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 1995, 1(1): 3-7. (in Chinese)
- [12] 任敬心,杨茂奎,李雅清,等.镍基高温合金的磨削特征[J].航空学报,1999,18(6): 755-758.
REN Jingxin, YANG Maokui, LI Yaqing, et al. Grinding characteristic of nickel based superalloy [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1999, 18(6): 755-758. (in Chinese)
- [13] 杨茂奎,李雅卿,史兴宽,等.陶瓷结合剂 CBN 砂轮磨削 GH4169 高温合金的磨削加工性与磨削表面完整性[J].工具技术,1996,30(11): 6-10.
YANG Maokui, LI Yaqing, SHI Xingkuan, et al. The grindability and grinding surface integrity of nickel-based superalloy GH4169 using CBN wheel [J]. Tool Engineering, 1996, 30(11): 6-10. (in Chinese)
- [14] 黄新春,张定华,杨振朝,等. GH4169 磨削表面粗糙度影响参数的敏感性研究[J].航空制造技术,2012,1(8): 83-86.
HUANG Xinchun, ZHANG Dinghua, YANG Zhenchao, et al. Study of sensitivity of parameter affecting surface roughness in grinding superalloy GH4169 [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012, 1(8): 83-86. (in Chinese)
- [15] 美国可切削性数据中心.机械加工切削数据手册[M].北京:机械工业出版社,1989.