

定向凝固镍基高温合金叶片榫齿高效深切成型磨削

傅玉灿¹ 张志伟¹ 徐九华¹ 赵正彩¹ 平波¹
何坚² 刘智武² 王艳² 余杰²

(1. 南京航空航天大学机电学院, 南京, 210016; 2. 西安航空动力股份有限公司, 西安, 710021)

摘要:针对定向凝固镍基高温合金 DZ125 叶片榫齿,采用电镀成型 CBN 砂轮对其进行了高效深切磨削(High efficiency deep grinding, HEDG)试验,对磨削比能及工件表面完整性进行了分析。结果显示,在保持速比(v_s/v_w)不变时,提高磨削速度 v_s 可有效降低磨削比能,提高平均材料去除率。磨削比能表现出“尺寸效应”,其值最终稳定在 40~60 J/mm³ 之间;在相同的平均材料去除率下,磨削比能随着磨削深度的增大而上升;在相同的单颗磨粒切厚下,磨削深度的差异对磨削比能的影响较小。对试验中最大平均材料去除率下获得的工件表面质量进行分析发现,已加工工件表面不同区域磨削纹理均很清晰,无皱叠及犁沟两侧翻起等现象;表层金相显微组织基本无变化,未发现相变、撕裂及晶粒扭曲现象;工件表层加工硬化程度为 7.7%~19%,深度为 40 μm 。结果显示了 HEDG 在高效磨削 DZ125 叶片榫齿中推广应用的潜力,并为其实际生产中磨削参数的选择提供了参考。

关键词:高效深切磨削;定向凝固镍基高温合金;磨削比能;单颗磨粒切厚

中图分类号: TG580 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2014)02-0190-07

High Efficiency Deep Grinding of Directional Solidified Nickel-Based Superalloy Turbine Blade Root

Fu Yucan¹, Zhang Zhiwei¹, Xu Jiuhua¹, Zhao Zhengcai¹, Ping Bo¹
He Jian², Liu Zhiwu², Wang Yan², Yu Jie²

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China; 2. Xi'an Aero-Engine PLC, Xi'an, 710021, China)

Abstract: In view of the poor machinability of turbine blade root made of directional solidified nickel-based superalloy DZ125, high efficiency deep grinding (HEDG) process is conducted to analyze specific grinding energy and surface integrity with profiled electroplated CBN grinding wheel. The result shows that higher grinding speed v_s can lower the specific grinding energy effectively when the speed ratio (v_s/v_w) keeps constant. The specific grinding energy decreases with the increasing mean material removal rate and finally remains in range of 40—60 J/mm³. Under the same mean material removal rate, the specific grinding energy increases with the decreasing depth of cut. However, the difference of depth of cut has little effect on the specific grinding energy with the same undeformed chip thickness. The surface quality of the workpiece obtained under the highest mean material removal rate is analyzed. The surface texture is clear, and does not present wrinkles and ploughing marks. The phase transition and grain distortion are not observed from the metallographic microstructure. The degree of work hardening

基金项目: 国家科技重大专项基金(2012ZX04003-081)资助项目。

收稿日期: 2014-01-15; **修订日期:** 2014-02-15

作者简介: 傅玉灿,男,1972年6月生,博士,教授,博士生导师。主要研究方向:难加工材料高效精密加工技术、超硬磨料工具技术、绿色高效冷却技术。发表学术论文 200 余篇,授权国家发明专利 14 项,入选教育部新世纪优秀人才支持计划,获江苏省科技进步奖及国防科技进步奖各 1 项。

通信作者: 傅玉灿, E-mail: yucanfu@nuaa.edu.cn。

is in range of 7.7%—19%, and the hardening depth is about 40 μm . The result reveals the potential of HEDG in the high efficiency machining of turbine blade root DZ125, and provides reference for future application.

Key words: high efficiency deep grinding (HEDG); directional solidified nickel-based superalloy; specific grinding energy; undeformed chip thickness

镍基高温合金凭借其优异的高温强度、热稳定性及耐腐蚀性能,可在高温下长期服役于复杂应力,氧化腐蚀与燃气腐蚀的恶劣环境,因而被广泛应用于航空发动机的热端部件,如航空发动机中的涡轮叶片。随着对航空发动机推重比要求的不断提高,以及材料制造与加工技术的发展,镍基高温合金的性能也逐步提升。具有较高力学性能的镍基变形高温合金,为早期制作燃气涡轮叶片的最佳材料;随后变形镍基高温合金逐步被铸造镍基高温合金取代,因为后者具有比前者更高的蠕变强度,同时使用铸造技术可将叶片做成空心结构;然而普通铸造镍基高温合金仍存在一定缺陷,如等轴晶铸造合金塑性较低,力学性能不稳定,高温蠕变和热疲劳破坏通常起始于垂直于主应力方向的横向晶界,为了消除合金横向晶界并提高叶片的工作寿命,定向凝固高温合金,单晶高温合金等性能更加优异的材料便应运而生^[1-4]。

镍基高温合金的材料特性与榫齿轮廓的复杂性决定了涡轮叶片的加工难度。表现为当采用成型铣削方式时,刀具磨损快,工件表面质量较难达到要求,并且工件轮廓精度难以保证;采用普通往复磨削时,砂轮磨损速度快,工件表面易出现烧伤现象,无法实现高效磨削。发明于 20 世纪 50 年代的缓进给磨削(Creep feed grinding, CFG)最终解决了这一难题,并在成功解决磨削烧伤理论和工艺稳定性问题后,大幅提高了镍基高温合金的加工质量,加工精度和加工效率,节约了加工成本,实现了在航空加工领域实际生产中的推广^[1-2]。其中针对工艺稳定性问题的解决方案为采用连续修整磨削(Continuous-dress creep feed grinding, CDCF),即通过连续修整确保砂轮具有稳定的锋利度和轮廓精度,然而该工艺造成砂轮与金刚石滚轮消耗快,因此当前的研究为通过磨削过程监测与仿真,对修整工艺进行优化,实现加工精度、加工质量、加工效率以及砂轮寿命之间的平衡^[3-5]。此外,由 Rolls-Royce 公司发明的 Very impressive performance extreme removal(VIPER)工艺,于 1999 年开始应用于叶片榫齿的加工。该工艺基于多轴加工中心,配有高压大流量冷却系统。然而由于砂轮直径小

(<250 mm),且为大气孔普通磨料砂轮,因此砂轮寿命成为限制提高其加工效率的主要因素^[2, 5-6]。

发明于 20 世纪七八十年代,被誉为“现代磨削技术的高峰”的高效深切磨削工艺(High efficiency deep grinding, HEDG),结合了 CFG 和高速磨削(High speed grinding, HSG)的特点,表现为磨削速度高,磨削深度大以及工件进给速度快^[7-8]。其可获得较低的磨削比能及工件热量分配系数,从而成功控制工件表面温度,进而可实现更高的材料去除率^[7, 9-10]。当磨削比能达到最低值时,该值接近切屑的熔化能,此时切屑疏导热量的比例增至最大值,从而使得工件的热分配系数得以降低^[11]。此外工件表面温度还与弧区热量加载的形式有关,由于磨料与工件的接触时间随磨削速度的提高而降低,从而造成工件表面处于热不平衡状态,在热量传入工件以前,磨料切削产生的热量以热脉冲的形式遍布整个接触表面^[7, 12]。

在先进磨削工艺发展的同时,超硬磨料工具也得到了快速发展,如单层电镀 CBN 砂轮,其具有以下特点:磨料硬度高,耐磨损性能好;电镀层黏结强度高,可用于高速超高速磨削;易于做出复杂的轮廓外形,无需修整;基体可以重复使用。Johnstone 将成型电镀 CBN 砂轮应用于 HEDG,比较了 HEDG 与 VIPER 两种磨削工艺在镍基高温合金叶片榫齿成型加工中的磨削性能,发现 HEDG 在工件表面完整性与加工效率方面比 VIPER 具有更大的优势^[10]。

另外,区别于传统的铸造技术(加工余量多达 10 mm),近终形连铸技术的应用可以使叶片榫齿的加工余量仅为 1~2 mm,非常适合采用 CBN 砂轮^[5]。同时,文献有关定向凝固镍基高温合金 HEDG 成型磨削性能的研究较少。因此本文针对定向凝固镍基高温合金 DZ125 叶片榫齿,使用成型电镀 CBN 砂轮,采用 HEDG 工艺,进行高效成型磨削试验,分析其磨削比能、轮廓精度及表面完整性。结果可为进一步提高定向凝固镍基高温合金 DZ125 叶片榫齿成型加工效率提供技术依据。

1 试验条件与参数

磨削试验在磨床 Blohm Profimat MT408 (主

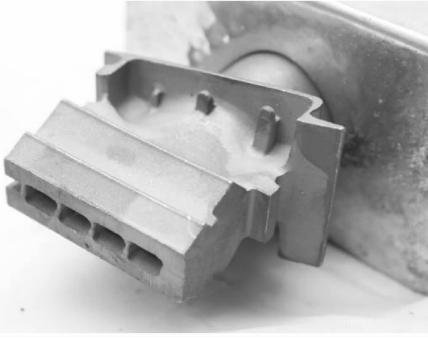


图1 DZ125 铸件毛坯

Fig.1 DZ125 roughcast

轴最大功率为 45 kW) 上进行, 工件材料为 DZ125 定向凝固镍基高温合金, 铸件毛坯如图 1 所示, 其主要化学成分与主要物理性能分别见表 1 和表 2。为了便于分析 DZ125 的磨削性能, 试验同时选择变形镍基高温合金 GH4169 进行对比。电镀 CBN 砂轮磨料粒度为 80/100#, 外径为 400 mm。

表 1 DZ125 的主要化学成分^[13]

Tab. 1 Chemical composition of DZ125

元素	C	Cr	Co	W	Mo	Al	Ti	Ta	Hf	B	Ni
质量分数/%	0.1	8.9	10	7	2	5.2	1	3.8	1.5	0.015	Bal

表 2 DZ125 的主要力学性能^[13]

Tab. 2 Mechanical properties of DZ125

取向	温度 $\theta/^\circ\text{C}$	条件屈服极限 $\sigma_{0.1}/\text{MPa}$	条件屈服极限 $\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	抗拉强度 σ_b/MPa	延伸率 $\delta/\%$	断面收缩率 $\psi/\%$
纵向	室温	955	985	1 320	13.0	14.5
	700	920	930	1 220	13.0	15.5
	760	935	955	1 210	17.0	21.0
	850	835	905	1 030	20.0	24.0
	900	510	580	850	25.0	29.0
	950	455	530	740	21.0	22.0
	1 000	370	395	575	31.0	41.0
横向	室温	840	840	1 090	15.0	18.5
	760	765	765	965	7.0	20.0
	850	760	805	910	6.5	16.5
	950	475	525	705	7.0	10.0
	1 000	375	420	560	8.5	8.0

表 3 磨削试验参数

Tab. 3 Grinding parameters

磨削速度 $v_s/$ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	工件进给 速度 $v_w/$ $(\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$	磨削深度 a_p/mm	磨削 方式	冷却条件
30~150	0.15~9.6	0.05~2	顺磨	成型喷嘴, 4%~6% 乳化液, 压力 1.8 MPa

试验中选用 load controls PPC-3 功率计, 并通过 NI USB 6211 数据采集卡与 Labview 软件对主轴功率数据进行测试与保存; 应用 Hitachi S-3400N II 型扫描电镜和 KH-7700 三维视频显微镜对已加工工件表面和金相组织进行微观形貌观察; 通过 KH-7700 三维视频显微镜观察磨削后的砂轮表面, 统计出单位面积中出现磨耗平台的磨粒数, 来近似作为砂轮的动态有效磨刃数^[14]; 金相制作选用的侵蚀剂是体积比为 92:5:3 的 HCL, H₂SO₄ 和 HNO₃ 的混合溶液^[15]; 已加工表面层的显微硬度采用 HXS-1000A 型显微硬度计进行测量。

本文主要研究磨削工艺参数对磨削比能的影响, 以及本试验最大磨削用量下工件表面完整性的分析, 试验参数见表 3。

2 试验结果与讨论

2.1 磨削比能的分析

2.1.1 磨削功率的读取

主轴功率 P 的原始信号如图 2 所示。由于磨削过程中冷却液对主轴功率损耗存在较大的影响, 所以实际的磨削功率的读取需消除冷却液作用的影

响。为此试验中在工件右侧同时装夹与工件尺寸一致的石墨块, 因石墨块质地很软, 其磨削功率可忽略, 因此当砂轮磨削石墨块时, 即可读出该磨削工艺下冷却液对主轴功率的损耗, 即 P_{coolant} 。据此, 便可获得磨削功率 P_c 。

2.1.2 等速比下磨削速度对磨削比能的影响

磨削速度的提高有利于提高砂轮的锋利度, 提高磨削速度 v_s 是 HEDG 的必要条件^[8]。为了消除由于磨削速度引起的单颗磨粒切厚变化的影响, 试验以一组典型的 CFG 参数 ($v_s = 30 \text{ m/s}$, $v_w = 150 \text{ mm/min}$, $a_p = 0.2 \text{ mm}$) 为基础, 然后保持 $v_s/v_w = 1.2 \times 10^4$ 与 a_p 不变, 通过提高磨削速度, 研

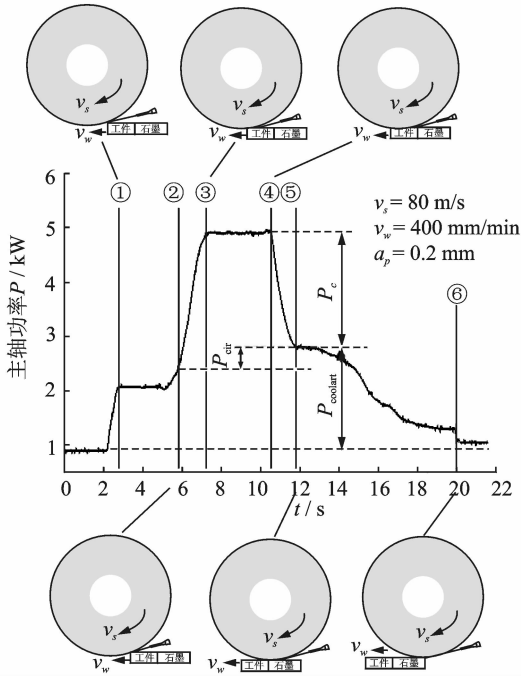


图 2 成型磨削功率原始信号

Fig. 2 Typical grinding power signal

究其磨削比能的变化规律。磨削比能 e_s 是指去除单位体积材料所消耗的能量,成型磨削的磨削比能计算公式如下

$$e_s = \frac{P_c}{A_c \cdot a_p \cdot v_w} \quad (1)$$

式中: P_c 为磨削功率; A_c 为单位磨削深度下工件轮廓截面积; a_p 为磨削深度; v_w 为工件进给速度。

图 3 为 $a_p = 0.2 \text{ mm}$, $v_s/v_w = 1.2 \times 10^4$ 时, DZ125 和 GH4169 随磨削速度变化的磨削比能曲线,由图 3 可以看出,首先在相同的磨削工艺参数下, DZ125 的磨削比能较 GH4169 高 20~30 J/mm^3 ,这主要归因于 DZ125 的力学性能比 GH4169 更佳,从而导致其加工性能更差。其次,图 3 中显示,当 $v_s < 80 \text{ m/s}$ 时, DZ125 和 GH4169 的磨削比能均随磨削速度的提高而显著降低,表明高速可有效降低磨削比能,由绝热剪切的理论可知,在未变形切屑横截面积和磨粒条件一致的情况下,磨削速度的提高,导致磨料与工件的接触时间降低,剪切变形区的应变率和绝热水平提高,当热软化作用大于应变强化作用时,材料就发生“热塑失稳”,此时更易于成屑过程的发生,同时加上材料的剪切变形发生在很小的区域内,从而使得划擦、耕犁作用减弱,磨削比能下降^[12,16-17];当 $v_s \geq 80 \text{ m/s}$ 时, GH4169 的磨削比能随磨削速度的提高仍有较明显的下降趋势,而 DZ125 变化较小,这主要是因为 DZ125 合金化程度更高,且结合定向凝固技术,并经过高温

固溶处理,中高温性能更加优异^[13]。

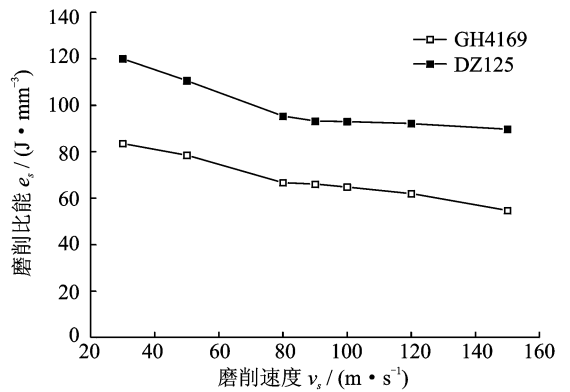


图 3 磨削速度对磨削比能的影响

Fig. 3 Relationship between specific grinding energy and grinding speed

2.1.3 平均材料去除率对磨削比能的影响

材料去除率是指单位宽度砂轮在单位时间内去除材料的体积,而对于成型磨削,由于砂轮轮廓会造成该方向实际磨削深度的差异,因此通过以下公式计算其平均材料去除率

$$\overline{Q'_w} = \frac{A_c \cdot a_p \cdot v_w}{L} \quad (2)$$

式中, L 为成型砂轮截面轮廓长度。

图 4 为 $v_s = 80 \text{ m/s}$ 时,在不同磨削深度下,平均材料去除率对 DZ125 磨削比能的影响曲线。

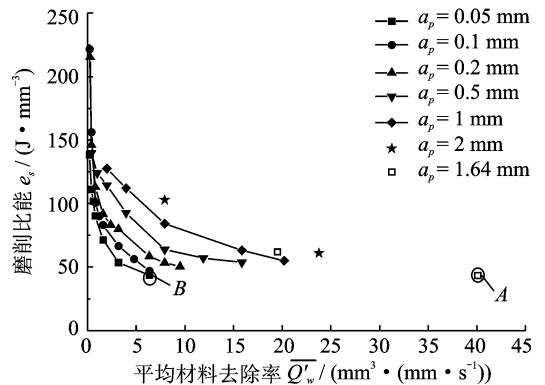


图 4 平均材料去除率对磨削比能的影响

Fig. 4 Relationship between specific grinding energy and mean material removal rate

由图 4 可见,首先,在不同磨削深度下,磨削比能均随着平均材料去除率的提高呈下降趋势,且最终都稳定在 40~60 J/mm^3 之间;其次,在相同的平均材料去除率下,当磨削比能未达到稳定值之前,磨削比能随磨削深度的增大而上升,因此为了获得较低的磨削比能,当采用“大”切深时,需提高其工件进给速度。这样,在确保磨削比均能处于较低水平的前提下,磨削深度越大,平均材料去除率

就越高,如图中的A点($a_p=1.64$ mm)所示。

2.1.4 最大单颗磨粒切厚对磨削比能的影响

上文平均材料去除率对磨削比能影响的分析,仅为“尺寸效应”的表象,因此还需使用最大单颗磨粒切厚对高效深切磨削进行进一步分析,最大单颗磨粒切厚计算公式如下^[18]

$$a_{g\max} = \left[\frac{4v_w}{v_s N_d C} \sqrt{a_p / d_s} \right]^{1/2} \quad (3)$$

式中: C 为与磨刃有关的系数,取 6.9 ^[18]; N_d 为砂轮动态有效磨刃数,对电镀CBN砂轮表面进行统计,获得 $N_d=14$; d_s 为砂轮直径。

图5为 $v_s=80$ m/s时,最大单颗磨粒切厚对DZ125磨削比能的影响曲线。图5中显示,首先,磨削比能随单颗磨粒切厚的增大而降低,并最终呈稳定的趋势。其主要原因为:当单颗磨粒切厚增大时,金属的剪应变效应与剪应变率随之减弱,而热软化效应增强,从而使材料的剪切流动应力减小;单颗磨粒切厚的增大,有利于降低磨粒钝圆的影响,同时促使砂轮与工件之间的平均接触压力增大,从而降低摩擦因素^[19]。其次,由图5可以发现,不同磨削深度下获得的最大单颗磨粒切厚对磨削比能的影响差异较小,尤其是当 $a_{g\max} > 0.6$ μm 时(如图5中的A点($a_p=1.64$ mm)和B点($a_p=0.05$ mm))。该现象表明在分析“尺寸效应”时,单颗磨粒切厚为决定磨削比能大小的核心因素。因此在机床刚度,砂轮强度以及冷却条件允许的条件下,采用高效深切磨削时,只需控制单颗磨粒切厚,便可同时实现低磨削比能和高材料去除率。

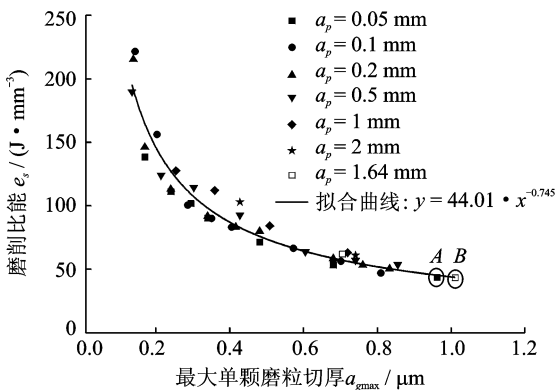


图5 最大单颗磨粒切厚对DZ125磨削比能的影响

Fig. 5 Relationship between specific grinding energy and underformed chip thickness

图6为 $v_s=80$ m/s时,DZ125与GH4169磨削比能的比较,由图6可以看出,在相同的最大单颗磨料下,DZ125的磨削比能高于GH4169。该结

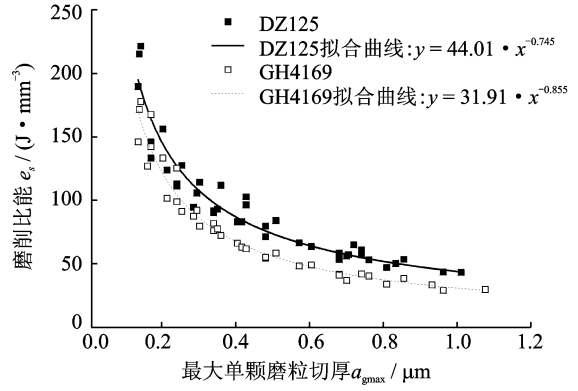


图6 DZ125和GH4169磨削比能的比较

Fig. 6 Comparison of specific grinding energy between DZ125 and GH4169

果与磨削速度的分析相一致,归因于定向凝固镍基高温合金DZ125比变形镍基高温合金更加优异的力学性能。

2.2 工件表面完整性分析

为了进一步考察本试验中采用最大磨削用量(即图4与图5中A点)时所获得的工件表面质量,本文分别对已加工工件表面微观形貌,金相组织以及表面加工硬化进行了分析。

2.2.1 表面微观形貌

微观形貌是评价磨削工件表面完整性的重要指标,观察表面微观形貌是研究磨削表面质量的一种最直接的方法,微观形貌能反映出磨粒与工件的相互作用状态及金属材料的去除方式。文献^[20]指出,镍基高温合金的磨削加工,其表面易发生严重的塑性变形,随之产生的磨削力与磨削温度易使已加工表面出现撕裂、皱叠等表面缺陷。图7给出了 $v_s=80$ m/s, $v_w=1.85$ m/min, $a_p=1.64$ mm时的单层电镀CBN成型砂轮高效深切磨削DZ125的加工表面形貌,由图可以看出,在成型面的不同区域,其磨削纹理均清晰规整,无皱叠及犁沟两侧翻起等现象,表明磨粒在切削过程中引起的塑性变形较小。

2.2.2 金相组织分析

定向凝固高温合金的显微组织与普通铸造合金类似,均为由 γ 基体上弥散分布着的很多 γ' 相质点以及少量碳化物和硼化物组成。在完全热处理条件下,定向凝固柱晶合金中的 γ' 相比同成分等轴晶合金中 γ' 相更加均匀细小。DZ125中的Hf促进枝晶间($\gamma+\gamma'$)共晶生成;同时Hf改变了碳化物的化学成分与形态,当Hf含量大于1%时,除形成绝大多数高强度铸造合金中存在的复合碳化物

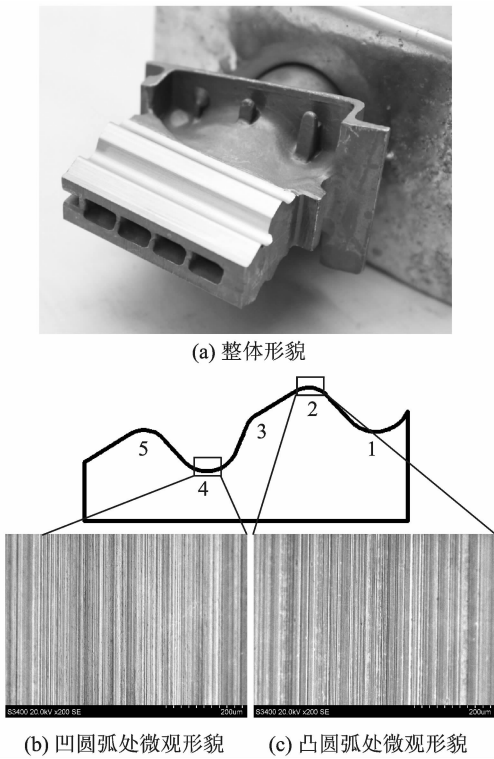


图 7 工件表面微观形貌

Fig. 7 Topography of ground surface

外,还形成等轴状 HfC,其基本不含其它金属原子,从液相直接形成,而一般的复合碳化物是在液固两相糊状区形成,而且趋于呈枝晶状分布。细小等轴状碳化物有利于疲劳寿命的提高^[21]。

试验中的金相试样取自垂直于工件进给方向的截面,其可显示加工表层以下沿深度方向上的组织变化情况。图 8 所示为 DZ125 磨削表面近表层的显微组织,由图 8 看出,工件表层金相显微组织基本没有变化,未发现撕裂、相变、以及晶粒扭曲等现象。

2.2.3 表面加工硬化分析

磨削过程中,磨粒的划擦、耕犁及切削等机械作用导致工件表层发生塑性变形;弧区的高温热作用促使工件表层组织发生热损伤。高温合金的塑性变形的主要特征为加工硬化,当磨削温度低于软化温度(即恢复温度或再结晶温度)时,变形程度越大,硬化程度也越大;反之,当磨削温度高于软化温度时,硬化程度随着变形程度的增大而降低,此为烧伤软化的现象。图 9 为磨削参数为 $v_s=80$ m/s, $v_w=1.85$ m/min, $a_p=1.64$ mm 时,成型面不同区域的表层显微硬度,由图 9 可以看出,硬化层的厚度距离工件表面 $40 \mu\text{m}$ 左右,未出现软化现象;工件基体的显微硬度在 $HV_{0.1}$ 在 $430 \sim 455$ MPa 之

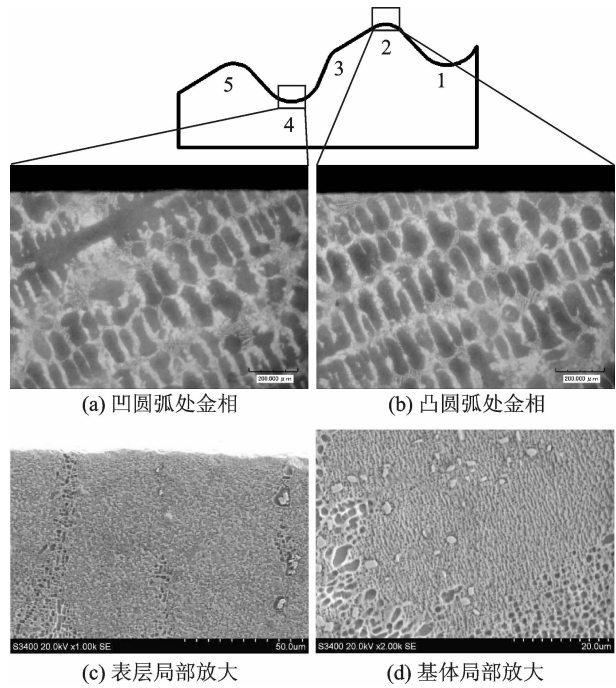
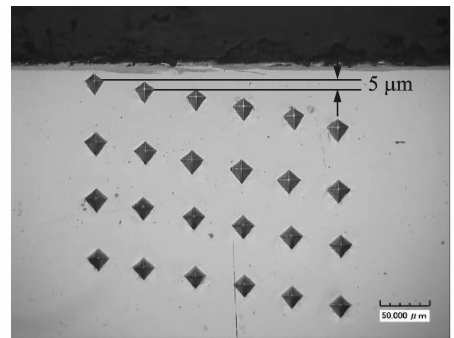
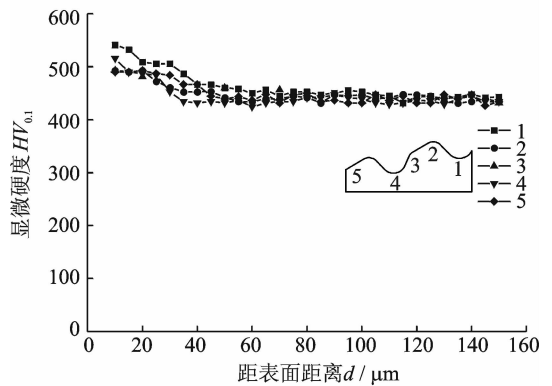


图 8 DZ125 金相组织

Fig. 8 Microstructure of DZ125



(a) 显微硬度测量实物图



(b) 距表面不同位置的显微硬度值

图 9 工件表层显微硬度

Fig. 9 Hardness distribution on sub-surface

间;根据式(4)计算,硬化程度 N 为 $7.7\% \sim 19\%$ ^[22]。

$$N = \frac{HV - HV'}{HV} \times 100\% \quad (4)$$

3 结 论

(1)在相同的磨削工艺下,DZ125 的磨削比能高于 GH4169,说明定向凝固镍基高温合金 DZ125 比变形镍基高温合金 GH4169 加工性更差。

(2)等速比试验表明,当 $v_s < 80$ m/s 时,DZ125 磨削比能随磨削速度的提高下降较为明显;而当 $v_s \geq 80$ m/s 时,磨削速度的提高对磨削比能的影响较小。因此, $v_s = 80$ m/s 为 DZ125 高效深切磨削的临界速度。

(3)等平均材料去除率时,磨削比能随着磨削深度的增大而上升。单颗磨粒切厚一致时,磨削深度的差异对磨削比能的影响较小。因此当单颗磨粒切厚达到临界值时,增大磨削深度可有效提高平均材料去除率。

(4)在本试验最大用量组合($v_s = 80$ m/s, $v_w = 1.85$ m/min, $a_p = 1.64$ mm)下,材料去除率为 $50 \text{ mm}^3 / (\text{mm} \cdot \text{s})$,对工件加工表面质量分析发现,工件表面微观形貌的磨削纹理清晰,无皱叠及犁沟两侧翻起等现象;金相显微组织未发现撕裂、相变、以及晶粒扭曲等现象;硬化层的厚度距离工件表面 $40 \mu\text{m}$ 左右,未出现软化现象,硬化程度 N 为 $7.7\% \sim 19\%$ 。

参考文献:

[1] Andrew C, Howes T, Pearce T. Creep feed grinding [M]. New York: Industrial Press, 1985: 1-174.

[2] Salmon S C. What is abrasive machining[J]. Manufacturing Engineering, 2010, 144(2): 64-68.

[3] Guo C, Campomanes M, Mcintosh D, et al. Optimization of continuous dress creep-feed form grinding process[J]. CIRP Annals—Manufacturing Technology, 2003, 52(1): 259-262.

[4] Guo C, Campomanes M, Mcintosh D, et al. Model-based monitoring and control of continuous dress creep-feed form grinding[J]. CIRP Annals—Manufacturing Technology, 2004, 53(1): 263-266.

[5] Marinescu I, Hitchiner M, Uhlmann E, et al. Handbook of machining with grinding wheels[M]. Boca Raton: CRC Press, 2007: 356-380.

[6] Lackner R, Ray C. Service expertise—The tool for the future[C]//Proceeding of 1st European Conference on Grinding. Duesseldorf: VDI Verlag, 2003: 7-17.

[7] Tawakoli T. High efficiency deep grinding [M]. London: Mechanical Engineering Publication Limited, 1993:1-72.

[8] Werner P G. HEDG-eine neue variante des hochleistungsschleifens verbindet das hochgeschwindigkeits- und tiefschleifen[C]// Wirtschaftliche Schleifverfahren-

en- Stand und Entwicklungstendenzen in der Schleiftechnik. Kempen: DIF, 1995: 1-39.

[9] Rowe W B. Thermal analysis of high efficiency deep grinding[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2001, 41(1): 1-19.

[10] Johnstone L. A critical study of high efficiency deep grinding[D]. Cranfield: School of Applied Sciences, Cranfield University, 2002.

[11] Rowe W B, Morgan M N, Batako A, et al. Energy and temperature analysis in grinding[C]// Proceedings of 6th International LAMDAMAP Conference and Exhibition on Laser Metrology, Machine Tool CMM and Robot Performance, Laser Metrology and Machine Performance VI. Southampton: WIT Press, 2003: 3-23.

[12] Kopac J, Krajnik P. High-performance grinding—a review[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 175(1): 278-284.

[13] 《中国航空材料手册》编辑委员会. 中国航空材料手册(第二卷 变形高温合金 铸造高温合金)[M]. 第二版. 北京: 中国标准出版社, 2002: 771-783.

[14] Shi Z, Malkin S. Wear of electroplated CBN grinding wheels[J]. ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2006, 128(1): 110-118.

[15] 韩德伟, 张建新. 金相试样制备与显示技术[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2005: 250-252.

[16] 冯宝富, 赵恒华, 蔡光起, 等. 高速单颗磨粒磨削机理的研究[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2002, 23(5): 470-473.

Feng Baofu, Zhao Henghua, Cai Guangqi, et al. Study on the single grain high-speed grinding mechanism[J]. Journal of Northeastern University: Natural Science, 2002, 33(5): 470-473.

[17] 杨扬, 程信林. 绝热剪切的研究现状及发展趋势[J]. 中国有色金属学报, 2002, 12(3): 401-408.

Yang Yang, Cheng Xinlin. Current status and trends in researches on adiabatic shearing[J]. The Chinese Journal Nonferrous Metals, 2002, 12(3): 401-408.

[18] Malkin S, Guo C. Grinding technology: theory and applications of machining with abrasives[M]. 2nd edition. New York: Industrial Press, 2008: 43-59.

[19] 陈勇平, 唐进元. 磨削加工中的尺寸效应机理研究[J]. 中国机械工程, 2007, 18(17): 2033-2036.

Chen Yongping, Tang Jinyuan. Research on the size effect involved in grinding[J]. China Mechanical Engineering, 2007, 18(17): 2033-2036.

[20] 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: 139-195.

[21] 郭建亭. 高温合金材料学 下册: 高温合金材料与工程应用[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 162-180.

[22] 任敬心, 华定安. 磨削原理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011: 178-186.

