

IC10 定向凝固高温合金缓进给磨削表面完整性研究

杨忠学¹, 张帅奇², 张强²

(1. 西北工业大学现代设计与集成制造教育部重点实验室, 西安 710072;
2. 北京航空材料研究院先进高温结构材料国防科技重点实验室, 北京 100095)

[摘要] 通过设计不同磨削工艺参数组合, 研究了定向凝固高温合金 IC10 在缓进给磨削过程中表面完整性的变化, 分析了 IC10 合金在缓进磨削过程中工艺参数对磨削表面粗糙度、显微硬度、三维形貌、显微组织的影响规律。研究表明: IC10 合金在缓进给磨削过程中, 当砂轮线速度 v_s 在 15~20m/s 之间变化, 工件进给速度 v_w 不大于 200mm/min, 磨削深度 a_p 不超过 0.5mm 时, 可以获得较好的表面质量。另外, IC10 在缓进给磨削过程中会产生较严重的加工硬化现象, 硬化程度最大可达 26.9%, 最大硬化层深度可以达到 230 μ m。同时, IC10 在缓进磨削过程中沿磨削深度方向上会产生表面白层和塑性变形层, 其深度分别在 0.24~3.2 μ m 和 0.48~3.8 μ m 之间变化。

关键词: 高温合金; 缓进磨削; 表面完整性; 加工硬化; 表面白层; 塑性变形

Surface Integrity of IC10 Directionally Solidified Superalloy in Creep Feed Grinding

YANG Zhongxue¹, ZHANG Shuaiqi², ZHANG Qiang²

(1. Key Laboratory of Contemporary Design and Integrated Manufacturing Technology, Ministry of Education, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. The Key Laboratory of Advanced High Temperature Structural Materials, Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

[ABSTRACT] Different combination of grinding process parameters are designed to research the surface integrity of IC10 directionally solidified superalloy in creep feed grinding. The effects of process parameters on the surface roughness, surface topography, microhardness and microstructure alteration of the subsurface are investigated in detail. The results show that a better surface quality can be obtained during creep feed grinding of IC10 superalloy under the conditions: the wheel speed ranges from 15 to 20m/s, the workpiece speed is not more than 200mm/min, and the grinding depth is not more than 0.5mm. In addition, surface hardening phenomenon appears on the ground surface, the maximum hardening degree can reach 26.9% and the maximum depth of the hardened layer is 230 μ m. At the same time, the white layer and plastic deformation layer are produced in the subsurface, the depth of the white layer and deformation layer ranges from 0.24 μ m to 3.2 μ m and 0.48 μ m to 3.8 μ m respectively.

Keywords: Superalloy; Creep feed grinding; Surface integrity; Work hardening; White layer; Plastic deformation

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2019.06.062

高温合金具有优良的热强性、热稳定性及抗热疲劳性^[1], 在高温氧化和燃气腐蚀条件下, 它能承受复杂应力和长期可靠工作, 因此被广泛应用于航空发动机及燃气轮机涡轮叶片的制造。涡轮叶片作为航空发动机的关键零件, 其榫齿部位通常需要机械加工。然而, 由于高温合金特殊的材料特性, 切削加工过程中刀具磨损快、生产率低、成本高, 其切削加工难度极大增加^[2-4]。为此, 涡轮叶片榫齿部位通常采用磨削加工工艺。其中,

缓进给磨削因其大切深、高效率、高精度等特点, 在精铸涡轮叶片榫齿加工方面得到了广泛的应用^[5]。然而, 由于缓进给磨削采用大的磨削深度, 砂轮与工件的接触面积较大、磨削型面复杂、冷却液很难进入磨削弧区, 且加工过程中很容易发生振动, 其表面质量很难保证^[6-7]。因此, 有必要针对高温合金缓进给磨削表面完整性展开进一步深入研究。

为改善高温合金磨削表面完整性, 提高零件服役性

能,国内外学者对高温合金的磨削表面完整性进行了大量研究。Ding等^[8]利用CBN砂轮研究了K424镍基高温合金在缓进磨削过程中磨削工艺参数对磨削表面完整性的影响。试验表明:在利用CBN砂轮对K424合金进行磨削时,虽然比磨削能高达 $200\sim 300\text{J}/\text{mm}^3$,然而磨削区的温度仅为 100°C 。另外,在工艺参数组合为 $v_s=22.5\text{m}/\text{s}$, $v_w=0.1\text{m}/\text{min}$, $a_p=0.2\text{mm}$ 时可以获得较好的表面质量。Zeng等^[9]研究了磨削工艺参数对GH4169高温合金磨削表面完整性的影响。研究表明:磨削深度 a_p 是影响表面粗糙度的主要因素,当 a_p 由 0.005mm 减小到 0.04mm 时,磨削表面粗糙度由 $0.284\mu\text{m}$ 增大到 $0.896\mu\text{m}$ 。另外,磨削深度对磨削变质层的影响也较显著,在较小的磨削深度下,磨削表层的显微硬度与残余应力相对于基体无明显变化,磨削表层不会产生烧伤裂纹与明显的组织变化。黄新春等^[10]研究了高温合金GH4169在磨削过程中,磨削工艺参数对表面完整性的影响。研究表明:砂轮线速度对表面残余应力和表面显微硬度的影响最为显著,而工件速度对表面粗糙度的影响最为显著。另外,GH4169经过磨削后,其塑性变形层、显微硬度影响层、残余应力影响层最大影响深度分别可达 $10\mu\text{m}$ 、 $100\mu\text{m}$ 、 $200\mu\text{m}$,其研究结果为高温合金磨削的研究提供了相关的试验依据。Zhou等^[11]研究了镍基单晶高温合金在微磨削过程中沿不同晶面磨削后粗糙度与再结晶层厚度的变化规律。研究表明:当沿着(111)晶面磨削时,其粗糙度最小,而沿着(100)方向磨削时其粗糙度最大。此外还发现,沿着(111)晶面磨削后工件再结晶层的厚度小于沿(110)晶面磨削后再结晶层的厚度。Ju^[12]研究了磨削温度对表面完整性的影响,系统的研究了磨削温度随接触面积、磨削参数等条件的变化规律。结果显示,磨削液对磨削区的温度有很大影响,磨削速度之比(v_w/v_s)在一定范围内会导致磨削温度迅速升高,因此磨削过程中须避免。

目前,对高温合金磨削加工的研究,从磨削加工的类型来看,主要侧重于对普通磨削表面完整性及磨削力、磨削温度等的研究。从研究的材料来看,主要是针对多晶材料磨削加工的研究。而对于定向凝固高温合金以及单晶高温合金的缓进给磨削加工,虽然国内外研究人员已经进行了相关的研究,但主要是针对磨削表面完整性个别指标(如表面粗糙度、显微硬度、显微组织等)的研究,缺乏对高温合金缓进磨削表面完整性系统的评价和研究。因此,对高温合金磨削加工的研究尚需进一步完善。

本文针对定向凝固高温合金IC10缓进磨削表面完整性展开,研究了缓进磨削工艺参数对表面粗糙度、表面形貌、显微硬度、显微组织的影响规律,通过对试验数据

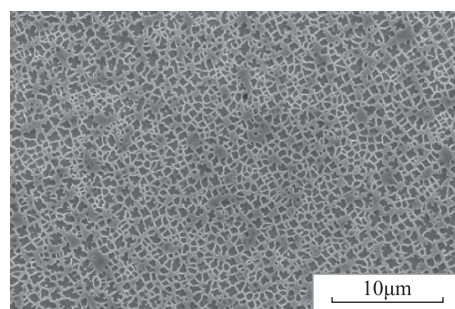
的分析给出了IC10合金缓进磨削的工艺参数范围。

1 缓进给磨削试验

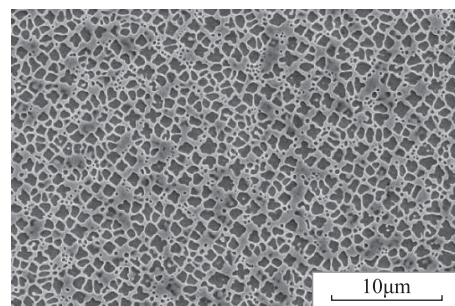
1.1 试验材料

本试验采用的材料为 Ni_3Al 基高温合金IC10,其主要成分如表1所示。首先采用定向凝固技术将IC10母合金浇注成试块,然后将铸态试块进行固溶和时效处理。图1为IC10合金热处理前后显微组织图,从图中可以看出,铸态IC10组织主要包含 γ' 相和 $\gamma+\gamma'$ 共晶相以及少量碳化物,其中 γ' 相形状不规则,经过热处理后, $\gamma+\gamma'$ 相残余共晶基本消除, γ' 相呈较规则的正方形。

试样尺寸为 $29\text{mm}\times 15\text{mm}\times 15\text{mm}$,为了排除材料各向异性对磨削性能的影响,磨削方向均垂直于 $\langle 001\rangle$ (合金定向凝固的方向)取向方向,如图2所示。



(a) IC10 铸态组织



(b) IC10 热处理态组织

图1 IC10热处理前后合金微观组织

Fig.1 Microstructure of IC10 before and after treatment

表1 IC10合金主要成分(质量分数)

Table 1 Main compositions of IC10 alloy %

| 成分 | 质量分数 | 成分 | 质量分数 |
|----|-----------|----|-----------|
| C | 0.07~0.12 | Mo | 1.0~2.0 |
| Co | 11.5~12.5 | Ta | 6.5~7.5 |
| Cr | 6.5~7.5 | Hf | 1.0~2.0 |
| Al | 5.6~6.2 | B | 0.01~0.02 |
| W | 4.7~5.2 | Ni | 余量 |

1.2 试验设计

磨削试验在 FSG-B818CNC 缓进给磨床上进行,选用的砂轮为白刚玉(80[#])和铬刚玉(100[#])混合的砂轮。为了研究缓进磨削表面完整性与磨削工艺参数(砂轮线速度 v_s 、工件进给速度 v_w 、磨削深度 a_p)之间的关系,对每个工艺参数设置了 5 个水平,如表 2 所示,并进行 3 组单因素试验,通过对试样磨削后的表面粗糙度、显微硬度、三维形貌、显微组织的测量,研究上述参量随磨削工艺参数的变化规律。各参量的测量方法如下:

表面粗糙度检测采用 TR620 表面粗糙度测试仪。为保证测量结果准确、可靠,在磨削表面上取 5 个点进行测量,然后取其均值,测量方向垂直于磨削加工方向。

三维形貌采用激光共聚焦显微镜进行观察,其测试步骤分为 3 步:(1)设置设备参数,放大倍数 50 \times ,Z 向扫描范围为 $-15\sim 15\mu\text{m}$;(2)将被测表面进行清洁(酒精擦拭或超声波清洗均可);(3)将试样放置到测试平台上进行对焦测量调试后开始测量,测量结束后,观察测量得到的 3D 形貌图等信息并储存。

显微硬度采用 HVT-1000 显微硬度计进行测量,测量硬度沿磨削深度方向的变化规律需要制做金相试样。制作过程为:线切割—镶样—打磨—抛光,线切割方式和制作的金相试样如图 3 (a)和(b)所示。为保证测试结果的准确性,测量沿深度方向的显微硬度时,对每个深度的显微硬度测量 5 个点,取其均值。

显微组织的观察利用扫描电镜,检测时首先需要制作如图 3 (b)所示金相试样,然后对金相试样进行腐蚀,腐蚀液的选取与合金材料有关,本试验采用的 IC10 合金用冰醋酸进行腐蚀,腐蚀时间 5~8s。

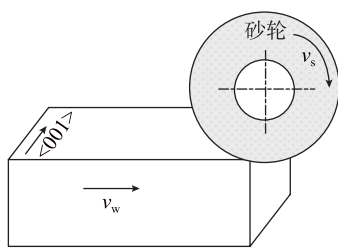


图2 磨削示意图

Fig.2 Schematic diagram of grinding

表2 磨削参数水平表

Table 2 Grinding parameter level

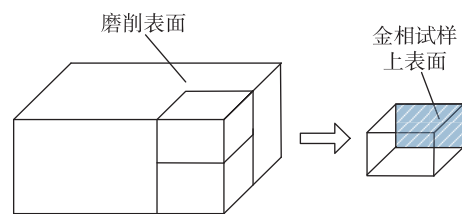
| 工艺参数 | 水平 | | | | |
|---|-----|-----|-----|-----|-----|
| $v_s / (\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 |
| $v_w / (\text{mm}\cdot\text{min}^{-1})$ | 100 | 150 | 200 | 250 | 300 |
| a_p / mm | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 0.6 | 0.7 |

2 试验结果与分析

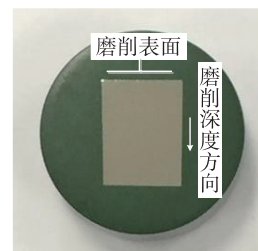
2.1 表面粗糙度测量与分析

图 4 (a)为砂轮线速度 v_s 对粗糙度的影响规律,可以看出,当砂轮线速度 v_s 低于 20m/s 时,随 v_s 的增加,粗糙度 R_a 从 0.55 μm 逐渐减小到 0.33 μm ,这是因为砂轮线速度 v_s 增大,会导致单颗磨粒磨削厚度减小,因此磨削表面粗糙度 R_a 减小。然而,当砂轮线速度大于 20m/s 时,随着砂轮线速度 v_s 的增加,粗糙度迅速增大,当 $v_s=30\text{m/s}$ 时,粗糙度增大至 0.62 μm 。通过对磨削表面形貌(见图 5 (a)和(b))观察发现:当 v_s 为 15m/s 时,磨削表面有较清晰的磨削纹路,磨削表面无明显变形,而当 v_s 为 20m/s 时,磨削表面产生严重的变形,表面局部出现严重的黏附现象。这是因为砂轮线速度较大时,磨削弧区产生的热量增加,在磨削高温下砂轮与工件发生黏附,砂轮切削能力下降,磨削力增大,使得磨削表面质量迅速恶化,表面粗糙度增大。

图 4 (b)反映了粗糙度 R_a 随工件进给速度 v_w 变化的规律。从图中可以看出,表面粗糙度 R_a 随着工件进给速度 v_w 的增加而增加,当 v_w 由 100mm/min 增加至 300mm/min 时, R_a 由 0.33 μm 逐渐增加到 0.65 μm 。这是因为工件速度 v_w 增大,单颗磨粒磨削厚度增大,磨削量增大,塑性变形程度增大,导致磨削表面粗糙度 R_a 增大。另外,从图 5 (c)中还可以发现,当工件进给速度较大($v_w>200\text{mm/min}$)时,工件表面有波纹产生,经分析,这是由于工件速度增大,砂轮与工件相互作用增强,工件产生振动,表面出现振动波纹,加工振动也是导致粗糙度增大的重要原因。



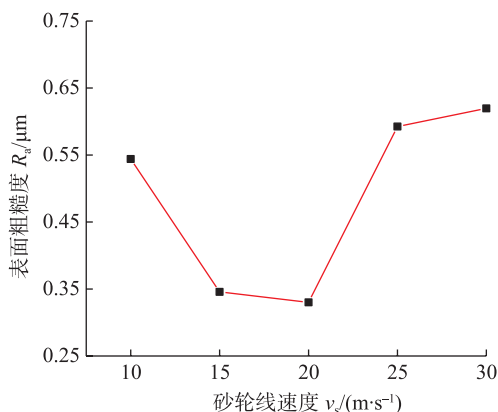
(a) 线切割取样示意图



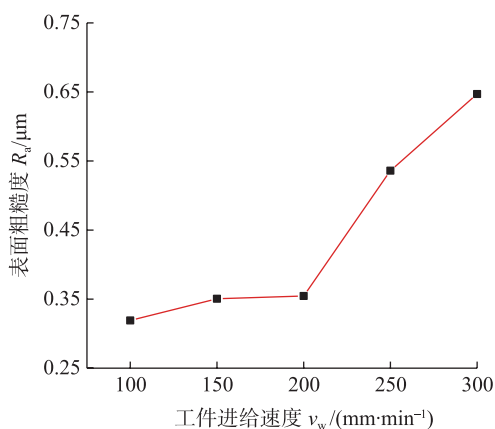
(b) 金相试样

图3 金相试样制取

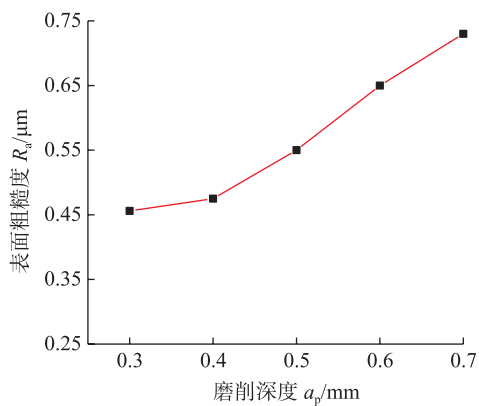
Fig.3 Metallographic specimen preparation



(a) 砂轮线速度对表面粗糙度的影响



(b) 工件速度对表面粗糙度的影响

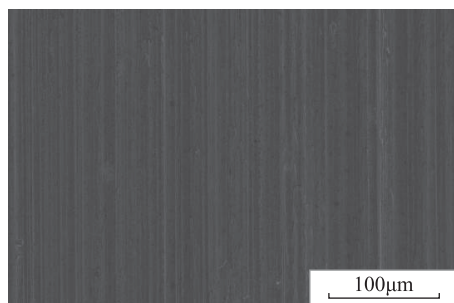


(c) 磨削深度对表面粗糙度的影响

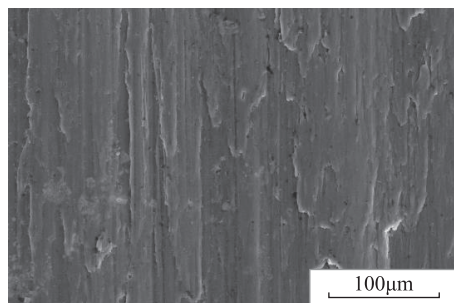
图4 磨削工艺参数对表面粗糙度的影响

Fig.4 Effects of grinding parameters on surface roughness

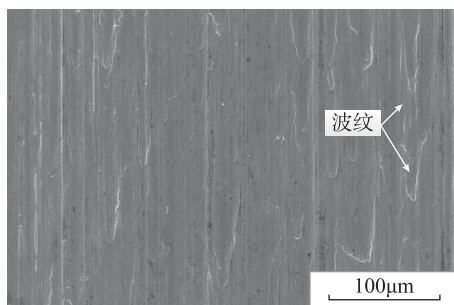
图4(c)为粗糙度 R_a 随磨削深度 a_p 变化的规律。可以看出, R_a 随磨削深度 a_p 的增加而增加,当磨削深度从0.3mm增大到0.7mm时,粗糙度 R_a 从0.46 μm 增大到0.73 μm 。磨削深度 a_p 的增大一方面会使单颗磨粒磨削厚度增大,从而导致使磨削表面粗糙度 R_a 增大;另一方面 a_p 的增大使得磨削力增大,砂轮磨粒受力增大,更



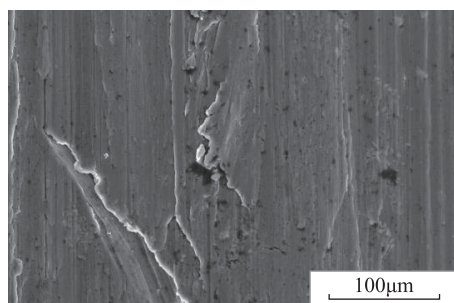
(a) $v_s=15m/s$ 磨削表面形貌



(b) $v_s=20m/s$ 磨削表面形貌



(c) $v_w=200mm/min$ 磨削表面形貌



(d) $a_p=0.5mm$ 磨削表面形貌

图5 不同工艺参数磨削表面形貌

Fig.5 Surface topography at different grinding process parameters

容易从砂轮脱落,在砂轮的挤压作用下脱落的磨粒在工件表面刻滑、耕犁,使工件表面形成不规则的犁沟,工件材料向两边隆起,表面质量变差,表面粗糙度增加。

2.2 三维形貌研究

图6~8分别为用激光共聚焦显微镜测得的不同磨削工艺参数下的三维形貌图。

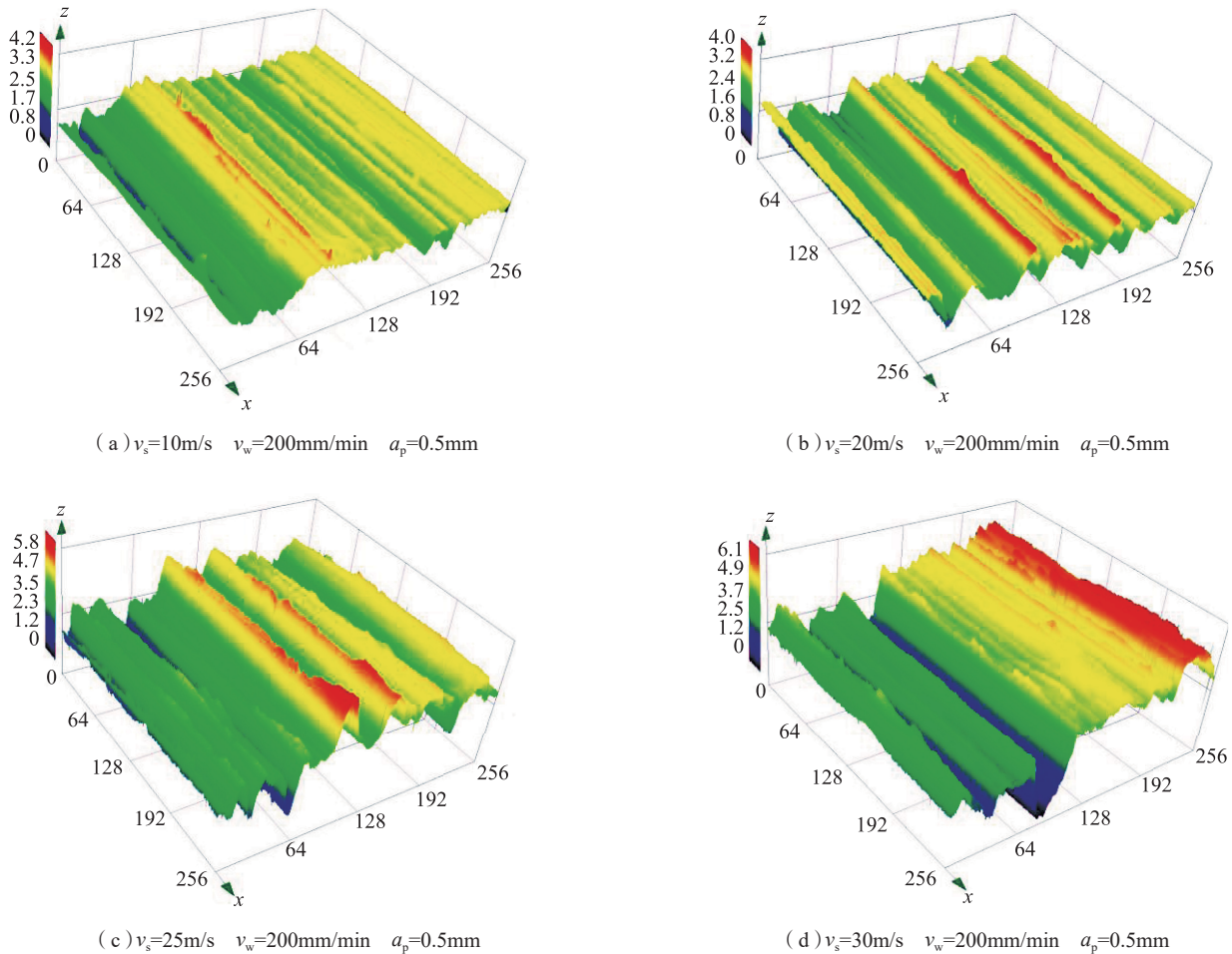


图6 不同砂轮线速度下磨削表面三维形貌

Fig.6 3D surface profile at different wheel speed

图6为不同砂轮线速度下磨削表面三维形貌图。由图6可以看出,当 v_s 低于20m/s时,磨削表面纹路清晰,表面形貌纹理细密紧致,轮廓峰起伏程度较小。 v_s 为10m/s、20m/s时,最大波峰高度分别为4.2 μm 和4 μm ,由此可以看出,随着砂轮线速度 v_s 增加,轮廓峰起伏程度呈减小趋势。这是因为,随着 v_s 的增加,单颗磨粒磨削厚度减小,相同时间内进入磨削区的磨粒数增加,磨削表面沿砂轮轴向波纹密度升高,沿磨削运动方向上沟壑长度减小。然而,当 v_s 高于20m/s时,随着砂轮线速度的增加,表面形貌逐渐变差,表面出现明显的棱脊和凸起,表面轮廓起伏程度变大,磨削纹路已有较大变形,表面质量变差。经过分析,这是由于砂轮线速度过高,导致磨削区热量增加,砂轮与工件产生黏附,砂轮与工件作用增强,沟壑边缘形成隆起的未成磨屑塑形变形材料增多,表面轮廓振幅增加,表面质量变差,这也是 v_s 高于20m/s时,磨削表面粗糙度随砂轮线速度增大而增大的原因。

图7为不同工件速度下磨削表面三维形貌图,当 v_w 为100mm/min时,磨削纹路细密紧致,清晰可见,磨

削表面轮廓起伏程度较小,轮廓高度在0~4.2 μm 之间变化。当 v_w 增大至200mm/min时,磨削表面轮廓起伏程度逐渐增大,表面轮廓最大高度达到6.5 μm ,磨削纹路产生较大变形,表面质量变差。当 v_w 增大至300mm/min时,磨削表面不平度继续增大,表面轮廓最大高度达到6.9 μm ,磨削表面出现明显的棱脊和凸起,犁沟严重变形,表面轮廓峰振幅显著增加,表面质量进一步恶化。由此可以发现,随着工件进给速度 v_w 的增加,磨削表面轮廓起伏程度、犁沟变形程度逐渐增大,表面质量逐渐变差。这是因为随着 v_w 的增加,单颗磨粒磨削厚度增加,工件表面粗糙度增加,表面质量变差。另外,随着 v_w 的增加,磨削力逐渐增大,导致磨削纹路产生较大变形,表面质量进一步恶化。

图8(a)~(c)分别为磨削深度 a_p 为0.3mm、0.5mm、0.7mm时的三维形貌。由图8可以看出,当磨削深度 a_p 为0.3mm和0.5mm时,可以看到较清晰的磨削纹路,磨削表面较为平缓,表面轮廓最大高度分别为3.8 μm 和4 μm 。当磨削深度为0.7mm时,磨削纹路已有很大的变

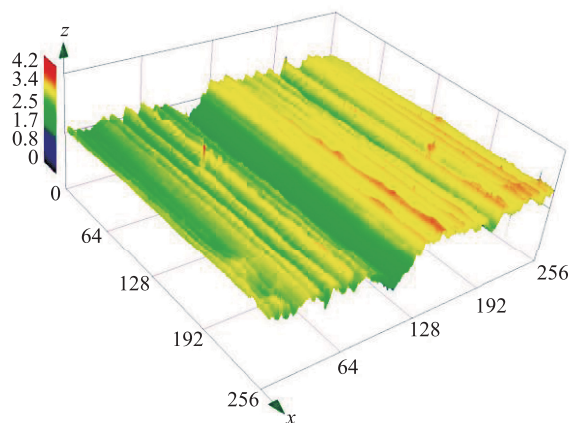
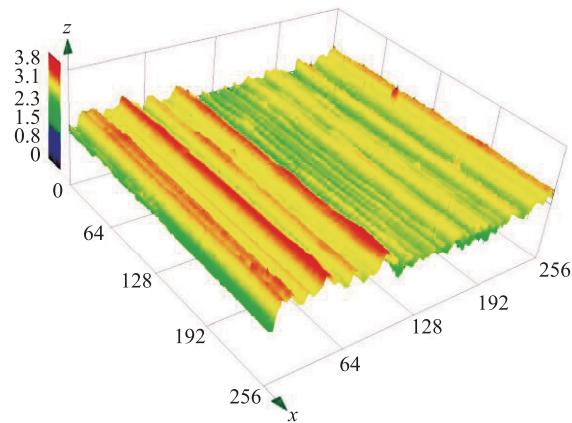
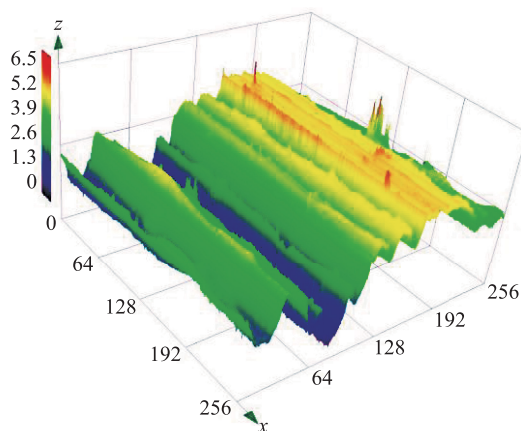
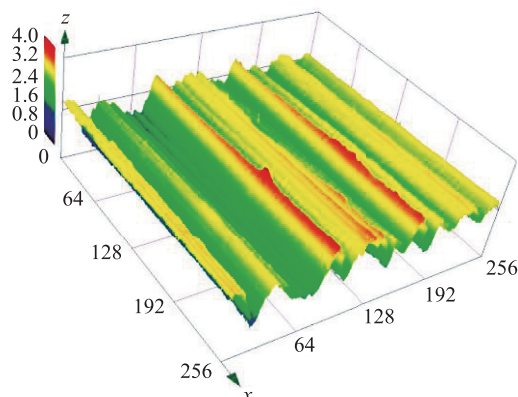
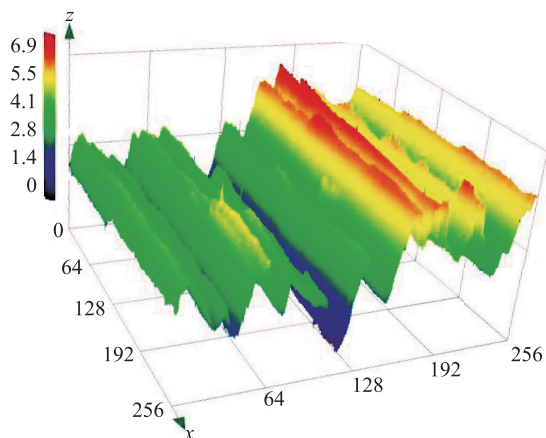
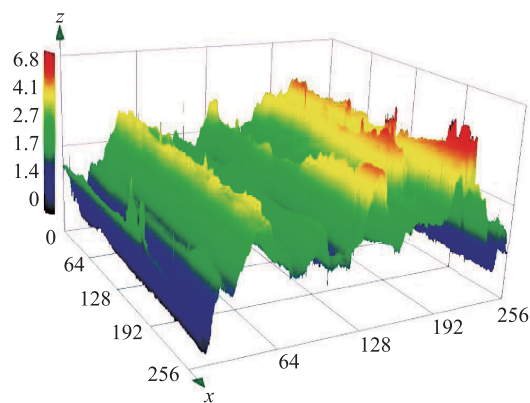
(a) $v_s=20\text{m/s}$ $v_w=100\text{mm/min}$ $a_p=0.5\text{mm}$ (a) $v_s=20\text{m/s}$ $v_w=200\text{mm/min}$ $a_p=0.3\text{mm}$ (b) $v_s=20\text{m/s}$ $v_w=200\text{mm/min}$ $a_p=0.5\text{mm}$ (b) $v_s=20\text{m/s}$ $v_w=200\text{mm/min}$ $a_p=0.5\text{mm}$ (c) $v_s=20\text{m/s}$ $v_w=300\text{mm/min}$ $a_p=0.5\text{mm}$ (c) $v_s=20\text{m/s}$ $v_w=200\text{mm/min}$ $a_p=0.7\text{mm}$

图7 不同工件进给速度下磨削表面三维形貌

Fig.7 3D surface profile at different workpiece speed

图8 不同磨削深度下磨削表面三维形貌

Fig.8 3D surface profile at different grinding depth

形,磨削纹路已很难区分,表面轮廓峰起伏程度显著增加,表面轮廓最大高度达到 $6.8\mu\text{m}$,表面质量显著恶化。由此可以看出,随着磨削深度的增加,磨削纹路变形逐渐增大,磨削表面不平度逐渐增大,表面质量逐渐变差。

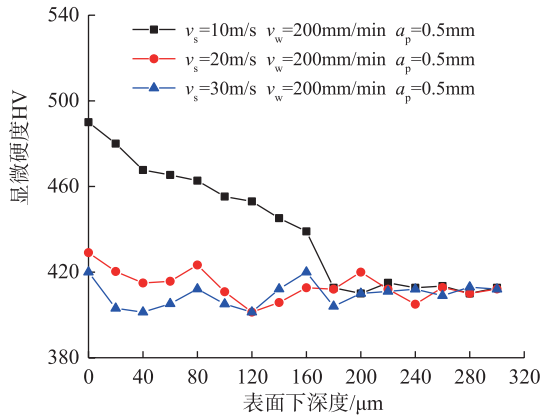
这是因为随着磨削深度的增加,单颗磨粒磨削厚度增加,单位时间内进入磨削区的材料增加,磨削表面沟壑深度升高,同时由于磨削强度的增大,使磨削表面磨粒与工件材料作用加剧塑性变形能增加,沟壑边缘形成隆

起的未成磨屑塑性变形材料增多,磨削表面轮廓波纹振幅增加,波峰尖锐。

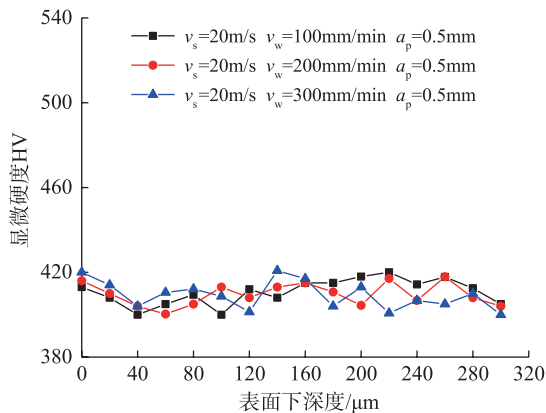
由以上分析可以得出,IC10 高温合金在缓进磨削过程中,砂轮线速度 v_s 在 15~20m/s 之间变化,工件进给速度 v_w 不大于 200mm/min,磨削深度 a_p 不超过 0.5mm 时,可以获得较好的表面质量。

2.3 显微硬度测量与分析

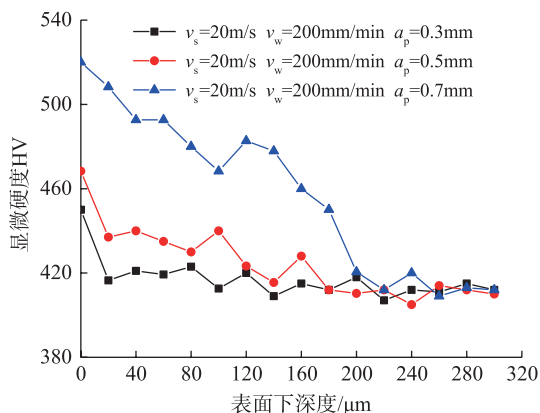
显微硬度测量结果如图 9 所示,通过显微硬度的测



(a) 砂轮线速度对显微硬度的影响



(b) 工件进给速度对显微硬度的影响



(c) 磨削深度对显微硬度的影响

图9 显微硬度测量结果

Fig.9 Results of microhardness measurement

量得到 IC10 高温合金的基体维氏硬度在 400~420HV 之间。

图 9 (a) 所示为砂轮线速度 v_s 对表层显微硬度的影响规律。由图可以看出,磨削表面的显微硬度明显高于基体显微硬度,且在一定深度范围内,显微硬度沿磨削深度方向呈降低趋势,磨削表面出现加工硬化现象。 v_s 为 10m/s、20m/s、30m/s 分别对应的表面显微硬度为 490HV、429HV、420HV,对应的基体显微硬度为 412HV,3 种工艺参数组合下,表面相对于基体的硬化程度分别为 18.9%、4.1%、1.9%,硬化程度随砂轮线速度的增加而减小。

分析认为:缓进磨削过程中,由于磨削力的作用使工件表层产生塑性变形、位错等,使得表层硬度增大,出现加工硬化现象,而磨削热会使得表层出现软化现象。当砂轮线速度逐渐增大时,磨削力逐渐变小,工件表层产生的塑性变形逐渐变小,由塑性变形造成的加工硬化现象逐渐减弱。另一方面,随着砂轮线速度的增加,磨削区温度逐渐升高,工件表层软化程度逐渐增加,然而其综合效应仍表现为加工硬化,这说明磨削力对硬度的影响大于磨削温度对硬度的影响。

图 9 (b) 反映了工件进给速度 v_w 对表层显微硬度的影响规律。由图可以看出,3 个工件速度下,显微硬度变化趋势基本一致,且都表现出轻微的加工硬化。 v_w 为 100mm/min、200mm/min、300mm/min 对应的表面显微硬度是 420HV、416HV、414HV,对应的基体显微硬度为 404HV,表面相对于基体的硬化程度为 3.9%、3%、2.5%。可以看出, v_w 对显微硬度的影响并不显著。

图 9 (c) 反映了磨削深度 a_p 对表层显微硬度的影响规律。磨削表层同样出现了加工硬化现象,且随着磨削深度的增加,硬化程度逐渐增加。当磨削深度为 0.3mm、0.5mm 和 0.7mm 时,其表面显微硬度分别为 450HV、470HV、520HV,其硬化程度分别为 9.2%、14.1%、26.2%。

分析认为,随着磨削深度的增加,磨削力和磨削温度增加,虽然工件表层同时存在硬化和软化作用,然而,由磨削力产生的硬化效应大于磨削温度产生的其综合效应仍然表现为加工硬化,这说明磨削力对硬度的影响大于磨削温度对硬度的影响。另外,随着磨削深度的变化,硬化程度变化较为显著,说明磨削深度对磨削力影响较大。

由以上分析可以看出,IC10 合金缓进磨削过程中会产生较严重的加工硬化现象。硬化程度与工艺参数有关,其中磨削深度 a_p 对显微硬度影响最大,砂轮线速度 v_s 次之,工件进给速度 v_w 对硬度影响最小。

2.4 显微组织研究

将磨削后的 IC10 试块经过线切割—镶样—打磨—抛光,制成如图 3(b)所示金相试样,用电镜观察试样沿磨削深度方向的显微组织变化,并分析砂轮线速度 v_s 、工件进给速度 v_w 、磨削深度 a_p 对显微组织的影响。

图 10 为 IC10 合金经磨削后沿深度方向的显微组织图。可以看到,经过磨削后,磨削表面产生一层白色物质,且在磨削表面附近合金组织产生明显的变形。由图 10 可以看出,未变形的 γ' 相形状接近于矩形,而变形后的 γ' 相变成细长的纤维状,且变形方向和磨削方向一致。由此可以发现,IC10 合金在经过磨削后显微组织沿磨削深度方向产生明显的分层现象,即表面白层和塑性变形层。

研究发现,由磨削产生的白层厚度和塑性变形层的厚度与磨削工艺参数有关。下面分别对砂轮线速度 v_s 、工件进给速度 v_w 、磨削深度 a_p 对白层和塑性变形层厚度的影响规律加以讨论。

图 11 为表面白层厚度和塑性变形层厚度随砂轮线速度的变化趋势,可以看出,当砂轮线速度 v_s 从 10m/s 增大到 30m/s 时,白层厚度由 1.32 μm 增加到 2.27 μm ,而塑性变形层厚度由 3.5 μm 减小至 2.27 μm 。可以发现,随着砂轮线速度的增加,表面白层厚度逐渐增加,而塑

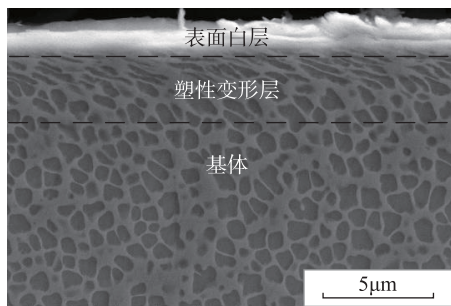


图10 IC10磨削后显微组织图
Fig.10 Microstructure of IC10 after grinding

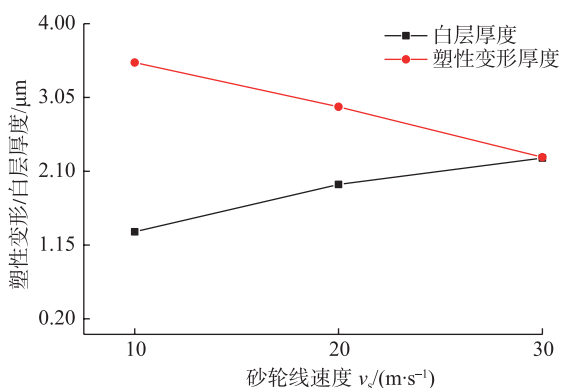


图11 不同砂轮线速度磨削表面变质层
Fig.11 Grinding metamorphic layer at different wheel speed

性变形层厚逐渐减小。分析认为, v_s 增加导致单位时间内起切削作用的磨粒数增多,摩擦加剧,产生热量增多,从而磨削温度升高,易形成较厚的白层。另外, v_s 的增加会使磨削力减小,砂轮对工件表面的挤压作用减弱,因此塑性变形程度逐渐减轻,变形层厚度逐渐减小。

图 12 为 IC10 合金在不同工件速度 v_w 下磨削后表面白层厚度和塑性变形层厚度随工件速度的变化趋势。可以看出,当 v_w 从 100 mm/min 增加到 300 mm/min 时,白层厚度由 0.57 μm 逐渐增加, $v_w=200\text{mm}/\text{min}$ 时白层厚度达到最大值 1.03 μm ,而后,随 v_w 的增加白层厚度逐渐变小,当 v_w 增大到 300 mm/min 时减小到 0.45 μm 。而塑性变形层的厚度随着工件速度 v_w 的增加而增加,当 v_w 从 100 mm/min 增加到 300 mm/min 时其厚度从 1.43 μm 增大到 2.81 μm 。

分析认为,随着工件速度 v_w 的增加,单位时间内进入磨削区的材料增加,砂轮与工件摩擦作用加剧,磨削区产生的热量增加。另一方面,随着工件速度的增加,砂轮与工件接触时间减小,流入工件的热量减小。当 v_w 较小时,由于磨削力增大造成的热量增加幅度大于由接触时间变短而造成的热量减小幅度,因此磨削区温度呈上升趋势,从而使得白层厚度增加。然而,当工件速度超过 200 mm/min 时,由于工件速度较大,工件与砂轮接触时间大幅减小,短时间内流入工件热量减小幅度较大,因此造成磨削区温度下降,产生较小的白层。

图 13 为 IC10 合金在不同磨削深度下磨削后表面白层厚度和塑性变形层厚度随工件速度的变化趋势。可以看出,当磨削深度 a_p 由 0.3 mm 增大至 0.7 mm 时,白层厚度由 0.24 μm 增大到 3.2 μm ,塑性变形层厚度由 0.48 μm 增加到 3.8 μm 。白层厚度和塑性变形层厚度均随磨削深度 a_p 的增加而增加,这是因为磨削深度增加,单颗磨粒磨削厚度增加,切屑变形抗力和摩擦力增大,消耗能量增大。另外,磨削深度增加也会导致砂轮

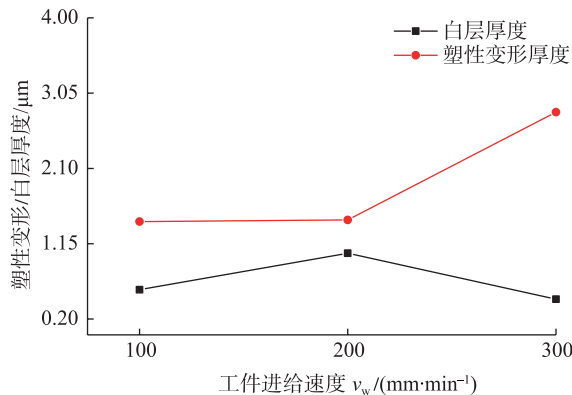


图12 不同工件速度磨削表面变质层
Fig.12 Grinding metamorphic layer at different work piece speed

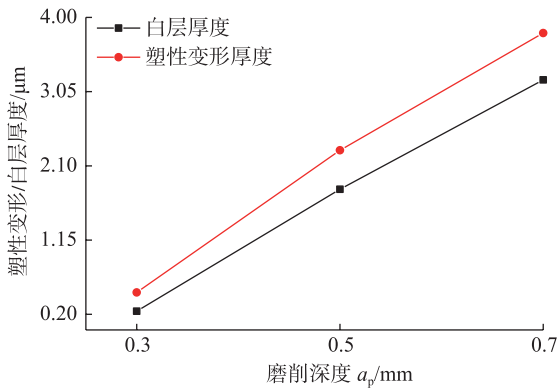


图13 不同磨削深度磨削表面变质层

Fig.13 Grinding metamorphic layer at different grinding depth

与工件接触弧变长,热量不易散失,导致磨削弧区温度升高,形成了较厚的白层和塑性变形层。

由以上分析可以看出,IC10 缓进磨削后其表面白层和塑性变形的影响总深度在 $0.72\sim 7\mu m$ 之间变化。通过对变质层显微硬度的测量可以发现,在 $0\sim 7\mu m$ 之间,其维氏硬度在 $414\sim 490HV$ 之间变化,而 IC10 基体维氏硬度在 $400\sim 420HV$ 之间,变质层硬度较基体硬度升高约 $1.9\%\sim 26.9\%$ 。由此可以说明,磨削过程中出现的表面白层和塑性变形现象是产生加工硬化的重要原因。

3 结论

通过对 IC10 高温合金缓进磨削表面完整性的研究,可以得出以下结论。

(1) IC10 高温合金缓进磨削过程中,加工硬化现象较为突出,加工硬化程度在 $1.9\%\sim 26.9\%$ 之间变化。且磨削深度 a_p 对显微硬度影响最大,砂轮线速度 v_s 次之,工件进给速度 v_w 对硬度影响最小。

(2) IC10 高温合金在缓进给磨削过程中,砂轮线速度 v_s 在 $15\sim 20m/s$ 之间变化,工件进给速度 v_w 不大于 $200mm/min$,磨削深度 a_p 不超过 $0.5mm$ 时,可以获得较好表面质量。另外,当采用较大磨削参数($v_s>20m/s$ 、 $v_w>200mm/min$ 、 $a_p>0.5mm$)时,砂轮与工件黏附较严重,磨削表面质量显著恶化。

(3) IC10 高温合金在缓进给磨削过程中,磨削表层会出现表面白层和塑性变形层,且表面白层厚度在 $0.24\sim 3.2\mu m$ 之间变化,塑性变形层厚度在 $0.48\sim 3.8\mu m$ 之间变化。

参考文献

[1] 钟丽琼,梁益龙,胡浩. GH4079 高温合金磨削表面特征的研究[J]. 制造技术与机床, 2016(12): 79-82.
ZHONG Liqiong, LIANG Yilong, HU Hao. Study on surface characteristics of superalloy in grinding[J]. Manufacturing Technology

and Machine Tool, 2016(12): 79-82.

[2] 刘忠伟. 高温合金的磨削加工[J]. 机械制造, 2004, 42(7): 46-47.

LIU Zhongwei. The grinding of superalloy[J]. Mechanical Manufacturing, 2004, 42(7): 46-47.

[3] 任敬心,杨茂奎,李雅卿,等. 镍基高温合金的磨削特征[J]. 航空学报, 1997, 18(6): 116-119.

REN Jingxin, YANG Maokui, LI Yaqing, et al. Grinding characteristics of nickelbased superalloy[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1997, 18(6): 116-119.

[4] 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 Jiuhua, ZHANG Zhiwei, FU Yucan. Research progress and prospect of high efficiency grinding for nickel-based superalloy[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(2): 351-360.

[5] 范茂祥. 涡轮叶片榫齿加工技术的发展[J]. 航空工艺技术, 1988(5): 25-27, 48.

FAN Maoxiang. Development of the machining technology of turbine bladetenon[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 1988(5): 25-27, 48.

[6] 曹福泉. 叶片榫齿的蠕动磨削[J]. 机械设计与制造, 1990(5): 18-20.

CAO Fuquan. Creep feed grinding of turbine blade tooth[J]. Machinery Design and Manufacture, 1990(5): 18-20.

[7] 黄新春,张定华,姚倡锋,等. 磨削参数对 GH4169 高温合金磨削表面特征影响研究[J]. 中国机械工程, 2014, 25(2): 210-214.

HUANG Xinchun, ZHANG Dinghua, YAO Changfeng, et al. Influence of grinding parameters on surface characteristics of GH4169 superalloy[J]. Chinese Mechanical Engineering, 2014, 25(2): 210-214.

[8] DING W F, XU J H, CHEN Z Z, et al. Grindability and surface integrity of cast nickel-based super alloy in creep feed grinding with brazed CBN abrasive wheels[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2010, 23(4): 501-510.

[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]. Engineering Manufacture, 2015, 229(2): 238-250.

[10] 黄新春,张定华,姚倡锋,等. 镍基高温合金 GH4169 磨削参数对表面完整性影响[J]. 航空动力学报, 2013, 28(3): 621-628.

HUANG Xingchun, ZHANG Dinghua, YAO Changfeng, et al. Effect of grinding parameters on surface integrity of nickel-based superalloy GH4169[J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(3): 621-628.

[11] ZHOU Y G, GONG Y D, CAI M, et al. Study on surface quality and subsurface recrystallization of nical-based single-crystal superalloy in micro-grinding[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 90(5-8): 1749-1768.

[12] JU Y Q. Thermal aspects of grinding for surface integrity[D]. Indiana: Purdue University, 1997.

通讯作者: 张师奇, 硕士、工程师, 研究方向为材料加工, E-mail: zhang2309508@163.com.

(责编 古索)