

文章编号: 1674-8190(2023)01-073-08

# DD9镍基单晶高温合金磨削表面质量实验研究

靳淇超<sup>1</sup>, 刘红军<sup>2</sup>, 张世贵<sup>3</sup>, 蒋睿嵩<sup>4</sup>

(1. 长安大学 道路施工技术与装备教育部重点实验室, 西安 710064)

(2. 机械工业信息研究院 业务处, 北京 100037)

(3. 中国航发成都发动机有限公司 机匣厂, 成都 610503)

(4. 四川大学 机械工程学院, 成都 610065)

**摘要:** 涡轮叶片榫齿常采用磨削加工, 磨削工艺参数决定了其加工表面的质量和疲劳性能。基于正交试验研究磨削参数对第三代镍基单晶高温合金DD9磨削表面粗糙度及硬度的影响规律和机理。结果表明: 磨削表面粗糙度受砂轮线速度 $v_s$ 的影响最大, 工件进给速度 $v_w$ 对其的影响次之, 而受磨削深度 $a_p$ 的影响最小; 磨削表面出现加工硬化, 加工硬化程度在1.9%~13.8%之间, 亚表面硬化层深度在60~120  $\mu\text{m}$ 之间; 为获得粗糙度小、纹理均匀、硬化程度小的DD9高温合金磨削表面, 精加工推荐的磨削参数为 $v_s \in [20 \text{ m/s}, 25 \text{ m/s}]$ ,  $v_w \in [12 \text{ m/min}, 16 \text{ m/min}]$ ,  $a_p \in [10 \mu\text{m}, 15 \mu\text{m}]$ 。

**关键词:** DD9; 磨削; 表面粗糙度; 表面硬度; 微观形貌

**中图分类号:** V263.1<sup>+</sup>1; TG580.6

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.16615/j.cnki.1674-8190.2023.01.08

## Experimental study on grinding surface quality of DD9 nickel-based single crystal super-alloy

JIN Qichao<sup>1</sup>, LIU Hongjun<sup>2</sup>, ZHANG Shigui<sup>3</sup>, JIANG Ruisong<sup>4</sup>

(1. Key Laboratory of Road Construction Technology and Equipment of MOE, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

(2. Business Department, China Machinery Industry Information Institute, Beijing 100037, China)

(3. Casing Factory, AECC Chengdu Engine Co., Ltd., Chengdu 610503, China)

(4. School of Mechanical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** Turbine blade root are commonly processed by grinding, and the grinding process parameters determine the surface quality and fatigue performance. The effect and mechanism of grinding parameters are investigated on the surface roughness and hardness of third generation nickel-based single crystal super-alloy DD9 based on orthogonal experiment. The experimental results show that grinding surface roughness is mostly affected by the wheel speed  $v_s$ , followed by the workpiece feed  $v_w$ , the grinding depth  $a_p$  is few effects on the grinding surface roughness. The machining hardening is appeared at the grinding surface for grinding DD9, the hardening degree is ranged from 1.9% to 13.8%, and the depths of hardening layer are between 60 and 120  $\mu\text{m}$ . In order to obtain a surface with small surface roughness, uniform texture and small degree of hardening in grinding DD9 super-alloy, a grinding parameter scope is recommended as,  $v_s \in [20 \text{ m/s}, 25 \text{ m/s}]$ ,  $v_w \in [12 \text{ m/min}, 16 \text{ m/min}]$ ,  $a_p \in [10 \mu\text{m}, 15 \mu\text{m}]$ .

**Key words:** DD9; grinding; surface roughness; surface hardness; microtopography

收稿日期: 2022-02-24; 修回日期: 2022-05-26

基金项目: 国家科技重大专项(2017-I-0001-0070); 陕西省自然科学基金青年项目(2021JQ-284); 四川省科技计划项目(2021ZHCG0009)

通信作者: 蒋睿嵩, jiangrs@scu.edu.cn

引用格式: 靳淇超, 刘红军, 张世贵, 等. DD9镍基单晶高温合金磨削表面质量实验研究[J]. 航空工程进展, 2023, 14(1): 73-80, 150.

JIN Qichao, LIU Hongjun, ZHANG Shigui, et al. Experimental study on grinding surface quality of DD9 nickel-based single crystal super-alloy[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2023, 14(1): 73-80, 150. (in Chinese)

## 0 引言

DD9 合金是我国自主研发的第三代镍基单晶高温合金,具有优异的高温综合性能,被广泛应用于航空发动机高压涡轮叶片的生产<sup>[1-3]</sup>。单晶高温合金涡轮叶片主要采用熔模精密铸造工艺,基本可以实现叶片型面的无余量精密铸造成型,然而榫齿和缘板作为涡轮叶片与涡轮盘的安装定位结构,其预留余量需要机械加工,且对加工表面质量要求很高。磨削作为一种精密加工方式,可获得较高的表面质量和加工精度,常被用于航空航天高温合金材料的精密机械加工<sup>[4-6]</sup>。镍基高温合金作为一种典型的高强度、高韧性难加工材料,加工过程中易出现磨削温度高、砂轮磨损大等问题,导致磨削表面质量差,甚至发生烧伤,严重影响工件的机械性能和疲劳强度<sup>[7-8]</sup>。因此,有必要研究 DD9 单晶高温合金的磨削工艺性能和高质量磨削加工工艺。

国内外已针对镍基高温合金磨削机理与规律开展了广泛研究。张达<sup>[9]</sup>开展了二代镍基单晶高温合金 DD5 磨削性能研究,分析了各向异性对粗糙度、磨削力和表面变质层的影响规律,并比较了不同磨削润滑方式下磨削力、磨削温度、磨削表面质量;冯耀利<sup>[10]</sup>研究了磨削参数、磨削方式对 DD5 磨削力、表面质量、再结晶等方面的影响规律,并获得了最优工艺参数;靳淇超等<sup>[11]</sup>研究了 DD5 缓进磨削表面完整性形成机理,得到了工艺参数对表面完整性的影响规律,分析其形成机理,并通过工艺参数优化提出了 DD5 缓进磨削不同工况下的工艺参数;张帅奇等<sup>[12]</sup>基于实验研究了蠕动磨削工艺参数对 DD5 单晶高温合金磨削力和温度的影响规律,表明较小的磨削深度可避免磨削表面出现热力耦合影响层;Yao C F 等<sup>[13]</sup>研究了磨削参数对镍基高温合金 Inconel 718 磨削表面形貌、粗糙度的影响规律及亚表面组织、显微硬度分布和残余应力的分布情况,结果表明,相同工艺参数下,采用 SA 砂轮可以获得更好的表面,且磨削深度对 Inconel 718 表面加工质量影响较大;杨忠学等<sup>[14]</sup>对定向合金 IC10 缓进给磨削表面完整性进行了实验研究,结果表明,IC10 合金加工硬化现象较为突出,且磨削参数对硬度影响大小依次是磨削深度、砂轮线速度和工件进给速度,并指出磨削产生的白层和塑性变形是导致加工硬化的重要原因;

Miao Q 等<sup>[15]</sup>对比了四种镍基高温合金(变形高温合金 GH4169、等轴高温合金 K403、定向高温合金 DZ408 和单晶高温合金 DD6)的磨削性能和磨削表面完整性特征,发现四种材料按照 DD6、GH4169、K403 和 DZ408 的顺序磨削力增加而磨削比减小, GH4169、K403 和 DZ408 磨削中会导致砂轮磨损剧烈,而 DD6 磨削砂轮容易出现堵塞现象,四种材料磨削表面都会出现不同程度的热软化现象,磨削表面存在磨削痕迹、孔洞和表层材料撕裂和搭接,在亚表面存在微裂纹和严重的塑性变形;蔡明等<sup>[16]</sup>通过极差法和方差法分析了 CBN 砂轮磨削 DD5 合金工艺参数对表面质量的影响规律,发现砂轮线速度对表面粗糙度  $R_a$  影响最大,磨削深度对  $R_a$  影响最小,通过分析亚表面的微观组织变化,解释了镍基单晶合金磨削加工硬化的机理;孙杨等<sup>[17]</sup>研究了镍基单晶高温合金 DD98 材料的微磨削表面粗糙度和磨削力,在设定的工艺参数范围内,影响表面粗糙度的主要因素为磨削深度,其次为主轴转速,并提供了 DD98 微磨削最优参数组合。由于单晶不同于多晶材料,具有明显各向异性,残余应力研究主要通过有限元方法,采用无损检测技术仍有较大困难<sup>[18-19]</sup>。单晶高温合金材料强度高、耐高温,磨削亚表面塑性变形难以观察<sup>[20]</sup>,在强力磨削工况下观察小于  $3\ \mu\text{m}$  的亚微晶结构,当磨削力较小时磨削亚表面组织形态变化更小,且疲劳寿命对亚表面组织的敏感程度远小于对粗糙度的敏感性<sup>[21]</sup>。

综上所述,现阶段对于镍基高温合金磨削表面质量评价与控制的研究主要针对多晶高温合金及二代单晶,关于三代单晶磨削工艺的研究尚未见报道。为此,本文针对第三代单晶高温合金 DD9 磨削表面粗糙度、表面形貌及表层硬度的影响规律等方面展开研究,获得 DD9 单晶合金优化的磨削工艺参数。

## 1 实验设计与实施

### 1.1 实验设计

为研究第三代单晶高温合金 DD9 磨削工艺对表面质量的影响规律,开展磨削实验,磨削实验设计示意如图 1 所示。以磨削砂轮速度、工件进给、磨削深度为工艺因子设计正交试验,详细磨削工艺参数规划如表 1 所示。通过测试试件磨削表面

粗糙度、表面形貌、表层硬度研究工艺参数对磨削表面质量的影响规律。

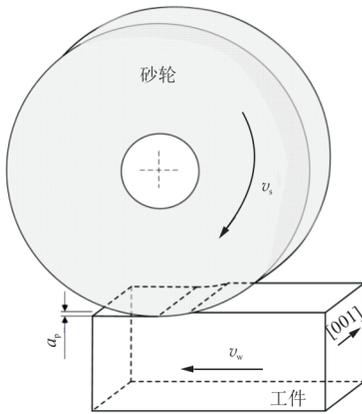


图 1 DD9磨削实验示意图  
Fig. 1 DD9 grinding experimental schematic

表 1 DD9磨削正交实验参数水平及真实值  
Table 1 The orthogonal experimental level and real value parameters for DD9 grinding

磨削工艺因子	磨削工艺水平及真实值			
	水平一	水平二	水平三	水平四
砂轮线速度 $v_s / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	10	15	20	25
工件进给速度 $v_w / (\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$	8	12	16	20
磨削深度 $a_p / \mu\text{m}$	10	15	20	25

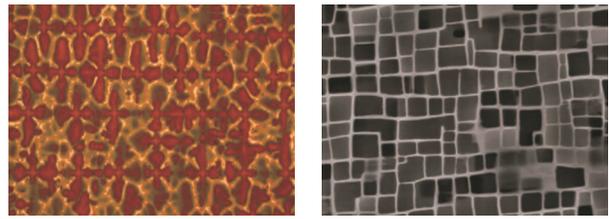
### 1.2 实验材料与试样

实验选取第三代单晶高温合金 DD9,其化学成分如表 2 所示。采用定向凝固技术获得 DD9 单晶铸件,并进行标准固溶处理<sup>[1]</sup>。

表 2 DD9合金主要化学成分<sup>[1]</sup>  
Table 2 Main elementary composition of DD9 superalloy<sup>[1]</sup>

成分	质量分数/%	成分	质量分数/%
Cr	3.500	Re	4.500
Co	7.000	Hf	0.100
Mo	2.000	Nb	0.500
W	6.500	C	0.008
Al	5.600	Ni	余量
Ta	7.500		

DD9合金固溶处理前后金相组织如图 2 所示。合金热处理前  $\gamma'$  相与  $\gamma/\gamma'$  共晶组织共存,通过固溶热处理快速冷却和两级时效,获得立方化程度高的  $\gamma'$  相组织<sup>[22]</sup>。



(a) DD9铸态组织 (b) DD9热处理态组织

图 2 DD9合金热处理前后微观组织  
Fig. 2 Microstructure of DD9 alloy before and after heat treatment

DD9镍基单晶高温合金试样如图 3 所示。热处理后的 DD9 合金坯锭如图 3(a)所示;为方便实验过程中试件装夹与定位,采用磨削方法加工沿 [001] 方向的四个面,再通过线切割获取磨削试样,如图 3(b)所示。



(a) DD9合金铸件



(b) DD9合金磨削试样切割

图 3 DD9镍基单晶高温合金试样  
Fig. 3 DD9 nickel-based single crystal superalloy sample

### 1.3 实验实施方案

磨削实验在 MM7120A 平面磨床上进行,采用 80#单晶刚玉(SA)砂轮,乳化液冷却,实验设备及砂轮如图 4 所示。



(a) MM7120A平面磨床 (b) SA80F13V砂轮

图 4 磨削实验条件  
Fig. 4 Grinding experiment situation

表面粗糙度测量采用 TR240 表面粗糙度测试仪,设置取样长度 0.5 mm,评定长度 2.5 mm。为了获得准确的表面粗糙度值,分别沿磨削方向和

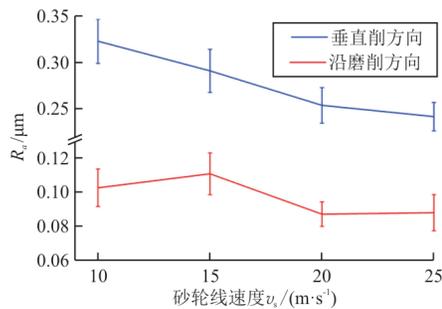
垂直磨削方向测量 5 个不同位置的表面粗糙度并求平均值。为进一步分析磨削表面质量,使用 Alicona 刀具扫描仪观察表面纹理;使用 Marsurf XT20 表面粗糙度测试分析仪观察三维形貌。使用 FEM-800 显微硬度测试仪测量磨削表面硬度,实验加载力为 50 gf (1 gf=0.009 8 N),保持载荷时间为 10 s。在磨削表面不同区域重复检测,以保证结果准确可靠。

## 2 实验结果与分析

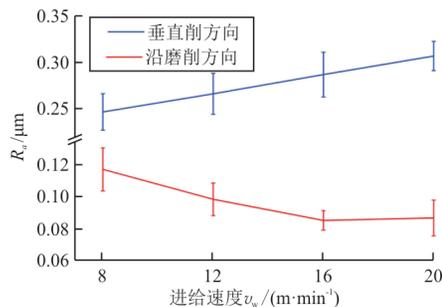
根据正交实验的测试结果,分别得到磨削工艺参数对应的磨削表面粗糙度、表面形貌、表层硬度,并分析工艺参数对其影响规律。

### 2.1 磨削表面粗糙度分析

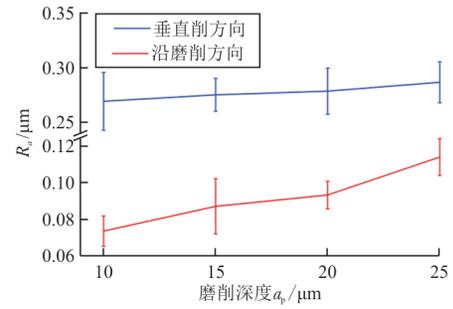
表面粗糙度是评价加工质量最重要的特征之一。基于正交试验研究磨削工艺参数对表面粗糙度影响规律,结果表明:在不同的磨削工艺参数下,垂直磨削方向粗糙度  $R_a$  在 0.241~0.322  $\mu\text{m}$  范围内,沿磨削方向粗糙度  $R_a$  在 0.087~0.117  $\mu\text{m}$  范围内,垂直磨削方向粗糙度大于沿磨削方向粗糙度。测试不同磨削工艺参数下磨削表面的粗糙度,得到不同工艺参数对表面粗糙度  $R_a$  的影响规律曲线如图 5 所示;同时为分析其形成机理,观测不同磨削工艺参数下表面纹理及缺陷(如图 6 所示)和表面三维形貌(如图 7 所示)。



(a)  $v_s - R_a$



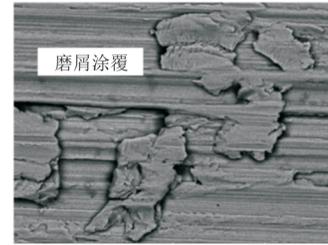
(b)  $v_w - R_a$



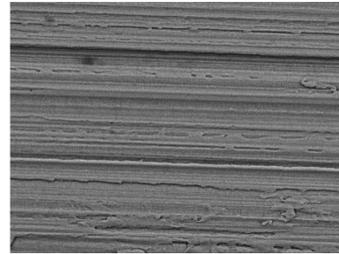
(c)  $a_p - R_a$

图 5 磨削工艺参数对 DD9 磨削表面粗糙度的影响

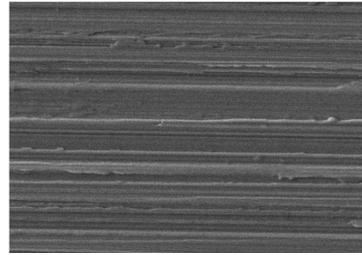
Fig. 5 Effect of grinding parameters on DD9 grinding surface roughness



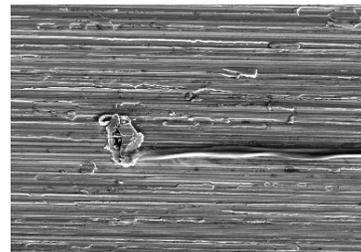
(a)  $v_s = 10 \text{ m/s}$ ,  $v_w = 16 \text{ m/min}$ ,  $a_p = 0.02 \text{ mm}$



(b)  $v_s = 25 \text{ m/s}$ ,  $v_w = 16 \text{ m/min}$ ,  $a_p = 0.015 \text{ mm}$



(c)  $v_s = 15 \text{ m/s}$ ,  $v_w = 8 \text{ m/min}$ ,  $a_p = 0.015 \text{ mm}$



(d)  $v_s = 20 \text{ m/s}$ ,  $v_w = 20 \text{ m/min}$ ,  $a_p = 0.015 \text{ mm}$

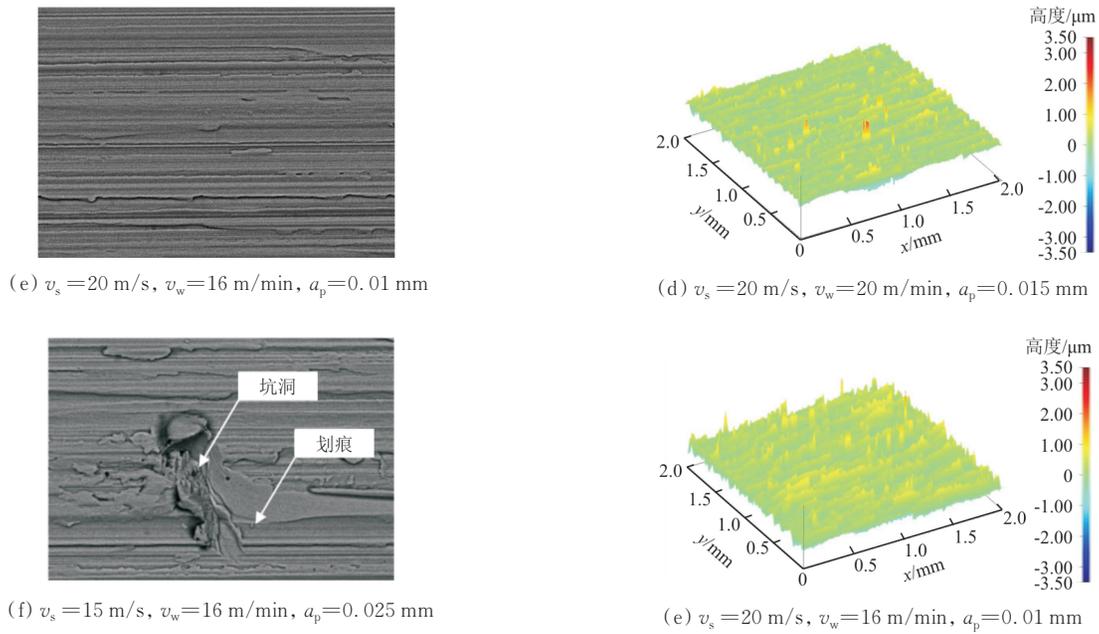


图 6 不同磨削工艺参数表面纹理和缺陷  
Fig. 6 surface texture and defect by different grinding process parameters

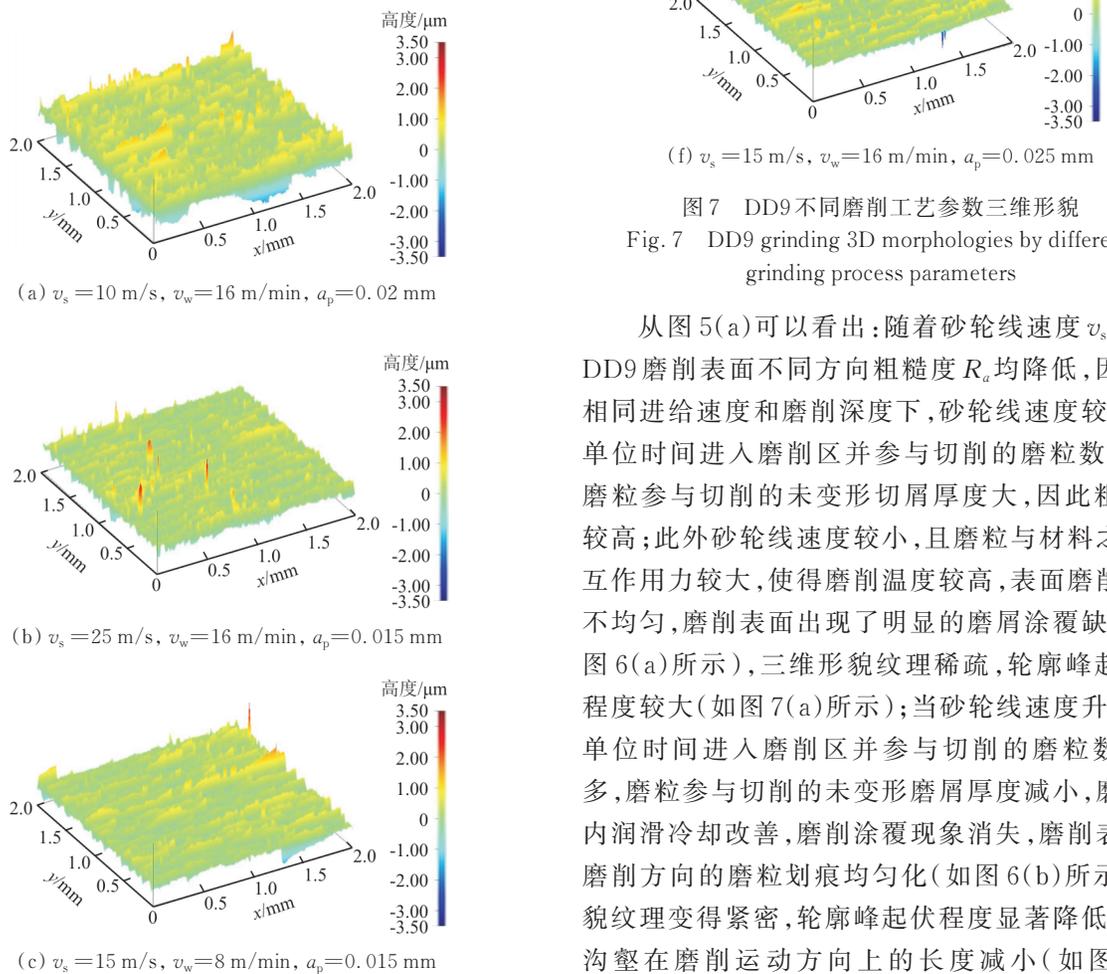


图 7 DD9不同磨削工艺参数三维形貌  
Fig. 7 DD9 grinding 3D morphologies by different grinding process parameters

从图 5(a)可以看出:随着砂轮线速度  $v_s$  升高, DD9磨削表面不同方向粗糙度  $R_a$  均降低,因为在相同进给速度和磨削深度下,砂轮线速度较低时,单位时间进入磨削区并参与切削的磨粒数目少,磨粒参与切削的未变形切屑厚度大,因此粗糙度较高;此外砂轮线速度较小,且磨粒与材料之间相互作用力较大,使得磨削温度较高,表面磨削纹理不均匀,磨削表面出现了明显的磨屑涂覆缺陷(如图 6(a)所示),三维形貌纹理稀疏,轮廓峰起伏的程度较大(如图 7(a)所示);当砂轮线速度升高时,单位时间进入磨削区并参与切削的磨粒数目增多,磨粒参与切削的未变形磨屑厚度减小,磨削弧内润滑冷却改善,磨削涂覆现象消失,磨削表面沿磨削方向的磨粒划痕均匀化(如图 6(b)所示),形貌纹理变得紧密,轮廓峰起伏程度显著降低,同时沟壑在磨削运动方向上的长度减小(如图 7(b))

所示)。

从图 5(b)可以看出:随着工件进给速度  $v_w$  的增大,沿磨削方向磨削表面粗糙度  $R_a$  降低而垂直磨削方向磨削表面粗糙度  $R_a$  升高;因为顺磨加工且工件进给速度较小时,在磨削弧末段,工件和砂轮相对运动速度高,表面磨削纹理较均匀,因此垂直磨削方向粗糙度较小,其表面纹理如图 6(c)所示,磨削纹理细密清晰;磨削表面轮廓波动小,如图 7(c)所示;增大工件进给速度,在磨削弧末段,工件和砂轮相对运动速度降低,磨削表面切削痕呈短宽状,磨削材料去除率升高,砂轮磨粒切削效应增强,磨削力和温度均升高,因此垂直磨削方向粗糙度增加而沿磨削方向粗糙度减小,磨削表面出现轻微的涂覆和划痕缺陷,如图 6(d)所示;磨削表面不平度增大,轮廓波动大,出现更多的棱脊和凸起,其峰值幅度增大,表面质量变得更差,出现表面凹坑,如图 7(d)所示。

从图 5(c)可以看出:随着磨削深度  $a_p$  的增大,磨削表面粗糙度  $R_a$  也增大,单磨粒切削深度增大,磨粒参与切削的未变形切屑厚度和长度均增大,塑性变形程度增加,磨削弧长增大导致冷却液难以进入磨削弧,磨削弧冷却润滑不足,表面粗糙度  $R_a$  增大,此规律与磨削深度对 DD5 合金磨削表面粗糙度的影响规律<sup>[11]</sup>相一致。当磨削深度为 0.01 mm 时,磨削表面纹理较均匀,表面未发生涂覆现象,如图 6(e)所示;三维形貌显示磨削表面轮廓波动较小,如图 7(e)所示,当磨削深度为 0.025 mm 时,表面因磨粒耕犁划擦产生的耕犁划痕更加明显,划痕两侧材料隆起明显,并出现了划痕和凹坑缺陷,如图 6(f)所示;三维形貌显示磨削表面轮廓波动增大,表面出现微裂纹和少量划痕,如图 7(f)所示。

通过实验结果分析表明,DD9 镍基单晶高温合金磨削表面粗糙度受到砂轮线速度  $v_s$  的影响最大,工件进给速度  $v_w$  对其的影响次之,而其受到磨削深度  $a_p$  的影响最小。因此,为获得较低 DD9 的表面粗糙度,应优先选用较高的磨削速度和较小的进给速度。与二代单晶 DD5 蠕变磨削相比较,工艺参数对表面粗糙度、纹理、形貌的影响规律相类似;然而因工件进给速度和磨削深度差异非常

大,磨削弧内磨粒切削效应也不相同,磨削表面粗糙度存在明显差异,DD5 缓进磨削表面粗糙度在 0.56~0.74  $\mu\text{m}$  之内<sup>[11]</sup>,而 DD9 平面磨削表面粗糙度在 0.24~0.32  $\mu\text{m}$  之内,DD9 平面磨削表面纹理和形貌也更加致密光滑。

## 2.2 磨削表面硬度分析

磨削表层显微硬度能够反映表层硬度相对于基体硬度的变化趋势,是反映磨削热力耦合效应对材料切削加工表面层硬度影响程度的衡量指标。基于 DD9 镍基单晶高温合金磨削正交实验结果,分析砂轮线速度  $v_s$ 、工件进给速度  $v_w$  和磨削深度  $a_p$  对磨削表面层硬化程度的影响规律曲线;毛坯基体硬度在 420~440 HV 之间,结果表明磨削表面出现了明显的加工硬化现象,硬化程度通常采用硬化率表示,即:

$$h = \frac{H - H_0}{H_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $h$  为硬化率; $H$  为测试硬度值; $H_0$  为材料基体硬度值。

不同工艺参数对表面硬化程度的影响如图 8 所示。砂轮线速度  $v_s$  对表层硬化程度的影响规律如图 8(a)所示,可以看出:表面相对基体的硬化程度随着砂轮线速度  $v_s$  的增大,其硬化程度从 11.07% 降到 4.01%。磨削表层硬度因为磨削过程中的相互作用产生的磨削力使表层材料产生塑性变形等,从而造成其硬度增大,出现加工硬化现象。然而磨削同时伴随着大量热量的产生,从而产生磨削热,造成表层出现软化现象。砂轮线速度的增大会使磨削力减小,而磨削热会增大。在本实验中,当砂轮线速度增大时,磨削力减小,磨削热增大,但工件表面仍然表现为加工硬化现象,说明 DD9 磨削过程中,磨削力对硬度的变化起主要作用。

不同工件进给速度  $v_w$  对表层硬化程度的影响规律如图 8(b)所示,可以看出:随着工件进给速度  $v_w$  的变化,其表层硬化程度变化在 6.64%~7.87% 范围内,其硬化程度变化较小,因此工件进给速度对磨削表层硬度影响较小。

不同磨削深度  $a_p$  对表层硬化程度的影响规律

如图8(c)所示,可以看出:硬化程度随着磨削深度 $a_p$ 的增加,从6.46%增长到11.24%。磨削力和磨削温度随着磨削深度的增加都会增大,但是磨削力在加工过程中工件表层硬化和软化过程中起到主导作用,其综合表现仍然为加工硬化现象。

与二代单晶DD5缓进磨削表面硬化程度相比,工艺参数对表面硬度的影响规律大致相同;然而DD9平面磨削表面硬度受砂轮线速度影响最大,而DD5缓进磨削表面硬度受磨削深度影响最大<sup>[11]</sup>,这是由于不同磨削工艺造成砂轮与工件在接触弧内状态差异,如磨削接触弧长度、冷却润滑状态、单磨粒切削深度等不同。

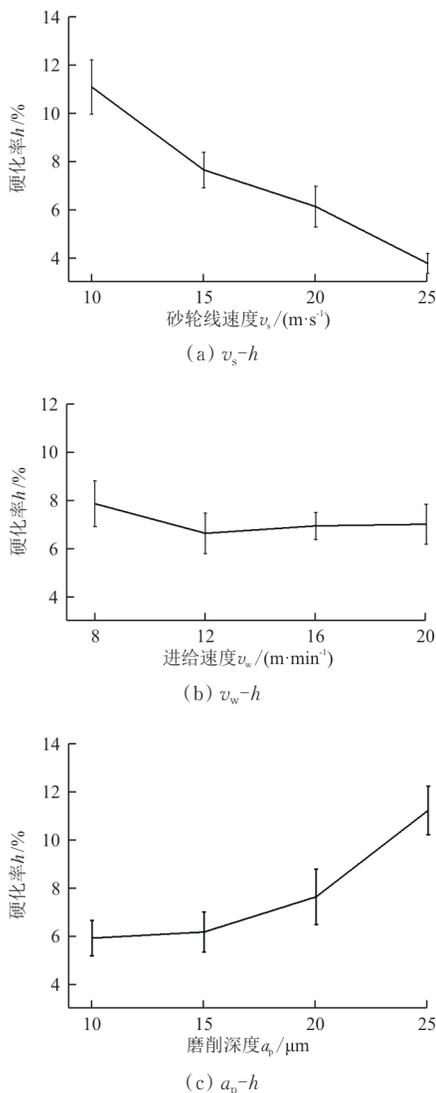


图8 磨削工艺参数对表面硬化程度的影响  
Fig. 8 Influence of grinding parameters on surface microhardness ratio

热力耦合作用下DD9磨削亚表面硬度也会发生变化,基于表面硬化程度规律选择三组工艺试件,测量磨削亚表面硬化层分布状态,如图9所示。由于磨削进给速度对表面硬化影响较小,可以忽略。可以看出:当磨削深度由10  $\mu\text{m}$ 增加到25  $\mu\text{m}$ 时,DD9磨削表层硬化程度加剧,硬化层深度约由60  $\mu\text{m}$ 增加到120  $\mu\text{m}$ ;当砂轮速度由10 m/s增加到25 m/s时,DD9磨削表层硬化程度降低,硬化层深度约由120  $\mu\text{m}$ 降低到75  $\mu\text{m}$ 。与二代单晶DD5缓进磨削表面硬化层比较,DD9平面磨削表面硬度和硬化层深度略高<sup>[11]</sup>,表明DD9更难加工。

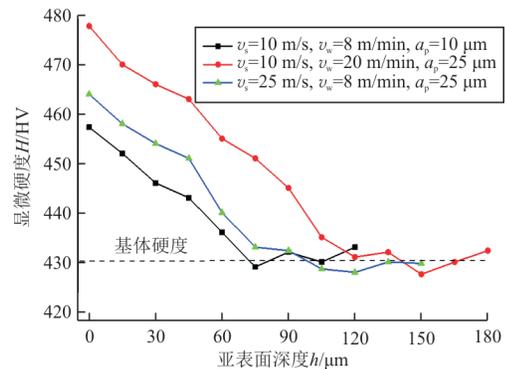


图9 不同工艺参数硬度沿磨削深度方向变化  
Fig. 9 Microhardness variation of different process parameters along the direction of grinding depth

通过实验结果分析表明,DD9镍基单晶高温合金磨削表面硬化程度受砂轮线速度 $v_s$ 和磨削深度 $a_p$ 的影响最大,工件进给速度 $v_w$ 对其的影响较小。

### 3 结 论

(1) 在磨削参数范围内,垂直磨削方向粗糙度 $R_a$ 在0.241~0.322  $\mu\text{m}$ 范围内,沿磨削方向粗糙度 $R_a$ 在0.087~0.117  $\mu\text{m}$ 范围内。磨削表面粗糙度受到砂轮线速度 $v_s$ 的影响最大,工件进给速度 $v_w$ 对其的影响次之,而其受到磨削深度 $a_p$ 的影响最小。

(2) DD9单晶高温合金磨削表面出现加工硬化现象,磨削表面加工硬化程度在4.7%~18.0%之间,磨削亚表面硬化层深度在60~120  $\mu\text{m}$ 之间;砂轮线速度较小或磨削深度较大时,加工硬化现

象尤为明显。

(3) 为获得粗糙度小、纹理均匀、硬化程度小的 DD9 单晶高温合金磨削表面, 应选用较大的砂轮速度。根据本文实验结果, 推荐 DD9 磨削工艺参数域为:  $v_s \in [20 \text{ m/s}, 25 \text{ m/s}]$ ,  $v_w \in [12 \text{ m/min}, 16 \text{ m/min}]$ ,  $a_p \in [10 \mu\text{m}, 15 \mu\text{m}]$ 。

### 参考文献

- [1] LI J R, LIU S Z, WANG X G, et al. Development of a low-cost third generation single crystal superalloy DD9 [C]// Proceedings of the 13th International Symposium of Superalloys. USA: TMS, 2016: 57-63.
- [2] YANG W P, LI J R, LIU S Z, et al. Orientation dependence of transverse tensile properties of nickel-based third generation single crystal superalloy DD9 from 760 to 1100 °C [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2019, 29(3): 558-568.
- [3] SHI Z X, LIU S Z, WANG X G, et al. Hot-gas corrosion resistance of DD9 single crystal superalloy[J]. Materials Science Forum, 2016, 849: 463-467.
- [4] 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): 201-227.
- DING Wenfeng, MIAO Qing, LI Benkai, et al. Review on grinding technology of nickel-based superalloys used for aero-engine[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(1): 201-227. (in Chinese)
- [5] EZUGWU E O. Key improvements in the machining of difficult-to-cut aerospace superalloys [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2005, 45(12/13): 1353-1367.
- [6] THAKUR A, GANGOPADHYAY S. State-of-the-art in surface integrity in machining of nickel-based superalloys [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2015, 100: 25-54.
- [7] ROWE W B. Principles of modern grinding technology [M]. Norwich: William Andrew Pub., 2014: 365.
- [8] 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: 44.
- REN Jingxin, KANG Renke, WANG Xibin. Grinding technology for refractory materials [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011: 44. (in Chinese)
- [9] 张达. 镍基单晶高温合金的磨削性能及织构砂轮磨削试验研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2021.
- ZHANG Da. Experimental study on grinding properties of nickel base single crystal superalloy and grinding with textured wheel[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2021. (in Chinese)
- [10] 冯耀利. 镍基单晶高温合金磨削加工工艺与质量影响因素研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2017.
- FENG Yaoli. Research on grinding process and quality influencing factors of nickel-based single crystal superalloy [D]. Shenyang: Northeastern University, 2017. (in Chinese)
- [11] 靳洪超, 曹帅帅, 汪文虎, 等. DD5 镍基单晶高温合金缓进磨削表面完整性研究[J]. 西北工业大学学报, 2022, 40(1): 189-198.
- JIN Qichao, CAO Shuaishuai, WANG Wenhui, et al. Study on surface integrity of DD5 nickel-based single crystal super-alloy in creep-feed grinding[J]. Journal of Northwestern Ploytechnical University, 2022, 40(1): 189-198. (in Chinese)
- [12] 张帅奇, 杨忠学, 张长春, 等. DD5 镍基单晶高温合金缓进磨削力和温度实验研究[J]. 航空工程进展, 2021, 12(4): 80-89.
- ZHANG Shuaiqi, YANG Zhongxue, ZHANG Changchun, et al. Experimental research on grinding forces and temperature of DD5 nickel-based single crystal super-alloy by creep-feed grinding[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2021, 12(4): 80-89. (in Chinese)
- [13] YAO C F, JIN Q C, HUANG X C, et al. Research on surface integrity of grinding Inconel 718[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 65(5/8): 1019-1030.
- [14] 杨忠学, 张帅奇, 张强. IC10 定向凝固高温合金缓进给磨削表面完整性研究[J]. 航空制造技术, 2019, 62(6): 62-70.
- YANG Zhongxue, ZHANG Shuaiqi, ZHANG Qiang. Surface integrity of IC10 directionally solidified superalloy in creep feed grinding [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(6): 62-70. (in Chinese)
- [15] MIAO Q, DING W, KUANG W, 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, 2019, 49: 175-186.
- [16] 蔡明, 巩亚东, 屈硕硕, 等. 镍基单晶高温合金磨削表面质量及亚表面微观组织试验[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2019, 40(3): 85-90.
- CAI Ming, GONG Yadong, QU Shuoshuo, et al. Experiment of grinding surface quality and subsurface microstructure for nickel-based single crystal superalloy[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2019, 40(3): 85-90. (in Chinese)
- [17] 孙杨, 巩亚东, 周云光, 等. 单晶材料微磨削表面粗糙度与磨削力实验研究[J]. 机械设计与制造, 2018(4): 122-128.
- SUN Yang, GONG Yadong, ZHOU Yunguang, et al. Experimental study on surface roughness and grinding force of signal crystal DD98 in micro-grinding [J]. Machinery Design & Manufacture, 2018(4): 122-128. (in Chinese)
- [18] 张俊. 镍基单晶高温合金的残余应力衍射测试与分析[D]. 沈阳: 中国科学院金属研究所, 2007.
- ZHANG Jun. Measurement and analysis of residual stress in