

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.01.003

定向凝固高温合金 IC10 缓进磨削表面粗糙度研究

靳淇超¹, 包虎子¹, 张帅奇², 杨忠学², 张锦淇¹, 叶子银¹, 郭磊¹, 蒋睿嵩³

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

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;

3. 四川大学 机械工程学院, 四川 成都 610065)

摘 要:为控制涡轮叶片榫齿表面粗糙度, 基于实验研究磨削参数对定向凝固高温合金 IC10 缓进磨削表面粗糙度的影响规律。结果表明:在实验参数范围内, 垂直于磨削方向表面粗糙度为 $0.40 \sim 1.68 \mu\text{m}$, 沿磨削方向表面粗糙度为 $0.08 \sim 0.28 \mu\text{m}$; 增大砂轮线速度而减小工件进给速度和磨削深度都能降低磨削表面轮廓峰起伏程度, 使磨削表面坑洞缺陷密度和划擦痕迹明显程度降低。为获得更好的表面质量, 推荐磨削参数为 $v_s = 36 \text{ m/s}$, $v_w = 50 \text{ mm/min}$, $a_p = 0.1 \text{ mm}$ 。

关键词:IC10 合金; 缓进磨削; 表面粗糙度; 表面形貌; 表面纹理

中图分类号:TG580.6 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2025)01-0011-05

Study on Surface Roughness of Directionally Solidified Superalloy IC10 in Creep Grinding

JIN Qichao¹, BAO Huzi¹, ZHANG Shuaiqi², YANG Zhongxue², ZHANG Jinqi¹, YE Ziyin¹, GUO Lei¹, JIANG Ruisong³

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

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

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

Abstract:To control the surface roughness of tenon teeth of turbine blades, the effect of machining parameters on the roughness of directionally solidified superalloy IC10 in creep grinding was studied based on experiments. The results show that the surface roughness perpendicular to the grinding direction is $0.40 \sim 1.68 \mu\text{m}$ within the range of experimental parameters, the surface roughness along the grinding direction is $0.08 \sim 0.28 \mu\text{m}$. Increasing the linear speed of the grinding wheel and decreasing the feed speed and grinding depth of the workpiece can reduce the undulation degree of the grinding surface profile peak, so that the density of the grinding surface pits and scratches can be significantly reduced. Grinding parameters of $v_s = 36 \text{ m/s}$, $v_w = 50 \text{ mm/min}$, $a_p = 0.1 \text{ mm}$ are recommended for obtaining better surface quality.

Keywords:IC10 alloy; creep grinding; surface roughness; surface topography; surface texture

0 引言

IC10 是一种定向凝固镍铝基高温合金, 拥有良好的力学性能和耐高温性能, 是涡轮叶片成形材料之一。叶片形面采用精密铸造成形, 榫齿作为叶片在轮盘上装夹定位零件, 精密铸造成型后仍需要通过成形铣削和磨削等机械加工以保证精度。由于铣削等方式切削难度较大, 常用磨削代替铣削进行榫齿加工。缓进磨削是在高速磨削后发展起来的大磨削深度、小工件进给速度的先进磨削方式, 具有加工工艺简单、磨削精度高等优

点^[1]。IC10 高温合金的导热性差与各向异性等特点, 使其成为一种典型的难加工材料, 因此有必要研究磨削参数对 IC10 缓进磨削表面粗糙度的影响规律并分析其机制。

针对高温合金磨削机制, 国内外研究人员开展了广泛研究。黄新春等^[2]研究了磨削参数对镍基高温合金 GH4169 表面完整性的影响规律, 指出表面粗糙度对工件进给速度变化最敏感。傅玉灿等^[3]研究了高温合金 DZ125 高效深切磨削表面显微硬度形成规律, 结果表明工件表层加工硬化程度为 $7.7\% \sim 19\%$, 深度为 $40 \mu\text{m}$; 材料最大平

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(2021YFG0049; 2021ZHCG0009)

第一作者简介:靳淇超(1986—), 男, 陕西汉中, 工程师, 博士, 研究方向为精密成形工程与机械加工表面完整性, jinqichao@chd.edu.cn。

均去除率不会因其磨削纹理皱叠及犁沟两侧翻起;表层未发现相变和晶粒扭曲现象。靳淇超等^[4]指出磨削深度和工件进给速度对垂直磨削方向的磨削凹槽和隆起长度影响较大。孙超等^[5]揭示了磨削压力和磨削参数对高温合金 GH4169 表面粗糙度的影响规律,结果表明 60 N 的磨削压力、1 Hz 的振动频率、34 m/s 的砂带线速度能得到表面粗糙度的最优值为 0.072 μm 。ZENG 等^[6]基于单因素实验研究了磨削深度对 GH4169 平面磨削表面完整性的影响规律,结果表明磨削深度对表面完整性的影响较大,小磨削深度能产生更低的残余应力和表面显微硬度;磨削深度合理时不会出现严重的显微组织变化。WANG 等^[7]研究了砂带速度对镍基高温合金 Inconel 718 砂带磨削表面残余应力的影响,结果表明砂带速度为 31 m/s 时残余压应力较大,约 355 MPa,同时此砂带速度下的表面粗糙度最小。LI 等^[8]研究了磨削深度对颗粒增强钛基复合材料缓进磨削表面显微硬度和残余应力的影响,指出显微硬度与残余应力对磨削深度变化较敏感。杜随更等^[9]研究了 GH4169 磨削表面变质层形成机制,结果表明 GH4169 磨削表面及亚表面发生了局部剧烈塑性变形,微型剪切带位于表面层和纳米晶层之间,平行于磨削表面,其内组织完全非晶化。蔡明等^[10]研究了磨削参数对高温合金 DD5 磨削表面粗糙

度影响规律,得出结论为表面粗糙度对砂轮线速度变化最敏感。白洋^[11]基于极差法比较了各磨削参数对镍基高温合金磨削表面粗糙度的影响程度大小,指出砂轮线速度对表面粗糙度的影响程度大于工件进给速度。ZHU 等^[12]研究了磨削参数对 IC10 缓进磨削表面质量的影响,结果表明较大的工件速度或磨削深度会引起沟槽等表面缺陷。

综上所述,现阶段对于高温合金磨削表面质量的研究主要针对镍基单晶高温合金,且研究对象基本集中在表面完整性中的表面粗糙度指标上,关于新型镍铝高温合金的研究较少。本文针对磨削参数对 IC10 缓进磨削表面完整性影响规律开展研究,为棒齿磨削提供工艺理论基础。

1 实验部分

1.1 实验材料

实验使用的材料为定向凝固高温合金 IC10,是一种定向凝固的镍铝高温合金,因具有良好的力学性能和耐高温性能,使其在航空领域有很大的应用潜力,但 IC10 合金同时是一种典型的难加工材料,其质量分数如表 1 所示。将定向凝固后的试块进行热处理,热处理后的显微组织如图 1 所示。可以看到,经过热处理后, γ' 加强相体积分数较大。

表 1 IC10 高温合金质量分数组成

单位:%

C	Co	Cr	Al	W	Mo	Ta	Hf	B	Ni
0.07~0.12	11.50~12.50	6.50~7.50	5.60~6.20	4.70~5.20	1.00~2.00	6.50~7.50	1.00~2.00	0.01~0.02	其余

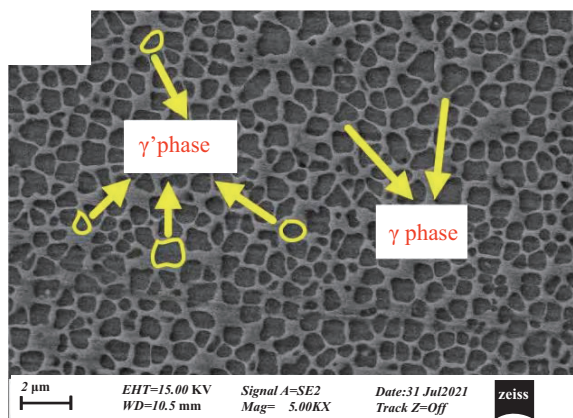


图 1 IC10 热处理后合金微观组织

1.2 实验方法及过程

磨削实验包含砂轮线速度 v_s 、工件进给速度

v_w 与磨削深度 a_p 3 个参数。对缓进磨削而言,磨削深度是普通磨削的 100~1 000 倍,而工件进给速度缓慢,比普通磨削降低了大约相同的倍数。常见的几种磨削方式的参数水平如表 2 所示。

表 2 常见磨削方式的各磨削参数

磨削方式	砂轮线速度 $v_s / (\text{m/s})$	工件进给速度 $v_w / (\text{mm/min})$	磨削深度 a_p / mm
普通磨削	12~40	1 000~15 000	0.001~0.050
高速磨削	60~200	1 000~15 000	0.003~0.050
缓进磨削	12~40	50~500	0.100~30.000

由表 2 可知,缓进磨削各参数范围为: $v_s \in [12, 40]$ 、 $v_w \in [50, 500]$ 、 $a_p \in [0.100, 30.000]$,为使参数水平尽可能满足上述范围,同时考虑实验

所用磨床条件,设计如表 3 所式的正交实验,研究磨削参数对表面粗糙度影响规律。

表 3 实验参数

参数	磨削工艺因子水平			
砂轮线速度 $v_s/(m/s)$	12	20	28	36
工件进给速度 $v_w/(mm/min)$	50	150	250	350
磨削深度 a_p/mm	0.1	0.4	0.7	1.0

磨削实验在 BC15 蠕动磨床上进行,砂轮使用铬刚玉和白刚玉的混合磨料砂轮,粒度 80,磨削过程采用乳化液进行冷却,磨床及砂轮如图 2 所示。

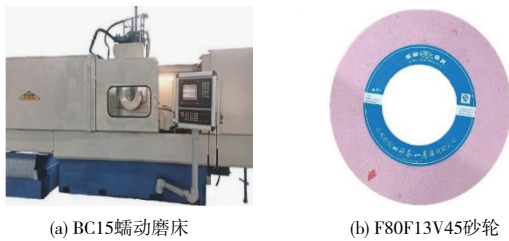


图 2 实验设备

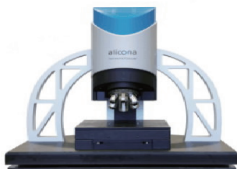
表面粗糙度检测采用 Marsurf XT20 粗糙度仪检测,取样长度为 0.6 mm,评定长度为 2.6 mm,测量表面粗糙度时,先在零件磨削表面垂直磨削方向选择 5 个点检测表面粗糙度并求取平均值,并用同样的方法检测沿磨削方向表面粗糙度值。三维形貌和表面纹理分别采用 NT1100 三维表面轮廓仪和 Infinite Focus System G4 全自动刀具测量仪检测,在磨削表面多个位置检测以减小测量误差的影响,相关检测仪器如图 3 所示。



(a) Marsurf XT20 表面粗糙度仪



(b) NT1100 三维表面轮廓仪



(c) IFM G4 全自动刀具测量仪

图 3 检测仪器

2 结果与讨论

2.1 表面粗糙度研究

磨削过程包括 3 个阶段:磨削开始时,磨粒对零件表面有划擦作用,此时没有塑性变形;随着磨削过程的进行,进入耕犁阶段,在耕犁阶段经过塑性变形的材料被磨屑推向前方和侧面,导致工件表面材料隆起;在切削阶段磨粒推动材料流动并形成沟壑,最终滑出磨屑。由此过程可知,磨削表面会留下材料去除痕迹,表面粗糙度用于定量表征去除痕迹几何特性,直接影响零件的服役性能。

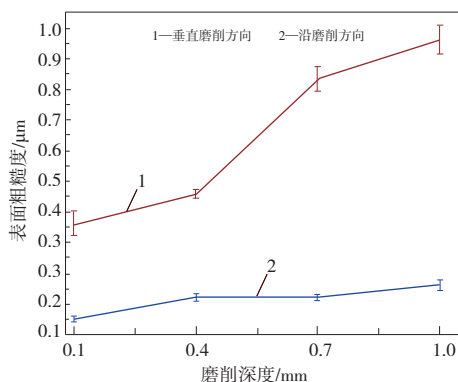
IC10 缓进磨削表面粗糙度实验结果如表 4 所示。

表 4 IC10 缓进磨削表面粗糙度结果

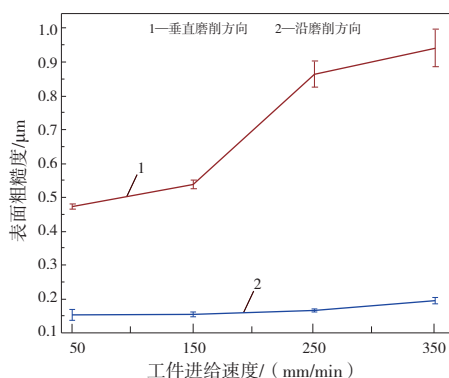
砂轮线速度 $v_s/(m/s)$	工件进给速度 $v_w/(mm/min)$	磨削深度 a_p/mm	表面粗糙度 $Ra/\mu m$	
			垂直磨削方向	沿磨削方向
12	50	0.1	0.41	0.08
12	150	0.4	0.49	0.11
12	250	0.7	1.28	0.14
12	350	1.0	1.68	0.28
20	50	0.4	0.45	0.16
20	150	0.1	0.40	0.13
20	250	1.0	1.18	0.16
20	350	0.7	1.15	0.23
28	50	0.7	0.54	0.13
28	150	1.0	0.71	0.18
28	250	0.1	0.44	0.12
28	350	0.4	0.54	0.19
36	50	1.0	0.49	0.23
36	150	0.7	0.56	0.19
36	250	0.4	0.55	0.23
36	350	0.1	0.40	0.08

图 4 展示了表面粗糙度随磨削参数的变化趋势。在实验参数范围内,垂直磨削方向表面粗糙度为 0.40 ~ 1.68 μm ,沿磨削方向表面粗糙度为 0.08 ~ 0.28 μm ,垂直于磨削方向表面粗糙度远大于沿磨削方向表面粗糙度。垂直磨削方向与沿磨削方向表面粗糙度值皆与磨削深度、工件进给速度呈正相关的变化关系;当砂轮线速度增大时,垂

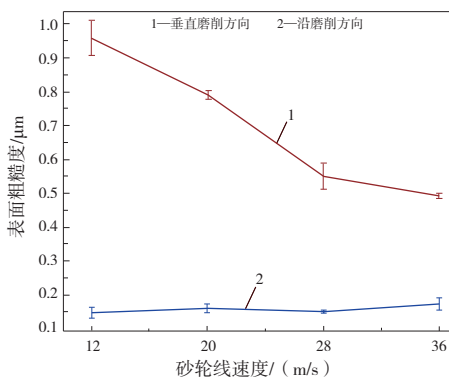
直磨削方向表面粗糙度降低,而沿磨削方向表面粗糙度呈波动变化。



(a) 磨削深度对表面粗糙度的影响



(b) 工件进给速度对表面粗糙度的影响



(c) 砂轮线速度对表面粗糙度的影响

图4 不同磨削参数下的表面粗糙度

图4(a)为不同磨削深度下的表面粗糙度值,当磨削深度增大时,表面粗糙度升高。由于磨削深度的增大使磨削力升高,使得磨粒更容易从砂轮脱落,脱落的磨粒在砂轮挤压下加剧了表面质量变差,同时对单颗磨粒而言,其一次要去除的材料厚度也相应增大,因此表面粗糙度升高。图4(b)展示了工件进给速度对表面粗糙度的影响规律,随着工件进给速度增大,表面粗糙度升高。这是因为当工件进给速度增大时,去除相同材料所参与的磨粒减少,分析一颗磨粒的话,其所

要去除的材料厚度也增大,随之产生的较大磨屑塑性变形引起了磨削力升高,砂轮磨损加剧,因此表面粗糙度升高。图4(c)反映了砂轮线速度对表面粗糙度的影响规律,随着砂轮线速度增大,垂直磨削方向表面粗糙度降低,沿磨削方向表面粗糙度呈波动变化。当砂轮线速度增大时,一颗磨粒所去除材料的厚度随磨削弧区内磨粒数的增多而降低,磨屑塑性变形减少,磨削力降低,垂直磨削方向表面粗糙度降低。砂轮转速的增大使磨削液进入磨削弧区更困难,因此沿磨削方向表面粗糙度在磨屑塑性变形减少和冷却润滑条件变差两种作用交互影响下波动变化。

采用极差分析比较各磨削参数对表面粗糙度影响程度(用极差指标 R 进行表征)的大小。由表4可知,垂直磨削方向表面粗糙度远大于沿磨削方向,故只比较各磨削参数对垂直磨削方向表面粗糙度的影响程度大小,极差分析结果如表5所示。

表5 极差分析结果

参数	砂轮线速度/ (m/s)	工件进给速度/ (mm/min)	磨削深度/ mm
K_1	3.86	1.89	1.65
K_2	3.18	2.16	2.03
K_3	2.23	3.45	3.53
K_4	2.00	3.77	4.06
$\bar{K}_1$	0.965 0	0.472 5	0.412 5
$\bar{K}_2$	0.795 0	0.540 0	0.507 5
$\bar{K}_3$	0.557 5	0.862 5	0.882 5
$\bar{K}_4$	0.500 0	0.942 5	1.015 0
R	0.465 0	0.470 0	0.602 5

由极差分析结果可知,各磨削参数的极差参数 R 分别为0.465 0、0.470 0、0.602 5,故磨削深度对IC10缓进磨削表面粗糙度影响程度最大,其次是工件进给速度,砂轮线速度影响程度最小。为获得较小的表面粗糙度,推荐磨削参数分别为 $v_s = 36 \text{ m/s}$, $v_w = 50 \text{ mm/min}$, $a_p = 0.1 \text{ mm}$ 。

2.2 表面形貌研究

表面形貌更能反映磨削表面几何特性,磨削参数对磨削表面形貌的影响如图5所示。图5(a)—图5(b)展示了磨削深度对表面形貌的影响规律,当磨削深度为1.0 mm时,最大波峰高度为 $2.57 \mu\text{m}$,最大波谷深度为 $3.42 \mu\text{m}$ 。轮廓峰

起伏程度较大,形貌纹理变得稀疏。磨削深度减小到 0.1 mm 时,最大波峰高度为 $2.07\text{ }\mu\text{m}$,最大波谷深度为 $2.80\text{ }\mu\text{m}$,轮廓峰起伏程度变小,形貌纹理比较紧密。图 5(b)—图 5(c)反映了工件进给速度对表面形貌的影响规律,工件进给速度为 350 mm/min 时,最大波峰高度为 $2.52\text{ }\mu\text{m}$,最大波谷深度为 $3.30\text{ }\mu\text{m}$,轮廓峰起伏程度增大,形貌纹理较稀疏,工件进给速度减小到 50 mm/min 时,形貌纹理紧密,轮廓峰起伏程度较小。图 5(d)—图 5(e)反映了砂轮线速度对表面形貌的影响规律,在砂轮线速度由 12 m/s 增大到 36 m/s 的变化过程中,三维形貌的最大波峰高度和最大波谷深度无明显变化,但形貌稀疏程度减小,沿磨削方向的沟壑长度减小。

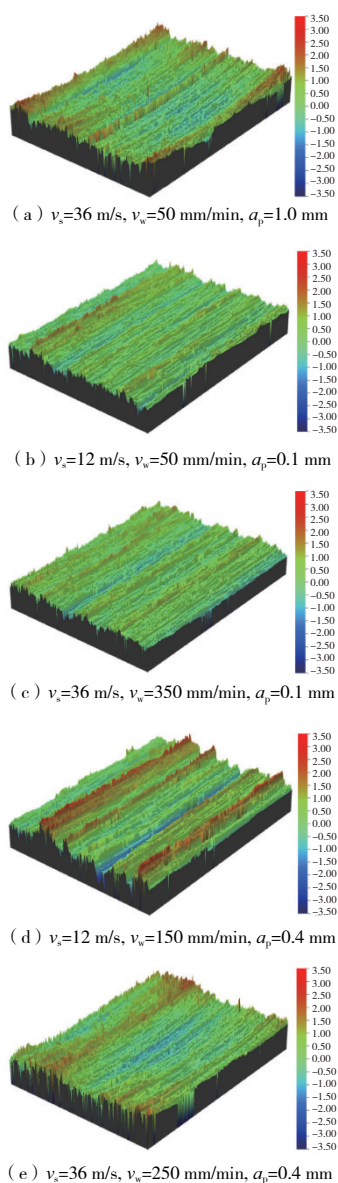


图 5 不同磨削工艺参数的三维形貌

2.3 表面纹理研究

为进一步分析表面粗糙度变化机制,观测不同磨削工艺参数下的表面纹理及缺陷,磨削工艺参数对三维形貌影响如图 6 所示。图 6(a)—图 6(b)反映了磨削深度对表面纹理影响规律,随着磨削深度的减小,磨削表面纹理变得均匀,磨削划痕程度明显降低,坑洞缺陷密度减小,烧伤程度降低。这是因为磨削深度降低使磨削弧长减小,磨削液进入磨削弧区更加容易。图 6(b)—图 6(c)展示了表面纹理随工件进给速度的变化情况,随工件进给速度减小,磨削纹理均匀程度提高,不再有明显烧伤痕迹。图 6(d)—图 6(e)反映了砂轮线速度对表面纹理的影响规律,当采用较小的砂轮线速度和较小的工件进给速度时,划擦痕迹比较明显,磨削纹理不均匀程度较大,坑洞缺陷密度较大。采用较大的砂轮线速度和较大的进给速度时,划擦痕迹程度明显有所降低,磨削纹理逐渐均匀化,坑洞缺陷密度减小。

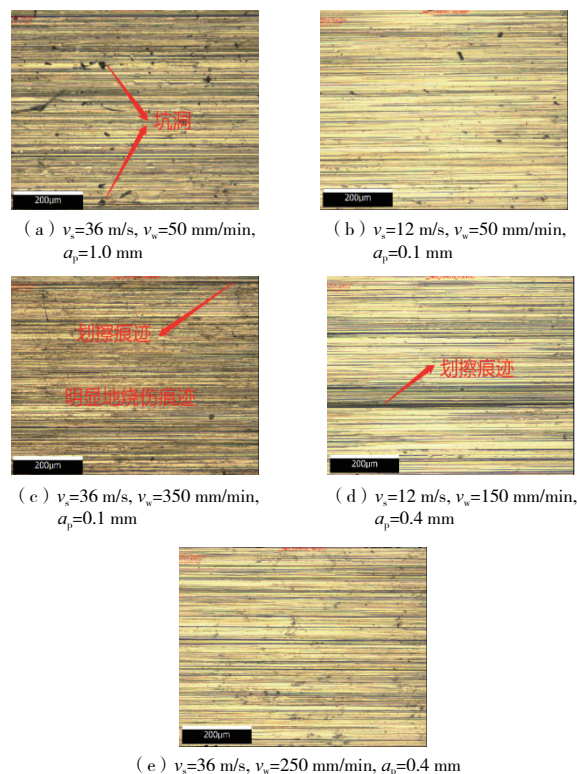


图 6 不同磨削工艺参数下的表面纹理

3 结语

本文基于实验研究磨削参数对定向凝固高温合金 IC10 缓进磨削表面粗糙度的影响规律,结果如下所述。

(下转第 29 页)

的行业应用过程,给空间螺旋孔加工技术在相关行业的开发和应用带来参考价值。

参考文献:

- [1] 丁永根,徐天稷,张南,等.新能源汽车驱动电机壳体冷却结构设计及热仿真分析[J].时代汽车,2020(16):71-72.
- [2] 吴明阳,李宝伟,孙宇杰,等.高速电主轴冷却系统试验研究[J].机床与液压,2021,49(1):56-62.
- [3] 陈明,王明环,彭伟.不同流场构型对微细螺旋孔电解加工的影响[J].机电工程,2009,26(10):87-89.
- [4] LEE C P, PAULCHIU R S. Method for enhancing heat transfer inside turbulated cooling passages: US6582584[P]. 2003-06-24.
- [5] 檀润华,王庆禹,苑彩云,等.发明问题解决理论:TRIZ:TRIZ过程、工具及发展趋势[J].机械设计,2001,18(7):7-12,53.
- [6] 鲍中美.电火花成形加工常见工艺问题分析和对策研

究[J].机械设计与制造,2007(9):200-202.

- [7] 王曰辉.基于TRIZ理论的齿轮装夹系统创新设计[J].制造技术与机床,2021(5):124-127.
- [8] 林兴坡.基于P&B与TRIZ的产品适应性设计研究及其应用[J].机电技术,2011,34(4):100-103.
- [9] 王立新,张玉环.基于TRIZ的动静压滑动轴承油腔结构创新设计[J].润滑与密封,2021,46(2):73-78.
- [10] 李梅芳,赵永翔. TRIZ 创新思维与方法理论及应用[M]. 北京:机械工业出版社,2022,
- [11] 朱勋鹏. TRIZ 辅助便携式电解去小孔毛刺装置设计[J].机床与液压,2017,45(10):11-14.
- [12] 王力,都日苏拉. 热障涂层高温合金电火花小孔加工伺服控制系统的研制[C]//第17届全国特种加工学术会议论文集(上册). 广州:中国机械工程学会特种加工分会,2017:427-430.

收稿日期:2023-06-20

(上接第15页)

1) 在实验参数范围内,垂直磨削方向表面粗糙度在 $0.40 \sim 1.68 \mu\text{m}$,沿磨削方向表面粗糙度在 $0.08 \sim 0.28 \mu\text{m}$;垂直磨削方向的表面粗糙度值与砂轮线速度呈负相关而与工件进给速度和磨削深度呈正相关。

2) 降低工件进给速度和磨削深度能使表面形貌轮廓峰起伏程度减小,形貌纹理变紧密,增大砂轮线速度不会使轮廓峰起伏程度发生明显变化,但可以使形貌纹理变紧密。

3) 增大砂轮线速度而减小工件进给速度和磨削深度会使磨削表面坑洞缺陷密度和划痕痕迹明显程度降低,减小磨削深度能缓解磨削表面的烧伤现象。为获得更好的表面质量,推荐磨削参数为 $v_s = 36 \text{ m/s}$, $v_w = 50 \text{ mm/min}$, $a_p = 0.1 \text{ mm}$ 。

参考文献:

- [1] 任敬心,华定安.磨削原理[M].北京:电子工业出版社,2011.
- [2] 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.
- [3] 傅玉灿,张志伟,徐九华,等.定向凝固镍基高温合金叶片榫齿高效深切成型磨削[J].南京航空航天大学学报,2014,46(2):190-196.
- [4] 靳淇超,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.
- [5] 孙超,张国军,尹佳超.GH4169 镍基高温合金砂带磨

削表面完整性分析[J].金刚石与磨料磨具工程,2016,36(1):74-78.

- [6] 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.
- [7] WANG J W, XU J J, WANG X F, et al. A comprehensive study on surface integrity of nickel-based superalloy Inconel 718 under robotic belt grinding[J].Materials and Manufacturing Processes,2019,34(1):61-69.
- [8] LI Z, DING W F, LIU C J, et al. Grinding performance and surface integrity of particulate-reinforced titanium matrix composites in creep-feed grinding[J].The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2018,94(9):3917-3928.
- [9] 杜随更,姜哲,张定华,等.GH4169 合金磨削表面塑性变形层的微观结构[J].机械工程学报,2015,51(12):63-68.
- [10] 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):386-391.
- [11] 白洋.镍基高温合金单晶零件磨削性能实验研究[D].沈阳:东北大学,2018.
- [12] ZHU X X, WANG W H, JIANG R S, et al. Performances of Ni3Al-based intermetallic IC10 in creep-feed grinding[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 108(5): 809-820.

收稿日期:2023-05-24