

doi: 10.12068/j.issn.1005-3026.2020.06.015

镍基单晶高温合金磨削变质层工艺试验研究

巩亚东, 张伟健, 蔡明, 周显新
(东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 为探究镍基单晶高温合金的磨削变质层工艺特性,采用单因素试验的方法,研究不同磨削参数及冷却条件对磨削变质层厚度的影响规律.结果表明,在镍基单晶高温合金 DD5 的磨削表面及亚表面存在一定厚度的磨削变质层.磨削变质层中的塑性变形层内 γ 相和 γ' 相发生剧烈扭曲变形且磨削变质层的硬度大于基体.不同磨削参数及冷却条件对磨削变质层厚度产生不同影响,随着砂轮线速度、磨削深度、工件进给速度的增加,磨削变质层厚度的变化分别表现为先减小后增大、不断增大、先增大后减小;在试验参数范围内,微量润滑(MQL)作为冷却条件可以降低相应的磨削变质层厚度,最多达到 $3.5\text{ }\mu\text{m}$.

关 键 词: 镍基单晶高温合金;磨削;磨削变质层;塑性变形;磨削参数

中图分类号: TH 161 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2020)06-0846-06

Experimental Study on the Grinding Metamorphic Layer of Nickel-based Single Crystal Superalloy

GONG Ya-dong, ZHANG Wei-jian, CAI Ming, ZHOU Xian-xin
(School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China.
Corresponding author: GONG Ya-dong, E-mail: gongyd@mail.neu.edu.cn)

Abstract: In order to explore the processing property of grinding metamorphic layers of nickel-based single crystal superalloy, a single-factorial plain grinding experiment was conducted to investigate the effect of different grinding parameters and cooling conditions on the thickness of grinding metamorphic layers. The results showed that the grinding metamorphic layer with certain thickness appears on the grinding surface and subsurface of nickel-based single crystal superalloy DD5. The γ phase and γ' phase in the plastic deformation layer of the metamorphic layer are distorted severely, and the hardness of the grinding metamorphic layer is greater than that of the matrix. The grinding metamorphic layer thickness varies with the grinding parameters and cooling conditions. With the increase of grinding wheel tangential velocity, the metamorphic layer thickness first decreases, and then increases; with the increase of grinding depth, the metamorphic layer thickness increases continuously; with the increase of workpiece feed velocity, the metamorphic layer thickness first increases, and then decreases. Within the range of experiment parameters, the minimum quantity lubrication (MQL) cooling condition can reduce the corresponding grinding metamorphic layer thickness, which can be reduced by up to $3.5\text{ }\mu\text{m}$.

Key words: nickel-based single crystal superalloy; grinding; grinding metamorphic layer; plastic deformation; grinding parameter

镍基单晶高温合金具有优良的高温性能,是目前制造航空发动机叶片的主要材料.作为单晶零件的重要加工手段,磨削容易在表层附近产生磨削变质层,使表层成分、组织、力学性能等发生改变,从而影响零件的疲劳、腐蚀、蠕变性能.因此

对镍基单晶高温合金的磨削变质层开展深入研究非常必要.

杜随更等^[1]采用光学显微镜和透射电镜对镍基高温合金 GH4169 的磨削变质层微观组织结构进行研究,发现磨削变质层中的塑性变形层可

进一步细化为表面非晶层、微观剪切带和纳米晶层. Cai 等^[2]对镍基单晶高温合金 DD5 磨削表面质量进行了正交试验,在给定的试验参数范围内得出了有效控制表面粗糙度的参数组合,试验还观察磨削亚表面微观形貌,发现亚表面内基体相 γ 和强化相 γ' 剧烈扭曲形成塑性变形层. Wang 等^[3]对镍基高温合金 Inconel 718 进行了机器人砂带磨削,研究发现在塑性变形和热处理的综合作用下磨削表面及亚表面发生了连续的部分动态再结晶,这种再结晶引起亚表面晶粒细化及产生大量位错.

国内外研究人员对高温合金磨削变质层的组织结构及形成机理的研究已取得一定进展^[4-9],但关于磨削参数及冷却条件对镍基单晶高温合金磨削变质层的影响还少有研究. 本文使用 3D 测量激光显微镜观察磨削变质层的金相形貌,采用硬度梯度分析研究磨削变质层的性能变化,使用场发射扫描电镜观察塑性变形层的微观组织变化,并研究不同磨削参数及冷却条件对镍基单晶高温合金磨削变质层厚度的影响规律,以期对镍基单晶高温合金零件磨削表面质量改善具有一定现实意义.

1 试验条件与过程

1.1 试验材料

本试验所加工单晶试件的材料为第二代镍基单晶高温合金 DD5. DD5 添加了稀土元素,具有比第一代镍基单晶高温合金更高的耐温能力. 试件的尺寸规格为 60 mm × 18 mm × 1 mm,其中 60 mm × 18 mm 所在平面为(001)晶面,加工时的磨削方向沿着[100]晶向,晶面和晶向已分别在图中标出,如图 1 所示. DD5 主要力学性能参数见表 1.

表 1 DD5 主要力学性能	
Table 1 Main mechanical properties of DD5	
性能	指标
870℃拉伸性能 σ_b /MPa	1 070
980℃/248 MPa 持久性能/h	196
1100℃/137MPa 持久性能/h	87. 6

1.2 加工机床与砂轮

磨削试验所用机床为 M7120A 平面磨床,平面磨床通过安装外部变频器可实现调速,以获得不同砂轮线速度下的磨削表面.

CBN 具有高硬度、高强度、高热导率等特性,

因此用 CBN 制成的砂轮在磨削加工高温合金等难加工材料上具有独特优势. 综合考虑磨床性能参数、磨削参数及工件材料性能等因素,本次磨削试验选用 CBN 砂轮磨削加工 DD5.



图 1 DD5 及其晶面和晶向
Fig. 1 DD5 and its crystal plane and orientation

CBN 砂轮主要规格参数为:砂轮粒度 180#, 中硬硬度,树脂结合剂,砂轮直径200 mm,安装直径 75 mm,砂轮宽度 5 mm,铝合金基体.

1.3 磨削参数的选取

为研究不同磨削参数(砂轮线速度、磨削深度、工件进给速度)对磨削变质层厚度的影响规律,本试验分别对 3 个磨削参数选用 5 个水平值进行单因素平面磨削试验,磨削方式采用逆磨. 结合试验要求、机床转速、砂轮粒度等因素,各磨削参数对应的具体水平值如表 2 所示.

表 2 磨削参数水平值		
Table 2 Levels of grinding parameters		
砂轮线速度 $v_s/(m \cdot s^{-1})$	磨削深度 $a_p/\mu m$	工件进给速度 $v_w/(m \cdot min^{-1})$
15, 20, 25, 30, 35	20, 40, 60, 80, 100	0. 2, 0. 4, 0. 6, 0. 8, 1. 0

1.4 冷却条件的选取

本试验除研究磨削参数对磨削变质层厚度的影响,还对比分析不同冷却条件对磨削变质层厚度的影响. 考虑到传统切屑液对环境的负面影响,试验冷却条件选择干磨削和微量润滑(minimum quantity lubrication,下文均用 MQL 表示).

MQL 是综合考虑环境影响和资源使用效率的一种新型冷却手段. 在气泵提供的压缩空气作用下,油水混合物经喷嘴雾化后以一定速度喷射至磨削区,起到冷却、润滑及排屑的作用.

MQL 的主要技术参数:气源压力 0. 7 MPa, 喷管 2 个,喷管出流量 60 mL/h.

1.5 截面金相试样制备

为观测磨削变质层,需对磨削加工后的单晶试件进一步处理,以制备截面金相试样. 使用 CA20 低速走丝线切割机床沿单晶试件各磨槽的磨削方向切制 2 mm 宽的截面金相试样. 截面金

相试样尺寸较小,不利于后续处理,用金相试样镶嵌机对试样镶嵌处理,共制备 4 块镶样(图 2)。



图 2 截面金相试样
Fig. 2 Section metallographic specimens

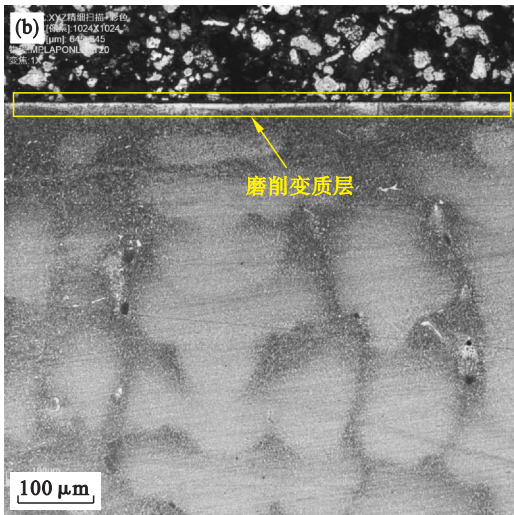
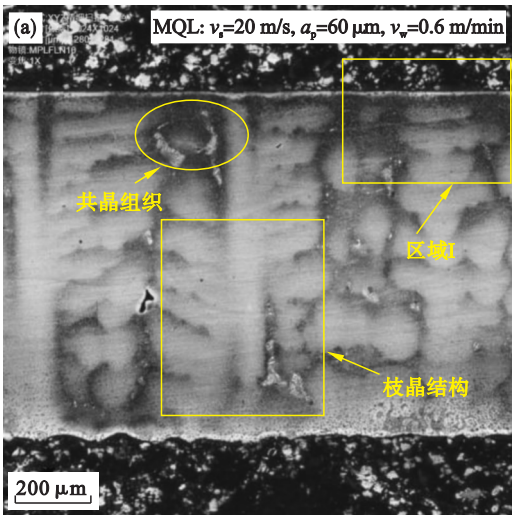


图 3 截面试样金相形貌及局部放大图
Fig. 3 Metallographic morphology and local enlarged drawing of the section specimen
(a)—金相形貌; (b)—区域 I 局部放大图。

图 3b 更清晰地显示磨削表层金相形貌,在磨削表面以下存在一层较连续的“白层”组织,该组织即为磨削变质层。

DD5 经磨削加工产生磨削变质层主要是因为受到磨削力与磨削热耦合作用的影响,致使磨削变质层内材料的组织结构和性能发生了改变。磨削过程中,工件材料受到磨粒的挤压作用产生较大应变,从而在工件表层形成塑性流动。所消耗的磨削能转化为大量磨削热积聚于磨削区,DD5 的低热导率使短时有极少部分热量传入材料基体,磨削区内瞬时产生局部高温,材料变形加剧,促进磨削变质层的形成。

2.2 磨削表层硬度梯度分析

为深入分析磨削变质层力学性能的变化,采用数显显微维氏硬度计,测量两种冷却条件下磨削表层内距离磨削表面不同深度的显微硬度。

为消除线切割加工在截面金相试样表层产生的损伤,对镶样机械研磨、抛光,获得光洁表面。然后用调制的腐蚀液(甘油、氢氟酸、硝酸按体积 4:2:1 比例混合)对每个截面金相试样腐蚀 32 s,完成最终处理。

2 试验结果与分析

2.1 截面试样金相形貌

图 3 为 3D 测量激光显微镜下观察截面试样金相形貌图。从图 3a 可以看出,在腐蚀液的腐蚀作用下,截面金相试样磨削表层的金相组织与基体金相组织明显不同。DD5 典型的枝晶结构和 γ/γ' 共晶组织在基体金相形貌中可清楚观察到。

硬度试验选用图 3 中的截面试样和同一磨削参数的干磨削截面试样。试验加载载荷为 25 g,载荷保持 8 s,金刚石压头距离磨削表面每隔 5 μm 加载一次,共加载 12 次。将不同位置压痕的对角线长度代入维氏硬度计算式,即可得到距离磨削表面不同深度的显微硬度。磨削表层硬度梯度曲线如图 4 所示。图中两条曲线走势相近,随着距磨削表面的距离不断增大,磨削表层内显微硬度先逐渐减小后趋于在 540 HV 附近小范围波动。此外,两种冷却条件下对应的磨削变质层厚度分别为 10.3,12.7 μm 。这说明两种冷却条件下的磨削变质层硬度均大于材料基体硬度,而应变硬化可能是引起磨削变质层硬度较大的主要原因。磨削变质层硬度的增加对材料表层的韧性会有所削弱,因此可能对单晶零件的疲劳强度产生不利影响。

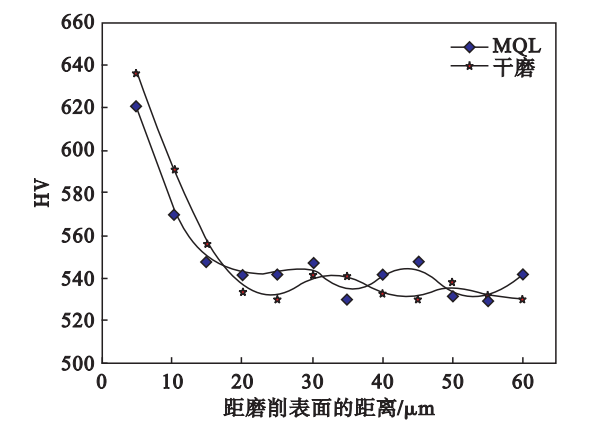


图 4 磨削表层硬度梯度曲线

Fig. 4 Gradient curve of the grinding surface hardness

2.3 塑性变形层显微形貌

塑性变形层是磨削变质层重要的组成部分. 在场发射扫描电镜下观察塑性变形层材料显微结构变化, 如图 5 所示. DD5 主要由基体相 γ 、析出增强相 γ' 、 γ/γ' 共晶组织等组成. 塑性变形层内材料的变形特征主要表现为 γ 相、 γ' 相沿着磨削方向发生明显不同于基体的严重扭曲, 且越靠近磨削表面材料的塑性变形越剧烈, 两相在表面附近扭曲缠结形成紧密的硬化层. 位错是材料塑性形变的根源, 由于 DD5 含有大量 γ' 相, 因此主要通过第二相强化. 在磨粒的摩擦和挤压作用下, 材料表层产生大量位错, 位错在滑移面运动的过程中受到 γ' 相的阻碍, 通过增大外力使得位错克服阻碍继续运动. 塑性变形层内 γ 相、 γ' 相的扭曲变形可能为磨削变质层的硬度增大提供依据.

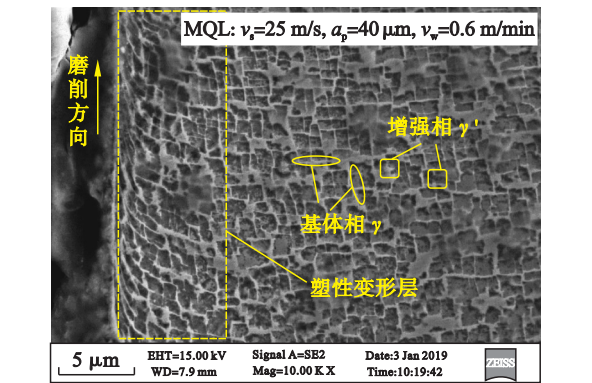


图 5 塑性变形层微观形貌

Fig. 5 Microstructure of the plastic deformation layer

2.4 磨削变质层厚度测量结果

由于磨削变质层的腐蚀特征明显不同于基体, 通过直接测量表层组织的深度即可获得磨削变质层厚度的大小. 测量每个截面金相试样三个不同位置的磨削变质层厚度, 取均值后的结果即

为各试样的磨削变质层厚度. 磨削变质层厚度数据处理结果见表 3.

表 3 磨削变质层厚度测量值

Table 3 Measurements of the grinding metamorphic layer thickness

试验 编号	$\frac{v_s}{\text{m} \cdot \text{s}^{-1}}$	$\frac{a_p}{\mu\text{m}}$	$\frac{v_w}{\text{m} \cdot \text{min}^{-1}}$	$T/\mu\text{m}$	
				干磨	MQL
1	15	60	0.6	13.3	10.8
2	20	60	0.6	12.7	10.3
3	25	20	0.6	11.2	7.7
4	25	40	0.6	11.8	8.4
5	25	60	0.6	12.3	9.4
6	25	80	0.6	13.0	10.0
7	25	100	0.6	14.3	11.2
8	25	60	0.2	11.7	9.0
9	25	60	0.4	12.1	9.3
10	25	60	0.8	12.0	9.1
11	25	60	1.0	11.8	8.7
12	30	60	0.6	12.5	9.0
13	35	60	0.6	13.0	9.6

2.5 磨削变质层厚度影响规律分析

根据表 3 中数据分别绘制磨削变质层厚度与磨削参数关系的折线图, 如图 6 ~ 图 8 所示. 根据图中折线走势可以得出以下规律:

1) 磨削变质层厚度随着砂轮线速度的提高而先减小后增大. 提高砂轮线速度可有效减小磨粒的未变形切屑厚度, 从而减轻材料的塑性变形, 磨削变质层厚度随之减小.

磨削过程中的磨削能量除消耗少部分传入砂轮和磨屑外, 大部分用于加热工件^[10]. 比磨削能 E_c 的计算公式为

$$E_c = \frac{v_s F_t}{v_w a_p b}. \quad (1)$$

随着砂轮线速度继续提高, 比磨削能逐渐增大, 导致大量磨削热传入工件. DD5 的低热导率使磨削热瞬时积聚于磨削区, 材料产生较大应变, 塑性流动加剧, 导致磨削变质层厚度增大. 因此, 磨削变质层厚度在砂轮线速度增加的过程中先减小后增大.

2) 磨削变质层厚度随着磨削深度的增加而增大. 增加磨削深度导致磨粒的未变形切屑厚度增大, 材料产生剧烈的塑性变形. 此外, 增加磨削深度使得磨粒与工件接触弧更长, 产生的磨削热难以和外界交换, 同样会加剧材料塑性变形, 磨削变质层厚度因而不断增大.

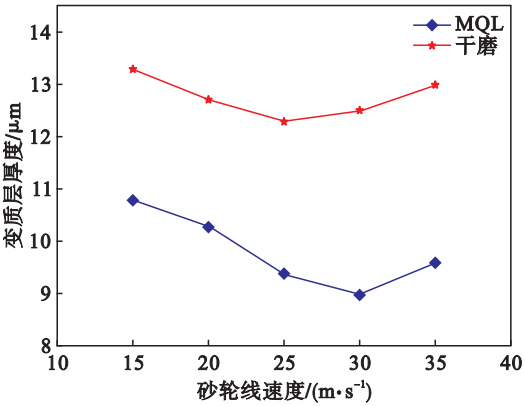


图 6 砂轮线速度对磨削变质层厚度的影响
Fig. 6 Effect of grinding wheel linear velocity on the thickness of grinding metamorphic layers

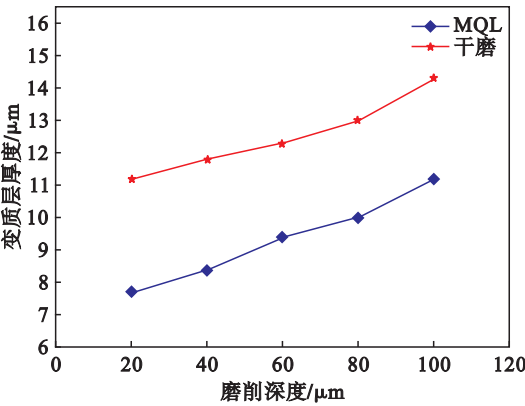


图 7 磨削深度对磨削变质层厚度的影响
Fig. 7 Effect of grinding depth on the thickness of grinding metamorphic layers

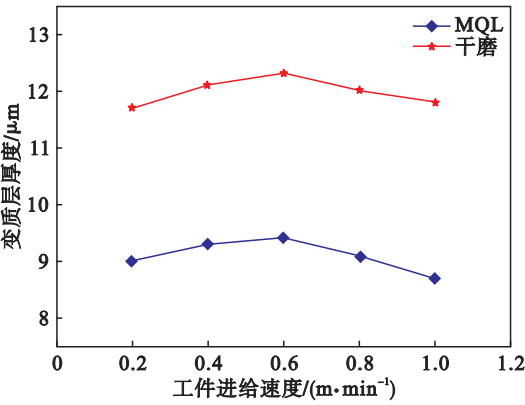


图 8 工件进给速度对磨削变质层厚度的影响
Fig. 8 Effect of workpiece feed velocity on the thickness of grinding metamorphic layers

3) 磨削变质层厚度随着工件进给速度的提高而先增大后减小. 提高工件进给速度使磨粒未变形切屑厚度增加,磨削区内工件材料塑性变形加剧,磨削变质层厚度增大.

由式(1)可知,工件进给速度的提高可削减磨削比能的消耗. 当工件进给速度较大时,用于加热工件的磨削能大幅减少. 减少磨削区内的磨削

热可有效减缓材料的塑性变形,磨削变质层厚度得以减薄. 因此,在工件进给速度不断提高的过程中,磨削变质层厚度先增大后减小.

4) 在相同的磨削参数下,MQL 作为磨削镍基单晶高温合金 DD5 的冷却条件所获得的磨削变质层较干磨削为冷却条件下所获得的磨削变质层更薄,且磨削变质层厚度可减少 2.4 ~ 3.5 μm.

MQL 通过喷嘴把油、水混合物雾化,混合物在压缩空气的作用下喷射到磨削区域,附着于试件表面上形成一层均匀的润滑薄膜. 一方面该润滑膜中的水滴在高温下蒸发成水汽,吸收了大量磨削热,能在一定程度上降低磨削温度;另一方面润滑薄膜可起到良好的减磨、润滑作用,在控制摩擦热产生的同时可减小磨粒与工件接触弧长,磨削区内材料的塑性流动得以有效减缓. 因此,MQL 作为冷却条件可获得较薄的磨削变质层.

3 结 论

- 1) DD5 磨削表层主要受磨削力与磨削温度的耦合作用,在表面及亚表面形成一定厚度的磨削变质层,磨削变质层具有比基体更高的硬度.
- 2) DD5 磨削变质层中的塑性变形层内基体相 γ 和增强相 γ' 发生剧烈的扭曲变形,可能导致磨削变质层的硬度增大.
- 3) 在试验参数范围内,DD5 磨削变质层厚度随着磨削参数的变化表现出不同的变化趋势:随砂轮线速度的提高而先减小后增大,随磨削深度的增加而增大,随工件进给速度的提高而先增大后减小.
- 4) 不同的冷却条件对 DD5 磨削变质层厚度表现出不同的影响程度,MQL 作为冷却条件可以减小磨削变质层厚度,在本试验中最多可达 3.5 μm.

参考文献:

[1] 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. (Du Sui-geng, Jiang Zhe, Zhang Ding-hua, et al. Microstructure of plastic deformation layer on grinding surface of GH4169 alloy [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 51(12): 63 - 68.)

[2] Cai M, Gong Y D, Sun Y, et al. Experimental study on grinding surface properties of nickel-based single crystal superalloy DD5 [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 101(1/2/3/4): 71 - 85.

[3] 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.

[4] 蔡明,巩亚东,冯耀利,等. 镍基高温合金磨削表面工艺性能试验研究[J]. 东北大学学报(自然科学版),2019,40(2):234–238.

(Cai Ming,Gong Ya-dong,Feng Yao-li,et al. Experimental study on grinding surface processing property of nickel-based superalloy[J]. *Journal of Northeastern University(Natural Science)*,2019,40(2):234–238.)

[5] Fan Y H,Wang T,Hao Z P,et al. Research of plastic behavior in high-speed cutting Inconel 718 based on multi-scale simulation [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*,2018,94(9/10/11/12):3731–3739.

[6] Guitouni A,Chaieb I,Rhouma A B,et al. Effects of jet pressure on the ground surface quality and CBN wheel wear in grinding AISI 690 nickel-based superalloy[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*,2016,25(11):5055–5064.

[7] Zhou Y G,Gong Y D,Cai M,et al. Study on surface quality and subsurface recrystallization of nickel-based single-crystal superalloy in micro-grinding [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*,2017,90(6):1749–1768.

[8] Gong Y D,Zhou Y G,Wen X L,et al. Experimental study on micro-grinding force and subsurface microstructure of nickel-based single crystal superalloy in micro grinding[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*,2017,31(7):3397–3410.

[9] Mohsan A U H,Liu Z H,Padhy G K. A review on the progress towards improvement in surface integrity of Inconel 718 under high pressure and flood cooling conditions [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*,2017,91(1/2/3/4):107–125.

[10] 李伯民,赵波. 现代磨削技术[M]. 北京:机械工业出版社,2003.

(Li Bo-min,Zhao Bo. Modern grinding technology [M]. Beijing:China Machine Press,2003.)



(上接第 845 页)

参考文献:

[1] 闵华松,杨杰. 融合 IMU 的 RGBD-SLAM 算法改进研究 [J]. 计算机工程与设计,2015,36(1):120–126.

(Min Hua-song,Yang Jie. Research of improved RGBD-SLAM algorithm fusing IMU[J]. *Computer Engineering and Design*,2015,36(1):120–126.)

[2] Khoshelham K. Accuracy analysis of kinect depth data[J]. *ISPRS—International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*,2011,38(5):133–138.

[3] Guo C X,Roumeliotis S I. IMU-RGBD camera 3D pose estimation and extrinsic calibration:observability analysis and consistency improvement [C]//IEEE International Conference on Robotics & Automation. Baden,2013:2935–2942.

[4] Chávez A,Karstoft H. Improvement of KinectTM sensor capabilities by fusion with laser sensing data using octree [J]. *Sensors*,2012,12(4):3868–3878.

[5] Ma S,Bai X,Wang Y,et al. Robust stereo visual-inertial odometry using nonlinear optimization [J]. *Sensors*,2019,19(17):3747–3762.

[6] Hu G,Huang S,Zhao L,et al. A robust RGB-D SLAM algorithm [C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Vilamoura,2012:1714–1719.

[7] Mur-Artal R,Moniel J M M,Tardos J D. ORB-SLAM: a versatile and accurate monocular SLAM system [J]. *IEEE Transactions on Robotics*,2015,31(5):1147–1163.

[8] Mur-Artal R,Tardos J D. ORB-SLAM2: an open-source SLAM system for monocular, stereo, and RGB-D cameras [J]. *IEEE Transactions on Robotics*,2017,33(5):1255–1262.

[9] Rublee E,Rabaud V,Konolige K,et al. ORB: an efficient alternative to SIFT or SURF [C]//International Conference on Computer Vision. Barcelona,2012:2564–2571.

[10] Sturm J,Engelhard N,Endres F,et al. A benchmark for the evaluation of RGB-D SLAM systems [C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Vilamoura,2012:573–580.