

DOI: 10.11973/jxgccl202310005

高速铣削参数对 GH4169 镍基高温合金加工表面变质层厚度的影响

张家瑁¹, 杜 劲¹, 李银玲², 石海川², 苏国胜¹, 张培荣¹

(1. 齐鲁工业大学(山东省科学院)机械与汽车工程学院, 济南 250353;

2. 山东山水重工有限公司, 济南 250300)

摘要: 在不同铣削速度(500~1 000 m·min⁻¹)和径向铣削深度(0.1~0.3 mm)下对 GH4169 镍基高温合金进行高速铣削加工, 研究了铣削参数对切削力、切削温度、变质层和白层厚度以及表层硬度的影响。结果表明: 随着铣削速度的增大, 切削力降低, 切削温度升高, 铣削深度的增加会导致切削力和切削温度升高; 在相同铣削深度下, 当铣削速度由 500 m·min⁻¹ 增大至 1 000 m·min⁻¹ 时, 变质层厚度增大约 30 μm, 白层厚度增大约 5 μm, 表层显微硬度增大约 200 HV, 硬化层深度增大约 100 μm; 在相同铣削速度下, 铣削深度每增大 0.1 mm, 变质层厚度增大约 30 μm, 白层厚度增大约 3 μm, 表层硬度增大 20 HV, 硬化层深度增大约 20 μm。

关键词: GH4169 镍基高温合金; 变质层; 白层; 高速铣削参数

中图分类号: TG54

文献标志码: A

文章编号: 1000-3738(2023)10-0031-06

Effect of High-Speed Milling Parameters on Metamorphic Layer Thickness of GH4169 Nickel-Based Superalloy Machined Surface

ZHANG Jiamao¹, DU Jin¹, LI Yinling², SHI Haichuan², SU Guosheng¹, ZHANG Peirong¹

(1. School of Mechanical Engineering, Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences), Jinan 250353, China;

2. Shandong Shanshui Heavy Industry Co., Ltd., Jinan 250300, China)

Abstract: High-speed milling of GH4169 nickel-based superalloy was carried out at different milling speeds (500—1 000 m·min⁻¹) and radial milling depths (0.1—0.3 mm). The effects of milling parameters on cutting force, cutting temperature, metamorphic layer and white layer thickness and surface layer hardness were studied. The results show that with the increase of milling speed, the cutting force decreased and the cutting temperature increased. The increase of milling depth resulted in the increase of cutting force and cutting temperature. Under the same milling depth, when the milling speed increased from 500 m·min⁻¹ to 1 000 m·min⁻¹, the thickness of the metamorphic layer increased by about 30 μm, the thickness of the white layer increased by about 5 μm, the microhardness of the surface layer increased by about 200 HV, and the depth of the hardened layer increased by about 100 μm. Under the same milling speed, when the milling depth increased by 0.1 mm, the thickness of the metamorphic layer increased by about 30 μm, the thickness of the white layer increased by about 3 μm, the hardness of the surface layer increased by 20 HV, and the depth of the hardened layer increased by about 20 μm.

Key words: GH4169 nickel-based superalloy; metamorphic layer; white layer; high-speed milling parameter

0 引言

对于任何经过机械加工的材料, 其加工表面至某一深度的性能会与基体材料不同, 该部分区域称为变质层^[1]。通常, 变质层是在加工过程中通过使用不同的物理机制从工件上去除材料时产生的^[2-3]。

收稿日期: 2022-07-27; 修订日期: 2023-08-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51675289); 山东省自然科学

基金资助项目(ZR2020ME160)

作者简介: 张家瑁(1999—), 男, 山东菏泽人, 硕士研究生

通信作者(导师): 杜劲副教授

变质层分为塑性变形层和白层,其中对工件性能影响最明显的是位于最外面的白层。白层是指经机械加工后在材料表面形成的,在光学显微镜下未观察到明显组织特征并呈现亮白色硬层的通称^[4]。白层通常比基体更硬、更脆^[5],疲劳裂纹易在此处萌生和扩展,从而影响工件的疲劳寿命和耐磨性^[6]。

GH4169 镍基高温合金常用于制造航空发动机的热端部件,对其疲劳寿命的要求相较于其他零部件更为严格,而高温合金通常采用高速铣削进行加工,因此研究高速铣削参数对 GH4169 合金变质层的影响具有重要意义。LI 等^[7]在车削加工淬硬钢时发现,加工产生的塑性变形细化了加工表面的晶粒,影响组织中奥氏体和马氏体的相变温度,从而加剧白层的产生。SUN 等^[8]研究发现,在铣削速度低于 40 m·min⁻¹时,随着铣削速度的增大,GH4169 合金的白层厚度减小,但当铣削速度大于 40 m·min⁻¹时,白层厚度增大。DU 等^[9]研究发现,当铣削速度小于 2 000 m·min⁻¹时,随着铣削速度的增大,FGH95 镍基高温合金白层厚度增大,而当铣削速度大于 2 000 m·min⁻¹时,白层厚度减小。降低切削温度可减小白层厚度^[10-11]。白层是由于机加工导致材料的亚表面部分产生热集中而形成的,镍基合金的低热导率会增强这种效果^[12],导致其表面白层厚度增大,并产生严重的加工硬化^[13-14]。

在切削加工过程中产生的加工硬化会使材料发

生强塑性变形^[15],而加工硬化和塑性变形的增加会导致变质层厚度增大。随着铣削速度的增加,材料表面残余应力峰值增大,材料的加工硬化程度增大,进而影响变质层的厚度^[16-17]。塑性变形的程度与切削条件,如刀具磨损程度、铣削速度、进给速度以及冷却剂的应用相关^[18-19]。同时,刀具半径与切屑厚度之比是决定加工表面塑性应变大小的最关键参数,是镍基高温合金低速切削时产生白层和弯曲晶粒的原因之一^[20]。

综上所述,为提高零部件的疲劳寿命,减少加工过程中变质层的产生,有必要分析切削参数对变质层厚度的影响规律,但目前有关铣削参数影响 GH4169 高温合金变质层厚度的研究报道较少。因此,作者通过改变铣削加工时的铣削速度和径向铣削深度,对 GH4169 镍基高温合金进行了切削试验,研究了在不同参数下加工后变质层厚度的变化趋势,以及切削力、切削温度、硬度分布和硬化层深度的变化。

1 试样制备与试验方法

试验材料选用 GH4169 镍基高温合金,由深圳市百顺金属材料有限公司提供,硬度为 40~45 HRC,化学成分如表 1 所示,热处理工艺如下: 960 ℃×1 h 固溶处理,空冷至室温;加热至 720 ℃保温 8 h,以 50 ℃·h⁻¹ 的速率炉冷至 620 ℃保温 8 h,冷却至室温。

表 1 GH4169 镍基高温合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of nickel-based superalloy GH4169

元素	C	Cr	Co	Mo	Mn	Al	Nb	Cu	Ni	Fe
质量分数/%	2.80	17.61	0.75	2.95	0.22	0.44	4.96	0.32	51.06	16.28

在试验合金上截取尺寸为 50 mm×30 mm×3 mm 的试样,采用 DNM-415 型数控立式加工中心进行铣削加工试验,所选用的刀具为 KENNAMETAL 生产的 SNHX12L5PZFNGE KC510M 三面刃铣刀盘,刀片选用 KC725M(物理气相沉积 TiAlN)涂层硬质合金刀片,每次切削只切除少量的材料且每次切削加工后均更换新的切削刀片。选用的铣削速度分别为 500,600,700,800,900,1 000 m·min⁻¹,径向铣削深度分别为 0.1,0.2,0.3 mm,进给量保持在 0.02 mm·r⁻¹,切削试验均为干切削。采用 Kistler-9129AA 型三向动态切削测力仪和 FlirA315 型红外热成像仪对切削过程中

的切削力和切削温度进行采集。

在切削加工后的试样上切割出含有加工表面的尺寸为 10 mm×10 mm×3 mm 的试样,经过镶嵌、研磨、抛光,用由 1 g 氯化铜、20 mL 浓盐酸和 20 mL 无水乙醇组成的溶液腐蚀 2 min,用流水和酒精溶液进行冲洗,然后利用 VHX-500 型超景深三维光学显微镜(OM)和 Phenom Prox 型扫描电子显微镜(SEM)观察截面显微组织。利用 HXD-1000TMC 型维氏显微硬度计测截面硬度分布,测试间距为 25 μm,当显微硬度与基体硬度相同或相近时停止测试,载荷为 19.6 N,保载时间为 15 s。

2 试验结果与讨论

2.1 对切削力和切削温度的影响

图 1 中 F 为切削力合力, F_x 为切向力, F_y 为径向力, 因轴向力 F_z 几乎无变化且数值远小于 F_x 和 F_y , 因此未对其进行分析。由图 1 可以看出, 随着铣削速度的增加, 切削温度明显升高, 而切削力呈下降趋势, 且在不同铣削深度下, 切削力的变化规律基本相同。这是由于随着铣削速度的增大, 材料的热软化效应超过硬化效应^[15], 从而导致切削力的变

化趋势与切削温度的变化趋势相反。随着铣削速度的增大, 单位时间内材料的去除率增加, 消耗了更多能量的同时增加了切削热, 从而导致切削温度的升高。对比不同铣削深度下切削力和切削温度的变化可以看出, 随着铣削深度的增加, 切削力和切削温度均增大。这是因为随着铣削深度的增加, 单位时间内材料的去除率增大, 刀具在单位时间内进行切削的面积也增大, 这使得刀具前刀面受力增大, 刀具与材料以及刀具与切屑之间的摩擦程度增大, 最终导致切削力和切削温度增大。

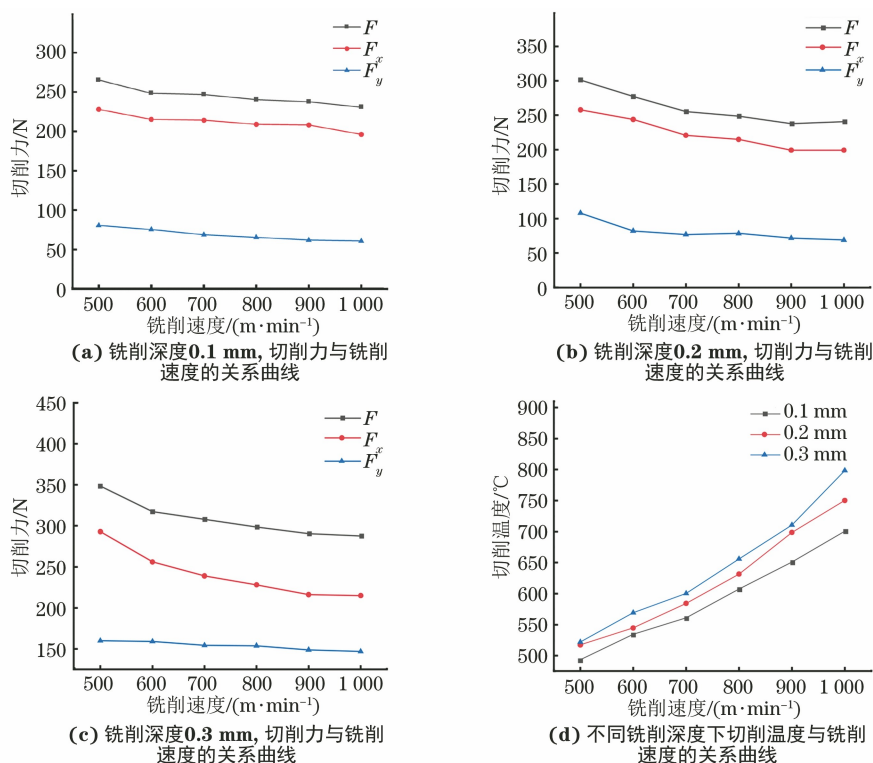


图 1 不同铣削深度下切削力和切削温度与铣削速度的关系曲线

Fig. 1 Cutting force (a—c) and cutting temperature (d) vs milling speed curves at different milling depths (a) milling depth of 0.1 mm; (b) milling depth of 0.2 mm and (c) milling depth of 0.3 mm

2.2 对截面微观形貌的影响

由图 2 可以看出: 铣削加工后 GH4169 合金基体组织主要由大块的基体相 γ 、圆盘状强化相 γ' 和 γ'' 以及短棒状析出相 δ 组成; 加工表面有一层与基体颜色明显不同的薄层, 在光学显微镜下呈亮白色, 即为白层, 扫描电镜下白层的微观结构与基体明显不同, 呈致密化且无明显结构特征^[21]。白层与基体过渡处存在一个暗区域, 为过渡区或塑性变形层^[22], 该区域沿切削方向有很强的塑性变形流动特征, 出现了明显的滑移线且表面晶粒明显被拉长。由图 3 可以发现, 增大铣削速度使得白层和变质层厚度均明显增大, 塑性变形程度也明显增大。

GH4169 高温合金加工表面塑性变形层出现了明显的晶粒倾斜、孔隙拉长和压缩以及滑移带和剪切流动等特征, 而滑移带是由多条滑移线成组出现形成的^[23], 这也从侧面证明了强塑性变形导致了晶粒发生滑移^[24]。

由图 4 可以看出: 随着铣削速度由 $500 m \cdot min^{-1}$ 增大至 $1\,000 m \cdot min^{-1}$, 变质层厚度增大约 $30 \mu m$, 白层厚度增大约 $5 \mu m$; 随着铣削深度的增大, 变质层和白层厚度的变化更加明显, 铣削深度每增大 $0.1 mm$, 变质层厚度增大约 $30 \mu m$, 白层厚度增大约 $3 \mu m$, 这与文献^[25]的试验结果相一致。在高速铣削加工过程中, 材料发生塑性变形, 产生了大

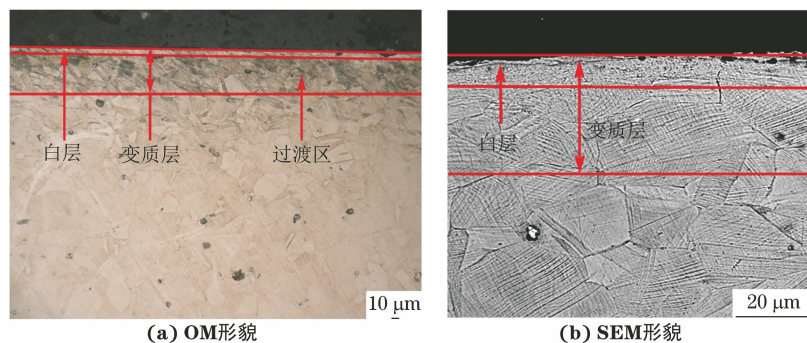


图2 铣削加工后 GH4169 合金试样的截面 OM 和 SEM 形貌(铣削速度 $800 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, 铣削深度 0.1 mm)

Fig.2 OM (a) and SEM (b) morphology of section of GH4169 alloy sample after milling (milling speed of $800 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, milling depth of 0.1 mm)

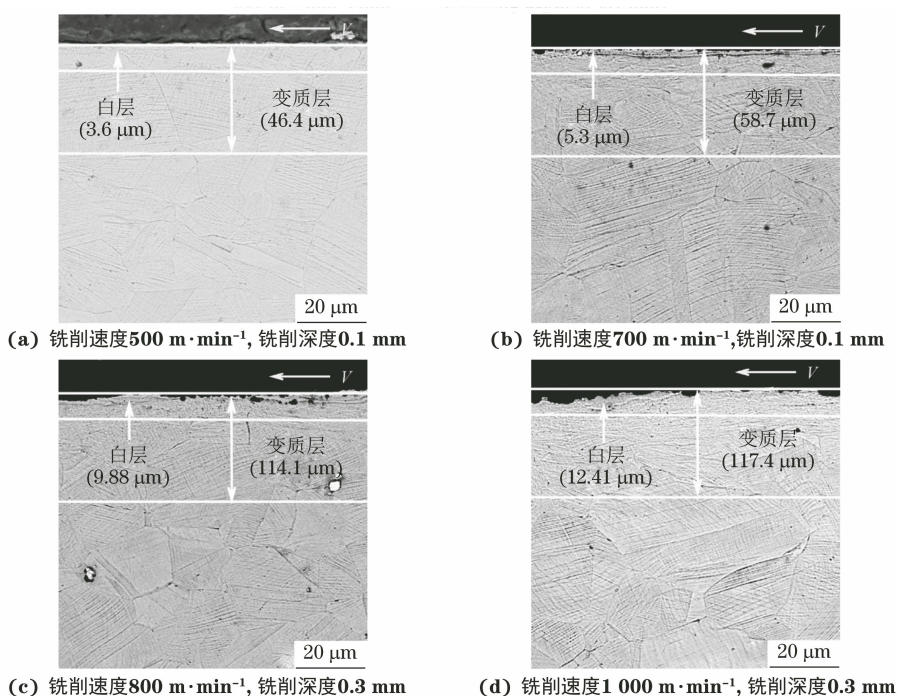


图3 不同参数铣削加工后 GH4169 合金试样的截面形貌

Fig.3 Section morphology of GH4169 alloy samples after milling under different parameters: (a) milling speed of $500 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, milling depth of 0.1 mm ; (b) milling speed of $700 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, milling depth of 0.1 mm ; (c) milling speed of $800 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, milling depth of 0.3 mm and (d) milling speed of $1000 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, milling depth of 0.3 mm

量的切削热, 进一步提高了加工表面的塑性变形程度, 使表面产生了较大的残余应力, 表面晶粒明显细化, 从而加剧了变质层的形成。铣削速度的增加会增大材料的应力和应变, 使材料的塑性变形程度增大, 变质层厚度随之增大。随着铣削深度的增大, 加工过程中的背向力明显增大, 表面应力和应变速率随之提高, 导致材料加工表面产生较大的塑性变形, 并在亚表层产生较大的残余应力^[24], 致使亚表层的晶粒之间发生滑移, 从而促进变质层的形成。铣削加工过程中产生的高应变和高应变速率导致高密度位错的形成, 促进了白层的形成, 并且随着铣削深度

或铣削速度的增大, 应变速率和应变进一步增大, 位错密度也进一步增大, 因此白层厚度增大。

2.3 对显微硬度分布和硬化层深度的影响

由图5可以看出, 合金基体的显微硬度约为 440 HV , 不同铣削参数下加工表层和次表层都存在明显的加工硬化现象, 其中表层显微硬度最高, 随着距表面距离的增大, 显微硬度逐渐降低。铣削速度的提高和铣削深度的增加均对合金加工表面的显微硬度和硬化层深度产生了较大影响。在相同铣削深度下, 随着铣削速度由 $500 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ 增大至 $1000 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, 合金表层显微硬度增大

200 HV, 硬化层深度增大约 $100\ \mu\text{m}$; 在相同铣削速度下, 铣削深度每增大 $0.1\ \text{mm}$, 硬度增大约 20 HV, 硬化层深度增大约 $20\ \mu\text{m}$ 。随着铣削速度

或铣削深度的增加, 表面塑性变形程度增大, 加工硬化现象明显增强, 因此显微硬度和硬化层深度增大。

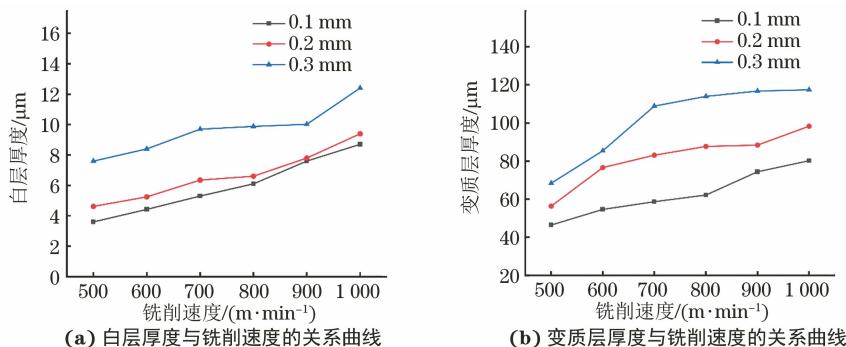


图 4 不同铣削深度下白层和变质层厚度与铣削速度的关系曲线

Fig. 4 Curves of thickness of white layer (a) and metamorphic layer (b) vs milling speed at different milling depths

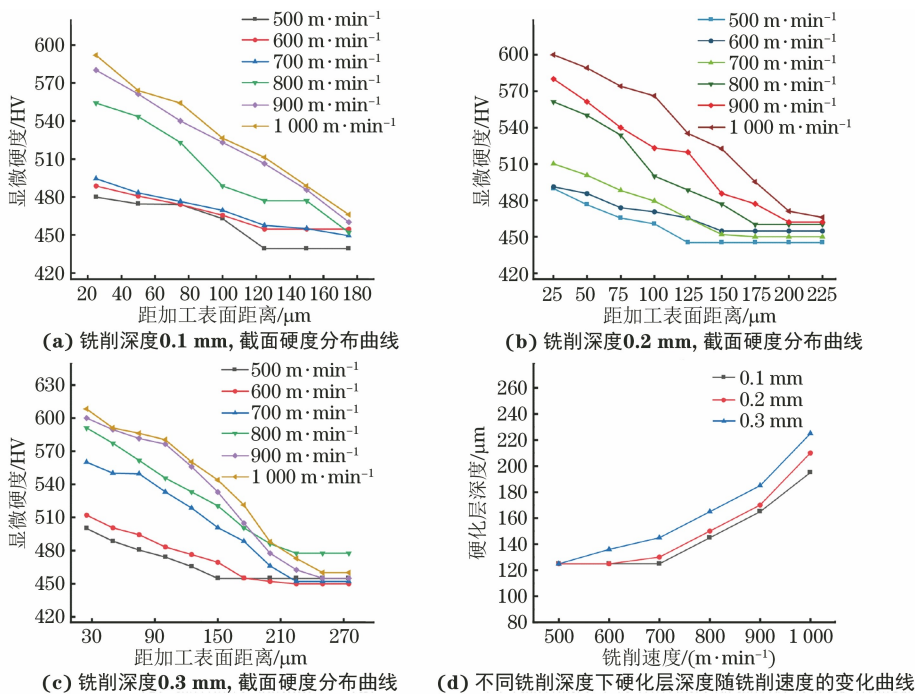


图 5 不同铣削参数下 GH4169 合金试样的截面硬度分布曲线以及不同铣削深度下硬化层深度随铣削速度的变化曲线

Fig. 5 Section hardness distribution curves (a-c) of GH4169 alloy samples under different milling parameters and curves of hardened layer depth vs milling speed under different milling depths (d): (a) milling depth of 0.1 mm; (b) milling depth of 0.2 mm and (c) milling depth of 0.3 mm

3 结论

(1) 高速铣削 GH4169 高温合金时, 随着铣削速度的增大, 不同铣削深度下的切削力均呈下降趋势, 而铣削深度的增加会导致切削力明显增大; 切削温度随着铣削速度或铣削深度的增大呈升高趋势。

(2) 高速铣削 GH4169 高温合金表面白层的组织呈现致密化且无明显结构特征的特点, 塑性变形层中存在明显的塑性变形和晶界滑移现象, 且晶粒

被拉长。在相同铣削深度下, 随着铣削速度由 $500\ \text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ 增大至 $1000\ \text{m}\cdot\text{min}^{-1}$, 变质层厚度增大约 $30\ \mu\text{m}$, 白层厚度增大约 $5\ \mu\text{m}$; 在相同铣削速度下, 铣削深度每增大 $0.1\ \text{mm}$, 变质层厚度增大约 $30\ \mu\text{m}$, 白层厚度增大约 $3\ \mu\text{m}$ 。

(3) 高速铣削 GH4169 合金后加工表面的显微硬度最高, 随着距表面距离的增大, 硬度逐渐降低。在相同铣削深度下, 铣削速度由 $500\ \text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ 增大至 $1000\ \text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ 后, 表层显微硬度增大约 200 HV,

硬化层深度增大约 100 μm ;在相同铣削速度下,铣削深度每增大 0.1 mm,表层硬度增大 20 HV,硬化层深度增大约 20 μm 。

参考文献:

- [1] 张方圆,段春争,王敏杰.已加工表面变质层的发展研究[J].机械设计与制造,2014(10):265-268.
ZHANG F Y, DUAN C Z, WANG M J. Research status of the machined surface metamorphic layer[J]. Machinery Design & Manufacture, 2014(10): 265-268.
- [2] BORCHERS F, CLAUSEN B, ECKERT S, et al. Comparison of different manufacturing processes of AISI 4140 steel with regard to surface modification and its influencing depth[J]. Metals, 2020, 10(7): 895.
- [3] GARCÍA NAVAS V, FERRERES I, MARAÑÓN J A, et al. Electro-discharge machining (EDM) versus hard turning and grinding, Comparison of residual stresses and surface integrity generated in AISI O1 tool steel [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 195(1/2/3): 186-194.
- [4] GRIFFITHS B J. Mechanisms of white layer generation with reference to machining and deformation processes[J]. Journal of Tribology, 1987, 109(3): 525-530.
- [5] YIN Q G, LIU Z Q, WANG B, et al. Recent progress of machinability and surface integrity for mechanical machining Inconel 718: A review [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 109(1): 215-245.
- [6] LIANG X L, LIU Z Q, WANG B. State-of-the-art of surface integrity induced by tool wear effects in machining process of titanium and nickel alloys: A review[J]. Measurement, 2019, 132: 150-181.
- [7] LI L, LAI D B, JI Q X, et al. Influence of tool characteristics on white layer produced by cutting hardened steel and prediction of white layer thickness [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 113(3): 1215-1228.
- [8] SUN J F, WANG T M, SU A P, et al. Surface integrity and its influence on fatigue life when turning nickel alloy GH4169[J]. Procedia CIRP, 2018, 71: 478-483.
- [9] DU J, LIU Z Q, LV S Y. Deformation-phase transformation coupling mechanism of white layer formation in high speed machining of FGH95 Ni-based superalloy[J]. Applied Surface Science, 2014, 292: 197-203.
- [10] PATURI U M R, VIDHYA DARSHINI B, REDDY N S. Progress of machinability on the machining of Inconel 718: A comprehensive review on the perception of cleaner machining [J]. Cleaner Engineering and Technology, 2021, 5: 100323.
- [11] M'SAOUBI R, AXINTE D, SOO S L, et al. High performance cutting of advanced aerospace alloys and composite materials[J]. CIRP Annals, 2015, 64(2): 557-580.
- [12] CHAIZE E, DUMONT F, TRUFFART B, et al. Influence of lubrication mode onto residual stress generation in turning [J]. Procedia CIRP, 2022, 108: 390-393.
- [13] SHARMAN A R C, HUGHES J I, RIDGWAY K. Workpiece surface integrity and tool life issues when turning inconel 718TM nickel based superalloy [J]. Machining Science and Technology, 2004, 8(3): 399-414.
- [14] SHARMAN A R C, HUGHES J I, RIDGWAY K. An analysis of the residual stresses generated in Inconel 718TM when turning [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 173(3): 359-367.
- [15] AUGSPURGER T, MEURER M, LIU H, et al. Experimental study of the connection between process parameters, thermo-mechanical loads and surface integrity in machining Inconel 718[J]. Procedia CIRP, 2020, 87: 59-64.
- [16] ARRAZOLA P J, KORTABARRIA A, MADARIAGA A, et al. On the machining induced residual stresses in IN718 nickel-based alloy: Experiments and predictions with finite element simulation [J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2014, 41: 87-103.
- [17] 任小平. 高温合金 GH4169 车削加工表面完整性及抗疲劳加工工艺研究[D]. 济南: 山东大学, 2019.
REN X P. Study on turning surface integrity and anti-fatigue processing technology of superalloy GH4169 [D]. Jinan: Shandong University, 2019.
- [18] LI W, GUO Y B, BARKEY M E, et al. Effect tool wear during end milling on the surface integrity and fatigue life of inconel 718[J]. Procedia CIRP, 2014, 14: 546-551.
- [19] WOJCIECHOWSKI S, MATUSZAK M, POWAŁKA B, et al. Prediction of cutting forces during micro end milling considering chip thickness accumulation [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2019, 147: 103466.
- [20] RANGANATH S, GUO C, HEGDE P. A finite element modeling approach to predicting white layer formation in nickel superalloys [J]. CIRP Annals: Manufacturing Technology, 2009, 58: 77-80.
- [21] 陈涛, 刘献礼, 李素燕, 等. 高速硬切削加工表面白层形成机理研究[J]. 机械工程学报, 2015, 51(23): 182-188.
CHEN T, LIU X L, LI S Y, et al. Mechanism of white layer formation on machined surface of high-speed hard machining [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(23): 182-188.
- [22] JIN D, LIU Z Q. Damage of the machined surface and subsurface in orthogonal milling of FGH95 superalloy [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 68(5): 1573-1581.
- [23] RAMESH A, MELKOTE S N, ALLARD L F, et al. Analysis of white layers formed in hard turning of AISI 52100 steel[J]. Materials Science and Engineering: A, 2005, 390(1/2): 88-97.
- [24] KOKO A, ELMUKASHFI E, BECKER T H, et al. In situ characterisation of the strain fields of intragranular slip bands in ferrite by high-resolution electron backscatter diffraction [J]. Acta Materialia, 2022, 239: 118284.