

高压冷却下切削GH4169切屑形态影响因素研究*

王维鑫, 吴明阳, 李宝伟, 王新宇, 程耀楠

(哈尔滨理工大学机械动力工程学院, 哈尔滨 150080)

[摘要] 高温合金属于典型的难加工材料, PCBN 刀具切削 GH4169 时, 切削力大, 切削温度高, 切屑形态很难得到有效控制。高压冷却作为新型的加工技术, 能够有效降低切削温度, 提高切屑的折断能力。首先, 对高压冷却下切屑弯矩进行理论分析, 获得切屑弯矩理论模型; 其次, 基于试验研究不同切削参数、冷却压力和刀具倒棱参数对切屑长度、卷曲半径和切屑宽度的影响规律, 为进一步促进切屑控制提供一定的借鉴作用。

关键词: 高温合金; PCBN 刀具; 高压冷却; 切屑形态; 切削参数

Study on Factors Affecting Chip Formation During Cutting GH4169 Under High Pressure Cooling

WANG Weixin, WU Mingyang, LI Baowei, WANG Xinyu, CHENG Yaonan

(School of Mechanical Power Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

[ABSTRACT] Superalloy is a typical difficult-to-machine material. When cutting GH4169 by PCBN tools, it has large cutting forces, high cutting temperature, and difficult chip shape control. As a new processing technology, high pressure cooling can effectively reduce the cutting temperature and improve the breaking capacity of the chips. In this paper, the theoretical analysis of chip bending moment under high pressure cooling was carried out to obtain the theoretical model of chip bending moment. Secondly, based on the experimental study, the influences of different cutting parameters, cooling pressure and tool chamfering parameters on chip length, crimp radius and chip width were studied, which provide a reference for further promoting chip control.

Keywords: Superalloy; PCBN tools; High pressure cooling; Chip morphology; Cutting parameter

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2020.05.093

高温合金广泛应用于航空航天发动机的发动机中, 工作时温度最高可达到 1200°C, 工作状况十分复杂, 对材料的性能要求十分苛刻, 而高温合金 GH4169 具有良好的高温强度、良好的抗氧化、抗腐蚀、抗蠕变和抗疲劳性能以及长期的组织稳定性, 因此高温合金 GH4169 作为涡轮发动机的热端部件和航空发动机的高温部件的首选材料^[1]。高温合金是典型的难加工材料, 陶瓷刀具和涂层硬质合金刀具加工时加工硬化严重, 切屑不易折断^[2], 聚晶立方氮化硼刀具 (Polycrystalline Cubic Boron Nitride, PCBN) 在切削难加工材料方面具有优越的性能, 但也存在一些弊端, 由于 PCBN 特殊的刀具结构, 无断屑槽, 因此自然卷曲折断为切屑的

主要折断方式, 容易形成带状切屑而不易折断, 并且高温合金材料导热性差, 在车削过程中, 刀-屑接触区温度高, 引起材料软化, 断屑效果不明显且切屑形态不规则, 影响加工材料的表面质量与加工安全。

目前, 针对难加工材料切削加工方面的问题, 很多学者对切屑形态进行了大量的研究。Bermingham 等^[3]采用硬质合金刀具车削 Ti-6Al-4V 钛合金发现低温冷却剂与干切削相比, 切屑长度更长, 切屑卷曲半径更小。Pawade 等^[4]通过 PCBN 刀具高速切削 Inconel718 试验, 分析出切削速度影响切削厚度比, 切削厚度比控制切屑形态, 进给量影响切屑向周围散热的能力, 进而控制切屑形态。Zhu 等^[5]通过

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(51475128); 黑龙江省自然科学基金项目(E2016043); 哈尔滨市应用技术研究与开发项目(2014DB4AG017)。

端铣钛合金试验,得出刀具磨损扩大了切削振动,导致刀具与切屑的摩擦力增大,切屑的变形程度增大,同样切屑变形也促进切削振动。Palanisamy 等^[6]通过车削 Ti-6Al-4V 钛合金时发现高压冷却剂能明显减小切屑尺寸。Thakur 等^[7]通过高速车削 Inconel718 试验,发现切屑在切削过程中发生了巨大的塑性变形,排屑过程中切屑与刀具之间产生剧烈摩擦,在塑性变形过程中晶粒产生变形。Hua 等^[8]通过车削钛合金试验研究发现,裂纹萌生与扩展是导致切屑从连续向不连续发展的主要原因,在低速时切屑是不连续的,而在高速切削是切屑的碎片呈现锯齿状。吴明阳等^[9]通过 PCBN 刀具车削高温合金 GH4169 试验,发现高压冷却液能够明显减少切屑的锯齿化程度,并且随着压力的增大锯齿化程度先增大后减小。刘震^[10]对比高压冷却与常规切削,得到高压冷却能明显减小卷曲半径。李亭亭^[11]进行了 PCBN 刀具车削镍基高温合金试验,发现切削速度对螺旋屑的形态有较大的影响,随着切削速度的增加,螺旋屑的半径逐渐增大。刘启抱^[12]通过 PCBN 刀具车削高温合金 GH4169 试验,发现切削速度和进给量对锯齿化影响较大,随着切削速度和进给量的增大锯齿化程度呈现增大的趋势。段春争等^[13]通过 ABAQUS 软件模拟高温合金切削过程,得知切屑的锯齿化程度随着刀具前角的增大而降低,随着切削速度和切削深度增大而增大。

综上所述,诸多学者对高温合金切屑形态进行了分析,但对高压冷却下切屑弯矩进行的理论分析

不多,多数采用涂层硬质合金刀具对高温合金进行车削,冷却条件为低温冷却和常规冷却,而把刀具倒棱参数作为影响因素的更为少见。PCBN 刀具的倒棱参数对其切削性能有很大的影响,因此本文进行了高压冷却条件下 PCBN 刀具切削高温合金 GH4169 的试验,对切屑的形态进行分析,以探究切削参数、冷却压力和刀具倒棱参数等对切屑形态的影响规律。

1 高压冷却下切屑弯矩的理论分析

高压冷却下切削高温合金,由于 PCBN 刀具不同于硬质合金等刀具,其前刀面为平前刀面且没有断屑结构,切屑折断属于自然卷曲折断以及冷却液喷射到切屑上的促进作用,因此可以把切屑视为悬臂梁,对其进行弯矩理论分析,其受力情况如图 1 所示。其中 M_s 为切削弯矩,与冷却压力 F_g 、前刀面的合力 F_r 及剪切面上的合力 F_{rr} 组成力偶。剪切面 IE 在弯矩 M_s 的作用下会出现弧形凸起,在 I 点转动的角度为 θ_I ,在 E 点转动的角度为 θ_E 。

由图 1 中的几何关系,可知:

$$M_s = F_r l_{c3} \cos \beta + F_g l_{c4} \cos \theta - F_{rr} l_{s1} \sin(\beta + \phi + \gamma_o) \quad (1)$$

整理得:

$$M_s = F_{n1} l_{c3} + F_{n2} l_{c4} - F_{ns} l_{s1} \quad (2)$$

式中, l_{c3} 是 F_r 作用点到实际切削层底部的距离, β 是 F_r 与其法向力夹角, l_{c4} 是 F_g 到实际切屑下部的距离,

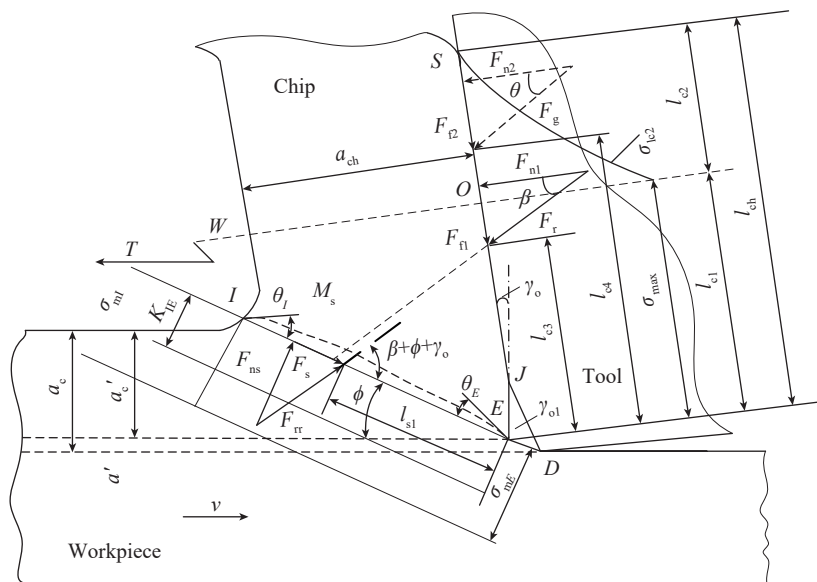


图1 高温合金切削区域的受力分布

Fig.1 Force distribution of high superalloy cutting area

θ 是 F_g 与其法向力夹角, l_{s1} 是合力 F_r 到刀尖的垂直距离, ϕ 为剪切角, γ_o 是刀片前角, F_{n1} 是合力 F_r 的法向力, F_{n2} 是压力 F_g 对切屑的法向分力, F_{ns} 是剪切面上的法向力。

$$l_{s1} = \frac{a'_c}{2\sin\phi} \quad (3)$$

$$F_{n1} = \frac{F_s + (F_{f1} + F_{f2}) \sin(\phi + \gamma_o) - F_{n2} \cos(\phi + \gamma_o)}{\cos(\phi + \gamma_o)} \quad (4)$$

式中, a'_c 是实际切削厚度; F_s 是合力 F_r 对名义剪切面的剪切力; F_{f1} 是合力 F_r 对切屑的剪切力; F_{f2} 是合力 F_g 对切屑的剪切分力。

$$F_{ns} = \frac{F_s \sin(\phi + \gamma_o) + F_{f1} + F_{f2}}{\cos(\phi + \gamma_o)} \quad (5)$$

$$F_{n2} = F_g \cos\theta \quad (6)$$

$$F_{f2} = F_g \cos\theta \quad (7)$$

$$F_{f1} = K_{int} a_w l_{ch} \quad (8)$$

式中, K_{int} 是合力 F_r 对切屑剪应力的均值; a_w 是切屑宽度, 在高压冷却液的作用下, 刀-屑接触总长度 l_{ch} 近似等同于刀-屑接触长度近 l_{c4} , 即:

$$l_{ch} = l_{c4} \quad (9)$$

$$K_{int} = C_f K_w = \frac{C_f \delta_{TF}}{\sqrt{3}} \left(\alpha_{max} + \frac{l_{cl}}{\sqrt{3\delta a_{ch}}} \right)^{n_f} \quad (10)$$

式中, C_f 是关于切削用量的比例常数; K_w 是前刀面剪切流动应力; ϵ_{max} 为第 1 变形区滑移线上的单轴平均应变为; σ_{TF} 和 n_f 是关于第 2 变形区应力-应变曲线的常数; a_{ch} 是实际切屑厚度; δa_{ch} 第 2 变形区发生塑性流动层的厚度, 约为 $0.05a_{ch}$, 具体计算如下:

$$C_f = 0.026 f^{0.070} v^{-0.125} (90 - a_p)^{0.866} \quad (11)$$

$$\epsilon_{max} = \frac{\cos\gamma_o}{\sqrt{3} \sin\phi \cos(\phi + \gamma_o)} \quad (12)$$

$$F_s = \frac{a'_c a_w K_{II}}{\sin\phi} \quad (13)$$

$$K_{II} = \frac{\sigma_{TS}}{\sqrt{3}} \left[\frac{\cos\gamma_o}{2\sqrt{3} \sin\phi \cos(\phi + \gamma_o)} \right]^n \quad (14)$$

式中, K_{II} 是名义剪切面上的剪应力; σ_{TS} 和 n 是第 1 变

形区 $\sigma = \sigma_{TS} \epsilon^n$ 中的常数, 与温度有关。由几何关系对刀尖求力矩, 可得 l_{c3} 与 l_{ch} 的关系如下:

$$l_{c3} = l_{ch} \frac{1 + 3U_c + 6U_c^2}{5(1 + 3U_c)} \quad (15)$$

$$U_c = \frac{l_{cl}}{l_{ch}} \quad (16)$$

式中, l_{cl} 为刀-屑粘结部分长度。

由式(10)~(16)得切削弯矩 M_s 理论计算模型如下:

$$M_s = \frac{\frac{a'_c a_w K_{II}}{\sin\phi} + (K_{int} a_w l_{ch} + F_g \sin\theta) \sin(\phi + \gamma_o) - F_g \cos\theta \cos(\phi + \gamma_o)}{\cos(\phi + \gamma_o)} \cdot \frac{l_{ch}^2 + 3l_{cl} l_{ch} + 6l_{cl}^2}{5 + 15l_{cl}} + F_g \cos\theta l_{ch} - \frac{\frac{a'_c a_w K_{II}}{\sin\phi} \sin(\phi + \gamma_o) + K_{int} a_w l_{ch} + F_g \sin\theta}{\cos(\phi + \gamma_o)} \frac{a'_c}{2\sin\phi} \quad (17)$$

根据上述公式, 可确定冷却压力、前刀面所受的合力和刀具角度等因素对弯矩 M_s 的影响趋势, 为切屑折断理论提供一定的参考, 并为讨论不同切削用量、冷却压力和刀具倒棱参数对切屑的长度和卷曲半径影响的试验提供理论依据。

2 高压冷却下切削高温合金试验准备

2.1 试验条件

在高压冷却条件下进行 PCBN 刀具车削高温合金 GH4169 试验, 高温合金工件尺寸为 $\phi 65 \times 400\text{mm}$, 主要化学成分如表 1 所示。

机床型号为 CK6150 数控车床, 高压冷却装置为 SOONWELL, 超景深显微镜为 VHX-1000, 选用株洲钻石公司生产的 PCBN 刀片, 型号为 CNGA120408-2, 刀片与刀杆安装后前角为 -6° , 后角为 6° , 如图 2 所示。

2.2 试验方法

采用单因素试验方法, 选取不同的切削参数、冷却压力和刀具倒棱参数进行多次试验, 并收集较为规则的切屑进行观察测量, 每组数据选取 3 段切屑测量其

表1 高温合金的主要化学成分(质量分数)
Table 1 Major chemical components of superalloy %

Ni	Mo	Nb	Cr	Ti	Al
53.38	3.00	5.13	18.40	1.1	0.38
Si	C	Mn	Cu	Co	Fe
0.062	0.017	0.05	0.022	0.076	余量

长度、卷曲半径和切屑宽度,结果取其平均值。测量时切屑长度采用直尺直接测量,切屑卷曲半径和宽度通过超景深显微镜辅助测量。方法如图3所示,具体试验参数如表2所示。

3 试验结果与分析

3.1 切削速度对切屑形态的影响

图4为不同切削速度下切屑宏观形态,可以发现,

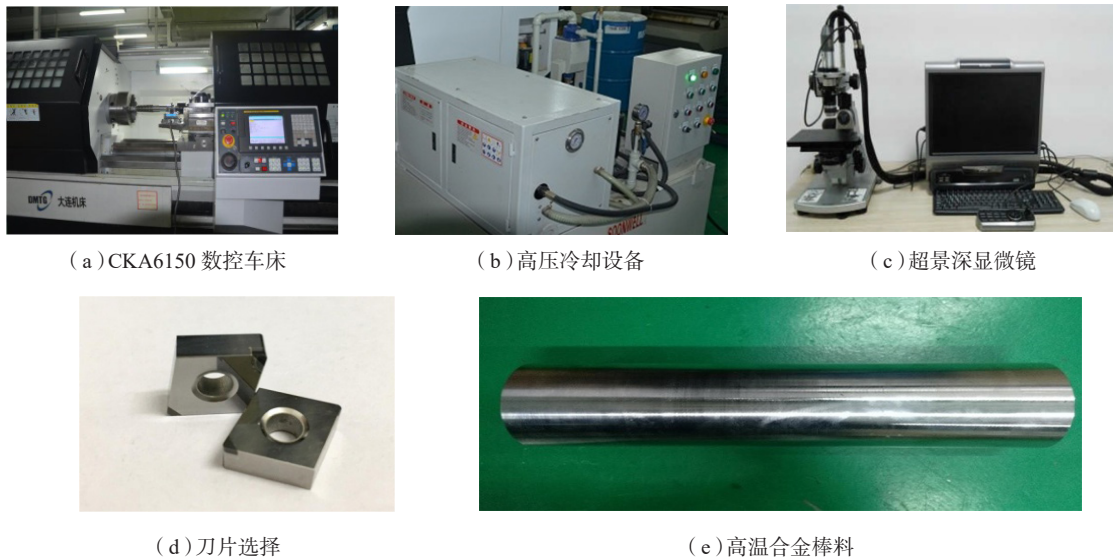


图2 设备和刀片选择

Fig.2 Equipment and blade selection

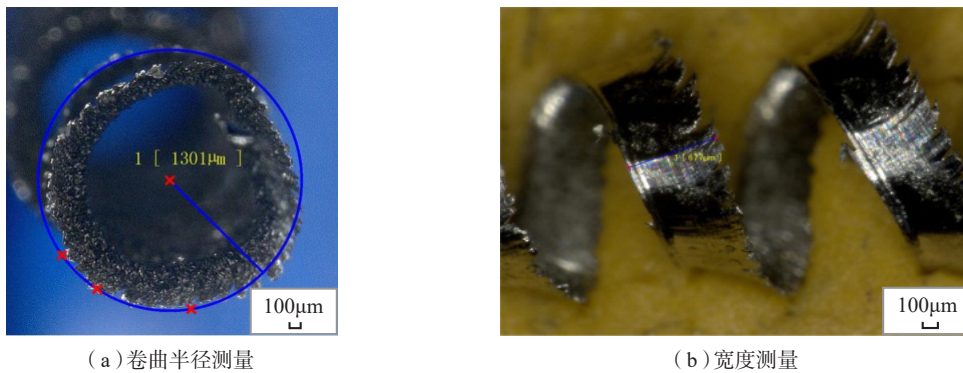


图3 显微镜测量示意图

Fig.3 Schematic diagram of microscope measurement

表2 试验参数

Table 2 Cutting parameters of test

切削速度 $V/(m \cdot \min^{-1})$	进给量 $F/(mm \cdot r^{-1})$	背吃刀量 a_p/mm	冷却压力 P/MPa	负倒棱角度 $B_r/(^\circ)$	倒棱宽度 W_r/mm
75, 100, 125, 150, 175	0.05	0.4	5	-15	0.15
125	0.03, 0.05, 0.07, 0.09, 0.11	0.4	5	-15	0.15
125	0.05	0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0	5	-15	0.15
125	0.05	0.4	3.5, 5, 6.5, 8, 9.5	-15	0.15
125	0.05	0.4	5	-5, -10, -15, -20, -25	0.15
125	0.05	0.4	5	-15	0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3

在试验范围内,切屑均为螺卷型屑,随着切削速度的提高,螺卷型屑的长度逐渐变短,变化较为明显。

图5为切削速度对切屑的影响,可以发现,当冷却压力为5MPa时,切屑长度随着切削速度的增大而减小,由于切削速度的增大使得切屑横向卷曲的角速度增大,切屑旋摆角度增大,进而切屑旋摆的惯性力和碰撞力增大,在切屑根部产生较大的弯矩促进切屑的折断。当切屑速度增加时,切屑锯齿化程度增加,切屑更易折断,故切屑长度逐渐减小;切屑的卷曲半径随着切削速度的提高而减小,当切削速度增大时,切削温度升高,材料出现明显的软化,刀-屑接触时间缩短,卷曲半径减小;切屑宽度随着切削速度的增加而减小,切屑为塑性变形体,两侧为自由端,存在向阻力最小方向流动的趋势,在切削过程中,切屑受到前刀面的挤压与摩擦作用,随着切削速度的增加作用时间逐渐变短,切屑向两侧流动时间减少,故切屑的宽度逐渐降低。

3.2 进给量对切屑形态的影响

图6为不同进给量下切屑宏观形态。可以观察到,在高压冷却条件下,当进给量为 $F=0.03\text{mm/r}$ 时,出现切屑缠绕现象,并且随着进给量的增加缠绕现象减轻非常

明显,切屑先由细长型螺卷屑转变为短粗型螺卷屑,又转变为粗长型螺卷屑,最后变为短粗型螺卷屑。

图7为进给量对切屑的影响。可以观察到:当高压冷却条件为5MPa,其他切削参数一定时,随着进给量的增加,切屑长度出现先增大后减小的趋势,当进给量为 0.07mm/r 时,切屑长度达到最低,随着进给量的增加切屑厚度增大,热传导率变差,切削时产生的热量不容易扩散,切屑相对滑移增大,刀-屑接触长度变大,切屑锯齿化程度增加,故切屑更容易折断,当进给量到达一定程度时,使得切屑截面对中性轴惯性矩增大,使得破坏点的应力应变减小,进而长度逐渐增大^[4];随着进给量的增加卷曲半径出现先增大后减小的趋势,倒棱区域对工件起到挤压作用,随着进给量的增大,挤压作用面积增大,导致卷曲半径增大,当进给量大于 0.07mm/r 时,切削力的作用使切屑沿着倒棱区域流出,切屑受到材料塑性流动的影响变形增大,切屑锯齿化程度增加,因此切屑半径逐渐减小;切削宽度随着进给量的增加而增大,在 $0.03\sim 0.05\text{mm/r}$ 时,切屑宽度增加非常剧烈,进给量大于 0.05mm/r 时,切屑宽度上升较为平缓,随着进给量的增大,切削温度逐渐增加,对切屑的软化作用增强,

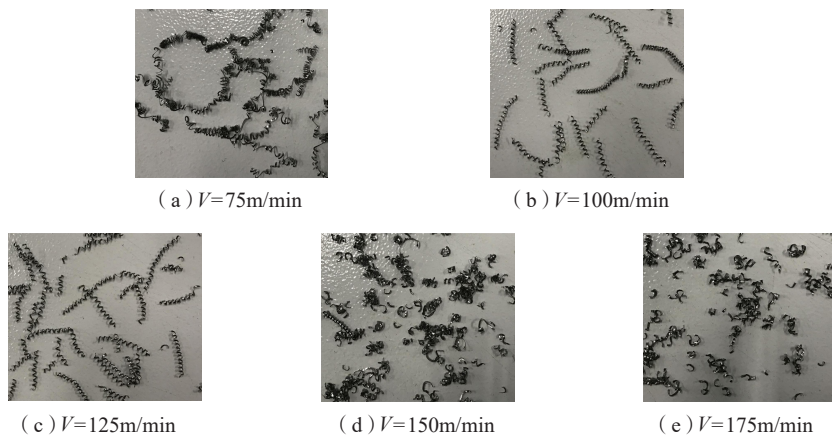


图4 不同切削速度下切屑宏观形态

Fig.4 Macro morphology of chips under different cutting speeds

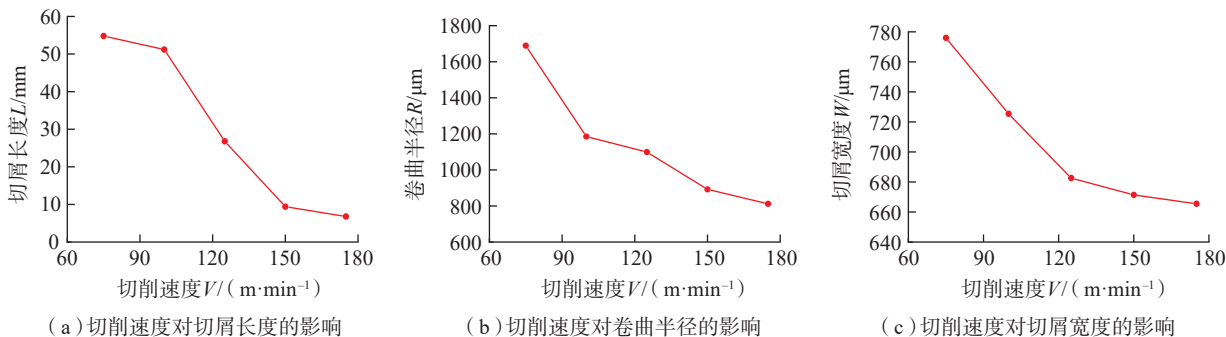


图5 不同切削速度对切屑的影响

Fig.5 Effect of different cutting speeds on chip

并且切屑受刀具挤压力增大,切屑塑性流动增强,切屑宽度增大^[15]。

3.3 背吃刀量对切屑形态的影响

图8为不同背吃刀量下切屑宏观形态。可以观察到,当冷却压力为5MPa时,在试验范围内,随着背吃刀量的增大,切屑由短螺卷屑逐渐向长螺卷屑转变。

图9为背吃刀量对切屑的影响。可以观察到,在其他参数不变的情况下,随着背吃刀量的增加切屑长度增加,当背吃刀量增加时,破坏点至中性轴的距离增大,切屑不易折断,故切屑长度呈现增加的趋势;切屑卷曲半径随着背吃刀量的增加而增大,当背吃刀量增大时,刀-屑接触面积增大,切削温度显著上升,切

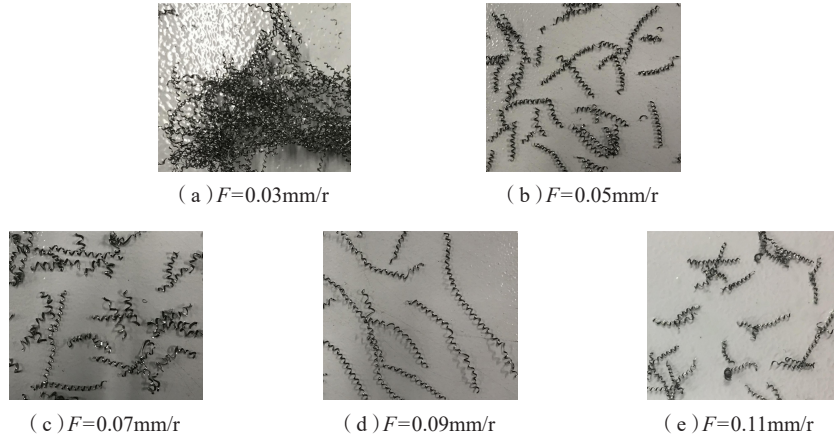


图6 不同进给量下切屑宏观形态
Fig.6 Macro morphology of chips under different feed rates

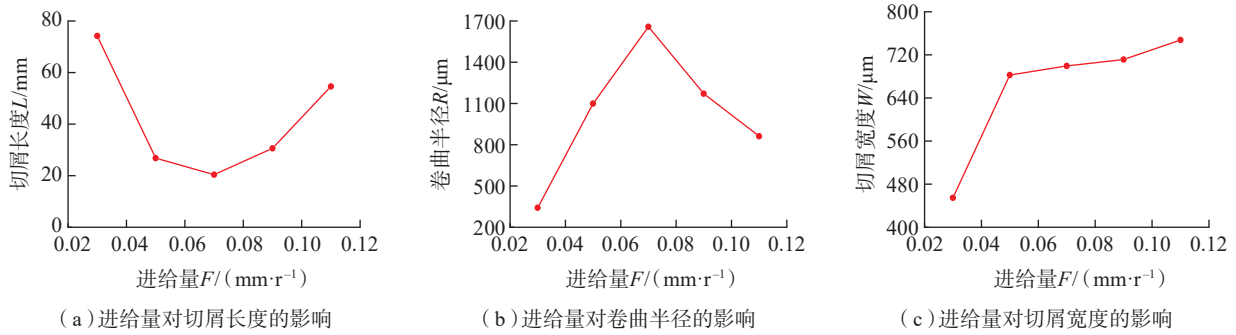


图7 不同进给量对切屑的影响
Fig.7 Effect of different feed rates on chip

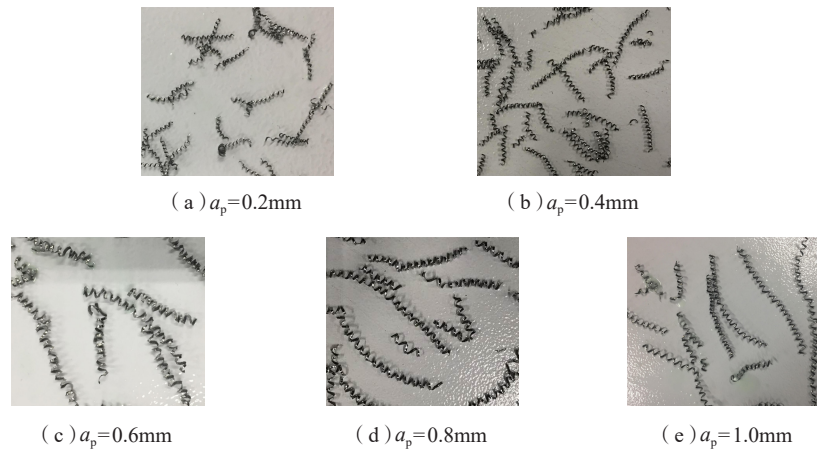


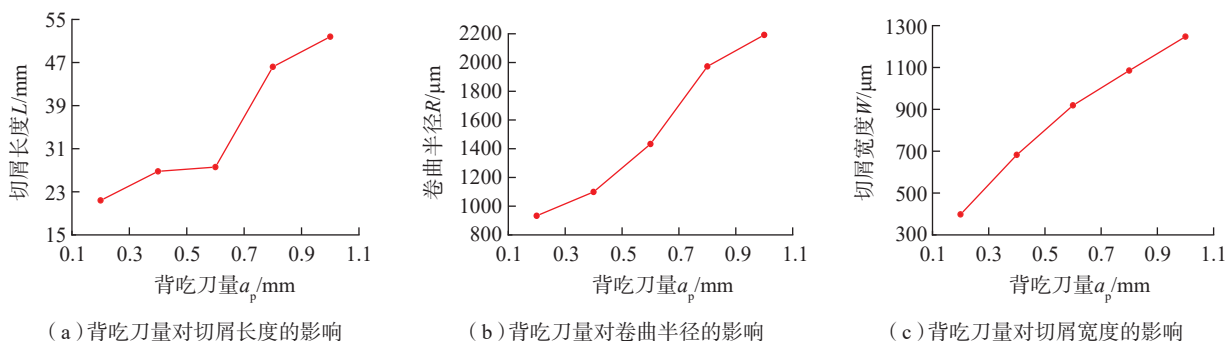
图8 不同背吃刀量下切屑宏观形态
Fig.8 Macro morphology of chips under different cutting depths

削热对切屑的软化效果明显大于加工硬化,切屑锯齿化程度增加,但锯齿化频率降低,导致切屑断裂应变增大,因此切屑卷曲半径增大;随着背吃刀量的增加切屑宽度逐渐增加,由于切削温度增加,对材料软化作用增强,切屑的塑性流动增强,当背吃刀量增加时,切屑卷曲半径增加,刀-屑接触长度增加,导致切屑受到充分的挤压,变形程度较大,因此切屑宽度逐渐增大。

3.4 冷却压力对切屑形态的影响

图 10 为不同冷却压力下切屑宏观形态。当切削用量一定时,随着冷却压力的增大,切屑由长螺卷屑逐渐向短碎型卷屑转变,且冷却压力越大,切屑越碎小。

图 11 为冷却压力对切屑的影响。可以发现,在其他参数一定时,冷却压力对切屑的作用效果占主导地位,切屑长度随着冷却压力的增大显著变短,高压冷却可以有效地促进切屑的折断,降低切屑锯齿化程度,但



(a) 背吃刀量对切屑长度的影响

(b) 背吃刀量对卷曲半径的影响

(c) 背吃刀量对切屑宽度的影响

图9 背吃刀量对切屑形态的影响

Fig.9 Effect of cutting depth on chip morphology

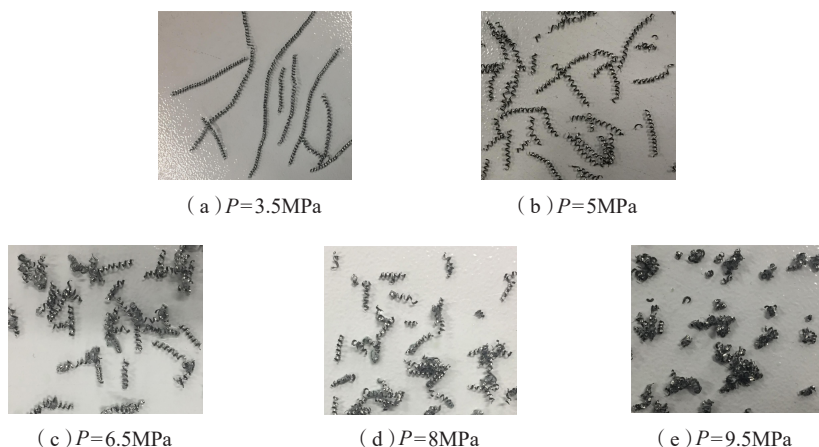
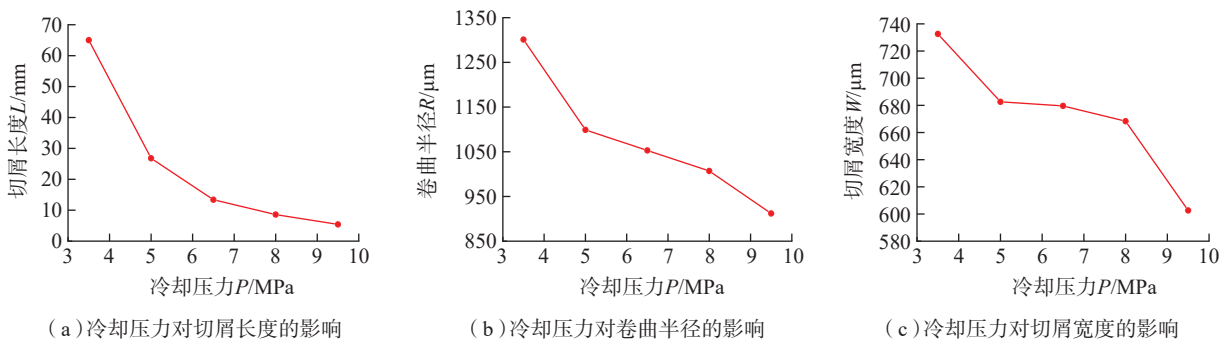
(a) $P=3.5\text{MPa}$ (b) $P=5\text{MPa}$ (c) $P=6.5\text{MPa}$ (d) $P=8\text{MPa}$ (e) $P=9.5\text{MPa}$

图10 不同冷却压力下切屑宏观形态

Fig.10 Macro morphology of chips under different cooling pressure



(a) 冷却压力对切屑长度的影响

(b) 冷却压力对卷曲半径的影响

(c) 冷却压力对切屑宽度的影响

图11 冷却压力对切屑的影响

Fig.11 Effect of cooling pressure on chip

是当附加冷却压力增大,切屑受力增大,至中性轴距离不变情况下,切屑弯矩增大,故切屑更容易折断进而长度减小;随着冷却压力的增加切屑卷曲半径逐渐减小,高压冷却液能够明显的降低切削温度,并且产生“淬冷”现象,降低了材料的延展性,当冷却压力增大时,切屑弯矩也会增大,因此切屑卷曲半径减小。随着冷却压力的增大切屑宽度逐渐减小,当冷却压力增加时切削温度逐渐降低,在切削过程中,切屑会带有大部分热量,所以温度对切屑影响作用很大,温度降低,切屑的塑性流动能力降低,变形程度降低,因此切屑宽度逐渐减小。

3.5 负倒棱角度对切屑形态的影响

图 12 为不同倒棱角度下切屑宏观形态。当其他参数保持一定时,随着倒棱角度的增大切屑由细长型螺卷屑向短粗型螺卷屑转变。

图 13 为倒棱角度对切屑形态的影响。可以观察到,切屑长度在倒棱角度为 $-5^{\circ}\sim-10^{\circ}$ 范围内变化较为明显,大于 -10° 时,切屑长度趋于稳定;随着倒棱角度的增大,刀-屑接触长度变大,导致切屑弯矩增大,切屑卷曲的能力得到了增强,因此切屑长度逐渐

减小;卷曲半径随着倒棱角度的增加而逐渐降低,并且趋于线性,增大倒棱角度,增强切屑的卷曲能力,故卷曲半径逐渐减小;切屑宽度随着倒棱角度的增加出现先增加后减小的趋势,当倒棱角度为 -20° 时,切削宽度达到最大,随着倒棱角度的增大,增强了倒棱区域对切屑的挤压作用,切削温度升高,对材料的软化作用增强,塑性流动性增强,切屑宽度逐渐增加,当倒棱角度大于 -20° ,冷却液的降温作用降低了材料的延展性,塑性流动降低,故切屑宽度又逐渐降低。

3.6 倒棱宽度对切屑形态的影响

图 14 为不同倒棱宽度下切屑宏观形态。可以发现,当切削用量和冷却压力保持一定,随着倒棱宽度的增大,切屑先由细长型螺卷屑向短粗型螺卷屑转变,接着又转变粗长型螺卷屑。

图 15 为不同倒棱宽度对切屑的影响。可以观察到,切屑长度在 $0.10\sim 0.15\text{mm}$ 范围内变化较为明显,随着倒棱宽度的进一步增加,切屑长度开始递增,当倒棱宽度达到 0.30mm 时,切屑长度接近倒棱宽度为 0.10mm 时

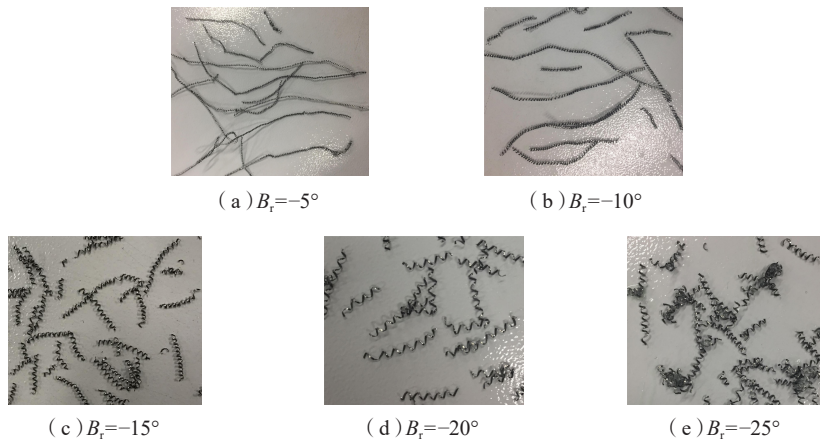


图 12 不同倒棱角度下切屑宏观形态

Fig.12 Macro morphology of chips under different chamfering angles

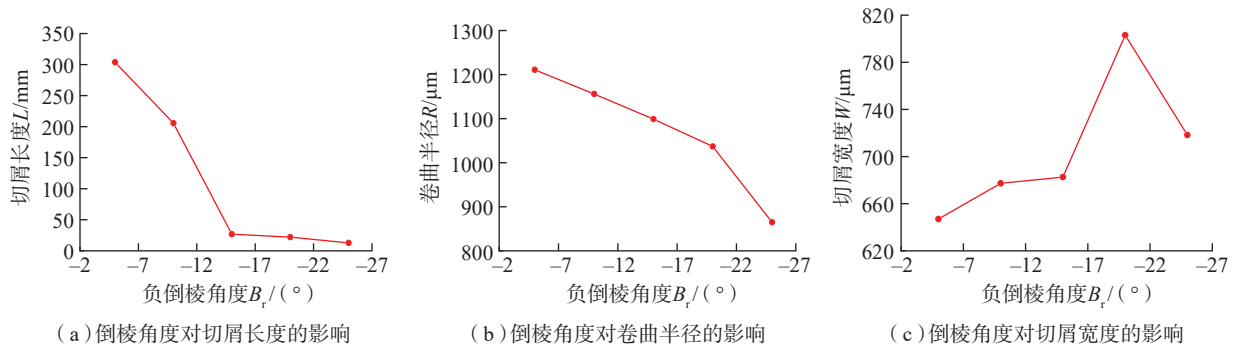


图 13 倒棱角度对切屑的影响

Fig.13 Effect of different chamfering angles on chip

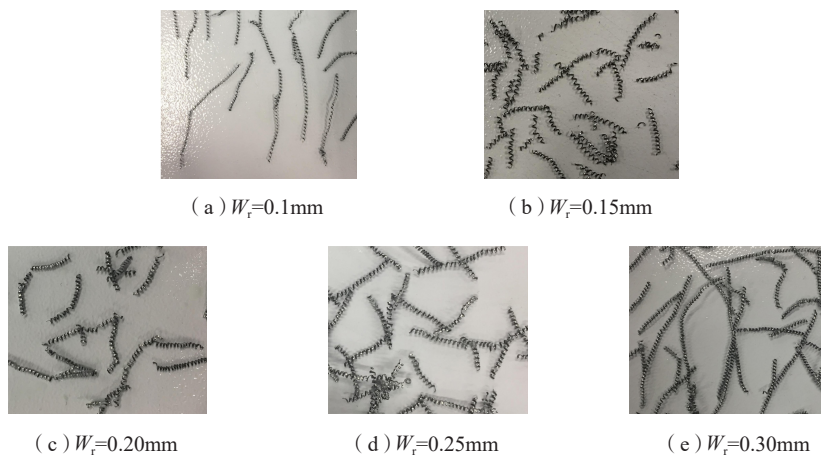


图14 不同倒棱宽度下切屑宏观形态

Fig.14 Macro morphology of chips under different chamfering widths

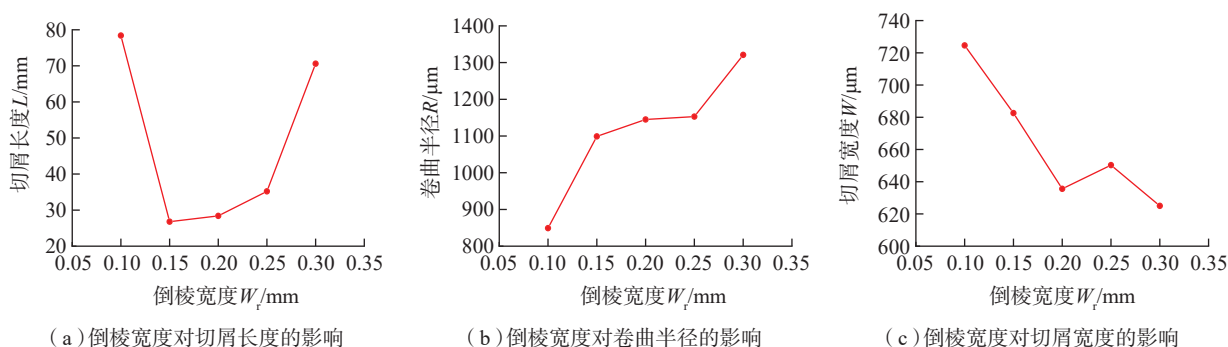


图15 倒棱宽度对切屑的影响

Fig.15 Effect of different chamfering widths on chip

的切屑长度,当倒棱宽度增加时,增强了刀具对工件材料的挤压作用,切屑沿着倒棱区域流出,刀-屑接触长度增大,切屑弯矩增大,切屑长度逐渐变短,当倒棱宽度大于0.15mm时,切屑的流出方向完全沿着倒棱区域,刀-屑接触长度减小,切屑弯矩又逐渐变小,因此切屑长度又出现逐渐增加趋势;卷曲半径随着倒棱宽度的增加呈现非线性的增加,当倒棱宽度增加时,倒棱区域面积增大,刀-屑接触长度减小,切屑弯矩减小,切屑折断能力降低,故切屑卷曲半径增大;切屑宽度随着倒棱宽度的增加逐渐降低,当倒棱宽度大于0.20mm时,出现切屑长度小幅增长的波动。当倒棱宽度增加时,切屑沿着倒棱区域流出,受到冷却液降温作用,降低了材料的延展性,并且刀具对切屑的挤压作用时间变短,切屑塑性流动性降低,因此切屑宽度逐渐降低。

4 结论

(1)通过分析高压冷却下切屑的受力状态,把切屑视作悬臂梁,对其进行弯矩理论分析,建立了切屑弯矩模型。

(2)进行了不同切削用量下的车削试验,对切屑的变化规律进行了探讨,进而得知在试验参数范围内,随着切削速度的增加,切屑长度、卷曲半径和宽度均减小。随着进给量增大,切屑长度先减小后增大,卷曲半径先增大后减小,宽度增大。随着背吃刀量增大,切屑长度、卷曲半径和宽度均增大。

(3)通过分析不同冷却压力下切屑的形态,可知高压冷却可以明显提升断屑能力,减小切屑长度、卷曲半径和切屑宽度,进而验证了切屑弯矩的理论分析的合理性。

(4)选用不同倒棱参数的刀具进行试验,得知因切屑塑性侧流的影响,随着刀具负倒棱角度增大,切屑长度和卷曲半径均减小,切屑宽度先增大后减小。随着刀具倒棱宽度增加,切屑长度先减小后增大,卷曲半径增大,切屑宽度减小。

参考文献

- [1] 王会阳,安云岐,李承宇,等.镍基高温合金材料的研究进展[J].材料导报,2011,25(2):482-486.

WANG Huiyang, AN Yunqi, LI Chengyu, et al. Research progress of Nickel-based superalloy materials[J]. Materials Review, 2011, 25(2): 482-486.

[2] 储继影. 高温合金加工刀具选择与工艺参数优化研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.

CHU Jiying. Research on tool selection and process parameter optimization of superalloy machining[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.

[3] BERMINGHAM M J, KIRSCH J, SUN S, et al. New observations on tool life, cutting forces and chip morphology in cryogenic machining Ti-6Al-4V[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2011, 51(6): 500-511.

[4] PAWADE R S, JOSHI S. Mechanism of chip formation in high-speed turning of Inconel718[J]. Machining Science and Technology, 2011, 15(1): 132-152.

[5] ZHU Z J, SUN J, LI J F, et al. Investigation on the influence of tool wear upon chip morphology in end milling titanium alloy Ti6Al4V[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 83(9-12): 1477-1485.

[6] BERMINGHAM M J, PALANISAMY S, KENT D, et al. A comparison of cryogenic and high pressure emulsion cooling technologies on tool life and chip morphology in Ti-6Al-4V cutting[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212(4): 752-765.

[7] THAKUR D G, RAMAMOORTHY B, VIJAYARAGHAVAN L. Influence of minimum quantity lubrication on the high speed turning of aerospace material superalloy Inconel718[J]. International Journal of Machining and Machinability of Materials, 2013, 13(2/3): 203-214.

[8] HUA J, SHIVPURI R. Prediction of chip morphology and segmentation during the machining of titanium alloys[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 150(1-2): 124-133.

[9] 吴明阳, 于永新, 程耀楠, 等. 高压冷却下锯齿形切屑几何表征试验[J]. 中国机械工程, 2019, 30(1): 42-49.

WU Mingyang, YU Yongxin, CHENG Yaonan, et al. Geometrical characterization of serrated chips under high pressure cooling[J]. China Mechanical Engineering, 2019, 30(1): 42-49.

[10] 刘霞. 高压冷却润滑条件下难加工材料车削试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2017.

LIU Xia. Experimental study on turning of difficult-to-machine materials under high-pressure cooling lubrication conditions[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2017.

[11] 李亭亭. PCBN 刀具加工镍基高温合金切削过程试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2012.

LI Tingting. Experimental study on cutting process of nickel-base superalloy by PCBN tool[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012.

[12] 刘启彪. 车削镍基高温合金的切屑变形和刀具磨损研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.

LIU Qibao. Research on chip deformation and tool wear of turning nickel-based superalloys[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.

[13] 段春争, 王肇喜, 李红华. 高速切削锯齿形切屑形成过程的有限元模拟[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2014(2): 226-262.

DUAN Chunzheng, WANG Zhaoxi, LI Honghua. Finite element simulation of sawtooth chip formation process in high speed cutting[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2014(2): 226-262.

[14] 曲贵民, 徐亦红, 李振加. 短螺卷切屑折断的实验研究[J]. 电机与控制学报, 1996(2): 148-152.

QU Guimin, XU Yihong, LI Zhenjia. Experimental study on chip breaking of short screws[J]. Journal of Electric Machines and Control, 1996(2): 148-152.

[15] WU M Y, YU Y X, CHENG Y H, et al. Experimental investigation of chip plastic side flow in machining of GH4169 superalloy under high-pressure cooling[J]. Ferroelectrics, 2018, 530(1): 82-96.

通讯作者: 王维鑫, 硕士, 研究方向为高压冷却条件下切削层特性研究以及断屑模型的建立, E-mail: 15754324565@139.com。

(责编 思齐)

(上接第79页)

XIE Xiaohui, SUN Lining, CHENG Yuan. Off-line program based robotic compliant grinding method and experiment[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2016, 40(5): 619-625.

[14] MARQUEZ J J, PEREZ J M, RIOS J, et al. Process modeling for robotic polishing[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 159(1): 69-82.

[15] 邓华健, 赵汝海. 基于离线编程的机器人打磨轨迹规划[J]. 机械工程及自动化, 2017, 10(5): 52-54.

DENG Huajian, ZHAO Ruhai. Robot polishing path planning based on Offline programming[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2017, 10(5): 52-54.

[16] LIU Q, CHEN X, GINDY N. Investigation of acoustic emission signals under a simulative environment of grinding burn[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2006, 46: 284-292.

[17] 刘贵杰, 巩亚东, 王宛山. 基于摩擦声发射信号的磨削表面粗糙度在线检测方法研究[J]. 摩擦学学报, 2003, 23(3): 236-239.

LIU Guijie, GONG Yadong, WANG Wanshan. Online measuring of ground surface roughness based on friction-induced acoustic emission[J]. Tribology, 2003, 23(3): 236-239.

[18] LUKAS P, GIULIANO B. Development of on the machine process monitoring and control strategy in robot assisted polishing[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2015, 64: 313-316.

通讯作者: 雷沛, 博士, 工程师, 研究方向为航空智能制造装备、智能制造, E-mail: glleipei@yeah.net。

(责编 思齐)