

# 低温切削加工技术的研究进展

段鹏飞, 乔阳, 王相宇, 付秀丽, 郭培全

济南大学

**摘要:** 随着环保要求的愈发严格,低温切削加工技术作为一种绿色制造技术,受到越来越多的重视。低温切削使用低温流体作为冷却剂,切削过程中不会产生污染物,相对传统冷却液切削更加绿色环保。本文综述了低温切削加工技术的发展现状、分类和低温切削加工对工件加工表面质量的影响规律,并展望了低温切削加工技术的应用前景。

**关键词:** 低温切削;发展现状;切削温度;刀具寿命;表面完整性

**中图分类号:** TG506.3;TH161

**文献标志码:** A

**DOI:**10.3969/j.issn.1000-7008.2019.09.002

## Overview of Cryogenic Cutting Machining Technology

Duan Pengfei, Qiao Yang, Wang Xiangyu, Fu Xiuli, Guo Peiquan

**Abstract:** With the environmental requirements becoming more stringent, cryogenic machining technology has received more attention as a green manufacturing process. Cryogenic cutting machining uses a low-temperature fluid as a coolant, which does not produce the contaminants during machining, this makes it more environmentally friendly than conventional coolant cutting. The development status of cryogenic machining technology, classification and the influence of cryogenic machining on the surface quality of workpieces are reviewed in this paper. Finally, the application prospects of low temperature cutting are prospected.

**Keywords:** cryogenic machining; development status; cutting temperature; tool life; surface integrity

## 1 引言

随着机械工业的发展,绿色制造的概念在切削加工领域不断强化。在切削过程中,冷却液的挥发和排放对工人健康和环境都有负面影响<sup>[1,2]</sup>。为了让切削绿色化,传统的切削冷却方法不断改进,新的

冷却方法层出不穷。低温切削加工技术是使用低温流体作为冷却剂对切削加工过程进行冷却,低温流体实现冷却效果后变为气体成为空气的一部分,是绿色环保的切削方式<sup>[3,4]</sup>。

进行低温切削时,低温冷却剂良好的降温效果和材料在低温下的性能变化可以改善切削效果<sup>[5,6]</sup>。低温切削可以降低切削温度、延缓刀具磨损、降低加工表面粗糙度、增大材料的加工表面硬度和表面残余压应力<sup>[7,8]</sup>。

**基金项目:** 山东省自然科学基金(ZR2017BEE028);山东省重点研发计划(2017GGX30143, 2018GGX103010);国家自然科学基金(51675230)

**收稿日期:** 2019年2月

[44] Hung N P, Boey F Y C, Khor K A, et al. Machinability of cast and powder-formed aluminum alloys reinforced with sic particles[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1995, 48(1-4): 291-297.

[45] Ming Wang, Guo Jun Dong, Ming Zhou. Dynamic modeling and simulation analysis for rotary ultrasonic machining of SiC<sub>p</sub>/Al thin-walled structure[J]. Key Engineering Materials, 2013, 568: 15-20.

[46] 牛秋林, 唐玲艳, 刘晓, 等. 切削参数对 SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料铣削棱边形貌的影响[J]. 宇航材料工艺, 2017, 47(5): 35-39.

[47] 赵明利, 郭秋成, 晁政. 超声辅助切削 SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料棱边缺陷有限元仿真研究[J]. 河南理工大学学报, 2016, 35(1): 95-99.

[48] Zhou L, Wang Y, Ma Z Y, et al. Finite element and experimental studies of the formation mechanism of edge defects during machining of SiC<sub>p</sub>/Al composites[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2014, 84(6): 9-16.

第一作者: 周柏健, 硕士研究生, 湖南科技大学机电工程学院, 411201 湖南省湘潭市

First Author: Zhou Baijian, Postgraduate, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411201, China

通信作者: 牛秋林, 博士, 副教授, 湖南科技大学机电工程学院, 411201 湖南省湘潭市

Corresponding Author: Niu Qiulin, Doctor, Associate Professor, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411201, China

## 2 低温切削的发展现状

### 2.1 国外发展现状

国外于20世纪70年代开始研究低温切削加工方法,但技术不够成熟。进入21世纪,研究成果变得丰富。Hong S. Y. 等<sup>[9-11]</sup>对多种合金钢和钛合金进行了低温切削试验,发现低温切削可以有效降低切削温度和刀具磨损,延长刀具寿命。Dhar N. R. 等<sup>[12,13]</sup>采用低温切削技术加工 AISI4140 钢,结果表明低温冷却有效降低了刀具磨损,提高了刀具寿命,工件表面粗糙度和尺寸精度得到显著提高。Khan A. A. 等<sup>[14]</sup>使用加工有内孔的车刀对不锈钢 SUS304 进行低温车削,使用改良车刀和液氮冷却有效延长了刀具寿命,刀具寿命增加到2倍以上。Manimaran G. 等<sup>[15]</sup>使用液氮冷却作为提高磨削 AISI D3 钢表面质量的方法。相对于磨削和传统冷却液磨削,低温磨削技术可降低表面粗糙度,改善表面完整性。Bordin A. 等<sup>[16]</sup>对 Ti6Al4V 工件进行了低温切削,分析了冷却措施对刀具和加工表面的影响,发现低温切削明显改善了工件的加工质量和刀具寿命,提高了 Ti6Al4V 工件的加工性能。

### 2.2 国内发展现状

我国低温切削技术的研究始于20世纪80年代,但研究成果较少。进入21世纪,许多研究人员对低温切削进行了研究。魏树国<sup>[17]</sup>对 BT20 钛合金进行了液氮低温切削试验。液氮低温切削可以有效降低切削温度和刀具磨损,保证了表面加工质量。安庆龙等<sup>[18,19]</sup>采用低温喷雾方式切削钛合金,试验表明,低温切削加工能有效降低切削温度,延长刀具寿命,降低表面粗糙度。马建斌<sup>[20]</sup>通过液氮低温冷却进行了不锈钢的低温切削,发现使用液氮低温切削可以提高工件表面质量,减少刀具磨损,提高切削效率。钱景行<sup>[21]</sup>对 AZ31B 镁合金采用了低温液氮切削,低温切削过程中温度的有效降低增大了加工表面的残余压应力值,改善了表面完整性。齐向东<sup>[22]</sup>采用内部冷却刀具对 TC4 钛合金进行了低温铣削,试验发现,低温冷却有效降低了表面粗糙度,减少了刀具粘结磨损,改善了刀具耐用度,提高了加工效率。

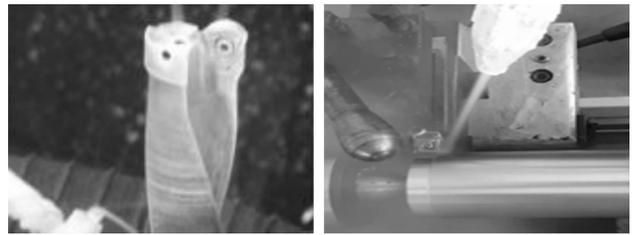
## 3 低温切削的分类

根据冷却温度划分,低温切削主要分为三种类型:常温以下切削、零度以下切削和超低温切削<sup>[23,24]</sup>。常温以下切削温度范围为 $4^{\circ}\text{C} \sim 6^{\circ}\text{C}$ ,零度

以下切削温度范围为 $0^{\circ}\text{C} \sim -30^{\circ}\text{C}$ ,超低温切削的温度范围小于 $-50^{\circ}\text{C}$ 。

根据冷却介质划分,低温切削主要分为低温冷风冷却、液态二氧化碳冷却和液氮冷却<sup>[25,26]</sup>。在三种冷却介质中,液氮冷却能力最强,液态二氧化碳冷却能力次之,低温冷风冷却能力不如以上两种,但低温冷风应用也十分广泛。

根据冷却措施划分,低温切削主要分为内部管路低温冷却和外部管路低温冷却两类<sup>[27]</sup>。内部管路低温冷却是在刀架或刀具内部加工管路,使用内部管路运输低温冷却剂冷却加工(见图1a)<sup>[28]</sup>;外部管路低温冷却通常是在加工设备外设置管路来运输和喷射低温冷却剂(见图1b)<sup>[29]</sup>。



(a) 内部管路

(b) 外部管路

图1 内部管路冷却和外部管路冷却

## 4 低温切削的应用效果

研究表明,低温切削可以对切削温度、刀具磨损、表面粗糙度、表面硬度和表面残余应力产生有益的影响。

### 4.1 对切削温度的影响

采用低温切削加工技术可有效降低切削温度。Sivaiah P. 等<sup>[30]</sup>使用液氮在不同的切削深度条件下切削 17-4PH 不锈钢,并将试验结果与微量润滑、传统冷却液切削和干切削进行对比。低温切削的总体温度分别下降了 $44\% \sim 58\%$ 、 $50\% \sim 59\%$ 和 $61\% \sim 71\%$ 。Jerold B. D. 等<sup>[31]</sup>研究了液态二氧化碳冷却和液氮冷却对 AISI1045 钢切削效果的影响。相比传统冷却液,低温冷却液可以更有效地渗入切削区,有效降低切削温度。液态二氧化碳和液氮的应用可分别使切削温度降低约 $6\% \sim 21\%$ 和 $9\% \sim 34\%$ 。Musfirah A. H. 等<sup>[32]</sup>分别在低温切削和干切削条件下使用多层 TiAlN 涂覆的硬质合金刀片对 Inconel718 材料进行了低温铣削的研究。低温切削技术不仅起到了冷却的作用,还通过减少切削刀具和工件之间的摩擦而起到润滑的作用,低温冷却可以将切削传递到刀具的热量减少近 $70\%$ 。Danish M. 等<sup>[33]</sup>研究了 AZ31 镁合金的低温切削对温度的

影响,建立了预测被加工表面温度分布的有限元模型,同时通过试验进行了验证。与干切削相比,在低温切削过程中观察到最高温度降低了57%~60%,可以有效减少镁合金AZ31烧伤损伤的发生概率。Dhananchezian M.等<sup>[34]</sup>使用加工有内孔的刀片对Ti6Al4V进行了低温车削,研究了低温切削对切削效果的影响。液氮可以通过刀具刀片上的孔直接喷射到发热区,液氮切削温度比传统冷却液切削降低了61%~66%(见图2)。

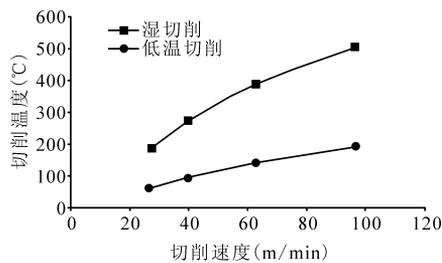


图2 不同冷却环境下切削速度对切削温度的影响<sup>[34]</sup>

#### 4.2 对刀具磨损的影响

低温切削可有效减少刀具磨损。Aramcharoen A.等<sup>[35]</sup>进行了低温冷却对Inconel 718铣削效果影响的试验研究,当使用低温冷却时,切削温度的降低减少了Inconel 718铣削过程中刀具和切屑之间的接触面积以及摩擦产生的热量,有效降低了刀具的磨损率。Zhuang K.等<sup>[36]</sup>研究了低温车削对Inconel 718表面质量的影响,使用低温冷却剂,有效减少了刀刃磨损,获得了最小的后刀面磨损量,与干切削相比,低温切削的刀具寿命延长了215%。Kaynak Y.<sup>[37]</sup>研究了Inconel 718的低温切削效果,并与干切削和微量润滑切削进行了对比,利用液氮进行低温冷却有效减少了刀具热裂纹的产生,减缓了刀具磨损速度(见图3),切削温度的降低有效减小了月牙洼磨损深度。Venugopal K. A.等<sup>[38]</sup>在干切削、常规冷却液切削和低温切削条件下对Ti6Al4V合金棒材进行了切削效果的对比,通过喷嘴进行了液氮低温冷却,有效降低切削温度,减少了刀具的粘结磨损和扩散磨损。Ravi S.等<sup>[39]</sup>研究了

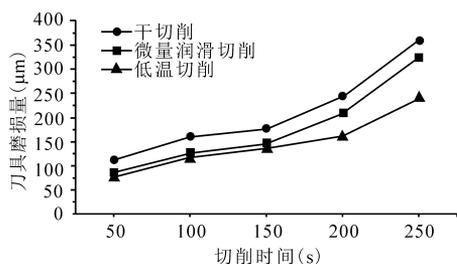


图3 不同冷却条件下刀具的侧面磨损量 ( $V_c=60\text{m/min}$ ,  $f=0.075\text{mm/r}$ ,  $a_p=0.8\text{mm}$ )<sup>[37]</sup>

液氮冷却对AISI H13工具钢切削性能的影响,低温切削有效减少了刀具热裂纹的产生,刀具受到热疲劳的影响较少,与干切削和传统冷却液切削相比,刀具磨损减少了29%~34%和10%~12%。

#### 4.3 对表面粗糙度的影响

低温切削可有效降低表面粗糙度。El-anchezian J.等<sup>[40]</sup>在传统冷却液冷却和低温冷却环境中使用电镀立方氮化硼砂轮对Ti6Al4V合金进行了研磨试验,由于研磨区域的温度受到控制,低温冷却加工后的表面粗糙度与传统冷却液研磨相比降低了38%。Islam A. K.等<sup>[41]</sup>使用内部有通道的铣刀对EN24钢进行了低温铣削的研究,相对干铣削的表面质量,传统冷却液铣削可使表面粗糙度值降低12%,内部通道施加液氮可使表面粗糙度值降低28%。Umbrello D.等<sup>[42]</sup>在干燥和低温冷却条件下使用CBN刀具对AISI 52100钢进行了车削试验,研究了低温冷却对加工件表面完整性的影响,结果表明,低温切削的表面粗糙度值始终低于干切削,低温切削产生的表面粗糙度值与磨削产生的表面粗糙度值相当(见图4)。Shokrani A.等<sup>[43]</sup>研究了低温铣削Ti6Al4V时低温冷却对表面完整性的影响,低温切削所获得的表面粗糙度值明显低于干切削和传统的冷却剂切削,测量结果表明,低温冷却样品的表面粗糙度平均下降18%和21%。孟春等<sup>[44]</sup>以液氮为冷却介质,在低温下切削TC4钛合金,将其与相同试验条件下的干切削进行比较,发现液氮低温切削能有效抑制刀具上积屑瘤的产生,减少了粘结现象的产生,低温切削可降低表面粗糙度并改善表面质量。

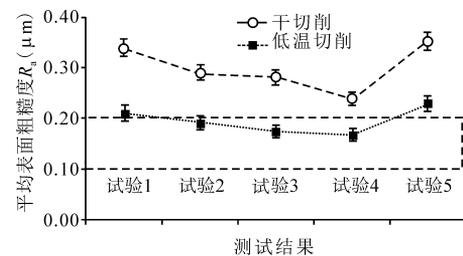


图4 不同冷却条件下加工样品的平均表面粗糙度<sup>[42]</sup>

#### 4.4 对表面硬度的影响

低温切削可有效提高表面硬度。Dinesh S.等<sup>[45]</sup>在各种切削速度和进给速率下进行了ZK60镁合金样品的低温车削试验,研究了液氮对切削温度、切削力和表面硬度的影响,试验发现,低温切削提高了表面硬度,表面硬度值与基体材料硬度值相比提高了约40%(见图5)。Pu Z.等<sup>[46]</sup>研究了低温加工环境和切削刃半径对AZ31镁合金表面完整性的影

响,在实验条件下,切削刃的增大和低温切削的应用可以有效提高 AZ31 镁合金的表面硬度,低温加工后,加工表面下方  $10\mu\text{m}$  的显微硬度由 52HV 增加到 96HV。Rotella G. 等<sup>[47]</sup>对 Ti6Al4V 进行了干切削、传统冷却液切削和低温冷却切削的加工对比研究,从表面粗糙度、表面硬度等方面研究了冷却条件对产品表面完整性和性能的影响,结果表明,低温切削条件可以使材料在各种试验条件下达到较高的表面硬度。Sun Y. 等<sup>[48]</sup>使用液氮低温切削了 Ti6Al7Nb 钛合金,研究了低温切削环境对表面完整性的影响,结果表明,与干切削和常规冷却液切削相比,低温加工表面层的表面硬度分别提高了 33.6% 和 14.7%。Kaynak Y. 等<sup>[49]</sup>研究了低温切削对 NiTi 记忆合金显微组织的影响,低温切削和干切削后的表面硬度高于原材料,而采用低温切削方式得到了最高的表面硬度。

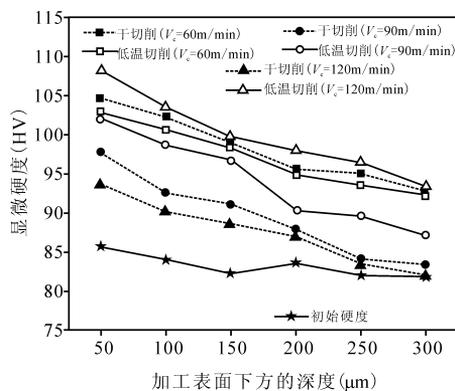


图5 不同冷却条件下加工表面的显微硬度<sup>[45]</sup>

#### 4.5 对表面残余应力的影响

低温切削可有效提高表面残余压应力。Jr W. V. L. 等<sup>[50]</sup>使用多晶立方氮化硼刀具进行了干车削和低温车削 AISI D6 钢的试验,结果表明,车削参数和冷却方式对工件表面的残余应力有影响,切削时温度的降低可以帮助加工表面产生更高的残余压应力。Pusavec F. 等<sup>[51]</sup>研究了冷却变形区,产生了较高的残余压应力。Outeiro J. C. 等<sup>[52]</sup>使用低温切削来改善 AZ31 镁合金切削加工的表面完整性,与干切削相比,低温冷却的应用可以有效提高工件表面的残余压应力,并加深残余压应力的分布,有效提高了表面质量(见图6)。Sartori S. 等<sup>[53]</sup>为了提高 Ti6Al4V 生物医学部件的表面质量,在液氮冷却的条件下对 Ti6Al4V 进行了低温切削,试验表明,低温冷却的应用导致表面残余压缩应力层普遍增厚,增强了表面残余压应力,提高了表面完整性。

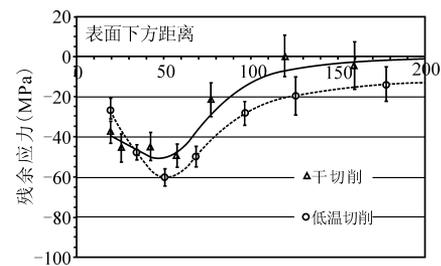


图6 不同冷却条件下的残余应力分布<sup>[52]</sup>

## 5 结语

低温切削是一种绿色环保的切削方法,可以降低切削温度、延缓刀具磨损、降低加工表面粗糙度、增大材料的加工表面硬度和表面残余压应力。但是,目前低温切削的发展仍存在不足,低温切削进一步发展的研究方向主要有以下方面:

(1) 低温切削的研究局限在高温合金、钛合金和镁合金的加工领域,对许多常用合金的低温切削研究较少。这些常用合金在许多应用场合需要更好的表面性能,对低温切削技术有一定需求。低温切削技术的推广应用离不开对更多种类材料切削性能的研究。

(2) 低温切削的研究主要是将低温切削与干切削和传统冷却液切削作对比,而目前低温冷却环境下切削参数对工件表面质量影响的系统研究仍有很大不足。低温冷却环境下切削参数的优化具有较高的应用价值,这是低温切削需要进一步研究的方向。

(3) 低温切削的研究很多集中在低温切削的应用效果,对低温切削机理的研究较少。对低温切削机理的研究有助于解释低温切削应用效果的原因,低温切削机理的不足是制约低温切削发展的重要原因,这也是低温切削研究的重要方向之一。

(4) 低温切削费用相对较高,如何更好地平衡加工质量和加工费用是实现低温切削最大应用价值的必然要求。在提高加工质量的同时如何降低低温切削的费用是低温切削发展未来的研究重点之一。

## 参考文献

- [1] 乔帆,任斐,刘晓,等. 难加工材料超低温切削的切屑形貌研究[J]. 机械制造,2018(6):63-66.
- [2] 朱林,张晓琴. 镍基高温合金在低温冷风微润滑条件下的切削研究[J]. 装备制造技术,2015(12):21-23.
- [3] 周波,侯力,唐锐,等. 基于低温冷却技术的钛合金切削性能分析[J]. 组合机床与自动化加工技术,2015(7):11-14.
- [4] Jawahir I S, Puleo D A, Schoop J. Cryogenic machining of bi-

- omedical implant materials for improved functional performance, life and sustainability [J]. *Procedia CIRP*, 2016, 46: 7-14.
- [5] 李伯豪, 赵海珠. 液氮冷却对高强度不锈钢加工性能的影响[J]. *航天制造技术*, 2017(4): 9-12.
- [6] 孙林平, 赵四海. 1Cr18Ni9Ti 材料的低温冷风车削性能实验研究[J]. *精密制造与自动化*, 2015(4): 20-22.
- [7] 刘克铭, 孙建强, 马壮, 等. 液氮冷却磨削淬火后 42CrMo 钢的组织与硬度[J]. *机械工程材料*, 2016, 40(9): 10-13.
- [8] 肖虎, 李亮. TC4 钛合金在低温 CO<sub>2</sub> 冷却下的切削性能[J]. *中国机械工程*, 2017, 28(8): 883-887.
- [9] Hong S Y, Zhao Z. Thermal aspects, material considerations and cooling strategies in cryogenic machining [J]. *Clean Products and Processes*, 1999, 1(2): 107-116.
- [10] Hong S Y, Broomer M. Economical and ecological cryogenic machining of AISI 304 austenitic stainless steel [J]. *Clean Products and Processes*, 2000, 2(3): 157-166.
- [11] Hong S Y, Ding Y. Cooling approaches and cutting temperatures in cryogenic machining of Ti-6Al-4V [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2001, 41(10): 1417-1437.
- [12] Dhar N R, Paul S, Chattopadhyay A B. The influence of cryogenic cooling on tool wear, dimensional accuracy and surface finish in turning AISI 1040 and E4340C steels [J]. *Wear*, 2001, 249(10-11): 932-942.
- [13] Dhar N R, Paul S, Chattopadhyay A B. Machining of AISI 4140 steel under cryogenic cooling-tool wear, surface roughness and dimensional deviation [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, 123(3): 483-489.
- [14] Khan A A, Ahmed M I. Improving tool life using cryogenic cooling [J]. *Journal of Materials Processing Tech.*, 2008, 196(1): 149-154.
- [15] Manimaran G, Pradeep Kumar M, Venkatasamy R. Surface modifications in grinding AISI D3 steel using cryogenic cooling [J]. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2015, 37(4): 1357-1363.
- [16] Bordin A, Sartori S, Bruschi S, et al. Experimental investigation on the feasibility of dry and cryogenic machining as sustainable strategies when turning Ti-6Al-4V produced by additive manufacturing [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 142: 4142-4151.
- [17] 魏树国. BT20 钛合金低温切削机理的研究 [D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2004.
- [18] 安庆龙. 低温喷雾射流冷却技术及其在钛合金机械加工中的应用 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2006.
- [19] 安中国. 低温喷雾射流冷却技术及其在钛合金车削加工中的应用 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007.
- [20] 马建斌. 奥氏体不锈钢 1Cr18Ni9Ti 的低温切削研究 [D]. 太原: 太原科技大学, 2010.
- [21] 钱景行. 基于仿真的 AZ31B 镁合金低温切削的表面完整性及能耗研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2015.
- [22] 齐向东. 干冰低温铣削 TC4 钛合金的试验研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.
- [23] 江雪. 45CrNiMoVA 高强度钢的低温切削实验研究 [D]. 太原: 太原科技大学, 2011.
- [24] 陈冲, 赵威, 何宁, 等. 液氮冷却下大进给铣削 TC4 钛合金的试验研究 [J]. *工具技术*, 2014, 48(8): 13-17.
- [25] 李郁, 田卫军, 任军学, 等. 低温冷却 GH4169 高温合金插铣刀具磨损试验研究 [J]. *现代制造工程*, 2017(8): 87-92.
- [26] 杨卫亮. 316L 不锈钢的低温切削研究 [D]. 太原: 太原科技大学, 2010.
- [27] 乔培平. 低温冷却切削加工研究与应用 [J]. *新技术新工艺*, 2015(5): 112-114.
- [28] Kheireddine A H, Ammouri A H, Lu T, et al. An experimental and numerical study of the effect of cryogenic cooling on the surface integrity of drilled holes in AZ31B Mg alloy [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 78(1-4): 269-279.
- [29] Dhananchezian M, Priyan M R, Rajashekar G, et al. Study the effect of cryogenic cooling on machinability characteristics during turning duplex stainless steel 2205 [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2018, 5(5): 12062-12070.
- [30] Sivaiah P, Chakradhar D. Effect of cryogenic coolant on turning performance characteristics during machining of 17-4 PH stainless steel; a comparison with MQL, wet, dry machining [J]. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2018, 21: 1-11.
- [31] Jerold B D, Kumar M P. Experimental comparison of carbon-dioxide and liquid nitrogen cryogenic coolants in turning of AISI 1045 steel [J]. *Cryogenics*, 2012, 52(10): 569-574.
- [32] Musfirah A H, Ghani J A, Haron C H C, et al. Effect of cutting parameters on cutting zone in cryogenic high speed milling of inconel 718 ally [J]. *Jurnal Teknologi (Sciences and Engineering)*, 2015, 77: 1-7.
- [33] Danish M, Ginta T L, Habib K, et al. Thermal analysis during turning of AZ31 magnesium alloy under dry and cryogenic conditions [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 91(5-8): 1-14.
- [34] Dhananchezian M, Kumar M P. Cryogenic turning of the Ti-6Al-4V alloy with modified cutting tool inserts [J]. *Cryogenics*, 2011, 51(1): 34-40.
- [35] Aramcharoen A, Chuan S K. An experimental investigation on cryogenic milling of inconel 718 and its sustainability

- assessment[J]. *Procedia Cirp*, 2014, 14: 529 – 534.
- [36] Zhuang K, Zhang X, Zhu D, et al. Employing preheating- and cooling-assisted technologies in machining of Inconel 718 with ceramic cutting tools; towards reducing tool wear and improving surface integrity[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 80(9 – 12): 1815 – 1822.
- [37] Kaynak Y. Evaluation of machining performance in cryogenic machining of Inconel 718 and comparison with dry and MQL machining[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, 72(5 – 8): 919 – 933.
- [38] Venugopal K A, Paul S, Chattopadhyay A B. Tool wear in cryogenic turning of Ti-6Al-4V alloy [J]. *Cryogenics*, 2007, 47(1): 12 – 18.
- [39] Ravi S, Kumar M P. Experimental investigations on cryogenic cooling by liquid nitrogen in the end milling of hardened steel[J]. *Cryogenics*, 2011, 51(9): 509 – 515.
- [40] Elanchezian J, Pradeep Kumar M, Manimaran G. Grinding titanium Ti-6Al-4V alloy with electroplated cubic boron nitride wheel under cryogenic cooling [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2015, 29(11): 4885 – 4890.
- [41] Islam A K, Mia M, Dhar N R. Effects of internal cooling by cryogenic on the machinability of hardened steel[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 90(1 – 4): 1 – 10.
- [42] Umbrello D, Micari F, Jawahir I S. The effects of cryogenic cooling on surface integrity in hard machining: a comparison with dry machining [J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2012, 61(1): 103 – 106.
- [43] Shokrani A, Dhokia V, Newman S T. Investigation of the effects of cryogenic machining on surface integrity in CNC end milling of Ti-6Al-4V titanium alloy [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2016, 21: 172 – 179.
- [44] 孟春, 李淑娟. 液氮低温切削钛合金实验研究[J]. *机械工程师*, 2012(3): 30 – 32.
- [45] Dinesh S, Senthilkumar V, Asokan P, et al. Effect of cryogenic cooling on machinability and surface quality of biodegradable ZK60 Mg alloy [J]. *Materials and Design*, 2015, 87: 1030 – 1036.
- [46] Pu Z, Outeiro J C, Batista A C, et al. Enhanced surface integrity of AZ31B Mg alloy by cryogenic machining towards improved functional performance of machined components [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2012, 56: 17 – 27.
- [47] Rotella G, Dillon O W, Umbrello D, et al. The effects of cooling conditions on surface integrity in machining of Ti6Al4V alloy [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, 71(1 – 4): 47 – 55.
- [48] Sun Y, Huang B, Puleo D A, et al. Improved surface integrity from cryogenic machining of Ti-6Al-7Nb alloy for biomedical applications [J]. *Procedia CIRP*, 2016, 45: 63 – 66.
- [49] Kaynak Y, Tobe H, Noebe R D, et al. The effects of machining on the microstructure and transformation behavior of NiTi alloy [J]. *Scripta Materialia*, 2014, 74(3): 60 – 63.
- [50] Jr W V L, Melo A C A D, Adilson José de Oliveira, et al. Effects of cryogenic cooling on the surface integrity in hard turning of AISI D6 steel [J]. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2018, 40(1): 15 – 29.
- [51] Pusavec F, Hamdi H, Kopac J, et al. Surface integrity in cryogenic machining of nickel based alloy – Inconel 718 [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2011, 211(4): 773 – 783.
- [52] Outeiro J C, Batista António Castanhola, Marques M J. Residual stresses induced by dry and cryogenic cooling during machining of AZ31B magnesium alloy [J]. *Advanced Materials Research*, 2014, 996: 658 – 663.
- [53] Sartori S, Bordin A, Ghiotti A, et al. Analysis of the surface integrity in cryogenic turning of Ti6Al4V produced by direct melting laser sintering [J]. *Procedia CIRP*, 2016, 45: 123 – 126.
- 第一作者: 段鹏飞, 硕士研究生, 济南大学机械工程学院, 250022 济南市  
*First Author: Duan Pengfei, Postgraduate, College of Mechanical Engineering, Jinan University, Jinan 250022, China*
- 通信作者: 王相宇, 博士, 讲师, 济南大学机械工程学院, 250022 济南市  
*Corresponding Author: Wang Xiangyu, Doctor, Lecturer, College of Mechanical Engineering, Jinan University, Jinan 250022, China*