

航空难加工材料的深冷加工技术研究进展

孙惠斌

(西北工业大学现代设计与集成制造技术教育部重点实验室,西安 710072)

[摘要] 主要介绍了深冷加工技术的发展现状,论述了深冷加工对航空难加工材料切削性能、切削温度、刀具磨损、表面完整性等的影响,指出了进一步研究和应用亟待探索和解决的问题。

关键词: 难加工材料; 切削性能; 深冷加工

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2017.08.016



孙惠斌

博士、副教授,主要从事数字化制造、智能制造、制造过程感知等方向的研究工作。

超高强度钢、钛合金、高温合金等难加工材料具有高硬度、高强度、高韧性和高耐磨性等特点,是航空关键零件的常用材料。但是,这些材料的导热系数低、化学活性大、亲和力强,导致切削温度高、切削力大,严重影响刀具的寿命。为了提高航空难加工材料的切削性能,常采用高速切

削、优化刀片基体和几何角度、采用新的涂层技术、改进冷却润滑方式等方法。近年来,深冷加工技术凭借其切削区域温度、零件表面完整性、刀具磨损等的显著改善,以及卓越的环境友好性,成为提高航空难加工材料切削性能的主要技术之一。

深冷加工技术

深冷(Cryogenic)是指利用液氧、液体氟、液体氮、液体氩等冷却介质达到 100K 或 120K 以下的低温冷冻技术^[1]。由于液氮(LN₂)经济、无污染、不产生化学反应,深冷技术常以液氮作为冷源,利用其相变吸热来获得 -196℃ 的低温环境。某些情况下,高于 100K 的低温冷冻技术也被纳入深冷范畴,如以固体或液体二氧化碳作为冷却介质。深冷技术在机械加工中的应用可分为深冷处理(Cryogenic Processing)和深冷加工(Cryogenic Machining)两种。深冷处理是一种扩展的热处理工艺,通过冷却来增强刀具或材料的切削性能,如提高刀具的硬度或改善韧性材料的脆度。深冷加工是指在切削加工过

程中通过局部施加冷源,降低切削变形区域的温度,从而达到减少刀具磨损、改善加工表面质量的目的。深冷加工是一个典型的多学科交叉技术,涉及低温物理学、材料学、热力学、传热学、金属切削原理、测控技术等领域。深冷加工是提高难加工材料切削性能的重要途径,相关的研究和应用已成为学科前沿和热点。

深冷加工的冷却方式

深冷加工的冷却方式分为切削区域冷却法、工件冷却法和刀具冷却法 3 种。

(1) 切削区域冷却法: 将液氮直接喷射到切削区域,达到降低切削区域温度、冷却刀具,提高刀具性能的目的。液氮可以通过外部喷嘴喷射,也可以通过机床主轴和刀具内部的管道传输,从刀片切削刃部的微孔中释放(图 1)^[2],避免将机床部件、夹具或传感器暴露在低温气体中。

(2) 工件冷却法: 在加工前或加工过程中通过液氮喷雾冷却工件,使韧性材料变得更脆一点,或者使高分子材料的温度低于玻璃化转变温度,

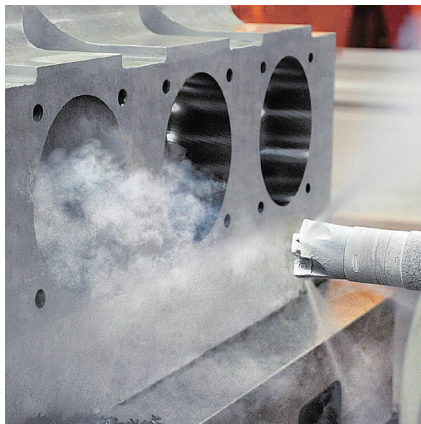


图1 深冷加工现场

Fig.1 Cryogenic machining example

从而使材料性能更有利于切削。

(3) 刀具冷却法: 在加工中不断地冷却刀具, 使切削热快速地从刀具上、特别是刀尖处被带走, 刀尖始终保持在较低温度。这种方法只冷却刀具, 不冷却工件, 不影响工件的几何尺寸和力学性能。

深冷加工技术研究现状

深冷加工是一个复杂的多学科耦合过程, 涉及几何、材料、传热、化学等变化。目前, 难以建立能够完整、精确描述这一过程的解析模型。因此, 对深冷加工的研究主要方式是利用 Deform 3D、Advantage、Abaqus 等软件行有限元仿真, 计算深冷加工过程中的温度、应变、应变率等(图 2)^[3]; 或开展实际的切削实验, 旨在观察深冷加工对零件质量、表面完整性、刀具磨损等的影响(图 3)^[3], 发现切削性能和切削结果的变化规律, 并利用响应曲面法等优化切削参数。

深冷加工常用的工件材料包括钛合金、镍基合金、奥氏体不锈钢、高速钢等。其中, Ti-6Al-4V 钛合金是双相合金, 有良好的韧性、塑性和高温变形性能, 可在 400~500℃ 的温度下长期工作, 在 500℃ 以下具有较高的屈服强度、疲劳强度和热稳定性, 是航空发动机压气盘、静叶片、动叶片、机壳、燃烧室外壳、排气机构外壳、中心体、喷气管等零件的常用材

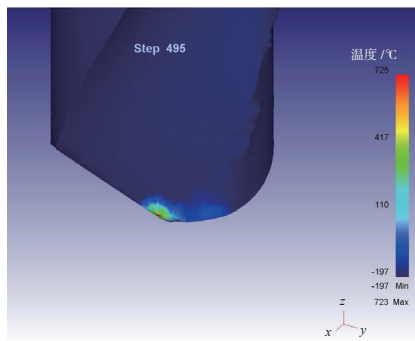


图2 深冷钻削Ti-6Al-4V的温度仿真
Fig.2 Cutting temperature simulation in cryogenic drilling Ti-6Al-4V

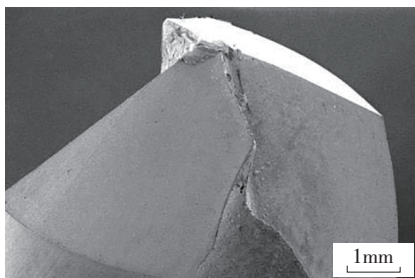


图3 深冷加工刀具磨损观测
Fig.3 Cutter wear measurement after cryogenic machining process

料, 也是深冷加工研究中的常用材料。据粗略统计, 深冷加工的研究文献中, 采用 Ti-6Al-4V 工件的占比超过 30%, 并且常采用碳化钨刀具。有研究表明, 采用深冷加工铣削 Ti-6Al-4V 钛合金的材料去除率最高可达 9500mm³/min, 节能 88%^[4]。

Inconel 718 是含铌、钼的沉淀硬化型镍铬铁合金, 在 650℃ 以下时具有较高强度、韧性和耐腐蚀性, 在 700℃ 时具有较高的抗拉强度、疲劳强度、抗蠕变强度和断裂强度, 在 1000℃ 时具有高抗氧化性, 广泛应用于航空发动机涡轮盘、压气机盘、轴和承力环等受力转动件。Inconel 718 容易加工硬化, 使切削加工十分困难, 是最难加工的材料之一, 相对可切削性仅为 45# 钢的 6%~20%。约 10% 的深冷加工研究采用 Inconel 718 工件。近几年, 随着 Inconel 718 的广泛应用, 这一比例还在迅速上升。研究表明, 深冷加工在高速加工 Inconel 718 时效果显著^[1]。

此外, AZ31B 镁合金在汽油、煤油和润滑油中性能稳定, 适于制造发动机齿轮机匣、油泵和油管, 又因在旋转和往复运动中产生的惯性力较小而被用来制造摇臂、舱门和舵面等活动零件, 在民用机和军用飞机被广泛应用。研究表明, 采用深冷加工技术切削此类零件可获得更好的表面完整性, 微观组织结构也得到改善^[5]。

近年来, 碳纤维增强复合材料 (Carbon Fiber Reinforced Polymer/Plastic, CFRP) 凭借其轻质高强的优势, 被越来越广泛地用于航空产品中。而深冷加工技术也被用于提高其切削性能。例如, 研究结果表明, 深冷加工对减少刀具刃口圆角和外圆角磨损有着深远的影响, 也有助于提高表面完整性^[6], 但会产生较大的切削力和扭矩^[7]。深冷加工技术可以提高切削芳纶纤维 (Aramid Fiber-Reinforced Composites, AFRC) 的质量, 因此可进一步优化切削深度、进给速度、冷却温度和液氮流量^[8]。

在加工方法方面, 深冷加工的研究多见于车削, 约占到 60%。近几年, 针对 Ti-6Al-4V 和 Inconel 718 的铣削、钻削研究逐渐增多。为了改善润滑效果, 深冷加工和微量润滑技术融合, 可降低切削力 50% 以上^[9]。通过设计融合深冷加工和微量润滑技术的专用喷嘴, 可显著提高刀具的寿命^[10]。深冷加工技术与零件加热技术融合。利用液氮冷却刀具, 通过加热软化工件, 双管齐下改善切削性能, 取得了良好的效果。但是, 有研究表明, 这种融合也可能恶化工件的导热性能, 使刀具磨损加剧^[11]。

增材制造是一种难加工材料成形的重要方式。但是, 增材制造的零件可能更难于进行精加工或半精加工切削。例如, 采用真空电子束熔炼技术成形后, Ti-6Al-4V 零件的可加工性比锻件的可加工性更差。但是, 采用深冷加工技术进行半精加工时, 刀具的粘着磨损明显降低, 表面完整

性改善、刀具寿命提高^[12],为增材-减材混合加工提供了一个选项^[13]。

国外一些公司开发出了商业化的深冷加工刀柄、刀具和其他装备,通过内部管道将液氮输送到切削区域,取得了良好的应用效果。但是,刀具内部管道形式也可能影响切削性能。例如,有研究证明,与利用双螺旋管道和单直管道相比,利用双直管道(图4)输送低温气体和润滑液可取得更小的切削力、更长的刀具寿命^[14]。

深冷加工的影响分析

(1)对切削性能的影响。深冷加工会显著提高难加工材料的切削性能,改变一些材料的传统加工方法。例如,由于热稳定性差,金刚石刀具不能用来加工钢铁类材料。而采用液氮冷却后,碳原子的扩散和石墨化得到有效抑制,减少了刀具磨损、提高了加工质量,使用金刚石刀具加工钢铁类材料成为可能^[1]。通常,氧化铝陶瓷刀具易碎,切削时不能使用切削液。通过与高速加工的结合,深冷加工可以改善这类刀具的加工性能,使加工效率提高50%~200%^[2]。深冷加工也可用于韧性材料和聚合物的切削,通过冷却使工件材料变脆,更利于切屑的形成^[15]。深冷加工能够满足特殊加工领域绝对不能使用切削液的要求。

(2)对切削温度的影响。切削区域温度升高是加工过程中的一种普遍现象,太高的切削温度会影响刀具寿命、表面完整性和加工精度。难加工材料的热导率低,切削区域的发热不能快速扩散,使切削区域和前刀面的温度变得很高。传统的切削液通过传导散热,在到达切削区域前可能已经蒸发,对切削区域的冷却效果有限。采用深冷加工技术后,具有一定压强的低温气体可直达切削区域,显著降低刀具和切屑界面的温度^[16]。图5是不同冷却润滑条件

下车削 Inconel 718 时实测切削温度的对比图。可以看出,深冷加工时切削温度仅为干切的一半左右^[17]。

(3)对切削力的影响。在相同的材料、刀具、机床和加工参数下,深冷加工比干切的切削力和扭矩更小,断屑性能更好^[16]。如图6所示,在同等条件下,深冷加工的径向力、进给力、主切削力均介于干切和微量润滑之间^[17]。因此,可以进一步提高切削速度和进给量,以便于获得更高

的材料去除率。但是,也有研究表明,在低速加工时,深冷加工提高了摩擦力^[18],反而产生了更大的切削力和扭矩^[1]。

(4)对刀具磨损的影响。试验表明,用深冷加工技术切削钛合金、不锈钢等材料时,切削力和切削温度的降低使硬质合金刀具、碳化钨刀具、立方氮化硼刀具的粘着磨损、扩散磨损、磨料磨损显著降低,月牙洼磨损减少^[19]。与干切或使用传统

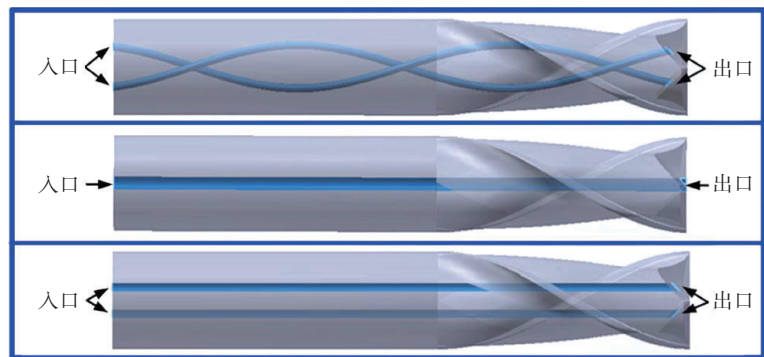


图4 刀具的内部管道

Fig.4 Internal cooling channels of cutters

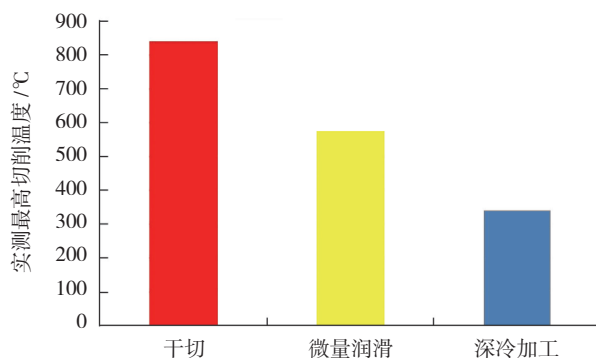


图5 不同冷却润滑条件下的实测最大切削温度

Fig.5 Measured maximum temperature as a function of cooling/lubricating

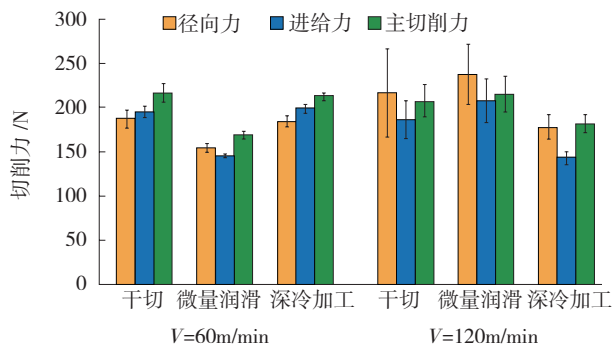


图6 不同冷却润滑条件下的切削力对比

Fig.6 Cutting force comparison under different cooling/lubricating conditions

冷却液相比,刀具寿命可提高数倍,经济效益显著。如图7所示,在车削Inconel 718时,深冷加工的后刀面磨损量显著低于干切和微量润滑^[17]。

(5)对切削稳定性的影响。与传统加工方式相比,深冷加工可以改变主轴刀具单元的模式和切削力系数,提高切削稳定性极限,使稳定性边界整体向低主轴转速区域移动^[20]。切削7075铝合金时,干切和深冷加工条件下的稳定性曲线如图8所示,与干切相比,深冷加工时的稳定性明显提高^[20]。

(6)对表面完整性的影响。深冷加工可以减少残余应力、毛刺,提高表面完整性和零件质量。对材料的深冷处理可改变其微观组织结构。与微量润滑和干切相比,深冷加工技术在切削Ti-6Al-4V和Inconel 718等难加工材料时可以获得更好的表面质量^[21]。在加工记忆合金、不锈钢等材料时也获得了类似的效果。与其他工况相比,深冷加工后零件表面和亚表面更加致密、塑性变形深度较浅、显微硬度更高,抗失效能力得到提高^[22]。从图9可以看出,在加工镍钛形状记忆合金时,深冷加工后的显微硬度明显高于干切,比可接受的标准高得多^[21]。

(7)对环境的影响。氮气是大气中的最主要成分(约占78%)。由于液氮是制氧工业的副产品,液氮的来源非常广泛。与使用常规切削液相比,使用液氮不仅能获得更好的切削性能,而且不会腐败、变质,对人体无毒害、对环境无任何污染^[23]。此外,液体二氧化碳(CO₂)也被用于切削区域的冷却。虽然液体二氧化碳(-78.5℃)比液氮温和,在某些情况下更有利于延长刀具寿命、改善表面质量、提高效益。但是,二氧化碳是辐射性气体,具有发射和吸收热辐射的能力,会产生温室效应,环境友好性差。而深冷加工与微量润滑的结合更能在技术和环境方面取得双

赢^[24]。

(8)经济效益分析。通过改善加工性能、优化工艺参数、提高材料去除率、降低刀具磨损、节省切削液,深冷加工技术可以获得显著的经济效益。使用深冷加工技术,省去了输送冷却液的泵,加工能耗也明显降低^[4]。由于没有切削液残留,因此省去了零件清洗的成本。综合考虑成本和收益,随着液氮使用成本的降低,深冷加工在经济方面的优越性将

变得越来越显著。

深冷加工研究和应用面临的问题

目前,深冷加工技术主要处于实验研究阶段,虽然有些公司致力于深冷加工工艺装备的研发,但大规模的工业化应用还未到来,公开报道的案例还比较少。其中,洛克希德·马丁公司采用深冷加工技术制造F-35的大型钛合金结构件(图10)^[2],使液氮

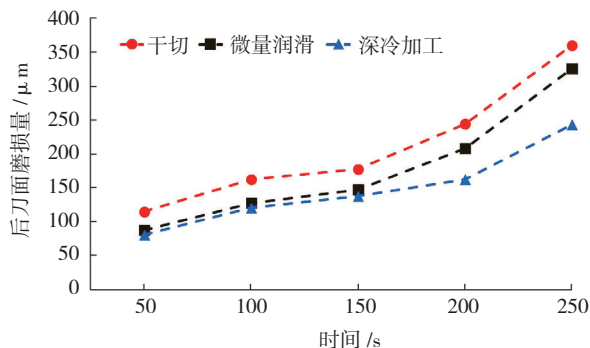


图7 不同冷却润滑条件下的后刀面磨损

Fig.7 Flank wear progression at different cooling/lubricating conditions

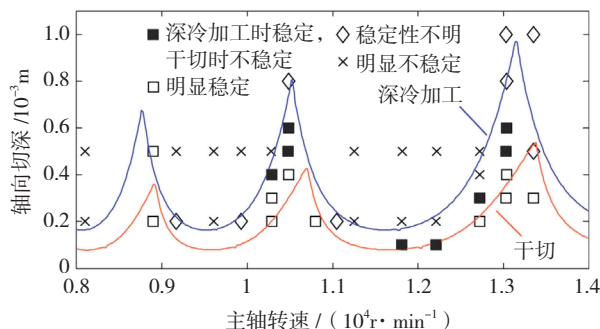


图8 深冷加工与干切的稳定性叶瓣图

Fig.8 Predicted SLDs of cryogenic machining and dry machining

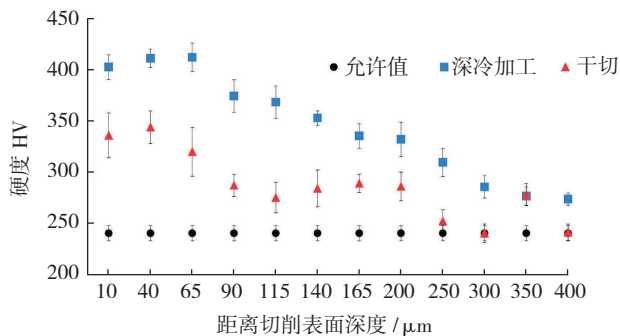


图9 深冷加工和干切的显微硬度

Fig.9 Microhardness of cryogenic machining and dry machining



图10 采用深冷加工技术制造的大型钛合金飞机结构件
Fig.10 Large titanium airframe component fabricated by using cryogenic machining technology

通过主轴和刀具的内部管道直达切削区域。与使用传统的冷却液相比,加工时间从44h降低到21h,切削效率提高了52%^[2],而刀具使用量并没有增加,零件表面完整性得到提高,白层减少,能耗减少,省去了废弃切削液处置工作,工人的安全性得到提高。据估计,加工成本降低了30%。

虽然深冷加工技术已经体现出显著的优越性,但该技术的研究和应用还处于发展阶段,还面临以下这些亟待探索和解决的问题。

(1)对于Ti-6Al-4V和Inconel 718等难加工材料来说,深冷加工在降低温度、提高切削性能的同时也会降低材料的导热性能,可能反而会加剧刀具磨损。深冷加工在提高零件表面硬化程度的同时也可能会恶化表面质量,二者之间也存在此消彼长的矛盾。因此,如何优化深冷加工中液氮喷射的角度、压强、时间、速度等参数,在其正面效应和负面效应之间取得平衡是一个值得研究的问题。

(2)目前,对深冷加工的研究主要通过加工试验或数值模拟(有限元仿真)进行,缺少可靠的解析模型,难以深入揭示其机理、掌握其规律,更不利于工艺装备和切削参数的优化^[25]。研究过程中经常出现一些存在争议、难以解释,甚至完全相反的结果。不同的刀具、工件材料组合下,深冷加工的结果差异较大^[26]。因此,对深冷加工技术的研究,需要逐步从定性研究转向更为深入的定量研究,为深冷加工工艺参数的选择和优化提供更可靠的依据。

(3)深冷加工过程是一个强时

变、非线性、多场耦合的复杂物理过程,对切削区域的温度、压强的在线监测难以进行,对热传导和温度场的变化难以在线获得,对可能存在的变化难以在线感知。这些都是认知深冷加工规律不得不面临的障碍,需要通过多学科交叉提高深冷加工过程的感知能力。

(4)对深冷加工工艺参数的精确控制,也必须通过相应的硬件设备实现。目前,刀具材料的选择和几何的设计很少考虑深冷加工的需求,深冷加工的专用刀具还不够丰富。深冷加工中使用的液氮基本上是一次性的,都直接“还给”了大自然,缺少现场回收、再利用的装备。这些问题使深冷加工的潜在优势不能完全发挥。因此,深冷加工专用设备、工装、刀具也是一个极具潜力的领域。

(5)深冷加工过程中,刀具和工件都可能发生热弹性变形,造成轮廓度误差。深冷加工后工件面型精度及表层力学性能还难以准确预测。因此,深冷加工精度的控制和补偿都是值得深入研究的问题。

结束语

应用深冷加工技术,可以显著改善航空难加工材料的切削性能,提高刀具寿命和零件表面完整性。更重要的是,深冷加工技术采用无毒、无污染的液氮作为冷却介质,是一种绿色、环保的先进加工技术,具有广阔的应用前景。目前,对于深冷加工技术的研究还不够深入和充分,还有大量的机理和规律有待探索和发现。随着需求的日益迫切、科学技术的高

速发展,深冷加工将成为提高航空难加工材料切削性能的重要手段,对深冷加工机理和规律的掌握将更加深入。这将有力地促进研究人员不断发掘深冷加工的潜在优势,深冷加工的应用也将越来越广泛。作为绿色制造技术的重要发展方向,深冷加工技术的经济、社会效益值得期待。

参考文献

- [1] SHOKRANI A, DHOKIA V, ESCALONA P M, et al. State-of-the-art cryogenic machining and processing[J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2013, 26(7): 616-648.
- [2] RICHTER A. Cryogenic machining systems can extend tool life and reduce cycle times[J]. Cutting Tool Engineering, 2015, 67(2): 50-57.
- [3] SHOKRANI A, SUN H, DHOKIA V, et al. High speed cryogenic drilling of grade 5 ELI titanium alloy[C]//26th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing. Wolverhampton: University of Wolverhampton, 2016.
- [4] SHOKRANI A, DHOKIA V, NEWMAN S T. Energy conscious cryogenic machining of Ti-6Al-4V titanium alloy[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B Journal of Engineering Manufacture, 2016, DOI: 10.1177/0954405416668923.
- [5] SHEN N G, DING H T, GAO J Y. Cryogenic cutting of AZ31B-O Mg alloy for improved surface integrity—part II: physics-based process modeling of surface microstructural alteration[C]//Proceedings of the ASME 2015 International Manufacturing Science and Engineering Conference. Charlotte, 2015.
- [6] KUMARAN S T, KO T J, LI C, et al. Rotary ultrasonic machining of woven CFRP composite in a cryogenic environment[J]. Journal of Alloys & Compounds, 2017, 698: 984-993.
- [7] XIA T, KAYNAK Y, ARVIN C, et al. Cryogenic cooling-induced process performance and surface integrity in drilling CFRP composite material[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 82(1): 1-12.
- [8] WANG F, LIU J, SHU Q. Optimization

of cryogenic milling parameters for AFRP[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, DOI: 10.1007/s00170-017-0003-0.

[9] SHOKOOHI Y, KHOSROJERDI E, SHIADHI B H R. Machining and ecological effects of a new developed cutting fluid in combination with different cooling techniques on turning operation[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 94:330-339.

[10] PEREIRA O, RODRIGUEZ A, BARREIRO J, et al. Nozzle design for combined use of MQL and cryogenic gas in machining[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing Green Technology, 2017, 4(1): 87-95.

[11] LEE I. Enhancement of tool life by cryogenic and preheated workpiece methods in the milling of Ti-6Al-4V[D]. Korea: Ulsan National Institute of Science and Technology, 2015.

[12] BORDIN A, BRUSCHI S, GHIOTTI A, et al. Analysis of tool wear in cryogenic machining of additive manufactured Ti6Al4V alloy[J]. Wear, 2015, 60: 89-99.

[13] BORDIN A, SARTORI S, BRUSCHI S, et al. Experimental investigation on the feasibility of dry and cryogenic machining as sustainable strategies when turning Ti6Al4V produced by additive manufacturing[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 142: 4142-4151.

[14] ZHANG C L, ZHANG S, YAN X F, et al. Effects of internal cooling channel structures on cutting forces and tool life in side milling of H13 steel under cryogenic minimum quantity

lubrication condition[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 83(5): 975-984.

[15] JAWAHIR I S, ATTIA H, BIERMANN D, et al. Cryogenic manufacturing processes[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2016, 65(2): 713-736.

[16] PUSAVEC F, DESHPANDE A, YANG S, et al. Sustainable machining of high temperature nickel alloy-Inconel 718: part 2-chip breakability and optimization[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 87: 941-952.

[17] KAYNAK Y. Evaluation of machining performance in cryogenic machining of Inconel 718 and comparison with dry and MQL machining[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 72(5): 919-933.

[18] PUSAVEC F, DESHPANDE A, YANG S, et al. Sustainable machining of high temperature nickel alloy-Inconel 718: part 1-predictive performance models[J]. Journal of Cleaner Production, 2014, 81(7): 255-269.

[19] SUN S, BRANDT M, PALANISAMY S, et al. Effect of cryogenic compressed air on the evolution of cutting force and tool wear during machining of Ti-6Al-4V alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 221: 243-254.

[20] HUANG X, ZHANG X, MOU H, et al. The influence of cryogenic cooling on milling stability[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214(12): 3169-3178.

[21] KAYNAK Y, LU T, JAWAHIR I S. Cryogenic machining-induced surface integrity: a review and comparison with dry, MQL, and flood-

cooled machining[J]. Machining Science and Technology, 2014, 18(2): 149-198.

[22] AURICH J C, MAYER P, KIRSCH B, et al. Characterization of deformation induced surface hardening during cryogenic turning of AISI 347 [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2014, 63(1): 65-68.

[23] SHOKRANI A, DHOKIA V, NEWMAN S T. Environmentally conscious machining of difficult-to-machine materials with regard to cutting fluids[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2012, 57: 83-101.

[24] PEREIRA O, RODRIGUEZ A, FERNANDEZ-ABIA A I, et al. Cryogenic and minimum quantity lubrication for an eco-efficiency turning of AISI 304[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 139: 440-449.

[25] SAFARI H, SHARIF S, IZMAN S, et al. Cutting force and surface roughness characterization in cryogenic high-speed end milling of Ti-6Al-4V ELI[J]. Advanced Manufacturing Processes, 2014, 29(3): 350-356.

[26] 曾志新, 李勇, 石常隽, 等. 深冷技术在切削加工中的应用研究进展[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2002, 30(11): 85-88.

ZENG Zhixin, LI Yong, SHI Changjun, et al. Research progress of deep cryogenic technology in the cutting field [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2002, 30(11): 85-88.

通讯作者: 孙惠斌, E-mail: sun_huibin@nwpu.edu.cn.

State-of-the-Art of Cryogenic Machining of Aeronautical Difficult-to-Machine Material

SUN Huibin

(Laboratory of Contemporary Design and Integrated Manufacturing Technology, Ministry of Education, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

[ABSTRACT] The state-of-art of cryogenic machining is introduced. Effects of cryogenic machining on aeronautical difficult-to-machine material machinability, cutting temperature, cutting tool wear condition, surface integrity, etc., are discussed. Topics for further researches and applications are also addressed.

Keywords: Difficult-to-machine material; Machinability; Cryogenic machining

(责编 海山)