

引文格式:王永青,左月帅,韩灵生,等.难加工金属材料超低温冷却加工表面完整性研究进展[J].航空制造技术,2023,66(14):14-25.

WANG Yongqing, ZUO Yueshuai, HAN Lingsheng, et al. Surface integrity of difficult-to-machine metal materials for cryogenic machining: A review[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(14): 14-25.

难加工金属材料超低温冷却加工表面完整性研究进展*

王永青,左月帅,韩灵生,姜少玮,李建明,刘阔,刘海波

(大连理工大学,大连 116024)

[摘要] 超低温冷却加工是一种在材料切削过程中采用液氮等超低温介质进行冷却的清洁加工技术。该技术被广泛应用于航空航天等领域的难加工金属材料加工,以改善这些材料常规冷却加工时冷却效能不足、加工质量较差等问题。为了阐明超低温冷却加工对难加工金属材料表面完整性的影响,本文综述了这类材料表面粗糙度、微观形貌、微观结构、显微硬度、残余应力等在不同冷却条件下变化规律分析的研究进展。结果表明,超低温冷却介质可带走大量切削热并降低刀具磨损,进而减小加工表面粗糙度、抑制表面缺陷、促进晶粒细化、提高显微硬度、增大残余压应力等。最后,对超低温冷却加工表面完整性研究进行了总结,并展望了未来需要开展的研究工作。

关键词:超低温冷却加工;难加工金属材料;表面完整性;残余应力;显微硬度;晶粒细化

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2023.14.014



王永青

教授,博士生导师,主要研究方向为超低温冷却加工理论与技术、测量-加工一体化制造理论与技术、装备在机测量理论与技术、智能机电装备与系统。

*基金项目:国家自然科学基金(U20B2033);基本科研业务费项目(DUT22LAB505)。

近年来,为满足极端工况条件下高端装备的高使役性能要求,以钛合金、镁合金、高温合金为代表的金属材料,因具有密度小、耐高温、耐磨损、耐腐蚀、抗冲击等优异的机械性能,被广泛应用于航空航天、深海探测、生物医疗等领域。例如,国产WS10发动机的钛合金用量占比约25%。德国金牛座系统公司和瑞典博福斯公司合作开发的导弹KEPD-350的加强框、壁板、舵面、隔板等30余种零件共使用了约100 kg的GW83和ZK61高性能镁合金^[1]。国产航空发动机燃烧室、涡轮叶片和涡轮盘的制造中广泛应用了镍基高温合金^[2]。

然而,该类材料都具有典型的难加工特性,常规加工难以获得优异的加工精度和加工质量。例如,钛合金具有导热系数低、弹性模量小、高温

化学亲和性强等特点,在切削过程中易出现刀具磨损和切屑黏附;高温合金不仅导热系数低,而且在加工过程中易出现刀具粘结、断屑困难和加工硬化严重等问题;镁合金具有极高的化学活性,切屑在高温下极易起火,而且遇到水基乳化液容易产生氢爆现象。以上问题都和切削温度过高密不可分,而现阶段主要采用干切削或常规切削液冷却加工手段,难以解决上述材料加工时冷却效能不足、特殊要求类零件表面污染等问题^[3-5],亟须寻求一种清洁的高效冷却加工方法。

超低温冷却加工是一种采用液氮(-196℃)等超低温介质进行冷却的切削加工工艺方法。20世纪60年代,液氮首次作为冷却介质应用于金属材料切削,在喷射压力作用下进入切削区域,依靠热传导、热对流、汽

化吸热等方式降低切削温度,进而改善加工质量,提高刀具寿命。此外,液氮是一种无色、无味、无毒的介质,不会对环境造成污染。而且,氮在空气中的体积分数约为 78%,故液氮易于获取、成本较低^[6]。鉴于超低温冷却加工在提高零件加工质量与加工效率、延长刀具寿命、降低综合加工成本、绿色环保等方面的独特优势,该技术逐渐成为国内外相关领域的研究热点。

因超低温冷却加工技术在改善难加工金属材料的加工性能与提高加工表面完整性方面的优异表现,国外的肯塔基大学、哥伦比亚大学和法国国立高等工程技术学校,国内的大连理工大学、南京航空航天大学、济南大学和山东大学等诸多高校开展了超低温冷却加工技术的相关研究^[7-14]。表面完整性是衡量零件加工质量的关键指标,其对零件的耐磨性、耐腐蚀性、疲劳寿命及使役性能有着重要影响,因此本文对难加工金属材料超低温冷却加工的表面完

整性进行了综述,并重点关注了超低温冷却加工装置,以及超低温冷却对材料表面粗糙度、表面微观形貌、表面或亚表面微观结构、显微硬度和残余应力等方面的影响。

1 超低温冷却施加方式与加工装置

超低温冷却因其施加方式不同,冷却效果也不尽相同,且结合不同的施加方式可以研制出不同的超低温冷却加工装置。

1.1 超低温冷却施加方式

目前,超低温冷却的施加方式主要分为刀具内循环冷却、外喷式冷却和刀具内喷式冷却 3 种。其中,刀具内循环冷却(图 1(a))的冷却介质不喷射至刀尖,而是通过刀具上的循环结构对刀体内部进行冷却^[15-16],该方式虽对切削区域的冷却效果一般,但非常适合一些切削温度适中、热膨胀系数很大但对加工尺寸精度要求很高的材料。外喷式冷却(图 1(b))是通过外部喷嘴将超低温冷却介质

喷射到切削区域^[17],这种方法易于实现,但存在冷却介质利用率较低、机床功能集成性差、钻铣削冷却能力较弱等问题。刀具内喷式冷却(图 1(c))是将冷却介质通过刀具的内部通道输送至刀尖处^[18],实现对切削区域直接、充分的冷却,冷却介质消耗量低、冷却效能更高。与上述冷却方式相结合产生的超低温车削、铣削、钻削和磨削如图 2 所示^[18-20]。

1.2 超低温冷却加工装置

国外对超低温冷却加工装置的研究较早。2010 年,美国 MAG 公司研制出世界上第一台液氮超低温冷却加工机床,如图 3(a)所示^[18],该装备可将液氮输送至距切削点不到 1 mm 处,充分冷却切削区域及刀具,大幅提高加工效率并延长刀具寿命。MAG 公司与 Lockheed Martin 公司合作,进一步探索了航空发动机关键部件的超低温冷却加工方法,并将其成功应用于 F-35 战斗机钛合金叶盘的高效加工中,使加工质量和效率得到显著提升。美国 Air Products 公司

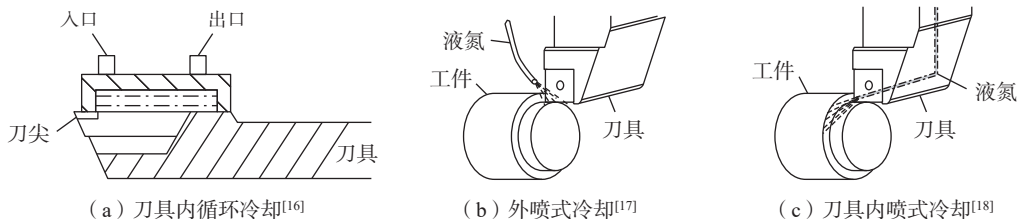


图 1 超低温冷却的施加方式
Fig.1 Application forms of cryogenic cooling

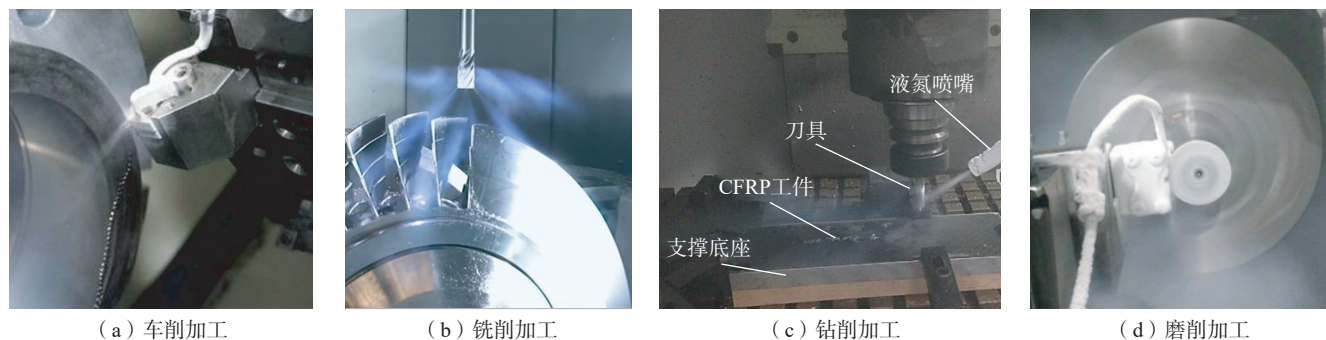


图 2 超低温冷却与传统加工方式的结合^[18-20]
Fig.2 Combination of cryogenic cooling and traditional processing methods^[18-20]

开发了 ICEFLY 超低温冷却车削工艺,将液氮直接喷射到刀尖和切削区域,显著降低切削温度并改善了零件加工表面质量,如图 3 (b) 所示^[21]。但是,上述技术与装备对我国封锁和禁运。

近年来,国内高校也开展了超

低温冷却加工装置研究。大连理工大学自主研制出液氮内喷式机械主轴(最高转速 6000 r/min)^[22]、刀柄^[23]及系列内冷式刀具^[24],开发了液氮在线制备与智能调控系统^[10],研发出国内首台液氮自给、内喷式超低温冷却加工机床,如图 4 (a) 所示^[25]。

南京航空航天大学构建了低温介质外喷式冷却切削试验系统,如图 4 (b) 所示^[26],并应用于 TC4 钛合金、35CrMnSiA 高强度钢等材料的加工试验研究。华中科技大学开发了一种双喷头式液氮冷却系统,如图 4 (c) 所示^[27],并应用于 Inconel 718 镍基合金的超低温加工试验研究。

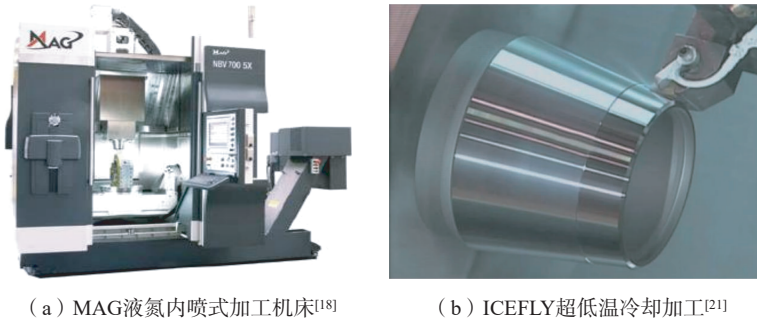
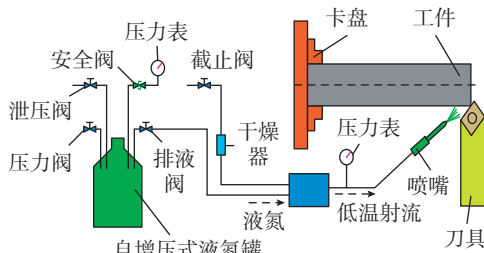


图 3 国外超低温冷却加工装备与工艺

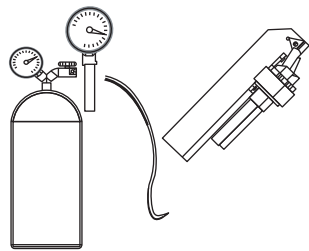
Fig.3 Foreign cryogenic machining equipment and technology



(a) 液氮内喷式超低温冷却加工机床^[25]



(b) 低温外喷式冷却切削试验系统^[26]



(c) 双喷头式冷却系统^[27]

图 4 国内超低温冷却加工装备与系统

Fig.4 Domestic cryogenic machining equipment and system

2 超低温冷却加工零件表面完整性

表面完整性是衡量零件加工质量的关键指标,通常受切削速度、进给速度、切削深度、刀具几何形状、材料属性及加工过程中冷却润滑条件等因素的影响^[28]。在液氮等介质的超低温冷却作用下,金属材料的表面粗糙度、微观形貌、组织结构、显微硬度和残余应力等均得到不同程度的改善。

2.1 超低温冷却对表面粗糙度的影响

表面粗糙度是量化零部件加工表面完整性的主要指标之一,可直接影响零部件的耐磨性和耐腐蚀性,从而影响其服役性能和使用寿命。Toker 等^[29]研究了冷却条件和切削速度对 Inconel 718 镍基合金表面粗糙度的影响规律,结果发现相较于乳化液冷却,50 m/min 切削速度下超低温冷却加工表面粗糙度由 1.05 μm 降低至 0.85 μm ,如图 5 所示。Danish 等^[30]研究发现与干切削相比,在超低温微量润滑条件下

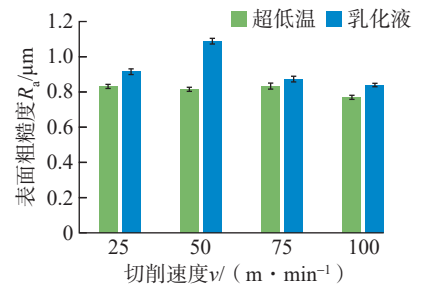


图 5 切削速度和冷却条件对表面粗糙度的影响^[29]

Fig.5 Influence of cutting speed and cooling conditions on surface roughness^[29]

Inconel 718 镍基合金的加工表面粗糙度降低了约 60%。Salur^[31] 研究了干切削、风冷、微量润滑(MQL)和超低温冷却 4 种冷却条件对 Inconel 718 镍基合金加工质量的影响,结果发现在切削速度为 100 m/min,进给量为 0.1 mm/r 时,超低温冷却加工表面粗糙度值最低可达 0.2 μm。李建明^[13] 和王相宇^[14] 分别研究了干切削、乳化液冷却和液氮冷却加工 Inconel 718 镍基合金的表面完整性,发现超低温冷却可以有效抑制热软化效应,且加工表面粗糙度值最小,结果如图 6 所示。Kaynak^[32] 的研究也表明,超低温冷却在 Inconel 718 镍基合金铣削中有更好效果。

Liu 等^[33] 对比了 3 种切削条件对 Ti-5553 钛合金表面粗糙度值的影响,结果显示超低温冷却条件下被加工材料的三维形貌最好,表面粗糙度值最小,约为 0.3 μm。戴明华等^[34] 开展了干切削、乳化液冷却和液氮冷却下的 TC4 钛合金切削试验,发现液氮冷却可以减小工件的变形和摩擦,有效抑制积屑瘤和鳞刺的产生,加工表面粗糙度值最小,如图 7 所示。Gan 等^[35] 研究了液氮冷却方式对 TA15 钛合金表面质量的影响规律,结果显示液氮内喷式冷却可有效抑制莱顿弗罗斯特现象,提高冷却效率,相比于干切削,TA15 钛合金的表面粗糙度最高降低了 45%。宋戈等^[36] 发现高速铣削 TC4 钛合金时,液氮冷却加工表面粗糙度值要比 MQL 条件降低约 50%。Ahmed 等^[19] 开展了 TC4 钛合金的超低温冷却钻削试验,结果表明超低温冷却钻削方式可以增强断屑,保证良好的加工质量,这是因为低温环境可以有效抑制热黏附现象,同时液氮的润滑作用有利于减小摩擦力,试验结果如图 8 所示。

在镁合金及其他难加工金属材料加工方面,超低温冷却也能够改善表面质量。Dinesh 等^[37] 研究了不同冷却条件和切削速度对 ZK60 镁

合金的加工表面完整性的影响,发现超低温冷却加工时摩擦力和切削力更小,表面粗糙度比干切削降低了 25%~40%,如图 9 所示。Pu 等^[38] 超低温冷却车削 AZ31B 镁合金,发现表面粗糙度较干切削降低了 17%。Dhar 等^[39] 开展了 AISI-4037 不锈钢的车削加工试验,结果显示在同样的切削参数下,超低温冷却加工的表面粗糙度值均有不同程度的减小,如

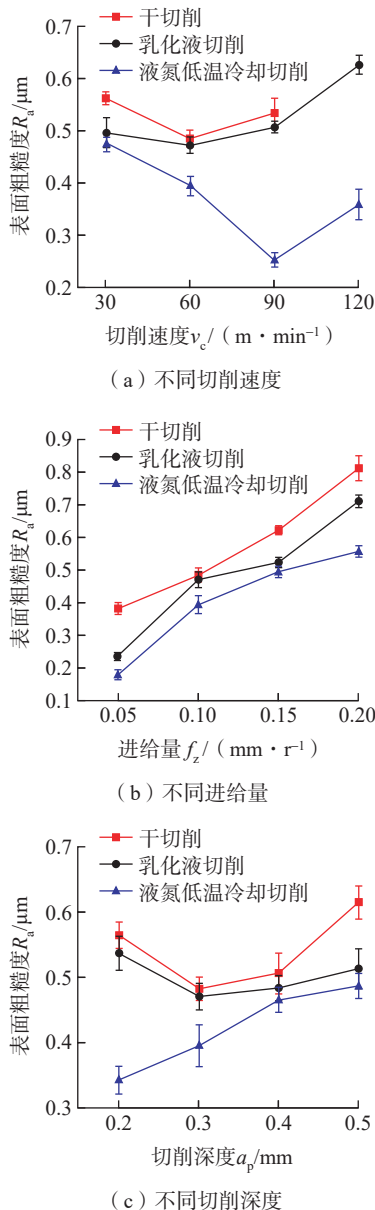


图 6 不同冷却条件和切削参数下的表面粗糙度^[13]
Fig.6 Surface roughness under different cooling conditions and cutting parameters^[13]

图 10 所示,究其原因液氮射流使切削区的温度降低,刀具磨损减小,

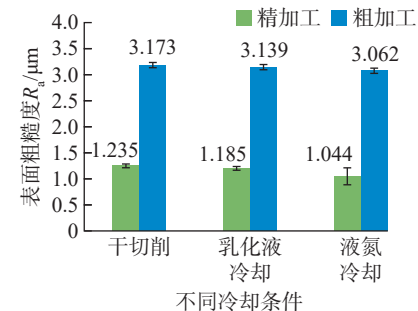


图 7 不同冷却条件下的表面粗糙度对比^[34]
Fig.7 Comparison of surface roughness for different cooling conditions^[34]

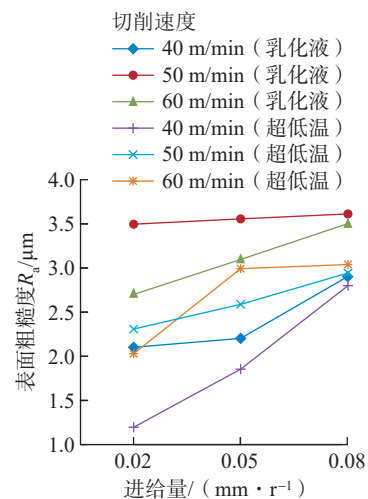


图 8 乳化液和超低温冷却加工中不同的进给量和切削速度下的表面粗糙度^[19]
Fig.8 Surface roughness at various combinations of feed rate and cutting speed in wet and cryogenic machining^[19]

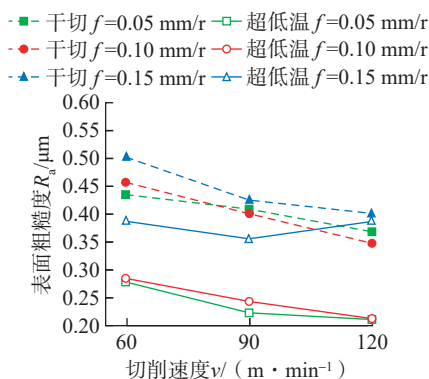


图 9 不同切削条件下加工样件的表面粗糙度^[37]
Fig.9 Surface roughness of machined sample under various cutting conditions^[37]

进而提高了加工质量。Pu 等^[40]进行了 Mg-Al-Zn 合金的超低温冷却抛光试验,结果表明超低温冷却条件下表面粗糙度也产生一定程度的减小。

2.2 超低温冷却对表面形貌和加工缺陷的影响

微观形貌和加工缺陷是反映零部件加工质量的重要指标,对零件的使役性能有着重要的影响。Percin 等^[41]开展了 TC4 钛合金在干切削、乳化液冷却、MQL、超低温冷却下的钻削试验,发现超低温冷却可以抑制钻削产生的毛刺,提高钻孔质量,如图 11 所示。Shokrani 等^[42]在超低温冷却铣削 TC4 钛合金时发现,与干切削和乳化液冷却相比,超低温冷却条件下加工表面缺陷减少,如图 12 所示,干切削加工表面切屑黏

附现象严重,并伴有表面侧向流动和明显的刀痕;乳化液冷却加工表面质量虽有一定程度的提高,但仍然可以发现切屑黏附、表面侧向流动和刀痕;超低温冷却时加工缺陷得到了明显的抑制。

刘泉等^[43]对比了干切削、乳化液冷却和液氮冷却条件对 7075 铝合金已加工表面鳞刺分布和尺寸的影响,结果如图 13 所示;与干切削条件相比,使用乳化液冷却和液氮冷却均

能减小已加工表面的鳞刺分布密度,且液氮冷却条件对鳞刺的抑制效果最好,鳞刺高度最低。张慧萍等^[44]开展了高强钢的车削试验,发现超低温冷却条件下可以生成更加光滑平整的表面,其波峰波动均匀,峰谷差距较小,改善了加工表面质量。Pan 等^[45]研究了超低温冷却车削铝合金的表面完整性,发现在超低温冷却条件下获得了更好的表面质量,如图 14 所示;在干切削条件下加工表

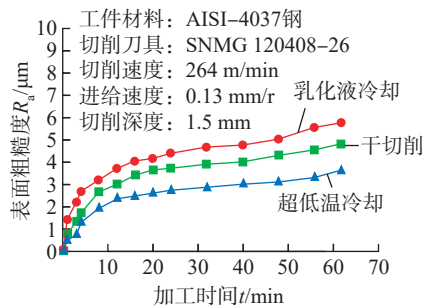


图 10 不同冷却条件下表面粗糙度随时间的变化^[39]

Fig.10 Surface roughness developed with machining time under different cooling conditions^[39]

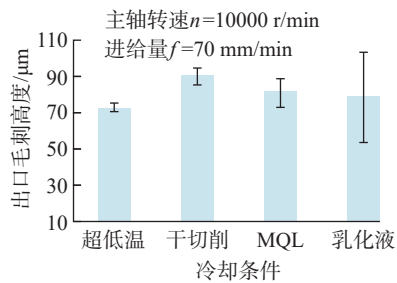


图 11 不同冷却条件下孔出口表面的毛刺高度^[41]

Fig.11 Burr height at hole exit surface under different cooling conditions^[41]

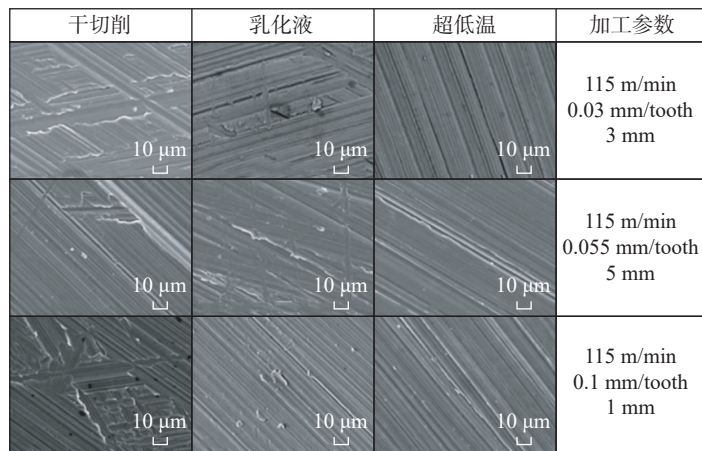


图 12 不同试验条件下样品加工表面形貌^[42]

Fig.12 Surface topography of machined samples from different experiments^[42]

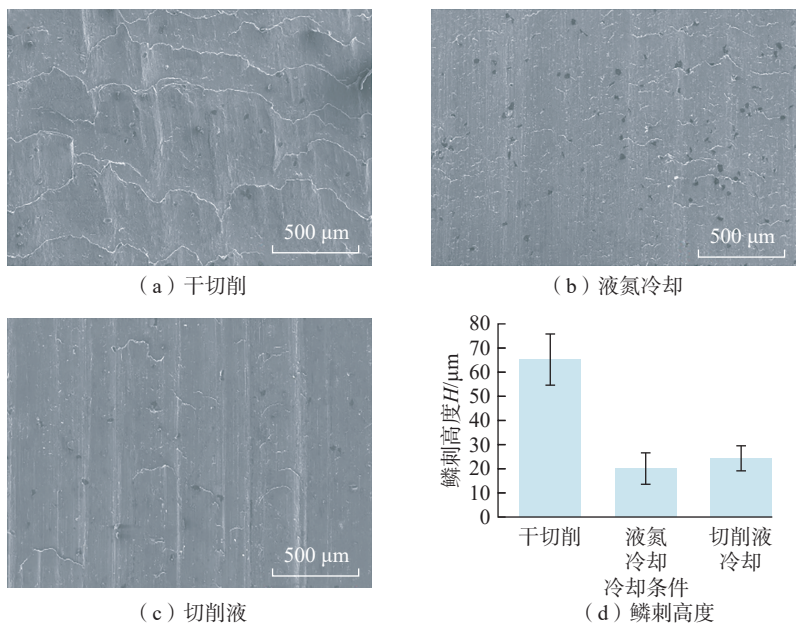


图 13 不同冷却条件下鳞刺分布及高度^[43]

Fig.13 Distributions and heights of the scale thorn with different cooling conditions^[43]

面存在大量的毛刺和毛边缺陷,而在乳化液冷却和超低温冷却条件下工件表面更为光滑,其中,超低温冷却条件下加工表面质量最优,这是因为局部超低温环境可以提高材料的脆性,使工件表面的塑性变形能力变弱。

薄壁类金属构件由于径向刚度低,采用传统装夹方式在加工过程中易出现受力变形,引发加工缺陷与精度误差,导致表面加工质量较差。采用超低温冷却加工与冰固持技术相结合的方式,非常适合于这类零件的高质高效加工^[46]。王永青等^[47]利用水在低温下会自然结冰的特性,设计了一种新颖的冰固持夹具来夹持薄壁件,同时用液氮作为冷却介质进行辅助加工以带走切削过程产生的切削热,来保证稳定的固持作用。图

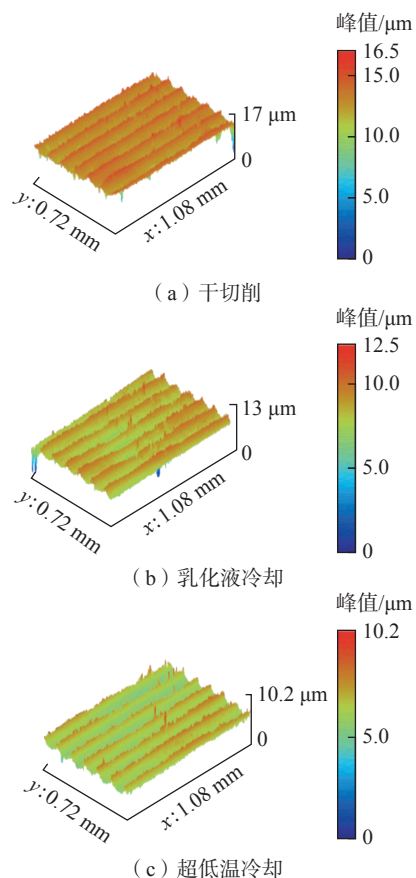


图 14 不同冷却条件下加工表面三维形貌^[45]
Fig.14 Three-dimensional morphology of machined surface with various cooling conditions^[45]

15^[48]为超低温冰固持加工和常规固持加工的薄壁件表面,可以看出超低温冰固持加工后的工件表面边缘毛刺得到明显抑制。姜少玮等^[49]开展了GH4099高温合金蜂窝芯的超低温冰固持铣削加工试验,结果表明,在蜂窝芯加工中引入冰固持装夹和超低温冷却加工方式,可以显著提高蜂窝芯的面内刚度,减少蜂窝芯塌边、撕裂和毛刺等加工缺陷,进而实现金属蜂窝芯的高质量加工,如图16所示。

2.3 超低温冷却对晶粒细化和显微硬度的影响

零件表面或亚表面微观结构,尤其是晶粒大小,会直接影响其耐腐蚀性能、耐磨性能和疲劳寿命等机械性能。晶粒细化有助于提升金属材料延展性,增加表面显微硬度。深

度塑性变形(SPD)已被证明是细化晶粒的有效方法,而超低温冷却加工则被认为是一种新的SPD方法^[40]。Rotella等^[50]对比了干切削、MQL和超低温冷却3种条件对车削TC4钛合金的影响,发现超低温冷却可以促进晶粒的动态再结晶,产生更细化的晶粒,如图17所示。殷晓龙等^[51]通过超低温挤出切削法对7075铝合金进行加工,发现材料的晶粒被细化至纳米级。范雷等^[52]研究了切削三要素和冷却介质对ZK61M镁合金车削加工表面完整性的影响规律,发现液氮冷却条件下加工表层晶粒出现明显细化。Pu^[38]和Danish^[53]等在AZ31B和AZ31C镁合金的超低温铣削中也得出了类似的结论,冷却条件对加工表面组织有显著影响,如图18所示。

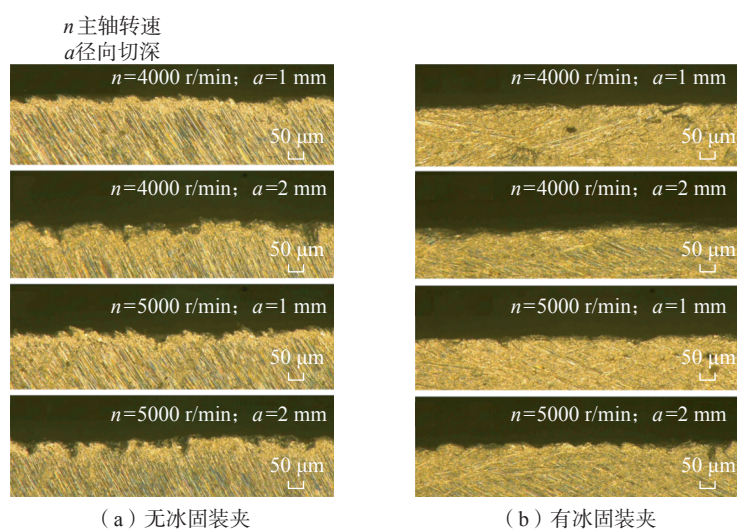


图 15 不同装夹条件下加工表面边缘毛刺结果对比^[48]

Fig.15 Comparison of machining results of edge burrs under different clamping conditions^[48]

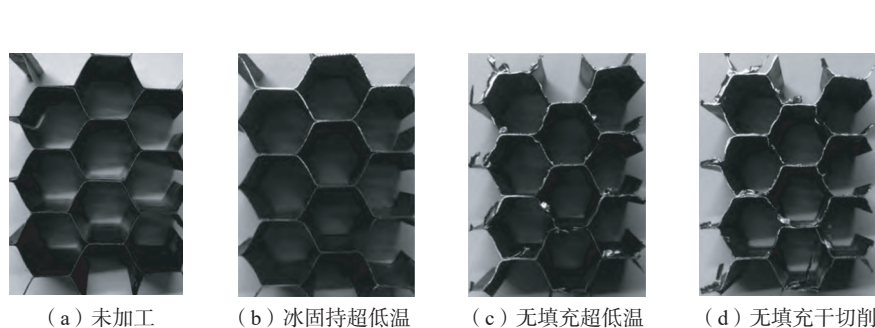
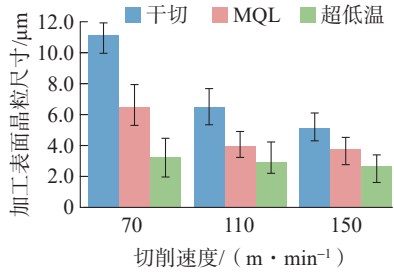
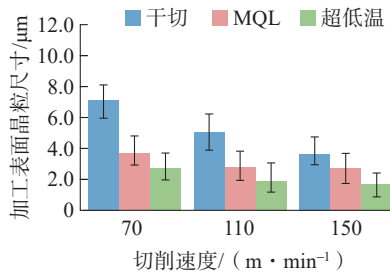


图 16 不同加工条件下蜂窝芯加工质量^[49]

Fig.16 Machining quality of honeycomb core under different machining conditions^[49]



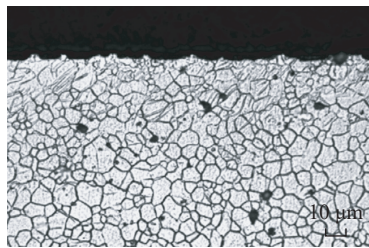
(a) 进给量0.05 mm/r时不同切削速度



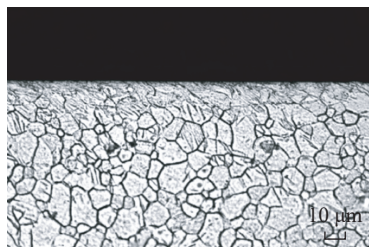
(b) 进给量0.10 mm/r时不同切削速度

图17 不同切削速度和进给量下晶粒尺寸变化的比较^[50]

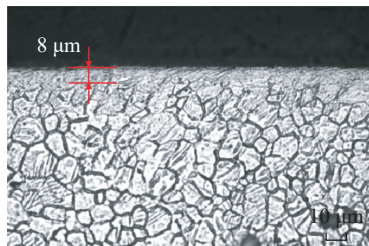
Fig.17 Comparison of measured grain size variation at varying the cutting speed and feed rate^[50]



(a) 加工前



(b) 干切削加工



(c) 超低温冷却加工

图18 不同冷却条件下的表面微观结构^[38]

Fig.18 Microstructure of the surface under different cooling conditions^[38]

显微硬度受冷却条件的影响较为明显,大量研究表明,在干切削条件下,刀具-工件界面受摩擦效应产生的热量很高,这增强了热软化效应并导致了更低的显微硬度值^[54]。在使用液氮作为冷却介质的超低温冷却加工中,热软化效应得到缓解,加工表面和亚表面的显微硬度也得到提高。李祥等^[55]通过开展不同射流温度下GH2132高温合金的切削试验,发现随着射流温度降低,工件已加工表面显微硬度增大,在-190℃时达到最大值。如图19所示,Kheireddine

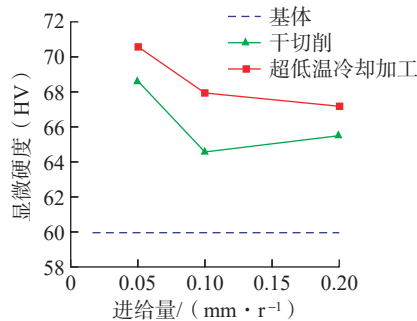
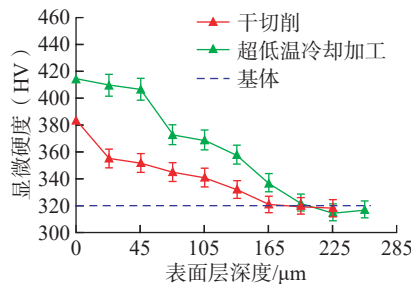
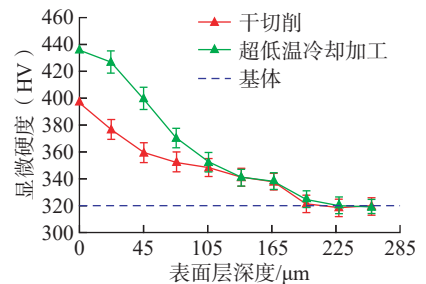


图19 不同进给量下测量的表面硬度^[56]

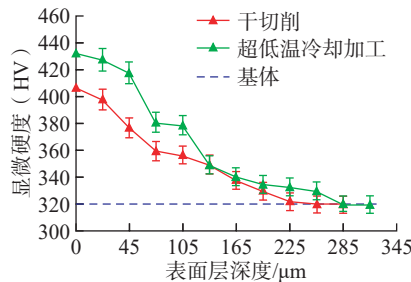
Fig.19 Measured surface hardness at varying values of feed^[56]



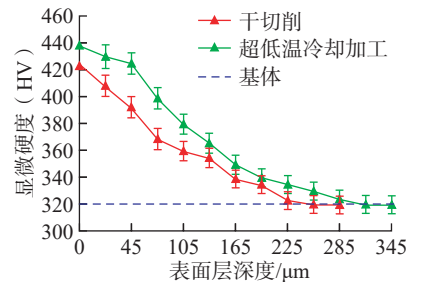
(a) 切削速度30 m/min



(b) 切削速度50 m/min



(c) 切削速度70 m/min



(d) 切削速度90 m/min

图20 在干切削和超低温冷却加工中不同切削速度下显微硬度变化^[57]

Fig.20 Microhardness variation in dry and cryogenic machining at different cutting speeds^[57]

等^[56]研究表明AZ31B镁合金在超低温冷却钻孔时硬度明显高于干切削。Fallah等^[57]研究了超低温冷却和干切削条件下TC4钛合金显微硬度的变化规律,结果表明,超低温冷却加工的显微硬度高于干切削,且随着切削速度的增加,显微硬度和硬化层深度也会增加,如图20所示。苏文佳^[12]开展了干切削和液氮冷却条件下TC17钛合金的铣削试验,如图21所示,结果表明液氮冷却加工表面显微硬度大于干切削,这主要是因为液氮冷却条件下新生成的加工表面更易与氮元素结合生成硬质层,进而增大表面显微硬度。

2.4 超低温冷却对残余应力的影响

残余应力是固体材料在外部机械载荷和热载荷消除后的一种自平衡内应力,对零件使役性能和疲劳寿命有重要影响,机械载荷产生的压应力对零部件使役性能有益,而热载荷产生的拉应力如果过大则有危害。超低温冷却可大幅度削弱热效应,进而抑制工件表面和亚表面产生的残余拉应力^[7,58]。Toker等^[29]研究了不同

冷却条件和切削参数对 Inconel 718 镍基合金残余应力的影响,结果显示所有被加工工件都表现出残余压应力,如图 22 所示,这表明在表面层生成过程中没有明显的热软化效应。Behera 等^[59]研究了超低温车削 Inconel 718 镍基合金对表面完整性的影响,对比高压乳化液冷却(HPJ)、超低温冷却和 MQL (nMQL 为纳米微量润滑),发现液氮(LN₂)超低温冷却可显著改善加工表面完整性,并减小残余拉应力,如图 23 所示。

Outeiro 等^[60]开展了干切削和

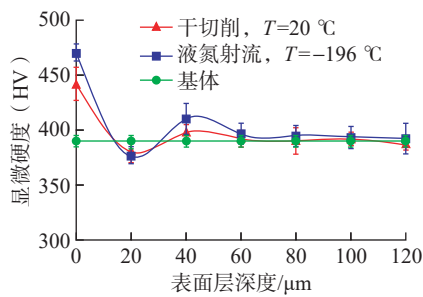


图 21 干切削和液氮冷却条件下的加工表面显微硬度^[12]

Fig.21 Microhardness of machined surfaces under dry and cryogenic cooling conditions^[12]

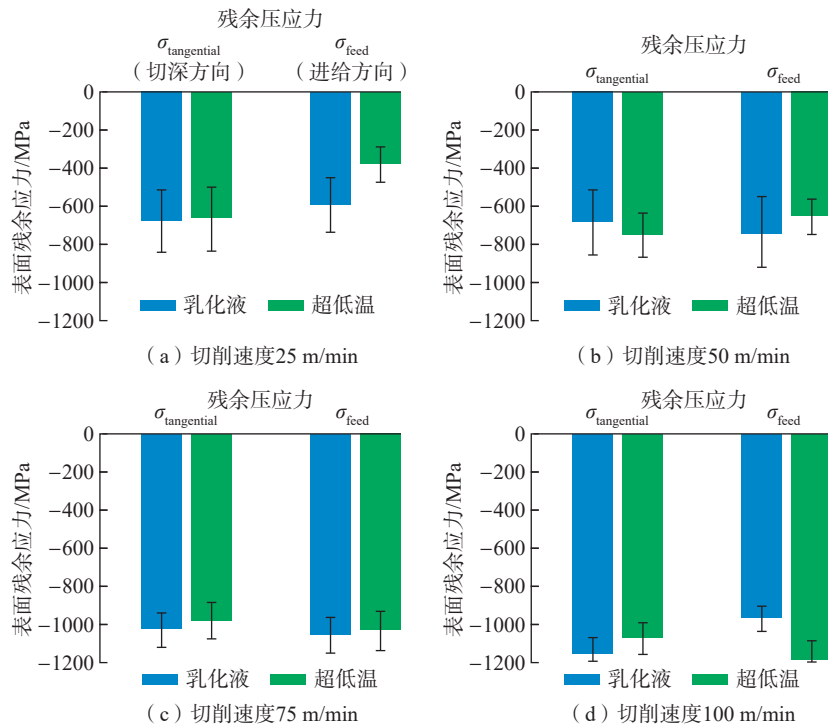


图 22 不同切削速度下加工表面的残余应力变化^[29]

Fig.22 Residual stresses variation of machined surface as a function of cutting speed^[29]

超低温冷却条件下 AZ31B 镁合金的切削试验,其轴向深度残余应力曲线如图 24 所示,结果表明超低温冷却加工有助于增加残余压应力。钱景行等^[61]利用有限元软件 ABAQUS 建立了 AZ31B 镁合金的切削模型,用来预测已加工表面的残余应力分布,发现以液氮为冷却介质进行加工时,残余拉应力向残余压应力进行转变,且残余压应力最大值有所增加。牟海阔等^[62]开展了铝锂合金的干切削和液氮冷却切削试验,结果表明在高转速、大切深、高进给情况下液氮冷却加工可以获得更高的表面残余压应力,同时也能提高材料的去除效率。

Zhao 等^[63]研究了超低温冷却切削对 Ti-5553 钛合金疲劳寿命的影响,结果显示,相比于干切削和乳化液冷却条件,超低温冷却降低了加工过程产生的热载荷,减小残余拉应力并增加了残余压应力。刘召欢^[11]建立了液氮冷却条件下的 TC4 钛合金加工表面残余应力有限元模型,结果表明超低温冷却可增大残余压应

力。Li 等^[64]对比分析了干切削、乳化液冷却和超低温冷却条件对车削 TC4 钛合金的表面完整性的影响,结果发现,相比于干切削条件,液氮冷却和乳化液冷却均能降低切削温度,减小由热效应产生的残余拉应力,但液氮冷却条件下的残余压应力值更高。

3 结论

本文介绍了超低温冷却施加方式和相应加工装置,并对难加工金属材料超低温冷却加工表面完整性展开了综述与分析。结果表明,与干切削、乳化液冷却和 MQL 条件相比,超低温冷却有利于改善钛合金、高温合金和镁合金等难加工金属材料的加工表面完整性。本文研究的主要结论如下。

(1) 超低温冷却加工可以降低表面粗糙度。液氮的强冷却作用可带走大量切削热,使切削区域温度大幅度降低,进而抑制刀具磨损,减少积屑瘤和切屑黏附现象,利于表面质量的改善;在超低温环境下,材料塑性下降、硬度提高,加工侧向塑性流动和材料变形得到有效抑制,最终使粗糙度降低。

(2) 超低温冷却加工可以增大加工表面和亚表面的显微硬度。在液氮冷却条件下,切削第三变形区热软化效应下降,使得应变硬化效应得到加强,促进了加工表面显微硬度的

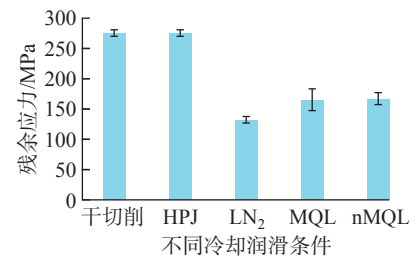


图 23 不同冷却润滑条件下的残余应力变化^[59]

Fig.23 Variation of residual stress under different cooling and lubrication conditions^[59]

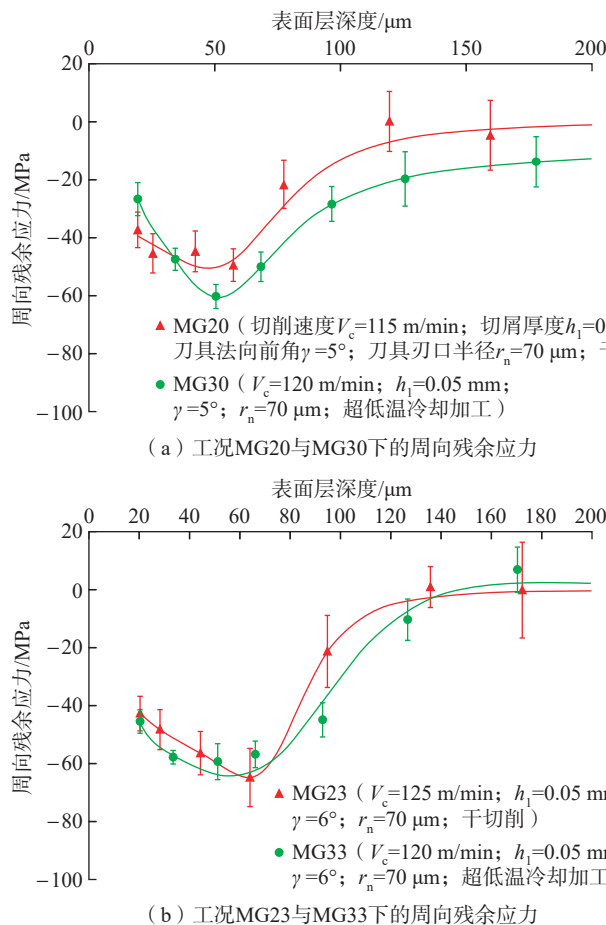


图 24 干切削和超低温切削条件下周向深度残余应力分布^[60]

Fig.24 In-depth residual stress profiles in the circumferential direction under dry and cryogenic cutting conditions^[60]

提高;液氮极强的冷却速度会促进亚表面层晶粒细化,提高亚表面显微硬度。显微硬度提高可有效提升零件强度、硬度和耐磨性。

(3)超低温冷却加工可以改善表面残余应力。在液氮冷却条件下,材料自身塑性变形能力下降,同时热应力造成的塑性变形减小,所以超低温冷却加工中零件表层残余拉应力要比常规切削时明显减小,且表层所形成的残余应力梯度小,应力分布更为合理。

现阶段,在金属材料超低温冷却加工表面完整性测试与分析方面,已取得了较为丰富的研究成果。但是,超低温冷却加工特有的机理与规律

以及更深层次表面完整性成因,还需要进一步的研究,以探明其科学本质。超低温刺激下,被加工材料可能发生复杂的应激式反应,需要定量评价超低温冷却对材料服役性能的影响,确定超低温介质对不同材料的影响阈值。实施超低温冷却,在常规切削过程中引入了新的影响因素,亟须探索超低温冷却加工中的切削热、切削力行为,以及材料断裂机理。上述工作可为超低温冷却加工表面完整性的全面、深入研究提供必要支持。

参考文献

[1] 康风, 闫峰, 杨鄂川, 等. 轻合金在国内外航空炸弹上的应用研究[J]. 材料导报,

2014, 28(2): 136-138.

KANG Feng, YAN Feng, YANG Echuan, et al. Application of the light structure material in the foreign aerial bomb[J]. Materials Review, 2014, 28(2): 136-138.

[2] MOHSAN A U H, LIU Z Q, PADHY G K. A review on the progress towards improvement in surface integrity of Inconel 718 under high pressure and flood cooling conditions[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 91(1): 107-125.

[3] 郭东明. 高性能精密制造[J]. 中国机械工程, 2018, 29(7): 757-765.

GUO Dongming. High-performance precision manufacturing[J]. China Mechanical Engineering, 2018, 29(7): 757-765.

[4] 白清顺, 郭永博, 陈家轩, 等. 超洁净制造的研究与发展[J]. 机械工程学报, 2016, 52(19): 145-153.

BAI Qingshun, GUO Yongbo, CHEN Jiakuan, et al. Research and development of ultra-clean manufacturing[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(19): 145-153.

[5] 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.

[6] YILDIZ Y, NALBANT M. A review of cryogenic cooling in machining processes[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2008, 48(9): 947-964.

[7] 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, 2012, 61(1): 103-106.

[8] HONG S Y, DING Y C. 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.

[9] TAHRI C, LEQUIEN P, OUTEIRO J C, et al. CFD simulation and optimize of LN2 flow inside channels used for cryogenic machining: Application to milling of titanium alloy Ti-6Al-4V[J]. Procedia CIRP, 2017, 58: 584-589.

- [10] 杨子健. 超低温加工用液氮在线制备及调控系统研制[D]. 大连: 大连理工大学, 2022.
- YANG Zijian. Development of on-line preparation and control system of liquid nitrogen for ultra-low temperature processing[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2022.
- [11] 刘召欢. Ti-6Al-4V 钛合金液氮冷却加工表面残余应力仿真分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
- LIU Zhaohuan. Simulation analysis of surface residual stress of Ti-6Al-4V titanium alloy in liquid nitrogen cooling process[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020.
- [12] 苏文佳. 钛合金低温力学性能与低温铣削基础试验研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2021.
- SU Wenjia. Basic experimental study on low temperature mechanical properties and low temperature milling of titanium alloy[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2021.
- [13] 李建明. 液氮冷却车削高温合金 Inconel 718 材料去除机理研究[D]. 济南: 济南大学, 2020.
- LI Jianming. Study on material removal mechanism of liquid nitrogen cooling turning superalloy Inconel 718[D]. Jinan: University of Jinan, 2020.
- [14] 王相宇. 高温合金 GH4169 的切削加工性评价方法和本构模型研究[D]. 济南: 山东大学, 2016.
- WANG Xiangyu. Study on machinability evaluation method and constitutive model of superalloy GH4169[D]. Jinan: Shandong University, 2016.
- [15] WANG Z Y, RAJURKAR K P. Wear of CBN tool in turning of silicon nitride with cryogenic cooling[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1997, 37(3): 319-326.
- [16] WANG Z Y, RAJURKAR K P. Cryogenic machining of hard-to-cut materials[J]. Wear, 2000, 239(2): 168-175.
- [17] LI S J, HU Y K, JIANG X, et al. Experimental study on cryogenic cutting of high-strength steel with liquid nitrogen cooling[J]. Advanced Materials Research, 2011, 328-330: 470-473.
- [18] MAG. Cryogenic machining takes flight with F-35[J]. Manufacturing Engineering, 2011, 147(5): 33, 35-38.
- [19] AHMED L S, KUMAR M P. Cryogenic drilling of Ti-6Al-4V alloy under liquid nitrogen cooling[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2016, 31(7): 951-959.
- [20] HUANG B, KAYNAK Y, SUN Y, et al. Surface layer modification by cryogenic burnishing of Al 7050-T7451 alloy and validation with FEM-based burnishing model[J]. Procedia CIRP, 2015, 31: 1-6.
- [21] 王永青, 郭东明, 郭立杰, 等. 超低温加工技术的研究现状及发展趋势[J]. 上海航天, 2020, 37(3): 11-21.
- WANG Yongqing, GUO Dongming, GUO Lijie, et al. Research status and development trend of cryogenic machining technology[J]. Aerospace Shanghai, 2020, 37(3): 11-21.
- [22] LIU K, HAN L S, WANG Y Q, et al. Theoretical and experimental research towards labyrinth sealing mechanism of liquid nitrogen in the cryogenic spindle[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2022, 167: 108502.
- [23] 赵地, 王永青, 刘阔, 等. 超低温介质内冷式刀柄的设计及试验研究[J]. 中国机械工程, 2022, 33(5): 600-606.
- ZHAO Di, WANG Yongqing, LIU Kuo, et al. Design and experimental study of cryogenic medium internal cooling toolholders[J]. China Mechanical Engineering, 2022, 33(5): 600-606.
- [24] GAN Y Q, WANG Y Q, LIU K, et al. The development and experimental research of a cryogenic internal cooling turning tool[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 319: 128787.
- [25] 王永青, 韩灵生, 刘阔, 等. 超低温加工机床的液氮冷却介质可靠传输与精准调控[J]. 机械工程学报, 2020, 56(1): 187-195.
- WANG Yongqing, HAN Lingsheng, LIU Kuo, et al. Reliable transmission and precise regulation of liquid nitrogen as the coolant of cryogenic machine tool[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(1): 187-195.
- [26] ZHAO W, GONG L, REN F, et al. Experimental study on chip deformation of Ti-6Al-4V titanium alloy in cryogenic cutting[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 96(9): 4021-4027.
- [27] 张小明, 贺子和, 丁汉, 等. 一种适用于 Inconel 718 切削加工的双喷头式液氮冷却系统: CN105583689A[P]. 2017-09-12.
- ZHANG Xiaoming, HE Zihang, DING Han, et al. A dual nozzle liquid nitrogen cooling system for Inconel 718 machining: CN105583689A[P]. 2017-09-12.
- [28] ULUTAN D, OZEL T. Machining induced surface integrity in titanium and nickel alloys: A review[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2011, 51(3): 250-280.
- [29] TOKER G P, SCHOOP J, KARACA H. Machining-induced surface integrity and nanocrystalline surface layers in cryogenic finishing turning of Inconel 718[J]. Machining Science and Technology, 2022, 26(4): 640-664.
- [30] DANISH M, GUPTA M K, RUBAIEE S, et al. Influence of hybrid Cryo-MQL lubri-cooling strategy on the machining and tribological characteristics of Inconel 718[J]. Tribology International, 2021, 163: 107178.
- [31] SALUR E. Understandings the tribological mechanism of Inconel 718 alloy machined under different cooling/lubrication conditions[J]. Tribology International, 2022, 174: 107677.
- [32] 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.
- [33] LIU E L, WANG R Y, ZHANG Y, et al. Surface integrity analysis of Ti-5553 under different cooling strategies[J]. Ferroelectrics, 2022, 593(1): 51-62.
- [34] 戴明华, 刘阔, 张红哲, 等. 液氮超低温冷却车削钛合金的综合实验[J]. 实验技术与管理, 2021, 38(8): 55-60.
- DAI Minghua, LIU Kuo, ZHANG Hongzhe, et al. Comprehensive experiment of liquid nitrogen cryogenic cooling turning titanium alloy[J]. Experimental Technology and Management, 2021, 38(8): 55-60.
- [35] GAN Y Q, WANG Y Q, LIU K, et al. Machinability investigations in cryogenic internal cooling turning Ti-6Al-2Zr-1Mo-1V titanium alloy[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 120(11): 7565-7574.
- [36] 宋戈, 姜振喜, 李卫东, 等. 基于液氮低温冷却的钛合金铣削技术研究[J]. 制造技术与机床, 2020(7): 22-26.

SONG Ge, JIANG Zhenxi, LI Weidong, et al. Study on milling technology of titanium alloy based on low-temperature liquid nitrogen cooling[J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2020(7): 22–26.

[37] DINESH S, SENTHILKUMAR V, ASOKAN P, et al. Effect of cryogenic cooling on machinability and surface quality of bio-degradable ZK60 Mg alloy[J]. *Materials & Design*, 2015, 87: 1030–1036.

[38] 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.

[39] DHAR N R, KAMRUZZAMAN M. Cutting temperature, tool wear, surface roughness and dimensional deviation in turning AISI-4037 steel under cryogenic condition[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2007, 47(5): 754–759.

[40] PU Z, YANG S, SONG G L, et al. Ultrafine-grained surface layer on Mg–Al–Zn alloy produced by cryogenic burnishing for enhanced corrosion resistance[J]. *Scripta Materialia*, 2011, 65(6): 520–523.

[41] PERÇIN M, ASLANTAS K, UCUN İ, et al. Micro-drilling of Ti–6Al–4V alloy: The effects of cooling/lubricating[J]. *Precision Engineering*, 2016, 45: 450–462.

[42] 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.

[43] 刘泉, 邓文君, 陈海涛, 等. 低温切削 7075 铝合金鳞刺形成规律及抑制措施[J]. *中国机械工程*, 2022, 33(3): 261–269.

LIU Xiao, DENG Wenjun, CHEN Haitao, et al. Scale thorn formation regularity and inhibitory measures in cryogenic cutting processes of aluminum alloy 7075[J]. *China Mechanical Engineering*, 2022, 33(3): 261–269.

[44] 张慧萍, 靳杰, 王尊晶, 等. 低温微量润滑高速车削高强度钢表面质量研究[J]. *哈尔滨理工大学学报*, 2019, 24(6): 33–40.

ZHANG Huiping, JIN Jie, WANG Zunjing, et al. Study on the machined surface quality in high speed turning high strength steel under

cryogenic minimum quantity lubrication[J]. *Journal of Harbin University of Science and Technology*, 2019, 24(6): 33–40.

[45] PAN D, WANG X Y, NIU J T, et al. Surface integrity of turned 6061 aluminum alloy using liquid nitrogen as cooling medium[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, 1885(3): 032048.

[46] LIU H B, WANG C X, LI T, et al. Fixturing technology and system for thin-walled parts machining: A review[J]. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 2022, 17(4): 55.

[47] 王永青, 左月帅, 刘阔, 等. 一种面向金属蜂窝芯的热电制冷冷冻固持系统: CN115625544A[P]. 2023–01–20.

WANG Yongqing, ZUO Yueshuai, LIU Kuo, et al. A thermoelectric cooling ice fixation system for metal honeycomb cores: CN115625544A[P]. 2023–01–20.

[48] WANG C X, XIONG W T, DING G, et al. Numerical analysis of the forming mechanism of exit burrs in metal milling under ice boundary constraint[J]. *Materials*, 2022, 15(16): 5546.

[49] 姜少玮, 王永青, 刘阔, 等. 高温合金蜂窝芯冰固持低损伤加工技术研究[J]. *中国机械工程*, 2022, 33(5): 577–582.

JIANG Shaowei, WANG Yongqing, LIU Kuo, et al. Research on ice fixation and low damage machining technology of superalloy honeycomb cores[J]. *China Mechanical Engineering*, 2022, 33(5): 577–582.

[50] ROTELLA G, DILLON O W, UMBRELLO D, et al. The effects of cooling conditions on surface integrity in machining of Ti6Al4V alloy[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, 71(1): 47–55.

[51] 殷晓龙, 邓文君, 张嘉阳, 等. 超低温挤出切削 7075 铝合金的组织与性能[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2019, 47(5): 89–95.

YIN Xiaolong, DENG Wenjun, ZHANG Jiayang, et al. Microstructure and mechanical properties of Al7075 alloy prepared by cryogenic-temperature extrusion machining[J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2019, 47(5): 89–95.

[52] 范雷, 颜培, 陈仕齐, 等. 镁合金低温切削性能及工艺参数优化[J]. *哈尔滨工*

业大学学报, 2022, 54(7): 53–63, 69.

FAN Lei, YAN Pei, CHEN Shiqi, et al. Optimization of process parameters and performances of cryogenic cutting of magnesium alloy[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2022, 54(7): 53–63, 69.

[53] DANISH M, RUBAIEE S, IJAZ H. Predictive modelling and multi-objective optimization of surface integrity parameters in sustainable machining processes of magnesium alloy[J]. *Materials*, 2021, 14(13): 3547.

[54] GONG L, BERTOLINI R, BRUSCHI S, et al. Surface integrity evaluation when turning Inconel 718 alloy using sustainable lubricating-cooling approaches[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing: Green Technology*, 2022, 9(1): 25–42.

[55] 李祥, 郑光明, 颜培, 等. 清洁切削高温合金涂层刀具切削性能及加工表面完整性[J]. *中国机械工程*, 2023, 34(4): 454–463.

LI Xiang, ZHENG Guangming, YAN Pei, et al. Cutting performance of coated tools and machined surface integrity in superalloy clean cutting[J]. *China Mechanical Engineering*, 2023, 34(4): 454–463.

[56] KHEIREDDINE A H, AMMOURI A H, LU T, et al. An FEM analysis with experimental validation to study the hardness of In-process cryogenically cooled drilled holes in Mg AZ31b[J]. *Procedia CIRP*, 2013, 8: 588–593.

[57] FALLAH M M, JAFARIAN F. Cryogenic and dry machining of Ti6Al4V alloy for evaluation of microhardness, thermal loads, microstructure, and surface quality[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2022, 32: 5895–5905.

[58] 彭泽宇, 颜培. 低温切削奥氏体 304 不锈钢残余应力研究[J]. *兵工学报*, 2019, 40(6): 1271–1276.

PENG Zeyu, YAN Pei. Investigation into residual stress of austenitic 304 stainless steel at cryogenic temperature[J]. *Acta Armamentarii*, 2019, 40(6): 1271–1276.

[59] BEHERA B C, ALEMAYEHU H, GHOSH S, et al. A comparative study of recent lubri-coolant strategies for turning of Ni-based superalloy[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2017, 30: 541–552.

[60] OUTEIRO J C, BATISTA A C,

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.

[61] 钱景行, 于随然. AZ31B 镁合金低温切削的建模与仿真[J]. *机电一体化*, 2015, 21(2): 26–31.

QIAN Jingxing, YU Suiran. Modeling and simulation of the cryogenic machining of AZ31B magnesium alloy[J]. *Mechatronics*, 2015, 21(2): 26–31.

[62] 牟海阔, 黄信达, 袁益楚, 等. 铝锂合金高速铣削表面完整性实验研究[J]. *中国科学: 技术科学*, 2014, 44(1): 89–98.

MU Haikuo, HUANG Xinda, YUAN Yichu, et al. Investigation of surface integrity of aluminum lithium alloy in high speed machining[J]. *Scientia Sinica (Technologica)*, 2014, 44(1): 89–98.

[63] ZHAO X, LI R Y, LIU E L, et al. Effect of cryogenic cutting surface integrity on fatigue life of titanium alloy Ti-5553[J].

Ferroelectrics, 2022, 596(1): 115–125.

[64] LI J M, LI T Y, WANG X Y, et al. Effects of cooling conditions on surface integrity in turning of TC4 alloy[J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, 735(1): 012035.

通讯作者: 韩灵生, 博士后, 主要研究方向为超低温冷却加工关键技术, 超低温流体动密封理论与技术。

Surface Integrity of Difficult-to-Machine Metal Materials for Cryogenic Machining: A Review

WANG Yongqing, ZUO Yueshuai, HAN Lingsheng, JIANG Shaowei, LI Jianming,
LIU Kuo, LIU Haibo

(Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

[ABSTRACT] Cryogenic machining is a cleaner processing technology which uses cryogenic coolants such as liquid nitrogen for cooling in material cutting process. It is widely used in the processing of difficult-to-machine metal materials in aerospace and other fields to solve problems such as insufficient cooling efficiency and poor machining quality during conventional cooling processing for these materials. In order to clarify the effect law of cryogenic machining on the surface integrity of difficult-to-machine metal materials, this paper particularly reviews the research progress in the analysis of surface roughness, micromorphology, microstructure, microhardness and residual stress of such materials under different cooling conditions. The results show that cryogenic coolant can take away a large amount of cutting heat and reduce tool wear, thus reducing the machined surface roughness, inhibiting surface defects, promoting grain refinement, improving microhardness and increasing residual compressive stress. Finally, researches on the surface integrity of cryogenic machining are summarized, and works which have not been carried out in relevant aspects are prospected.

Keywords: Cryogenic machining; Difficult-to-machine metal materials; Surface integrity; Residual stress; Microhardness; Grain refinement

(责编 逸飞)