DOI: 10.3901/JME.2020.01.187

超低温加工机床的液氮冷却介质可靠传输 与精准调控*

王永青 韩灵生 刘 阔 刘海波 班仔优 郭东明
(大连理工大学精密与特种加工教育部重点实验室 大连 116024)

摘要: 超低温冷却加工是一种以钛合金、复合材料为代表的难加工材料高质高效加工方法。刀具中内喷式冷却是将液氮通过主轴和刀柄的内腔通道引导至刀尖处。与刀具外喷淋冷却相比,内喷方式对切削区域及刀具的冷却更加充分。常规机床主轴和刀柄无法实现液氮传输功能,其材料和结构更不能满足超低温隔热与动密封要求。为解决机床结构中液氮因汽化和泄漏导致相态、流量、压力等传输特征稳定性差、不可控的难题,提出基于定向导引与热阻强化的隔热方法,建立唇形密封在超低温介质下的接触应力模型,提出局限空间内的超低温动密封方法,研制保障液氮可靠传输的中空隔热主轴-刀柄;揭示热交换与两相流压降对液氮传输稳定性的影响机理,构建液氮射流状态精准调控系统。开发国内首台液氮内喷式超低温加工机床,开展液氮传输调控试验与钛合金切削试验,结果表明:主轴隔热、密封性能良好,液氮传输状态稳定且调控精准度高,超低温加工表面粗糙度较干切削降低约 50%,冷却效果显著。

关键词: 难加工材料;超低温冷却;液氮;超低温机床;动密封

中图分类号: TG547

Reliable Transmission and Precise Regulation of Liquid Nitrogen as the Coolant of Cryogenic Machine Tool

WANG Yongqing HAN Lingsheng LIU Kuo LIU Haibo BAN Ziyou GUO Dongming
(Key Laboratory for Precision and Non-traditional Machining Technology of Ministry of Education,
Dalian University of Technology, Dalian 116024)

Abstract: Cryogenic machining is a high-quality and high-efficiency processing method for difficult-to-machine materials such as titanium alloys and composite materials. Internal cooling in tool is that liquid nitrogen is guided through the inner passages of spindle and toolholder to the tip of tool. Compared with the external cooling, the cutting area and tool are cooled more sufficiently by internal cooling. Liquid nitrogen transmission is not realized by conventional machine tool, and their material and structure can not meet the requirements of cryogenic insulation and dynamic seal. In order to solve the problem which the phase, flow rate, pressure and other characteristics of liquid nitrogen are difficult to maintain stability and control due to vaporization and leakage in machine tool, a thermal insulation method based on directional guidance and thermal resistance enhancement is proposed. The contact stress model of lip seal under cryogenic coolant is established, and a method of cryogenic dynamic seal in confined space is proposed. A hollow adiabatic spindle-toolholder for reliable transmission of liquid nitrogen is developed. The impact mechanism of heat exchange and two-phase flow pressure drop on the stability of liquid nitrogen is revealed, and a precise regulation system for liquid nitrogen jet is constructed. Finally, the first cryogenic machine tool with liquid nitrogen delivering through spindle in China is developed. A series of liquid nitrogen transmission and titanium alloy milling experiments are carried out. The results show the thermal insulation and sealing of spindle are fine, the transmission state of liquid nitrogen is stable and its regulation accuracy is high. The surface roughness of cryogenic machining is 50% lower than that of dry cutting, which proves the effect of cryogenic cooling is significant.

Key words: difficult-to-machine materials; cryogenic cooling; liquid nitrogen; cryogenic machine tool; dynamic seal

* 长江学者特聘教授奖励计划(T2017030)、国家自然科学基金(U1608251、51775085、51621064)、辽宁省兴辽英才计划(XLYC1807081)、大连市高层次人才创新支持计划(218RD05)和高性能复杂制造国家重点实验室开放课题(Kfkt2016-5)资助项目。20190219 收到初稿,20190804 收到修改稿

0 前言

在航空航天等领域,为满足极端工况下的高使用性能要求,高端装备中的核心零部件广泛采用以钛合金、复合材料为代表的先进材料。但是,上述材料往往呈现出高粘、高韧、低热导率等难加工特性,加工中切削温度高,乳化液冷却效能明显不足。此外,纤维增强复合材料吸湿后力学性能弱化显著,实际加工中不能使用水基或油基冷却液。因此,“一代材料,一代工艺”,新的工艺方法亟需被探索。

以液氮为冷却介质的超低温加工,作为一种清洁切削技术,可大幅降低切削温度,在提高难加工材料的加工质量与加工效率、延长刀具寿命等方面具有独特优势^[1-3]。超低温冷却的施加方式主要包括刀具外喷淋冷却和刀具中内喷式冷却^[4-5]。外喷式冷却是基于常规冷却的设计思路,利用外置喷嘴对切削点的外围区域进行漫灌式冷却,在现有条件下较容易实施,然而冷却介质利用率往往较低、机床功能集成性较差。内喷式冷却是将液氮等超低温介质通过主轴和刀柄的内腔通道引导至刀尖处,实现对切削点的直接定量冷却,冷却效能高,提高了冷却介质利用率,势必成为超低温加工技术的发展趋势。但是,内喷式冷却对相关装备与液氮调控技术的要求高,实施难度大。

目前,国内外对超低温加工技术的研究主要集中在难加工材料的外喷式冷却加工工艺方面,从表面完整性、刀具磨损、切削热/力/摩擦等角度展现了超低温冷却的效果^[6-10]。近年来,国内外学者也开始关注介质流量、压力、相态等参数变化对超低温冷却性能的影响^[11-14]。在液氮传输与调控方面,研究表明,热量输入与流动压降是影响液氮传输稳定性的主要因素^[15]。液氮流量调控主要有两种方式:手动控制截止阀门,通过称重计算液氮的平均流量,该方法可控性与精准度较差^[12];利用 PLC 等控制器自动调节液氮流量,实时性强,智能化程度高^[16]。在超低温加工系统和装置的开发与应用方面,美、法等先进制造大国处于领先地位。2010年,美国 SME 公司研制出液氮内喷式冷却加工机床,并探索出了钛合金整体叶盘等航空发动机关键件的超低温冷却加工工艺,已成功应用于 F-35 的生产^[16-17]。法国国立高等工程技术学校研究出了面向钛合金的内喷式超低温铣削加工刀具^[18]。大连理工大学与韩国工业技术研究所几乎同步研制出了液氮内喷式刀柄,实现了与机床相对独立的刀具中内喷式冷却^[19-20]。此外,大连理工大学开发出独立式液氮调控系统,实现了液氮流量的自动调节^[15]。

尽管国内已进行了较为系统的外喷式超低温加工工艺研究,同时在液氮调控系统、内喷式刀柄装置方面也取得了一定成果,但在超低温介质内喷式加工

机床层面仍处于“空白”。究其原因是液氮可靠传输功能-机床结构一体化集成难度大。具体表现为强制流动的液氮冷源对主轴内部隔热和动密封提出了极高的要求,常规主轴研制技术难以满足,无法避免液氮泄漏与热损失,不能消除超低温对主轴精度的影响。另外,液氮受热后热力学状态波动剧烈,传输过程中维持低含气率、保持稳定的流量、压力、温度非常困难。针对上述问题,本文将研究主轴-刀柄的超低温隔热与动密封、液氮的稳定传输与精准调控,并以此为基础,开发液氮内喷式超低温加工机床。

1 超低温加工机床功能及关键问题

以常规机床为基础研制的超低温加工机床主要功能如图 1 所示,该机床不仅具备内喷式中空主轴,还集成了超低温介质传输、调控以及环境状态监测系统。超低温加工机床的运行流程如图 2 所示,数控系统识别并判断液氮传输状态和机床内部环境信息,通过反馈调节完成期望的加工目标,或在环境状况超出安全阈值时报警并停止加工。

图1 超低温加工机床主要功能

图2 超低温加工机床运行流程

液氮可靠传输与精准调控要求液氮流型为纯液相或低含气率泡状流,流量、压力、温度等传输状态稳定且可控。然而,液氮饱和温度低、气化潜热小,在传输过程中受外界环境温度的影响,极易发生汽化。液氮在主轴、刀柄内腔作强制流动时,动/静结

合面易发生泄漏。同时超低温冷源以传导、对流等方式从主轴内部迅速扩散,引起材料收缩甚至冻结,导致结构变形、配合失效、润滑失效、转动失效等问题,对主轴造成不可逆的损坏。此外,汽化现象会严重破坏液氮传输的稳定性,进而无法保证刀尖射流状态的精准调控。因此,实现液氮冷却介质可靠传输,研制超低温加工机床,需要解决以下关键问题。

(1) 中空主轴-刀柄的内腔尺寸受到常规设计规则的约束,对于最低温度约 $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的液氮,如何在局限空间内设计隔热结构以有效遏止超低温温度场的传递,是超低温加工机床研制的难点。

(2) 超低温、小空间、高线速是超低温加工机床内流体密封面临的挑战,同时,行之有效的密封方法对液氮可靠传输极其重要。超低温动密封是本文主要研究的关键技术之一。

(3) 零件材料与结构的多样性,要求对超低温介质具有多变量、大范围、定量调控的能力,但前提需保证超低温介质传输的稳定性,因此分析其影响因素,规划合理的传输方案十分必要。

2 液氮可靠传输关键技术

2.1 中空主轴-刀柄隔热技术

超低温介质内喷式中空隔热主轴-刀柄如图 3 所示,液氮从传输系统末端的真空绝热软管进入主轴芯轴,芯轴与软管的连接方式为静态密封管螺纹连接,并在接口外表包覆隔热层。由于芯轴为定子结构,刀柄为旋转结构,因此主轴前端内芯轴与刀柄的连接处设置动密封结构,防止由两段通道间缝隙中逸出的液氮流入主轴内部造成冷源扩散。隔热结构由具有定向导引作用的真空层与低热导率材料层组成,严格限制了超低温冷源的移动区域,极大地增强了隔热能力。其中,主轴整体内腔为真空绝热结构,刀柄内腔及与主轴连接处为隔热材料结构。

图 3 中空隔热主轴-刀柄结构

主轴-刀柄内部的温度场取决于液氮流体与外部环境和热载荷之间的热量交换。鉴于主轴的中心对称结构,仅需要研究沿主轴剖面的热量传递过程,该过程可近似看成二维稳态传热。为了方便研究,作以下假设:箱体内部的零件表面仅存在热传导,无对流与辐射传热;隔热材料与主轴过盈配合,忽略其接触热阻;主轴和隔热材料的热导率为常数;真空结构热导率为零。

以中空隔热主轴-刀柄为研究对象建立传热模型,如图 4 所示。主轴内 ox_3 段为液氮两相流强制对流传热区域,主轴外 ox_4 段为空气强制对流传热区域。 Q_1 、 Q_2 、 $\dots$ 、 Q_5 为轴承、带轮与主轴的摩擦热载荷, t_{f1} 、 t_{f2} 分别为空气温度、液氮流体温度, t_1 、 t_2 为主轴与隔热材料接触表面温度, t_{w1} 、 t_{w2} 、 t_{w3} 、 t_{w4} 为固体与流体接触表面温度。

图 4 主轴-刀柄稳态传热模型

对于各向同性体,二维稳态传热中任何位置的热流密度 $q(x,r)$ 为 q_x 与 q_r 之和

$$q(x,r) = q_x + q_r \quad (1)$$

主轴-刀柄内部的低温温度场主要位于 ox_3 段,与 x 方向相比,该段沿 r 方向的热交换更为严重,因此主要分析该方向的一维稳态传热。根据传热学第三类边界条件,外界空气与摩擦热载荷通过主轴向液氮传递的热流量 Q 为

$$Q = \frac{t_{f1} - t_{f2}}{R_{h1} + R_{\lambda 1} + \frac{1}{\frac{1}{R_{\lambda 2} + R_{h2}} + \frac{1}{R_{h3}} + \frac{1}{R_{\lambda 3} + R_{h4}}}} + Q_{1r} + Q_{2r} + Q_{3r} + Q_{4r} + Q_{5r} \quad (2)$$

式中, Q_{1r} 、 Q_{2r} 、 $\dots$ 、 Q_{5r} 为摩擦热载荷在 ox_3 段 r 方向的热流量; R_{h1} 、 R_{h2} 、 R_{h3} 、 R_{h4} 为壁面 $r=r_4$ 、 $r=r_1$ 、 $r=r_3$ 、 $r=r_2$ 的对流热阻, $R_{\lambda 1}$ 、 $R_{\lambda 2}$ 、 $R_{\lambda 3}$ 为主轴、隔热材料的导热热阻,表达式如下

$$\begin{cases} R_{h1} = \frac{1}{2\pi r_4 x_4 h_{T1}} \\ R_{h2} = \frac{1}{2\pi r_1 x_1 h_{FC1}} \\ R_{h3} = \frac{1}{2\pi r_3 (x_2 - x_1) h_{FC2}} \\ R_{h4} = \frac{1}{2\pi r_2 (x_3 - x_2) h_{FC3}} \\ R_{\lambda 1} = \frac{1}{2\pi \lambda_1 x_3} \ln \frac{r_4}{r_3} \\ R_{\lambda 2} = \frac{1}{2\pi \lambda_2 x_1} \ln \frac{r_3}{r_1} \\ R_{\lambda 3} = \frac{1}{2\pi \lambda_2 (x_3 - x_2)} \ln \frac{r_3}{r_2} \end{cases} \quad (3)$$

式中, r_i 是壁面半径; x_i 是轴向长度, 其中 $i=1,2,3,4$; h_{r1} 是空气强制对流-辐射联合传热系数; h_{FCi} 是不同位置处液氮两相流强制对流传热系数, 根据 Dittus-Boelter 关系式采用分液相计算可得 $h_{FC} \propto [(1-X)G]^{0.8}$, X 为两相流质量含气率, G 为质量流速; λ_1 、 λ_2 是主轴与隔热材料的热导率。

中空隔热主轴-刀柄的功能目标是遏止超低温温度场在主轴内的传递, 即减小热流量。由式(2)可知热流量与空气-液氮温度差、区域 r 向摩擦热载荷正相关, 与等效热阻负相关。因此, 减小热流量最可行的措施是增大各环节的热阻。具体为选择热导率小的隔热材料、增加隔热材料厚度、减小传热面积、提高 x_1x_3 段的两相流质量含气率等。

图5 主轴-刀柄温度场(热导率 0.3 W/m·K)

图6 主轴-刀柄温度场(热导率 0.15 W/m·K)

2.2 超低温动密封技术

虑及主轴-刀柄内部空间小、转子线速度高、流体温度低等特点, 如图7选用唇形密封作为超低温动密封结构, 并通过理论计算与仿真分析, 获得了超低温工况下满足密封要求的结构参数。由于超低温下橡胶材料回弹变差, 故选择了一种热膨胀系数较小的塑性体作为密封材料。唇形密封的断面形状和箍紧弹簧使唇口对轴有较好的追随性, 同时两侧的非对称结构形成泵吸效应^[21], 最终能以较小的径

图7 唇形密封接触区示意图

向接触力获得良好的密封效果。针对超低温密封工况, 唇口材料应力的温度依赖性明显高于速率依赖性。因此, 塑性材料忽略应变率对应力的影响后, 其 JC 模型为^[22]

$$\sigma = \left[A + B(\epsilon^p)^n \right] \left(1 - \lambda \frac{e^{T/T_{vit}} - e^{T_{room}/T_{vit}}}{e - e^{T_{room}/T_{vit}}} \right) \quad (4)$$

式中, σ 为唇口应力; ϵ^p 为等效应变, 且 $\epsilon^p = \delta/L$, 其中唇口变形量 $\delta = b \cdot \tan \alpha \tan \beta / (\tan \alpha + \tan \beta)$, L 为唇口厚度, b 为唇口与轴的接触宽度, α 为密封侧唇角, β 为空气侧唇角; T 为唇口温度; T_{vit} 为材料的玻璃化温度; T_{room} 为室温; A 、 B 、 λ 为量纲一的材料参数。

密封唇口的等效应变 ϵ^p 可认为是三部分叠加之和

$$\epsilon^p = \epsilon_1^p + \epsilon_2^p + \epsilon_3^p \quad (5)$$

式中, ϵ_1^p 为初始过盈配合产生的配合应变; ϵ_2^p 为流体压力 P 引起的压力应变; ϵ_3^p 为温度变化导致

的温度应变。三项应变对应的应力如下

$$\begin{cases} \sigma_1 = A + B(\varepsilon_1^p)^n \\ \sigma_2 = A + B(\varepsilon_2^p)^n \\ \sigma_3 = \left[A + B(\varepsilon_3^p)^n \right] \left(1 - \lambda \frac{e^{T/T_{vit}} - e^{T_{room}/T_{vit}}}{e - e^{T_{room}/T_{vit}}} \right) \end{cases} \quad (6)$$

应力 σ_2 还可以通过式(7)求得

$$\sigma_2 = \frac{P(M - N \tan \alpha)}{\pi D b} \quad (7)$$

式中, M 、 N 分别为骨架凹槽底面积与密封侧面积; D 为轴径。

经验表明, 密封有效时唇口与轴的接触宽度 b 为 0.1~0.3 mm, 本文取 $b = 0.2$ mm。唇口应力 σ 需要满足如下条件

$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \geq P \quad (8)$$

联立式(5)~(8), 获得满足超低温动密封要求的最小配合应变 ε_1^p , 即密封唇口的初始过盈量 S 。

本文液氮压力最大值为 0.8 MPa, 将密封结构参数代入上述公式, 得到密封有效时的初始过盈量 $S \geq 0.08$ mm。为了验证密封结构的合理性, 选取 $S = 0.1$ mm 和 $S = 0.2$ mm 进行有限元仿真分析。由图 8 可知主轴转速 $n = 1000$ r/min 与 $n = 4000$ r/min 的条件下, 唇口的最大接触应力均大于 0.8 MPa, 证明该超低温动密封方法满足密封要求。

图 8 密封唇口接触应力

2.3 液氮传输稳定性保持技术

液氮的传输状态包括流量、压力、温度、相态等, 其稳定性是实现刀尖处射流状态参数精准调控的基础。当液氮的流型为纯液相或泡状流, 即流体的干度维持在较低水平时, 传输状态保持稳定。干度升高是由液氮汽化造成的, 实质是管路外部热量输入或内部压力降低, 导致管壁温度高于液氮饱和温度^[23]。

液氮传输系统如图 9 所示, 传输管路的连接处采用隔热材料, 因此液氮与外界环境之间必然存在热交换。此时液氮相当于进入了均匀加热通道, 将引发欠热沸腾, 如果外界通过壁面输入的热量足够多, 甚至会发生饱和沸腾, 导致干度不断升高, 液

体的流型将从泡状流、环状流、雾状流至单向气体依次转变。不考虑沿管路长度方向的热量传递, 该过程可看作圆筒壁一维稳态传热, 外界通过管壁向液氮传递的热量 Q_T 为

图 9 液氮传输管路系统

$$Q_T = \frac{t_{f1} - t_{f2}}{\frac{1}{\pi d_2 l h_{T2}} + \frac{1}{\pi l \lambda_3} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\pi d_1 l h_{FC4}}} \quad (9)$$

式中, d_1 、 d_2 是隔热筒壁的内径和外径; l 是漏热管段长度; λ_3 是隔热材料热导率; h_{T2} 是筒壁外空气自然对流-辐射联合传热系数; h_{FC4} 是管路内液氮两相流强制对流传热系数。因此, 减少外部热量输入的唯一方法是增强隔热材料筒壁的等效热阻。

管路内两相流压降对传输稳定性也有很大影响。两相流压降包括沿程压降与局部压降, 沿程压降主要有摩擦压降、加速度压降和重力压降, 局部压降主要有弯头压降、突扩/突缩接头压降等。在真空水平管路中不计加速度压降与重力压降, 因此以摩擦压降和弯头压降为例分析影响两相流压降的主要因素。采用一维均相流模型计算压降^[24]

$$-\left(\frac{dp}{dz}\right)_F = -\left(\frac{dp}{dz}\right)_{I0} \left[1 + X \left(\frac{\rho_l}{\rho_g} - 1 \right) \right] \quad (10)$$

式中, $-\left(\frac{dp}{dz}\right)_F$ 为摩擦压力梯度; $-\left(\frac{dp}{dz}\right)_{I0}$ 为全液相摩擦压力梯度; ρ_l 与 ρ_g 分别为液氮与氮气的密度。

弯头压降 ΔP_w 为

$$\Delta P_w = \Delta P_{w0} \left[1 + X \left(\frac{\rho_l}{\rho_g} - 1 \right) \right] \quad (11)$$

式中, ΔP_{w0} 为与两相流总质量流量相同的液体流经弯头时的阻力。

可见, 质量含气率 X 是影响两相流压降的主要因素。质量含气率是容积含气率 β 的函数

$$X = \frac{\beta \rho_g}{\beta \rho_g + (1 - \beta) \rho_l} \quad (12)$$

综上所述, 增强隔热材料筒壁等效热阻、提高液氮输入压力、减小两相流压降, 以此维持管壁温

度低于当前压力下的液氮饱和温度,是液氮传输稳定性保持技术的核心。

为了验证液氮传输稳定性保持技术的有效性,采用 FLUENT 建立传输系统的液氮两相流数值模型,计算管路出口附近的稳态流量与容积含气率。如图 10 所示,实线表示流量值,点画线表示容积含气率。当隔热层外径 d_2 为 150 mm,入口压力 P_{in} 为 0.6 MPa 和 0.4 MPa 时,容积含气率 β 分别为 0.06 与 0.13,属于泡状流($\beta < 0.2$),此时流量值稳定在 0.013 kg/s (57 L/h) 与 0.009 kg/s (40 L/h);当入口压力 P_{in} 为 0.2 MPa 或隔热层外径 d_2 为 80 mm、入口压力 P_{in} 为 0.6 MPa 时,容积含气率 β 均大于 0.2,并且含气率与流量值都没有达到收敛状态。因此,可认为传输系统只有同时具备良好的隔热性能与较高的入口压力才能满足液氮稳定传输的要求。

图 10 液氮传输稳态特征

3 液氮射流状态精准调控

液氮射流状态精准调控的核心是检测单元和控制单元组成的闭环系统,如图 11 所示。检测单元包括流量、压力、温度、氮气浓度等传感器,控制单元包括耐低温的压力调节器、流量调节阀与数控系统。液氮流量调节是通过改变阀门节流直径实现的,其中流量与调节阀开度之间的关系如下

图 11 液氮射流调控系统示意图

$$q = 1000 K_{vs} f(h) \sqrt{\frac{10 \Delta P}{\zeta}} \quad (13)$$

式中, q 为体积流量; K_{vs} 为调节阀额定流量系数; $f(h)$ 为调节阀固有流量特性,相对开度 h 是调节阀在某一开度时的阀芯位移与全开时阀芯位移之比; ΔP 为调节阀前后压差; ζ 为液氮与水的密度比值。

由式(13)可知,流量调节的实质是改变调节阀两端的压差。因此,无论调节流量还是调节压力都会造成传输管路内液氮压力的变化,然而液氮的热力学状态对环境压力变化非常敏感,所以调控系统采取了一种具有滞后特性的控制策略。加工过程中,液氮流量、压力和温度经传感器实时检测后输入数控系统,控制程序将检测值与期望值的偏差生成动作指令,通过既定的控制策略输送到压力调节器或调节阀中,从而实现压力或流量的自动调节。

4 超低温加工机床及试验验证

4.1 超低温加工机床

基于上述技术,研制了中空隔热主轴-刀柄、构建了液氮传输调控系统,开发了液氮内喷式超低温加工机床,如图 12、图 13 所示。机床主要参数包括:工作台尺寸 600 mm×1 300 mm; X、Y、Z 轴行程 800 mm、600 mm、300 mm; 主轴最高转速 4 000 r/min; 液氮流量调控范围 0~100 L/h; 最大射流压力 0.8 MPa; 射流温度范围 -20~-196 °C。

图 12 液氮内喷式立式铣床

图 13 液氮传输调控系统与状态监测

4.2 液氮传输调控试验

为了验证主轴的隔热、密封与液氮调控性能,进行了恒转速空载测试(图 14),主轴转速 2 000 r/min,试验时长 2 h。检测指标包括液氮传输管路内温度、主轴定子前端温度、主轴检漏点氮气浓度、液氮压力与流量。其中,管路内温度传感器、液氮压力传感器和流量计安装位置见图 9 与图 13,主轴

定子前端温度传感器布置如图 14 所示。温度传感器的量程为 $-200\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$; 压力传感器量程为 $0\sim 1.6\text{ MPa}$, 精度为 $0.1\%\text{ FS}$; 压差式流量计量程为 $0\sim 100\text{ L/h}$ 。液氮检漏点位于主轴末端, 氮气浓度传感器的分辨率为 $0.01\%\text{ VOL}$ 。上述传感器均输出 $4\sim 20\text{ mA}$ 电流信号, 通过 ADLINK-1902 采集卡获取试验数据。

图 14 液氮传输调控试验

图 15 为上述指标的检测曲线, 可见管路内温度稳定在 $-180\text{ }^{\circ}\text{C}$, 主轴前端温度稳定在 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, 检漏点氮气浓度始终维持在正常水平。依据液氮稳定传输时对压力与流量值的要求, 以及以往超低温冷却加工

图 15 测量结果

试验中获得的经验数据, 选择压力与流量调控试验中的目标期望值。同时, 虑及测量元件的精度及测量稳定性, 允许的压力波动范围为 $\pm 0.05\text{ MPa}$, 流量波动范围为 $\pm 5\text{ L/h}$ 。由图可知, 液氮压力与流量在多次调节中既能与期望值吻合又能保持稳定状态。该试验证明主轴隔热、密封性能良好, 液氮传输状态稳定且调控精准度高, 机床内喷式冷却功能可靠。

4.3 加工试验

为了验证超低温机床的加工性能, 选取 TC4 钛合金进行铣削试验。刀具为 KYOCERA 内冷式两刃立铣刀, 直径 16 mm , 可换刀片前角为 18° 、后角 13° , 材料为带 PVD 涂层的硬质合金。工艺参数如下: 切削速度 2.1 m/s , 进给速度 200 mm/min , 切削深度 0.8 mm , 液氮流量 $(60\pm 2)\text{ L/h}$, 压力 $(0.4\pm 0.05)\text{ MPa}$ 。加工过程及加工后的试样如图 16 所示, 已加工表面光洁度高, 边缘无粘连的切屑与毛刺。随机取 5 个粗糙度测量点, 并与同等切削参数的干切削表面对比。从图 17 可以看出, 超低温加工表面的粗糙度较干切削降低约 50% , 证明超低温冷却效果显著, 该机床具备了一定的难加工材料零件加工能力。

图 16 加工过程与加工后试样

图 17 表面粗糙度

5 结论

本文针对超低温加工机床研制中遇到的液氮可靠传输与精准调控问题, 详细介绍了中空主轴-刀柄隔热技术、超低温动密封技术与液氮传输稳定性保持技术。而且, 上述技术在其他低温领域也有较强的应用性。本文开发的液氮内喷式超低温加工机床, 实现了难加工材料零件的刀具中内喷式超低温冷却加工, 且刀尖射流状态参数稳定可控。为了全面检验超低温加工机床的使役性能, 未来将进一步开展更多的试验研究。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] JAWAHIR I S, ATTIA H, BIERMANN D, et al. Cryogenic manufacturing processes[J]. CIRP Annals, 2016, 65(2): 713-736.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] DIX M, WERTHEIM R, SCHMIDT G, et al. Modeling of drilling assisted by cryogenic cooling for higher efficiency[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2014, 63(1): 73-76.
- [6] KAYNAK Y, LU Tao, 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.
- [7] UMBRELLO D, ROTELLA G. Fatigue life of machined Ti6Al4V alloy under different cooling conditions[J]. CIRP Annals, 2018, 67(1): 99-102.
- [8] WANG Fengbiao, WANG Yongqing, HOU Bo, et al. Effect of cryogenic conditions on the milling performance of aramid fiber[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 83(1-4): 429-439.
- [9] LEQUIEN P, POULACHON G, OUTEIRO J C. Thermomechanical analysis induced by interrupted cutting of Ti6Al4V under several cooling strategies[J]. CIRP Annals, 2018, 67(1): 91-94.
- [10] SU Yu, HE Ning, LI Liang. Investigation into the effect of cryogenic minimum quantity lubrication in high-speed milling of titanium alloys[J]. Advanced Science Letters, 2011, 4(6-7): 2289-2294.
- [11] SADIK M I, ISAKSON S, MALAKIZADI A, et al. Influence of coolant flow rate on tool life and wear development in cryogenic and wet milling of Ti-6Al-4V[J]. Procedia CIRP, 2016, 46: 91-94.
- [12] AYED Y, GERMAIN G, MELSIO A P, et al. Impact of supply conditions of liquid nitrogen on tool wear and surface integrity when machining the Ti-6Al-4V titanium alloy[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 93(1-4): 1199-1206.
- [13] LEQUIEN P, POULACHON G, OUTEIRO J C, et al. Hybrid experimental/modelling methodology for identifying the convective heat transfer coefficient in cryogenic assisted machining[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 128: 500-507.
- [14] PUSAVEC F, LU Tao, COURBON C, et al. Analysis of the influence of nitrogen phase and surface heat transfer coefficient on cryogenic machining performance[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 233: 19-28.
- [15] 袁凯, 丛茜, 王永青, 等. 基于 AMESim 的液氮可控传输性能分析[J]. 低温工程, 2017(3): 49-54.
- YUAN Kai, CONG Qian, WANG Yongqing, et al. Analysis on controllable transmission performance of liquid nitrogen based on AMESim[J]. Cryogenics, 2017(3): 49-54.
- [16] LU Tao, KUDARAVALLI R, GEORGIOU G. Cryogenic machining through the spindle and tool for improved machining process performance and sustainability: Part I, System design[J]. Procedia Manufacturing, 2018, 21: 266-272.
- [17] KINARD D A. F-35 Production—advanced manufacturing and the digital thread[C]//2018 Aviation Technology, Integration, and Operations Conference, American Institute of Aeronautics and Astronautics, June 25-29, 2018, Atlanta, Georgia. AIAA, 2018: 3369-3388.
- [18] 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.
- [19] 王永青, 王凤彪, 张金豹, 等. 一种液氮内喷式刀柄装置: 中国, 104015079A[P]. 2014-09-03.
- WANG Yongqing, WANG Fengbiao, ZHANG Jingbao, et al. One tool handle device of liquid nitrogen injecting: China, 104015079A[P]. 2014-09-03.
- [20] PARK K H, YANG G D, SUHAIMI M A, et al. The effect of cryogenic cooling and minimum quantity lubrication on end milling of titanium alloy Ti-6Al-4V[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2015, 29(12): 5121-5126.
- [21] 郭飞, 贾晓红, 黄乐, 等. 旋转轴唇形密封混合润滑理论模型和试验验证[J]. 机械工程学报, 2014, 50(3): 137-144.
- GUO Fei, JIA Xiaohong, HUANG Le, et al. A mixed lubrication theoretical model and experimental verification of rotary lip seals[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(3): 137-144.
- [22] CHEN Fei, OU Hengan, LU Bin, et al. A constitutive model of polyether-ether-ketone (PEEK)[J]. Journal of the mechanical behavior of biomedical materials, 2016, 53:

- 427-433.
- [23] 齐守良, 张鹏, 王如竹, 等. 微通道中液氮的流动沸腾——换热特性分析[J]. 机械工程学报, 2007, 43(10): 20-26.
- QI Shouliang, ZHANG Peng, WANG Ruzhu, et al. Flow boiling of liquid nitrogen in micro-tube: two-phase heat transfer analysis[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(10): 20-26.
- [24] 齐守良, 张鹏, 王如竹, 等. 微通道中液氮的流动沸腾——两相流动压降分析[J]. 机械工程学报, 2007, 43(5): 36-43.

QI Shouliang, ZHANG Peng, WANG Ruzhu, et al. Flow boiling of liquid nitrogen in micro-tube : two-phase flow pressure drop[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(5): 36-43.

作者简介: 王永青, 男, 1969 年出生, 教授, 博士研究生导师, 长江学者特聘教授。主要研究方向为超低温冷却加工、测量-加工一体化、装备在机测量理论与技术等。

E-mail: yqwang@dlut.edu.cn

刘阔(通信作者), 男, 1983 年出生, 博士, 副教授, 硕士生导师。主要研究方向为数控装备智能化。

E-mail: liukuo@dlut.edu.cn