

难加工材料高效切削的超临界二氧化碳 低温微量润滑技术

周莉¹, 姚文铃¹, 陈裕君¹, 姜黎明², 王成勇³

¹广东技术师范大学; ²杭州华黎泵业有限公司; ³广东工业大学

摘要: 超临界二氧化碳低温微量润滑技术是一项新型绿色高效加工技术,在难加工材料切削加工中具有显著的优越性。本文从技术原理与性能优势对比角度对该技术进行了深入剖析和介绍,并从冷却润滑性能、刀具磨损机理以及切削性能方面对其研究进展进行了详细阐述。

关键词: 难加工材料;绿色高效加工;超临界二氧化碳;低温微量润滑

中图分类号: TG506.1;TH161

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.1000-7008.2019.04.001

Supercritical-CO₂ Minimum Quantity Lubrication Technology for Hard-to-cut Materials

Zhou Li, Yao Wenling, Chen Yujun, Jiang Liming, Wang Chengyong

Abstract: Supercritical-CO₂ minimum quantity lubrication is a new and green high-efficient manufacturing technology. It has a major superiority in hard-to-cut material manufacturing process. In this paper, its technical principle and performance advantages are analyzed in depth, and the research advances on cooling and lubrication capacity, tool wear and cutting performance are concluded and elaborated.

Keywords: hard-to-cut material; green high-efficient manufacturing; supercritical-CO₂; cryogenic minimum quantity lubrication technology

1 引言

高温合金、钛合金、高强度钢等难加工材料拥有高温强度、高温硬度、抗腐蚀、抗氧化、耐热性好等诸多优异性能,在航天航空、船舶、化工、核能等领域得到了广泛应用。但难加工材料切削加工时,存在刀具耐用度低、切削力大、切屑不易处理等难题。低温微量润滑技术是近年发展起来的将低温冷却与微量润滑技术相结合、旨在替代传统浇注式切削的绿色高效加工技术,通过低温冷却介质的强效冷却以及润滑油的减摩润滑特性来解决微量润滑技术应用于难加工材料高效切削加工时因切削区温度过高而导致的润滑油膜破裂、润滑失效等冷却性能不足的现象,现已成为国内外切削领域专家学者们的研究热点^[1,2]。

超临界二氧化碳低温微量润滑技术 (supercritical-CO₂ Minimum Quantity Lubrication, 简称 scCO₂ MQL) 是将超临界二氧化碳 scCO₂ 应用于切削领域的一项新型低温微量润滑技术,具有优异的冷却润滑性能,在难加工材料的切削加工中具有显著的优

越性。本文基于 scCO₂ 的超临界流体特性对 scCO₂ MQL 低温微量润滑技术原理进行了介绍,对比剖析了 scCO₂ 相比于其它常用低温微量润滑介质的性能优势,并从冷却润滑性能、刀具磨损机理以及切削性能方面对 scCO₂ MQL 低温微量润滑技术的研究进展进行了详细阐述。

2 scCO₂ MQL 低温微量润滑技术原理

超临界二氧化碳 scCO₂ 是指温度和压力均高于临界值 (临界温度 $T_c = 31.26^\circ\text{C}$ 、临界压力 $P_c = 7.38\text{MPa}$) 的二氧化碳流体^[3]。如图 1 所示,对常温常压下的 CO₂ 气体进行冷却、加压及升温等步骤即可得到 scCO₂, 因此,在室温下即可实现 scCO₂ 的制备操作,对设备要求不高,节省能耗。在超临界状态下,scCO₂ 兼有气液两相的双重特点,既具有与气体相当的高扩散系数和低粘度,又具有与液体相近的密度和良好的溶解能力,表面张力接近零。scCO₂ 是目前工业界应用最广泛的超临界流体溶剂,常用的工业润滑油 (如植物油脂、矿物油等) 都可以良好地溶解于 scCO₂^[4]。同时,scCO₂ 具有显著的焦耳-汤姆逊效应 (Joule-Thomson effect),在等焓的环境下自由膨胀可导致温度降低。

基金项目: 广东省自然科学基金 (2015A0303670); 广东省科技计划项目 (2017B090913006, 2016A010102019); 广州市科技计划项目 (201607010229)

收稿日期: 2018年7月

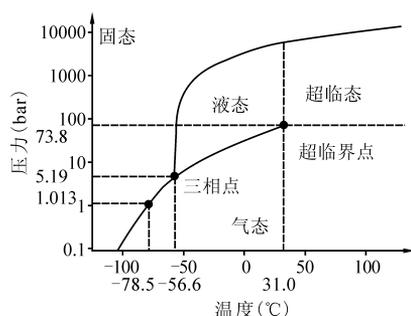


图1 二氧化碳的压力—温度相图

scCO₂ MQL 低温微量润滑技术的原理是利用 scCO₂ 的超临界流体溶剂特性,将 scCO₂ 用作润滑油的运输载体,溶解了润滑油的高压 scCO₂ (即 scCO₂-oil 流体)从喷嘴喷出进入大气后,scCO₂-oil 流体发生快速减压膨胀,使溶解在 scCO₂ 中的润滑油因过饱和而快速析出,形成微细均匀的油雾粒子^[5],并与低温的气态 CO₂ 和干冰颗粒形成低温气、液、固三相流并高速喷射到切削区,在切削区形成一层均匀的低温润滑油膜^[6],从而实现强效低温冷却、良好微量润滑和排空切屑的三重协同效应^[7]。

3 超临界二氧化碳 scCO₂ 与其它常用低温微量润滑介质的性能对比

低温微量润滑切削技术采用低温冷却与微量润滑相结合的方式来解决常规微量润滑技术冷却能力不足的问题,低温冷却介质的选择决定了冷却润滑性能的优劣。目前常用于微量润滑的低温冷却介质有液氮 LN₂^[8]、液态 CO₂、低温冷风、超临界二氧化碳 scCO₂ 等。

3.1 液氮 LN₂

液氮 LN₂ 冷却技术是目前国内外学者们研究较多的一种低温冷却技术,该技术采用在一定压力下将 LN₂ (常压下的液氮温度为 -196℃) 送达切削点,使工件、刀具或切削区处于低温冷却状态来实现切削加工冷却。LN₂ 的极端低温可以提高切削区域和刀具之间的热梯度,加快热量排出,并大幅降低热应力^[9]。采用 LN₂ 冷却复合微量润滑切削技术时,润滑油需要通过单独的雾化装置来供给, LN₂ 也需要配置循环冷却系统和隔热保温输送管道,所以系统结构非常复杂。LN₂ 冷却温度过低 (冷却温度可低至 -196℃),易引发被加工材料的低温脆性、冷作硬化以及刀具材料的热疲劳失效,导致切削力增大,刀具热疲劳失效^[10]。LN₂ 的存储和传输成本相对较高,因此,液氮 LN₂ 冷却复合微量润滑技术具有一定的局限性,在难加工材料切削加工中难以得

到推广应用。

3.2 液态 CO₂

液态 CO₂ 冷却技术是将高压液态 CO₂ 通过喷嘴高速喷射到切削区,液态 CO₂ 发生快速绝热膨胀并大量吸热,一部分气化为低温 CO₂ 气体,另一部分快速冷却形成微米级干冰颗粒射流,对切削区实现低温冷却^[11]。与液氮冷却相比,液态 CO₂ 冷却温度稍高,被加工材料表面的冷作硬化程度相对较轻,同时液态 CO₂ 介质自身也具有一定的润滑性能,因此与液氮冷却相比,切削力较低,刀具磨损较小,表面加工质量较好^[9]。由于液态 CO₂ 的成本低于液氮,所以液态 CO₂ 在生产实际中具有广泛的实用性。但是,液态 CO₂ 与微量润滑油无法在 MQL 系统内部均匀混合,因而需要两套独立的系统分别提供液态 CO₂ 和润滑油雾来实现液态 CO₂ 冷却复合微量润滑技术,因此也存在系统结构复杂的问题。

3.3 低温冷风

低温冷风微量润滑技术是将低温压缩气体 (-10℃ ~ -30℃ 的空气^[12]、氮气^[13] 等)与微量润滑油混合雾化喷射至切削区来降低切削温度,对刀具和工件之间的加工部位进行冷却和润滑。低温冷风微量润滑切削与传统切削相比,能够有效降低切削温度,降低切削力和刀具磨损,提高刀具寿命,提高表面加工质量,改善加工硬化现象,而且对环境几乎无污染。但是该技术的冷却能力有限,难以满足难加工材料高效切削冷却的需求。

3.4 超临界二氧化碳 scCO₂

溶解微量润滑油的 scCO₂ 形成高压 scCO₂-oil 流体,经喷嘴喷出后将发生快速减压膨胀,使润滑油因过饱和而快速析出形成微米级油雾粒子,从而实现润滑油的良好雾化。scCO₂ 可通过改变压力和温度来调节润滑油在其中的溶解度,进而对 scCO₂-oil 流体经喷射后形成的雾滴粒径进行调控^[5]。同时,scCO₂-oil 流体在焦耳—汤姆逊效应的作用下,形成的气态 CO₂/润滑油雾粒子/干冰颗粒三相射流,温度可低至 -78.5℃ (干冰的升华温度),导致喷嘴、周围环境以及切削区温度大幅降低,实现强效低温冷却。此外,三相射流中的干冰颗粒喷射到切削区后,可快速升华为比固态体积大 600 - 800 倍的气态 CO₂,气体膨胀力不仅可以有效清除切削区的切屑,还有助于油雾粒子更好地渗透进切削区,实现优异的润滑效果^[7]。

因此,采用 scCO₂ MQL 低温微量润滑技术无需额外配置润滑油雾化装置,通过一套供液系统即可同时实现强效的低温冷却和微量润滑功能,而且该

系统还能够不加润滑油,以单纯喷射 CO₂ 的形式使用,呈现了比其它冷却介质复合微量润滑切削技术更加优异的冷却润滑性能。

4 scCO₂ MQL 低温微量润滑技术的研究进展

目前,国内外对于 scCO₂ MQL 低温微量润滑技术的研究主要涉及冷却润滑性能、刀具磨损机理以及切削加工性能等方面,文献报道较少。

在冷却与润滑性能方面,Supekar S. D. 等^[14]对 scCO₂-oil 流体作为切削液与其它切削液进行了刀具磨损和切削扭矩对比,研究发现:与常规的水基切削液和基于气体的切削液喷射加工相比,scCO₂-oil 流体能够更加有效地从刀-工界面去除切削热,增大 scCO₂-oil 流体压力,可提高散热效率,降低刀具磨损;与常规 MQL 技术相比,scCO₂ MQL 可降低攻丝扭矩,提高攻丝扭矩效率约 17%,说明 scCO₂ MQL 具有更加优异的润滑性能。

在刀具磨损方面,Stephenson D. A. 等^[7]采用 scCO₂ MQL 低温微量润滑技术与水基切削液浇注式切削方式进行了 Inconel 750 粗车加工刀具磨损对比研究,结果表明:scCO₂ MQL 具有良好的润滑性能,在相同切削条件下,采用 scCO₂ MQL 比浇注式切削的刀具磨损小;在相同刀具寿命条件下,采用 scCO₂ MQL 比浇注式切削的金属去除率 25% - 40%,刀具的主要磨损形态由浇注式切削时的快速边界磨损转变为缓慢的月牙洼磨损;采用 scCO₂ MQL 切削时的刀具寿命延长了 10min,证明了 scCO₂ MQL 可对常规 MQL 技术无法加工的难加工金属/合金材料进行加工。

在切削加工性能方面,Rahim E. A. 等^[15]对 scCO₂ MQL 低温微量润滑技术作为一种可持续冷却技术的切削加工性能进行了研究,结果表明:与常规微量润滑 MQL 技术相比,scCO₂ MQL 低温微量润滑技术可降低切削温度 15% - 30%,减小切削力 5% - 14%,同时减小切屑厚度、刀-工接触长度和比切削能,降低加工成本,更加环保。Supekar S. D. 等^[16]探索了采用 scCO₂-oil 流体作为切削液来提高金属材料的微切削可加工性,研究发现:与干切削相比,scCO₂-oil 流体可减少毛刺形成,304 不锈钢的表面粗糙度降低约 69%,101 铜的表面粗糙度降低约 40%;刀具磨损量减小约 20%;不锈钢加工的比切削能降低约 87%,铜加工的比切削能降低约 40%,显著提高了不锈钢和铜的微切削可加工性。

5 结语

目前 scCO₂ MQL 低温微量润滑技术还不成熟,尚未在机械加工领域进行推广应用,在相关的低温微量润滑切削机理、智能低温微量润滑装置、机床集成技术及其配套工具系统等方面还需要开展进一步的深入研究。该技术的研究与发展,将突破微量润滑技术在难加工材料高效切削应用中的冷却润滑关键技术瓶颈,对于提升我国难加工材料洁净切削加工理论与技术水平、实现节能减排与绿色环保的绿色制造目标具有重要意义。

参考文献

- [1]何宁,李亮,赵威,等. 难加工材料高性能加工的冷却润滑技术[J]. 航空制造技术,2007(7):46-48.
- [2]袁松梅,刘思,严鲁涛. 低温微量润滑技术在几种典型难加工材料加工中的应用[J]. 航空制造技术,2011(14):45-47.
- [3]Lewis J,Argyropoulos J N,Nielson K A. Supercritical carbon dioxide spray systems[J]. Metal Finishing,2000,98(6):254-262.
- [4]Hyatt J A. Liquid and supercritical carbon dioxide as organic solvents[J]. Journal of Organic Chemistry,1984,49(26):5097-5101.
- [5]Yeo S D,Kiran E. Formation of polymer particles with supercritical fluids; a review[J]. Journal of Supercritical Fluids,2005,34(3):287-308.
- [6]Diefenbacher A,Turk M. Phase equilibria of organic solid solutes and supercritical fluids with respect to the RESS process[J]. Journal of Supercritical Fluids,2002(22):175-184.
- [7]Stephenson D A,Skeros S J,King A S,et al. Rough turning inconel 750 with supercritical CO₂-based minimum quantity lubrication[J]. Journal of Materials Processing Technology,2014,214(3):673-680.
- [8]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.
- [9]Priarone P C,Klocke F,Faga M G,et al. Tool life and surface integrity when turning titanium aluminides with PCD tools under conventional wet cutting and cryogenic cooling[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2016,85:807-816.
- [10]Jerold B D,Kumar M P. The influence of cryogenic coolants in machining of Ti-6Al-4V[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering-Transactions of the ASME,2013,135(3):922-926.

ZL109 硅铝合金车削加工表面质量研究

孙虎, 李安海, 周咏辉, 侯冠明

山东大学机械工程学院; 山东大学高效洁净机械制造教育部重点实验室;

机械工程国家级实验教学示范中心(山东大学)

摘要: 采用硬质合金和聚晶金刚石刀具, 借助单因素试验对柴油机活塞材料 ZL109 硅铝合金车削加工过程进行研究, 以期获得最佳的切削参数和提高加工表面质量。试验以粗—精加工工艺代替粗—半精—精加工工艺, 研究粗—精加工工艺下的加工质量。研究表明, ZL109 硅铝合金切削加工的最佳切削参数组合为切削速度 $v = 300\text{m}/\text{min}$, 切削深度 $a_p = 0.2\text{mm}$, 进给量 $f = 0.05\text{mm}/\text{r}$ 。合理选择切削参数可简化加工工艺, 提高生产效率和降低生产成本。

关键词: 硅铝合金; 切削参数; 表面质量; 工艺优化

中图分类号: TG506; TH161.14

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1000-7008.2019.04.002

Study of Surface Quality in Turning of Aluminum-Silicon Alloy ZL109

Sun Hu, Li Anhai, Zhou Yonghui, Hou Guanming

Abstract: The cemented carbide tool and polycrystalline diamond tools are used to study the turning process of diesel alloy piston material ZL109 by single-factor experiments, which aims to obtain the best cutting parameters and improve the surface quality. The experiments investigate the roughing-finishing process instead of the roughing-semi-finishing-finishing process, and evaluated the machining quality under the process. The results indicate that the best cutting parameters of cutting aluminum-silicon alloy ZL109 are cutting speed $v = 300\text{m}/\text{min}$, cutting depth $a_p = 0.2\text{mm}$, feed rate $f = 0.05\text{mm}/\text{r}$. Choosing the favorable cutting parameters can simplify the machining processes, increase production efficiency and reduce production cost.

Keywords: aluminum-silicon alloy; cutting parameter; surface quality; process optimization

1 引言

活塞是柴油机的“心脏”, 在运动过程中承受着交变的热—机械负荷, 其加工质量的好坏直接决定发

动机工作的可靠性, 对整个柴油机系统的可靠性、使用寿命、振动及稳定性等都有很大影响^[1]。活塞加工的基本流程为: 粗车止口→粗车外圆、顶面→精车止口→粗镗销孔→精车环槽→半精车外圆→精镗销孔→车挡圈槽→车内角→粗精车燃烧室→精车外圆^[2]。其中, 精车外圆、精镗销孔及精车环槽是控制活塞加工质量的三道主要工序。

活塞—缸套是柴油机系统最重要的摩擦副之

基金项目: 国家自然科学基金(51605260); 山东省重点研发计划(2017GGX30144, 2018GGX103043); 山东大学青年学者未来计划

收稿日期: 2018年8月

- [11] Cordes S, Hübner F, Schaarschmidt T. Next generation high performance cutting by use of carbon dioxide as cryogenics [J]. *Procedia CIRP*, 2014(14): 401-405.
- [12] 袁松梅, 刘伟东, 严鲁涛. 低温微量润滑技术铣削高强度钢的试验研究[J]. *航空制造技术*, 2011(5): 43-45.
- [13] 苏宇, 何宁, 李亮, 等. 低温氮气射流对钛合金高速铣削加工性能的影响[J]. *中国机械工程*, 2006(11): 1183-1187.
- [14] Supekar S D, Clarens A F, Stephenson D A, et al. Performance of supercritical carbon dioxide sprays as coolants and lubricants in representative metalworking operations [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2012, 212(12): 2652-2658.
- [15] Rahim E A, Rahim A A, Ibrahim M R, et al. Experimental investigation of supercritical carbon dioxide (scCO_2) performance as a sustainable cooling technique [J]. *Procedia CIRP*, 2016(40): 637-641.
- [16] Supekar S D, Gozen B A, Bediz B, et al. Feasibility of supercritical carbon dioxide based metalworking fluids in micromilling [J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2013, 135: 024501-1-024501-6.

第一作者: 周莉, 博士, 教授, 广东技术师范大学机电学院, 510635 广州市

First Author: Zhou Li, Doctor, Professor, College of Mechanical and Electrical Engineering, Guangdong Polytechnic Normal University, Guangzhou 510635, China