

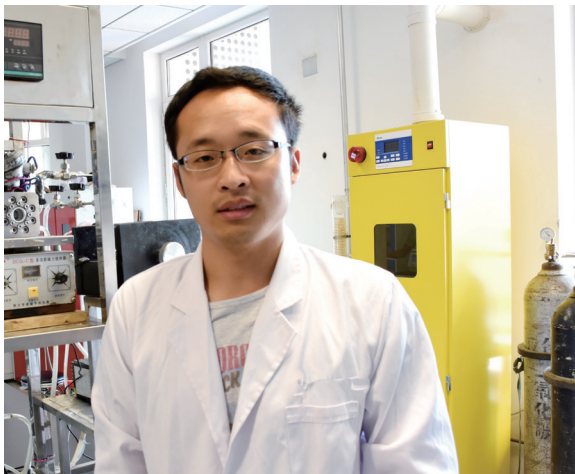
难加工材料绿色切削技术与CO₂增效工艺

梁向东，胡孟谦，解景浦，万晓航

河北工业职业技术大学 河北石家庄 050091

摘要：阐述几类绿色切削技术的基本原理及其在难加工材料加工中的应用，介绍二氧化碳微量润滑增效工艺，为发展绿色切削新工艺、提升微量润滑效能和改善难加工材料加工质量提供理论支撑和科学指导。

关键词：难加工材料；绿色切削；二氧化碳；微量润滑



工程师、讲师 梁向东

1 序言

高强度、高温合金及钛合金等难加工材料通常具有高强度、抗腐蚀、抗氧化性以及优良的高温性能等优势，被广泛应用于航空航天、核能和兵器等重要领域的关键装备中。然而在满足高性能使用要求的同时，由于材料的难加工性，会导致刀具磨损严重、寿命降低、切削区温度较高、工件表面加工质量下降以及产生较大的加工残余应力等一系列问题。对于高端精密装备与结构部件，表面加工质量和残余应力更是直接关系到后期的使用寿命及可靠性。

传统加工通过浇注切削液对刀具和工件表面进行冷却、润滑和清洗，用来减小切削力和刀具磨损并改善表面质量。但是切削液含有矿物油和各类化学添加剂，大量使用会导致环境污染，危害操作

人员身体健康，同时造成资源浪费且提高了生产成本。许多国家已制定相关环保标准，明确了切削液限值，我国也陆续出台了一系列环保和职业保护标准来限制切削液用量。随着先进制造技术的发展和环境、安全及健康保护意识的加强，绿色制造成为制造业未来发展的必然趋势。近些年发展起来的干式切削、低温切削、微量润滑（Minimal Quantity Lubrication, MQL）切削以及低温微量润滑切削等绿色高效加工技术，有望替代传统的浇注式加工方式。

2 绿色切削技术

2.1 不含切削液的切削

干式切削不使用切削液，因此机床结构简单，环保、成本低。通过提高切削速度可以改善表面粗糙度，并且对残余应力和加工硬化程度有一定的改善。但是由于缺少冷却和润滑，切削温度较高，切削力较大，排屑不畅，不易保证表面加工质量，并且存在较大的残余应力。

低温切削技术是在加工过程中加入冷源以降低加工区温度，局部的深冷可使工件材料冷脆，促进切屑的分离，进而达到改善加工质量，减少刀具扩散磨损的目的。低温加工现场如图1所示。

试验表明：①使用液氮冷却切削可显著降低高温合金和钛合金的切削温度，改善切削变形区的应力分布。②使用低温压缩空气作为冷源能显著提高刀具寿命，并且随着切削速度的提高，刀具寿命显著提高。使用高压低温空气射流，通过强化冷却



图1 低温加工现场

和减小刀屑接触长度，可降低切削温度，抑制干切削时切削刃的塑性变形。③使用低温 CO_2 作为冷却润滑剂在不锈钢切削、铣削加工中也有较大应用潜力。液态 CO_2 在喷射到加工区时产生 CO_2 气体和微米级干冰颗粒，除实现低温冷却外， CO_2 本身也具有一定的润滑性能，相比液氮冷却可降低切削力，减少刀具磨损，此外还具有一定的经济效益和环境优势。

低温切削可以有效降低切削温度，但是由于缺少润滑条件，因此在加工性能提升方面具有一定的局限性。

2.2 微量润滑切削

微量润滑（MQL）技术是将少量的切削液与压缩气体混合后，通过喷嘴雾化成微米级液滴油雾，喷射到加工区，实现刀具和加工面的润滑。近些年来，国内外学者在MQL技术的润滑机理、刀具磨损及寿命、MQL工艺参数优化以及各类难加工材料加工性能等方面进行了大量研究。大多数试验研究表明，MQL技术具有切削液用量少、减少刀具-切削面摩擦、降低切削力和延缓刀具磨损等优势。然而在一些工况下，MQL技术存在冷却性能不佳、切削温度较高甚至润滑油膜破裂和润滑失效等问题。

如果能将低温切削和MQL技术的优势相结合，既保证足够的冷却性能，又能有效利用润滑剂的润滑特性，那么将大幅改善难加工材料的加工状态。低温微量润滑技术就是这两种绿色加工技术的结合。低温冷源的介入，一方面用于降低切削温度；另一方面用于防止润滑剂因高温失效。常用的冷源有低温冷风、低温液氮、液态/超临界 CO_2 。

国内在低温冷风微量润滑技术方面的研究较多，与传统切削相比，该技术能有效降低切削温度，减少刀具磨损，改善加工硬化现象。但是该技术冷却能力有限，有时难以满足难加工材料高效切削的要求；液氮低温微量润滑技术在冷却方面效果最佳，但过低的温度容易引起材料的低温脆性和硬化，导致加工表面恶化、润滑剂失效，并且在减小刀具磨损方面与传统浇注式切削相比存在一定的差距。此外，液氮冷却工艺需要集成较为复杂的液氮射流系统和工艺装备，液氮储存和运输成本也相对较高，国内相关的研究一直未能深入。

3 超临界二氧化碳微量润滑技术

超临界二氧化碳（Supercritical Carbon Dioxide, scCO_2 ）是目前公认的环境友好的“绿色溶剂”，其临界条件温和（临界温度 $T_c=31.1^\circ\text{C}$ ，临界压力 $p_c=7.4\text{MPa}$ ），不仅无毒、廉价、不易燃、无污染、容易回收循环利用，还具有超临界流体的特性，如密度和溶剂化能力与液体相似，而黏度、扩散系数接近气体，并且性质可通过温度和压力调节。 scCO_2 既能作为溶剂溶解润滑油，又可作为冷却介质形成 CO_2 /干冰颗粒/润滑油微液滴的三相射流，输送到切割、成形区域的深处，实现冷却润滑增效。另外，超临界二氧化碳微量润滑（ scCO_2 -MQL）技术不需要设置单独的润滑油雾化装置，结构简单，还可以单纯的 CO_2 /干冰形式进行低温切削。 scCO_2 -MQL技术的工艺流程如图2所示。

与浇注式切削相比，采用 scCO_2 -MQL切削的刀具磨损量小，在同样的刀具寿命条件下，使用 scCO_2 -MQL切削能提高金属去除率，并且刀具的磨损由快速沟槽磨损转变为缓慢的月牙洼磨损；与干式加工相比，使用 scCO_2 -MQL加工可减少材料毛刺的形成；与MQL加工技术相比， scCO_2 作为切削液载体，降低了切削温度、切削力、切屑厚度、刀-屑接触长度和比能量，具有更高的加工效率。另外， scCO_2 -MQL还可以加工传统MQL方法难以加工的硬质合金，是MQL技术的重要拓展；将 scCO_2 和油膜附水滴（Oils on Water, OoW）技术结合，可以利用快速膨胀的 scCO_2 喷雾，将干冰和OoW液滴的混合物输送到切削区，对加工过程进行冷却和润滑。与单纯 scCO_2 、单纯OoW冷却润滑相比， scCO_2 -

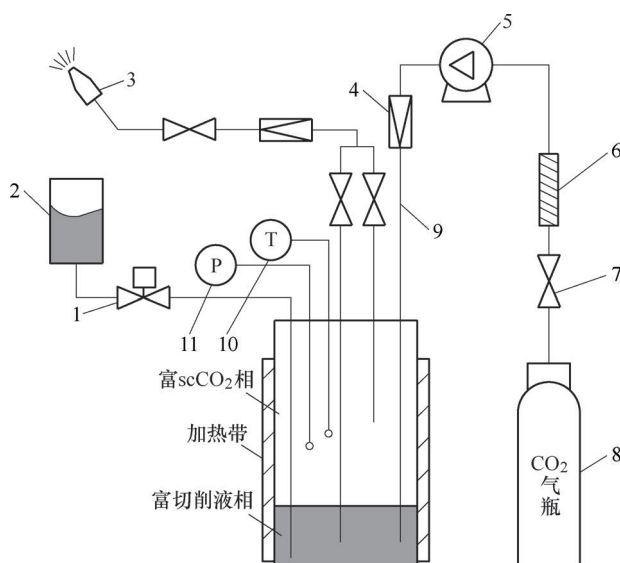


图2 scCO₂-MQL技术的工艺流程

1—计量泵 2—切削液储罐 3—喷嘴 4—单向阀 5—柱塞泵
6—冷却器 7—调节阀 8—CO₂气瓶 9—管路
10—温度传感器 11—压力传感器

OoW方法降低了切削力，保持了更平稳的切削过程，加工表面质量显著提高。因此，scCO₂-MQL在减少刀具磨损、提高加工效率和改善金属微加工性能方面有着广泛的应用前景。

4 结束语

将低温冷源与微量润滑技术结合可实现加工区的冷却润滑增效，能显著改善难加工材料加工性能。该技术由于减少了切削液用量且显著提升了切削性能，是一类新兴的绿色切削技术，所以近年来受到学术与工业界的普遍关注。一些学者将scCO₂作为冷源应用于低温微量润滑切削中，展示出了其优越的润滑冷却效果，使微量润滑技术在高材料去除率下的加工成为可能，同时也是“绿色溶剂”与“绿色制造”“可持续加工”深度融合的重要创新，能在改善难加工材料加工性能、提升制造质量和提高生产效率的同时，实现环境污染最小化。此外，scCO₂无毒、廉价，还具有超临界流体低黏度、溶剂能力强以及性质可调的特性，具有较大的开发潜力。scCO₂与MQL技术的融合具有学科交叉属性，化工、热力学和机械学科交叉渗透部分较多，已有的研究主要集中在机械加工方面，以及与其他冷却润滑方式之间的比较，scCO₂对切削液的溶解特性、热力学行为以及工艺调控方面的基础研究并未

得到较大关注，还有待深入探讨。

参考文献：

- [1] Richter A. Cryogenic machining systems can extend tool life and reduce cycle times[J]. Cutting Tool Engineering, 2015, 67 (2) : 50-57.
- [2] 袁松梅, 朱光远, 王莉. 绿色切削微量润滑技术润滑剂特性研究进展[J]. 机械工程学报, 2017, 53 (17) : 131-140.
- [3] Stephenson D A, Skerlos 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.
- [4] 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.

MW 20210528

专家点评



文章综述了几类绿色切削技术的基本原理以及在难加工材料中的应用，并介绍了二氧化碳微量润滑增效工艺，为发展绿色切削新工艺提供了理论指导和方向。

文章的前瞻性和学术性较强，将低温冷源与微量润滑技术结合，改善难加工材料加工性能，是一类新兴的绿色切削技术，在创新中实现了“绿色制造”与“可持续加工”的深度融合。