

# 绿色切削技术的研究进展与发展趋势

## Research and Development of Green Cutting Technology

哈尔滨理工大学机械动力工程学院 刘献礼 岳彩旭



刘献礼

哈尔滨理工大学机械动力工程学院教授、博士生导师,机械工业切削控制及高效刀具技术重点实验室主任,中国刀协先进技术研究会副理事长,黑龙江省刀具技术协会常务理事。主要从事高效金属切削加工技术与刀具开发、清洁切削技术、切削数据库技术、图像技术及制造过程检测技术研究。曾获国家科技进步奖、国家发明奖和省、部级科技进步奖8项。

### 采用绿色切削技术的必要性

制造业是国民经济和社会发展的物质基础,是创造社会财富的支柱产业。制造业的发展水平是一个国

绿色切削技术是绿色制造的一个重要组成部分,该技术是指对生态大环境和加工现场小环境均无毒副作用(或副作用很小),在加工过程中产生少量的废气、废液和废渣,以达到无公害的环保要求,是对人类的健康和环境没有危害的加工技术。面对人类社会可持续发展的需要,实施绿色制造已经势在必行。

家综合国力的重要体现。但是在自然资源开采过程和工业产品的制造过程中,制造业所产生的废气、废渣、废液也造成了环境的严重污染,导致了以资源枯竭和环境恶化为特征的生态危机。诸如在传统的切削加工过程中通常要使用大量的切削液,尽管切削液在冷却、润滑和辅助排屑中起着重要的作用,但它对资源消耗、环境和人体健康产生了一系列负作用,并且与切削液相关的费用约占加工成本的17%。采用干式切削技术具有重要的意义,因此,在材料的加工过程中很有必要发展绿色制造技术。

绿色切削技术是绿色制造的一

个重要组成部分,该技术是指对生态大环境和加工现场小环境均无毒副作用(或副作用很小),在加工过程中产生少量的废气、废液和废渣,以达到无公害的环保要求,是对人类的健康和环境没有危害的加工技术<sup>[1]</sup>。面对人类社会可持续发展的需要,实施绿色制造已经势在必行。

### 绿色切削技术的研究现状

近年来绿色制造技术已成为国际上的研究热点,并且各国都投入大量的人力、物力和财力来发展此工艺。按照切削工艺构成分类,可以将绿色切削技术分为干式切削技术、微量润滑切削技术、低温冷风切削技术

和气体射流切削技术<sup>[2]</sup>。针对绿色切削技术,有以下典型学者和机构开展了深入研究。

1994年美国Ecunio公司独家资助,由阿亨工业大学的WZL·戴姆拉·彭兹、蒲吉沃等组成联合课题组,开展硬态切削研究,计划4年完成。1996年“有利于环保的加工方法”作为德国政府的国家级项目,正式制定了1个3年研究计划来实施硬态切削技术的研究<sup>[3]</sup>。近年来,美国阿拉巴马大学的Y.B.Guo教授和乔治亚理工学院的L.Y.Steven教授课题组分别在干式切削技术的原理、应用和工艺的优化方面做了细致且系统的研究,在很大程度上促进了硬态干式切削技术的推广。

美国Cicinati大学和TechSolveInc公司的联合研究表明,在Tongil TNV280CNC立式加工中心上分别切削时,在较低的切削速度和金属切除率下微量润滑切削技术造成的空气中油雾微粒生成率,在钻削时是传统注浇法的340~3300倍,在铣削时是其100~140倍<sup>[4]</sup>。

美国怀特州立大学的S.Y.Hong博士对液氮冷却车削加工的研究表明,硬质合金刀具材料在液氮冷却切削条件下能够保持良好的切削性能<sup>[5]</sup>。美国林肯大学的Z.Y.Wang所做的车削氮化硅陶瓷的试验表明,在液氮冷却条件下刀具寿命可延长约4倍,工件表面粗糙度值可降低到原来的1/6<sup>[6]</sup>。日本学者横川和彦对车削和铣削中的冷风冷却进行了研究,在铣削试验中分别采用水基切削液、常温风(10℃)和冷风(-30℃)3种条件进行比较,结果表明,采用冷风切削时刀具耐用度显著提高。在车削试验中,冷风(-20℃)切削时刀具磨损率比常温(+20℃)切削时显著下降<sup>[7]</sup>。

日本学者原贡采用高压注液法精加工Ni基高温合金,与浇注冷却相比,切削速度可提高2~25倍,刀

具使用寿命延长5倍<sup>[8]</sup>。美国学者Mazurkiewicz在1992年获得了采用高压水射流冷却润滑的金属加工专利,并进行了大量的试验研究。结果表明,切削力和切削温度显著降低,易于形成破碎切屑,便于切屑处理<sup>[9]</sup>。美国莱特州立大学S.Y.Hong博士和印度理工学院S.Paul分别在车削和磨削加工中采用液氮作为切削液直接喷射到切削区的工艺,进行了理论和试验研究。结果表明,在超低温状态下,刀具材料能够保持优良的切削性能,提高了加工效率和加工质量,并可显著降低磨削区温度,减少磨削烧伤<sup>[10]</sup>。

针对绿色切削技术,国内也有不少学者展开了深入研究。除笔者外,如哈尔滨工业大学的韩荣第教授、重庆成田公司的张昌义教授和广东工业大学的王成勇教授等的研究成果在很大程度上推动了我国绿色切削技术的应用。

## 绿色切削技术的分类

### 1 干式切削技术

全干式切削法即完全不采用切削液的加工技术。此加工方法中主轴在非常高的转速下运转,用高强度刀具在较小的吃刀量条件下进行高速切削。在此加工工艺中90%以上的切削热被切屑带走,通过机床高速运转、切削条件的改变来实现无切削

液时的零件加工。由于干式加工过程中没有切削液,为了使干式加工可以具有与有切削液时的加工效果一样,要求刀具具有更高的加工性能。在加工过程中,由于机床的加工速度很快,一般情况下材料又较硬,切削温度较高,因此机床必须具有刚性好、功率大的特点,同时工艺也对机床的排屑、防尘和热特性提出了较高要求。

由于工艺特性的限制,在加工过程中缺少切削液的润滑作用,刀具与工件的摩擦作用会加剧,且在短时间内产生大量的切削热,上述热量主要集中在切屑上面,若不能及时排放出去,会造成刀具磨损的加剧以及机床结构的变形,进而影响已加工表面质量和加工效率。同时,为了使干式切削的精度更高,适当地选择主轴转速、切深和进给量等也是非常重要的。

近年来,在干式切削技术中硬态切削工艺发展迅速,该工艺能将硬度大于HRC55的毛坯直接加工为零件,与磨削相比具有较好的工艺柔性、较高的经济性和环保性。为此,硬态切削工艺在实际生产中得到了越来越广泛的应用。硬态干式切削条件下的进给速度、切削深度和切削速度都有别于普通切削,刀具一般采用负倒棱来保护刃口。在高速切削状态下,一般的金属切削理论已不完

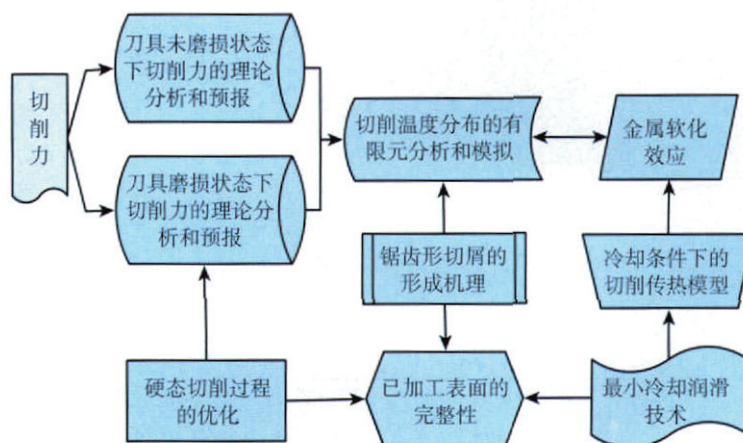


图1 硬态切削原理

全适合硬质材料的切削过程分析。因此,必须根据硬质材料和所用刀具的特点来研究其切削加工过程。硬态干式切削的研究内容及相互联系见图1。

在硬态切削机理中,最显著的3个特征为:锯齿形切屑、红月牙效应和已加工表面白层的产生。关于锯齿状切屑形成原因的分析存在两大流派:周期脆性断裂理论与热塑性失稳理论。锯齿形切屑生成过程可描述为随着刀具的切入,首先在工件材料右端面产生裂纹实现了切屑分离,形成已加工表面。随着刀具切削行程的增大、塑性变形的加剧和能量的累积,在距切削刃一段距离的切屑某一特定位置,当达到某一临界载荷时,此时能量也累积到了最大值,导致突变性的局部剪切,从而形成了一个锯齿,如此往复下去导致了锯齿形切屑的生成。

白层指硬态切削加工后在已加工表层中生成的一种高硬度细颗粒组织。白层是影响工件性能和表面完整性的重要因素,所以应着重讨论其产生原因。随着对硬态切削机理研究的深入,其形成原因可解释为:过高的切削热致使材料出现奥氏体,而迅速的表面冷却又使材料出现淬火现象,从而导致白层的出现。由于白层组织的高硬度是超细颗粒和高位错密度导致的结果,所以刀具挤压

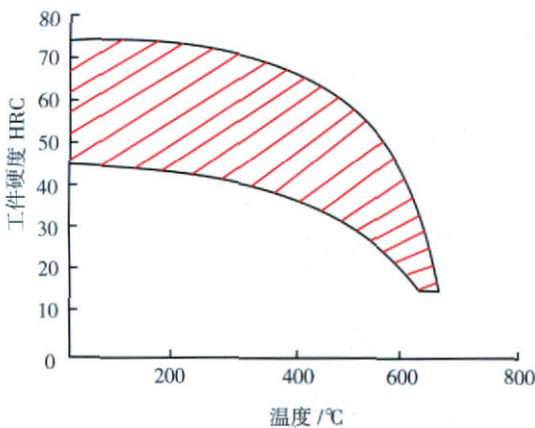


图2 硬态切削的金属软化效应

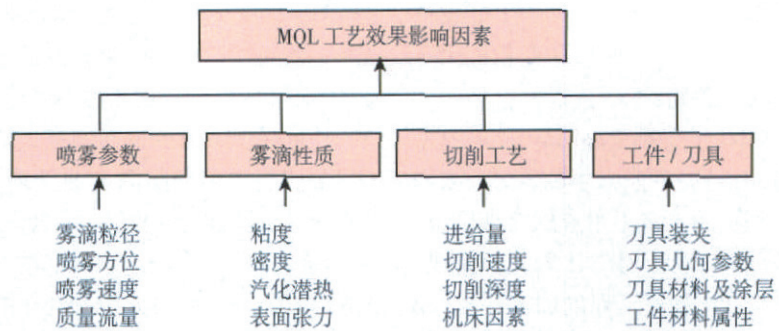


图3 微量润滑切削技术影响因素分析

作用也是产生白层的重要原因。金属软化效应是硬态切削的一个显著特点,如图2所示。硬态干式切削机理就是被切削金属层的软化作用机理。金属软化效应即工件硬度随切削温度的升高而降低,并进一步影响已加工表面的形成。可见,刀尖附近产生的大量的热量对金属软化效应起决定性作用<sup>[11]</sup>。

### 2 微量润滑切削技术

最小量润滑技术是介于干式与湿式切削之间的一种润滑技术,即切削工作状态最佳时切削液的用量最小。该方法将一定压力压缩空气与微量的润滑剂混合雾化后形成油雾,然后高速喷射到切削区,从而使刀具-切屑接触区得到冷却和润滑,大大减少刀具-切屑及刀具-加工表面间的摩擦,起到降低切削温度,减小刀具磨损,提高加工效率和加工表面质量的作用。微量润滑切削技术主要分为气雾外部润滑和内部润滑两种方式。目前微量润滑切削技术主要用于铸铁、钢和铝合金的钻削、铰削和攻丝加工。其切削效果影响因素如图3所示。

微量润滑切削技术是在保证有效润滑的前提下,尽可能减少切削液

的用量。切削过程中的润滑属于边界润滑,边界润滑的效果与润滑油量密切相关。如图4所示,当润滑油量很少时,在整个表面上形成单分子吸附层,吸附膜形状如A所示。自由能降低将依靠减少吸附膜的表面积,所以油量继续增加,油表面构成图中的B。当油量充足时,润滑油将充满粗糙峰谷,如图中的C。当油膜只能达到A或者更少时,由于油膜很薄难以流动,峰顶油膜破坏后得不到补充油量,于是产生干摩擦;当油量超过C以后,摩擦系数将不稳定。据上述分析可知,最佳油面为B处。

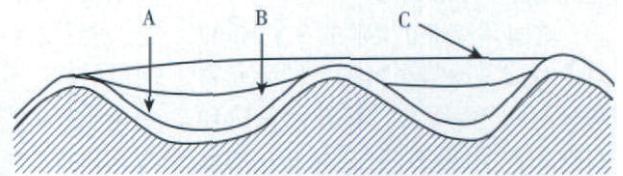


图4 微量润滑切削技术的油剂用量示意图

但这项技术目前仍存在以下两方面问题不易解决:一是最小量如何确定,二是冷却润滑油仍有污染。因此微量润滑切削技术并非干式纯绿色,故称为准绿色切削技术。在此基础上,微量润滑切削技术又发展为低温雾化润滑切削技术,即把压缩空气降至零下几十摄氏度,再与润滑油混合汽化,效果比一般压缩空气要好,但仍有少许污染。

### 3 低温切削技术

低温切削是将低温流体如液态氮、液态二氧化碳或者冷风等喷向加工系统的切削区域,造成切削区的局

部低温或超低温状态,利用工件在低温条件下产生的低温脆性,提高工件的切削加工性、刀具寿命和工件表面质量。它具有降低刀具磨损、生产效率高、提高工件表面的抗疲劳强度、减少残余应力、提高工件的切削加工性及减少工件的膨胀等优点。

#### (1)冷风切削技术。

冷风切削技术是用 $-10^{\circ}\text{C} \sim -50^{\circ}\text{C}$ 的低温气体混合微量无公害油剂(10~20mL/h)代替切削剂进行润滑、降温和排屑。低温风冷可均匀降低加工区、刀具和工件的温度,有效抑制刀具磨损,提高刀具耐用度,改善已加工表面的加工质量,常用的低温风冷介质有空气、氮气和 $\text{CO}_2$ 等。

#### (2)液氮冷却切削技术。

该技术是利用液氮使工件、刀具或切削区处于低温冷却状态而进行切削加工的方法。液氮冷却的直接应用,即将液氮作为切削液直接喷射到切削区可显著降低切削温度,提高加工精度和表面质量,进而延长刀具使用寿命。氮气是大气中含量最多的成分,液氮作为制氧工业的副产品来源十分广阔。液氮是一种未来切磨削加工中比较有效和经济的切削液替代品。液氮冷却的间接利用主要是刀具冷却法,即在加工中不断地冷却刀具,使切削热快速从刀具上,特别是刀尖处被带走,刀尖始终保持在低温状态下工作。由于研究水平的限制,液氮冷却技术存在如下问题:切屑形成过程中润滑性差的问题亟待解决;工件新生的金属表面因其具有极强的化学活性在空气中会很快生锈的问题;应加强对不同材料在低温及超低温环境下的切削加工性及刀具切削性能的研究。

#### (3)电子冷却切削技术。

电子冷冻加工使低温加工成为现实,可解决一般常用材料及某些特殊材料的加工问题,特别适宜于薄片

件及韧、粘性材料的加工。其特征是在电子冷堆上装有冷板,在冷板上涂上冷冻液,由冷堆致冷,将冷冻液结成薄冰,将工件夹紧,进行车、铣、磨机械加工。电子冷却加工具有如下特点:工件的装卸方式独特;加工温度可调;冷冻速度快;环保性好。

### 4 气体射流切削技术

气体射流切削技术是采用射流形式,将空气、氮气、水蒸汽等气体作冷却润滑剂的绿色切削技术。该技术与传统切削技术相比具有明显优势:气体射流冷却技术是一种可靠、安全、集约型工作方式;气体射流冷却从根本上改善了浇注冷却对环境的污染。但是由于研究水平的限制,该技术存在如下瓶颈:对气体射流冷却切削参数的优化设计;对气体射流冷却切削机理的分析研究;对不同工件材料的气体射流冷却切削性能的研究。

### 绿色切削技术的刀具技术

刀具技术是绿色切削技术的一项关键技术,绿色切削刀具的选择要综合考虑刀具材料、涂层材料、几何形状以及三者之间的相互兼顾及优化。不同的切削加工方式对刀具有不同的技术要求。

在干式切削工艺中,由于刀具与切屑接触部位温度过高,因此刀具的磨损机制通常以月牙洼磨损为主。因此干式切削对刀具有如下要求:耐高温;切屑和刀具之间的摩擦系数要小;刀具结构要方便排屑;应具有更高的强度和抗冲击韧性。目前采用的干切削刀具材料主要有陶瓷、超细硬质合金、聚晶金刚石和聚晶立方氮化硼等。陶瓷刀具具有很好的抗塑性变形能力,高温化学稳定性好,抗氧化磨损和抗扩散磨损能力强,但是韧性差,主要用于高速干式切削;超细硬质合金刀具具有很好的耐磨性和耐高温性,主要用于干式铣削和钻削;PCD刀具具有硬度高、

抗压强度高、导热性及耐磨性好等特性,比较适用于干式切削铜、铝及铝合金工件。

在微量润滑切削技术中,由于工艺对刀具有一定的冷却和润滑作用,因此微量润滑切削技术所用刀具在红硬性及耐磨性上较干切削刀具要求低一些。但是在微量润滑的切削过程中,润滑剂吸收的热量很少,多数热量一部分被切屑带走,一部分被刀具吸收,所以对刀具的性能提出了更高的要求。首先,刀具应具有优异的耐高温性能;其次,切屑和刀具之间的摩擦系数要小,以便减少刃口产生积屑瘤;第三,由于加工刀具切削刃承受极大的应力,因此对刃口硬度、抗冲击韧性要求更高,刀具几何参数及切削用量的选取要合理。微量润滑切削技术所采用的刀具一般采用的是涂层刀具,常用涂层有DLC涂层、CVD涂层、PVD涂层及钛化物涂层,广泛应用于铸铁、钢、铝合金等的钻、铰、攻螺纹、深孔钻削以及高速车、铣等加工过程中。

在低温切削过程中常用的刀具材料有硬质合金、涂层硬质合金、特种陶瓷、立方氮化硼、聚晶立方氮化硼等。刀具几何参数的合理选择可以使刀具潜在的切削能力得到充分的发挥,从而提高刀具的耐用度;或在保证耐用度的前提下提高切削用量,提高生产率。刀具几何参数的合理选择不仅直接影响切削力的大小和方向,还对切屑的卷曲形状和流出方向起着重大的作用。

### 绿色切削技术的应用

绿色切削技术发源于欧洲,并且在欧美已获得广泛应用,这与欧美发达的制造业和越来越强烈的环保理念有关。我国绿色切削技术的研究也已起步,并在以下几个方面获得了广泛的应用。

#### (1)铸铁的干切削。

铸铁加工通常采用直接干切削

加工以提高生产效率。切削产生的热量主要积聚在刀具前端,通过接触将切削热传向工件,使切削区域材料达到一个很高热量,使铸铁件屈服强度下降,切削及进给速度提高,大大提高了铸铁材料的切削效率,例如:用陶瓷、CBN 刀具进行高速干切削加工。

(2) 铝合金的切削。

铝合金传热系数高、热膨胀系数大,切削加工时会吸收大量切削热,故在切削过程中易于形成一个技术难题——积屑瘤。解决上述难题的最好办法是采用高速干切削技术。在高速切削时,95% ~ 98% 的切削热传给了切屑,会使切削区域局部熔化,切屑容易和工件分离,减小了切削力,不易形成积屑瘤。铝合金也可以采用冷风切削加工,诸如广州摩托集团在发动机的左右曲轴箱、盖,特别是缸头加工工艺路线中,采用气旋制冷技术,选用一定数量的人造金刚石刀具改进关键部位加工工艺,提高了发动机产品质量和生产效率。

(3) 钛合金的低温切削。

钛合金加工时易产生表层加工硬化,钛元素活性大,易形成表面污染层。同时由于钛合金的导热系数小,切削温度高,所以该材料为典型的难加工材料。在钛合金的高速切削过程中,苏宇等进行了低温氮气射流条件下高速铣削钛合金的试验,如图 5 所示。结果表明,低温氮气射流

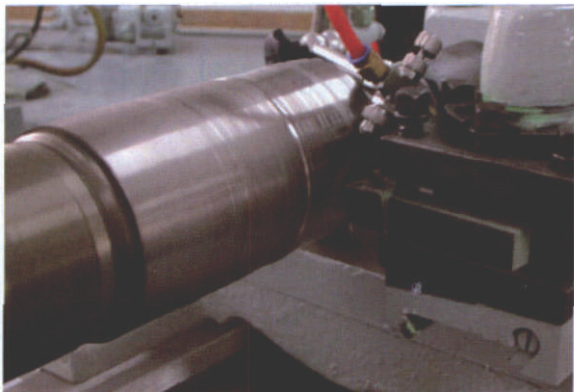


图5 低温喷雾射流冷却切削钛合金

结合微量润滑能够有效地降低铣削力,抑制刀具磨损。魏树国等为研究钛合金低温铣削时对表面粗糙度的影响,通过对 BT20 钛合金的低温切削试验,证明在保证工件同样的加工表面粗糙度情况下,低温切削时的速度明显大于常温切削时的速度,从而能够改善钛合金的切削加工性。

(4) 高温合金低温切削。

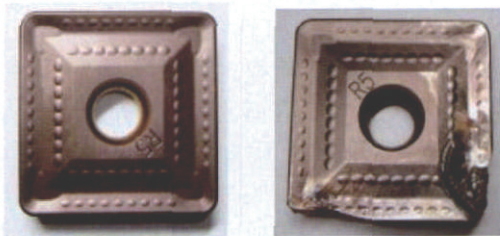
高温合金能在高温氧化及燃气腐蚀条件下工作,具有优良的热强性能、热稳定性能及热疲劳性能,因而常用于航空涡轮发动机、舰艇涡轮发动机和电站涡轮发动机等,但它的切削加工性差,是典型的难加工材料。日本学者采用喷雾冷却方法加工镍基高温合金 Inconel718 等材料,研究表明采用硬质合金 K20 刀具与浇注冷却对比,在一定的工艺条件下喷雾冷却时的切削速度可比传统冷却提高 2 ~ 2.5 倍,刀具寿命可延长 5 倍左右。

(5) 重型切削工艺中的应用。

由于国家对新能源的需求越来越大,石油化工和核电工业也对加工制造业提出了越来越高的要求。大型筒节是石油化工和核电工业的核心零部件,如图 6 所示。筒节加工和以往的机械加工不同,比如工件材料、加工精度等都会有更高的要求。若在加工过程中引入干式切削加工工艺,可取得良好的效果。由于工艺特殊性,不仅在结构上,而且在制造工艺上也需要对刀具进行改进。由于在切削过程中产生大量的热,极易发生粘接磨损,使得刀具寿命急剧下降,若在在刀具结构的特定位置设计凸起,可有效缓解上述情况,如



图6 大型筒节



(a) 未破损 (b) 破损后

图7 重型切削所用刀片

图 7 所示。为了使得刀具具有足够的硬度,进而实现重型切削,刀具材料中的碳化钛含量应该足够大。为了保证刀具与切削之间有良好的摩擦性能,进而减少刀具的月牙洼磨损,刀具表面应进行相关涂层工艺。

结束语

绿色加工技术已是世界工业发展的潮流,必将随着人类可持续发展战略的提出和经济全球化的趋势而显示出其优势。国际生产工程学会也一直对生态平衡、环境保护和可持续发展给予充分重视,提倡运用有利于保护环境的绿色制造技术。在保证满足综合加工性能的基础上,人们正在大力开发和应用低排放和低污染的绿色切削技术,进而实现绿色切削技术更快的发展和更广泛的应用。

本文有参考文献 11 篇,因篇幅所限未能一一列出,读者如有需要请向本刊编辑部索取。

(责编 良辰)