

# 切削难加工材料的新型绿色 高效冷却润滑技术

New Green and High-Performance Cool Lubricating Technology for  
Difficult-to-Cut Material

哈尔滨工业大学机电工程学院 韩荣第



韩荣第

哈尔滨工业大学教授、博士生导师，从教 40 余年，主持和参加国家自然科学基金、863 重点项目、省市重点攻关项目等 30 余项。获部科技进步奖 3 项，1 项成果成功用于某型号通讯卫星自展天线，发表核心以上高水平学术论文 110 篇，其中 SCI、EI、ISTP 检索 50 篇，主编教材 7 部，参编教材 4 部（其中 2 部获奖），主审手册 3 部。研究方向：高速加工与绿色加工技术、难加工材料加工技术、切削过程仿真及特种刀具技术。

众所周知，在切削加工过程中，为了减小切削力（功率）和刀具磨损，提高刀具使用寿命、加工表面质量和

高速、超高速的干式切削是绿色切削追求的最终目标，但它在相当长的时期内还不能广泛实施。因此现阶段的主要任务是要研究如何使所用切削液不对环境造成污染或少污染。主要研究有 2 方面：一方面是研制无害添加剂，另一方面是研究少或无污染的冷却润滑剂（包括气体和液体的），研究绿色切削技术。

生产效率，大多企业都会使用冷却润滑剂。液体冷却润滑剂通常称为切削液或冷却润滑液，切削液一般分为水基和油基两大类，水基包括水及其溶液，油基包括植物油、动物油和矿物油及其混合油。

为了提高切削液的冷却润滑性能，特别在切削难加工材料时，往往还需加入极压添加剂，如 S、Cl 和 P 等。乳化液中的防锈添加剂（如亚硝酸钠）多为有毒、有害物质，甚至致癌。油基切削液在切削高温的作用下会产生大量烟雾，二者中添加的 S、Cl 和 P 虽能增强渗透性，与表面生成化学吸附膜或物理吸附膜，减小摩擦，但它们具有强烈的刺激性气味，对人体健康危害很大，同时要处

理废液又会增加很多成本。据统计，废液的处理费用约占总制造成本的 20%。

由此可见，使用切削液有着很大的负面效应：一是对人体健康造成极大危害，二是对环境造成严重污染。随着科学技术的发展，人们对环境污染的认识越来越深刻，加之环保法规日趋严格，迫切要求机械制造企业必须重视机械加工过程中的环境污染问题，因此提出了绿色切削的概念，即不污染环境且不危害健康的切削。

高速、超高速的干式切削是绿色切削追求的最终目标，但它在相当长的时期内还不能广泛实施。因此现阶段的主要任务就是要研究如何使所用切削液不对环境造成污染或少

污染。主要研究有2方面:一是研制无害添加剂,二是研究少或无污染的冷却润滑剂(包括气体和液体的),研究绿色切削技术。

绿色切削技术是机械制造企业实施绿色制造技术的重要组成部分,已成为21世纪的一种先进制造技术。

### 绿色切削技术的研究现状

为了实现切削冷却润滑技术的少或无污染,各国学者做了大量的试验研究工作,开发出许多切削冷却润滑技术,如最小量(微量)润滑(Minimal Quantity Lubrication, MQL)技术、雾化冷却润滑技术、液体射流冷却润滑技术、低温冷风冷却技术、液氮冷却干式切削技术及干式静电冷却技术等。

#### (1) 最小量(微量)润滑技术。

此法是西欧国家的一些专家提出的介于干式与湿式切削之间的一种润滑技术。此技术是将压缩空气与少量润滑油混合汽化后,再喷射到加工部位,从而使刀-屑接触区得到冷却和润滑。此技术可大大减少刀-屑及刀-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。如一台加工中心在传统湿式切削中需要切削液20~100L/min, MQL技术则只需 $(15 \sim 30) \times 10^{-4}$ L/min,约为湿式切削的1/3000~1/40000。但这项技术目前仍存在2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MQL技术并非干式纯绿色,故称为准绿色切削技术。在此基础上, MQL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。

#### (2) 雾化冷却润滑技术。

此法是将切削液雾化后喷射到切削区的冷却润滑技术,这项技术虽然有良好的效果,但是污染较为严

重,工作区必须封闭,不便推广和采用。

#### (3) 液体射流冷却润滑技术。

此法是将切削液用高压射流喷射到切削区,与浇注法相比,此项技术可提高刀具使用寿命,但污染也较为严重。

#### (4) 低温冷风冷却技术。

此法必须有低温冷风冷却系统,包括压缩空气源、空气除湿器、空气冷却器、绝热管、风嘴、吸尘管和集尘器等组成。为使其有防锈和润滑作

用,还必须喷入少量植物油,此项技术也有污染且系统复杂,不便推广和采用。

#### (5) 液氮冷却干式切削技术。

此法是采用液氮使切削在低温冷却状态下进行。常有2种方式:一是靠液氮的自身瓶装压力喷到切削区;二是靠液氮受热蒸发循环间接冷却刀具,这是一种低温干式切削方法。液氮是制氧过程的副产品,价格便宜、可循环使用且无污染,但储存设备成本较高,使用起来不方便。另

表1 3种冷却润滑条件下的切削力对比 %

项目	试件材料			
	45 钢	1Cr18Ni9Ti	TC4	GH4169
水蒸气比干切减小量	20 ~ 30	25 ~ 30	20 ~ 35	15 ~ 30
水蒸气比乳化液减小量	10 ~ 15	15 ~ 20	10 ~ 20	10 ~ 15

表2 3种冷却润滑条件下的切削温度对比 %

项目	试件材料			
	45 钢	1Cr18Ni9Ti	TC4	GH4169
水蒸气比干切降低量	15 ~ 20	20 ~ 30	10 ~ 15	20 ~ 30
水蒸气比乳化液降低量	5 ~ 15	10 ~ 20	5 ~ 10	10 ~ 20

表3 3种冷却润滑条件下的刀具的VB值和寿命T对比 %

项目		试件材料		
		1Cr18Ni9Ti	TC4	GH4169
水蒸气比干切	VB 减小量	30 ~ 40	40 ~ 50	30 ~ 35
	T 提高量	90 ~ 95	50 ~ 60	50 ~ 60
水蒸气比乳化液	VB 减小量	15 ~ 20	25 ~ 30	15 ~ 20
	T 提高量	25 ~ 30	25 ~ 30	20 ~ 25

表4 3种材料在3种冷却润滑条件下的 $v_c$ -T关系式

冷却润滑条件	试件材料		
	1Cr18Ni9Ti	TC4	GH4169
干切	$v_c T^{0.20} = 218.8$	$v_c T^{0.23} = 200$	$v_c T^{0.22} = 69$
乳化液	$v_c T^{0.21} = 239.9$	$v_c T^{0.25} = 229$	$v_c T^{0.23} = 75$
水蒸气	$v_c T^{0.22} = 257.1$	$v_c T^{0.26} = 245$	$v_c T^{0.24} = 82$

外,在液氮的低温条件下切削的表面化学活性极强,暴露于空气中会很快生锈。

#### (6) 干式静电冷却切削技术。

干式静电冷却切削技术是前苏联在 20 世纪 80 年代发明的干式切削技术,其基本原理是将压缩空气离子化、臭氧化(消耗功率不超过 25W),然后经由喷嘴送至切削区,在切削点周围形成特殊的气体氛围。这种气体氛围不仅降低了切削区温度,更重要的是能在刀具与切屑、刀具与工件接触面上形成具有润滑作用的氧化薄膜,并使被加工表面呈压应力状态,从而增加零件的使用寿命。俄罗斯罗士技术公司曾对此做过大量试验,发现在多数情况下,采用干式静电冷却技术时刀具的使用寿命与湿式切削相当或超过,切削力有所减小,特别是加工后的零件不必再经二次清洗,除减少污染外,也大大降低了废液处理的费用。据介绍,目前在俄罗斯的国防和汽车企业中,大约已有 5000 台机床使用此项技术。

### 新型绿色切削冷却润滑技术

#### 1 水蒸气作切削冷却润滑剂

一般情况下,人们总是考虑用低

温液体或气体做切削冷却润滑剂,而前苏联学者波德戈尔柯夫·B·B 却逆向思维,于 1988 年提出用高温水蒸气来冷却润滑切削区这一大胆的想法,并获得了专利。1998 年戈德列夫斯基·V·A 和马尔柯夫·B·B 的切削试验证明: T15K6 (YT15) 硬质合金刀具车削 45 钢、不锈钢及灰铸铁时,刀具的使用寿命提高了 1 ~ 1.5 倍,断续切削的铣削效果更好,可提高 1 ~ 3 倍。所用加热装置的功率为 500 ~ 700W,得到的饱和蒸气喷嘴处的温度为 100℃,到达切削区(冷却距离 20mm)时的蒸气温度为 85℃。

本课题组从 2002 年开始此项研究,现已从存贮式原理性试验装置阶段(加热功率为 3500W),经过随发式小功率供气系统阶段(加热功率为 1200W,温度压力可自控),到装置小功率、小型化阶段(加热功率为 800W,温度压力可控制,喷嘴出口温度为 125℃),直至工业应用系统阶段(单机用,多机用——存贮式 + 涡流二次加热)。小型供气系统如图 1 所示。

用 YT15 (P10) 切削 45 钢(正火),用 YG6 (K15) 切削奥氏体不

锈钢 1Cr18Ni9Ti、钛合金 TC4 及 Ni 基高温合金 GH4169,用水蒸气作冷却润滑剂与干切、乳化液的切削试验进行了对比,结果如表 1 ~ 4 所示。

切削 1Cr18Ni9Ti 时,水蒸气作切削冷却润滑剂比干切的切削速度提高了 11%,比乳化液的提高了 5%;切削 TC4 时,比干切的切削速度提高了 15%,比乳化液的提高了 10%;切削 GH4169 时,比干切的切削速度提高了 8.3%,比乳化液的提高了 3.2%。

相关报道认为,切削冷却润滑剂的冷却润滑作用只发挥了很少一部分。切削时刀 - 屑接触区的摩擦润滑原理为毛细管渗透理论,即刀 - 屑接触区的冷却润滑是靠冷却润滑剂的毛细管现象起作用的。相关的毛细管模型有 T.A. Willms 的长方体模型和 Godlevski.V.A 的圆柱体模型。关于冷却润滑剂渗入刀 - 屑接触区的过程,他们认为液态冷却润滑剂渗入毛细管分为 3 个阶段,一是常温液体渗入,二是常温液体在毛细管中切削温度(几百度)的作用下,发生体积膨胀,压力升高,微滴蒸发“爆炸”,从而进入第三阶段——气相填充阶段,即发生了“爆炸”了的蒸汽填充到了毛细管中,同时毛细管开口处的液体又被顶出,从而限制了后续液体的渗入,这说明液态冷却润滑剂的作用打了很大折扣。而过热水蒸气在毛细管中的渗入就较为顺利,省去了第二阶段——蒸发“爆炸”阶段,使它能连续、较顺利地完渗透,因而冷却润滑作用比液体或低温气体(压缩空气)要好。

蒸气的冷却润滑作用好的原因还在于蒸气在毛细管中渗透的时间远远小于毛细管存在时间,且能与毛细管壁形成润滑层,代替了被拭擦掉的氧化膜,避免了刀 - 屑间的直接接触摩擦,形成了屏蔽层,从而减小了刀 - 屑之间的摩擦,使扩散和粘

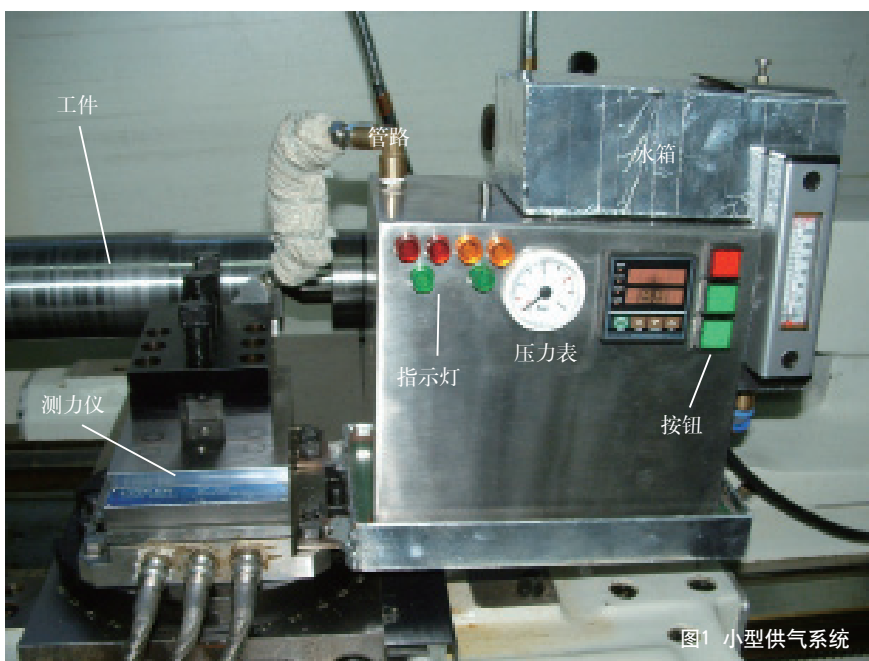


图1 小型供气系统

结的趋势减小。水蒸气的冷却作用不仅在于高效润滑作用的间接冷却作用,还在于对流换热能力的增强有效降低了切削温度,这是直接的冷却作用。其结果将是过热水蒸气比液体或低温气体作冷却润滑剂的效果

有高效的对流换热冷却作用。因此水蒸气作切削冷却润滑剂可明显降低切削温度。

## 2 干式静电冷却切削技术

此技术是将空气通过电离装置电离生成臭氧  $O_3$ , 由于臭氧具有

## 3 超声波处理乳化液作切削液实现节能减排的技术

现在切削磨削加工中大量使用乳化液,为了达到预想的冷却润滑效果,不惜代价连续浇注,这样做的结果是既浪费了资源和能源,又对环境和人体的健康造成了危害,废液的处理也增加了制造成本。如果把乳化液或其他水基切削液先用超声波进行处理,使其微粒直径减小、分布均匀并获得大量能量,则更容易进入切削区,渗透到刀-屑接触区的毛细管中,从而增强冷却润滑性能。切削试验表明:用超声波处理过的乳化液比未处理的乳化液作切削液时切削力减小 10%,这相当于减少了乳化液用量;加工表面质量得到了改善,加工痕迹规则了,几乎不存在粘结现象;切屑形状呈规则的螺旋状且颜色变浅,即切削温度降低了。

## 4 磁场处理乳化液作切削液实现节能减排的技术

如把乳化液或其他水基切削液先通过一定强度的磁场进行处理,也会得到与超声波处理的乳化液作切削液时类似的结果。

## 结束语

将过热水蒸气作为冷却润滑剂在难加工材料的切削中具有较好的冷却润滑效果,而且其来源广泛,是一种高效绿色的冷却润滑技术。

干式静电冷却切削技术在切削难加工材料 Ni 基高温合金 GH4169 和钛合金 TC4 时可较显著地减小刀具的磨损,是一种绿色高效切削工艺技术。

经超声波和磁场处理的乳化液作冷却润滑剂,乳化液微粒直径大大减小并获得了大量能量,使其渗透性能大大增强,因此,经超声波和磁场处理的乳化液作冷却润滑剂也是一种节能减排的冷却润滑方法。

(责编 岩石)

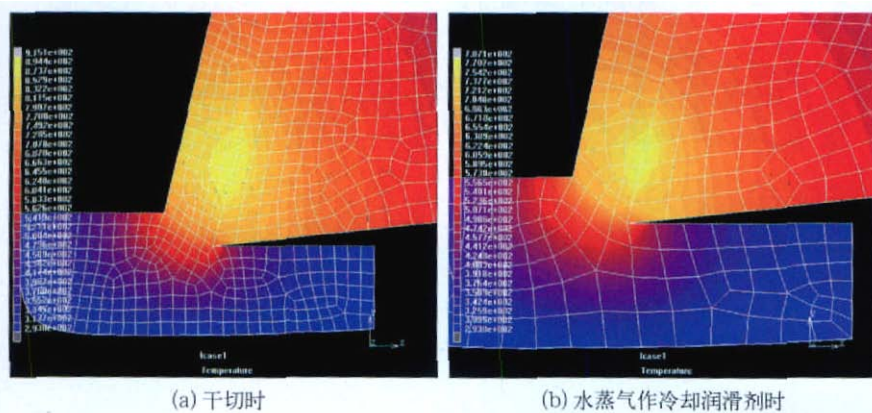


图2 切削温度分布的有限元仿真

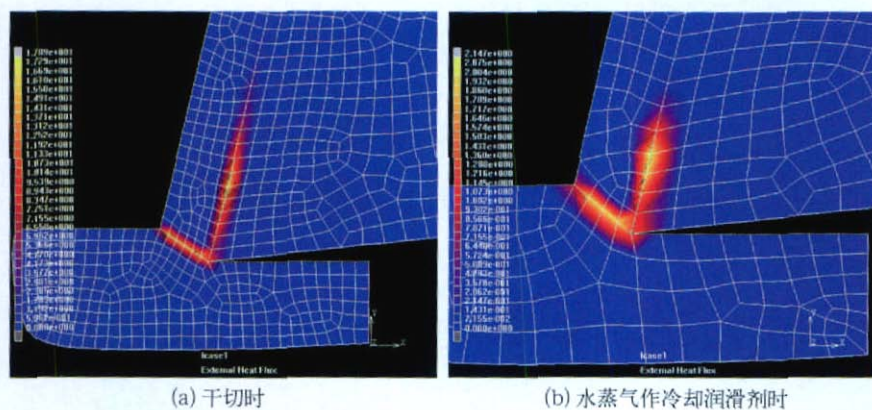


图3 热流分布的有限元仿真

好得多。上述试验结果很好地说明这一点。

图 2 和图 3 分别为刀-屑接触区温度和热流分布的有限元仿真。采用水蒸气作冷却润滑剂时,切削区最高温度明显低于干切,干切时切削区温度最高约为  $620^{\circ}\text{C}$ ,而水蒸气作切削冷却润滑剂时切削区温度最高约为  $500^{\circ}\text{C}$ ,可比干切时的降低约 20%。切削温度最高处至切削刃口有一定距离,干切时至刃口约为  $0.5\text{mm}$ ,而水蒸气冷却润滑剂时约为  $0.4\text{mm}$ ,刀-屑接触长度大约是干切时的 50%。水蒸气射流的强迫对流换热系数约是空气自然对流换热系数的 10 ~ 15 倍,故水蒸气还具

很强的化学活性,能在刀-屑接触区生成氧化膜,从而减小切削过程的摩擦,既减小切削力,又降低切削温度。切削试验表明:用硬质合金 YG8 切削 GH4169 时,与干切相比,切削力减小约 10%,切削温度降低约 5%,刀具磨损减小 30%,与使用乳化液时相当;切削 TC4 时,与干切相比,切削力减小 6%,切削温度降低 5%,刀具磨损减小 30% ~ 50%。特别是加工后表面活性物质的分解,可完全消除被加工表面的污染,不需工件的二次清洗,大大减少了废液的排放,既减少了环境污染,又大大节省了资源和能源,降低了制造成本。