

绿色切削技术的研究现状及发展

Research Status and Development of Green Cutting Technology

哈尔滨理工大学机械动力工程学院 刘献礼 王艳鑫 郭凯



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,机械工业切屑控制及高效刀具技术重点实验室主任,中国刀协常务理事。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。

在传统的切削加工过程中通常要使用大量的切削液,其流量有时高达80~100L/min。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。切削加工约占机械制造总工作量的30%~40%,是制造业中最主要和最常用的

26 航空制造技术·2009年第13期

与湿切削相比,由于缺少了切削液的冷却、润滑和辅助排屑等功能,干切削过程中刀具、工件和切屑之间摩擦以及刀具磨损加剧;切削力、切削热和切削区温度急剧增加;同时,加工精度和工件表面质量变差。但是,干切削具有对大气和水环境无污染、切屑上无残液从而降低了清洁处理成本、对人的健康无害且不会损伤皮肤或造成过敏等优点。而且通过改进刀具技术、机床性能和切削工艺可以消除干切削的不利影响。

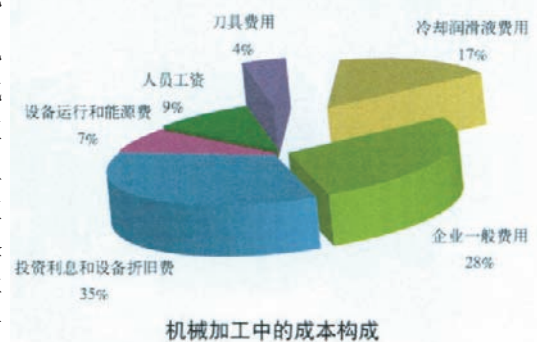
零件加工方法,也是能源消耗和环境污染的最大来源,而与切削液相关的费用约占加工成本的17%。可见,切削液在切削加工过程中的影响之大。特别是有些国家以保护本国环境为由,制定了极为苛刻的产品环境指标来限制国际产品进入本国市场,即设置绿色贸易壁垒。

现今,无公害、清洁化、低能耗的绿色制造已成为21世纪机械制造业的发展方向。绿色切削作为绿色制造的关键技术之一,主要指在对生态大环境和加工现场小环境均无负作用(或负作用很小)的情况下,在加工过程中产生的少量“三废”(废气、废液和废渣)在链条末端可回收或自然降解,达到无公害的环保要求,对人类健康和环境没有

危害的切削技术。研究开发新的绿色切削技术,寻求绿色环保的冷却润滑技术,是关系到绿色切削技术推广应用的重要课题。绿色切削技术符合可持续发展战略的要求,必将推动机械工业的持续、健康发展。

干式切削

干式切削技术是完全不用冷却润滑液的切削技术。绿色干切削技术通常应用于高速切削场合,所以又



称为高速干切削。相对于湿切削,干切削不产生烟雾及排放油污,是适应全球日益迫切的环保要求和可持续发展战略而发展起来的一项绿色切

目前,干式切削技术主要应用于铸铁件的加工,在车、铣、钻、铰、镗等加工中得到了成功应用。干式切削是绿色制造工艺的研究热点,

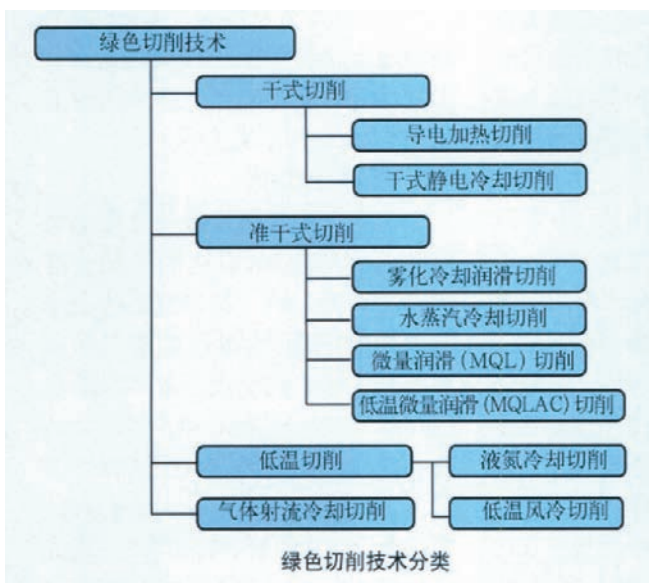
其实施需要满足一定的条件。

(1) 要求机床具有很好的热稳定性和很高的刚度。用于干式切削的机床在功能和结构设计上必须考虑切削热的散发和排屑两大问题。干式切削时,在切削区域产生的大量切削热若不及时排除,就会使机床受热较大且不均匀,其热变形将成为影响

不仅要求刀具材料具有较高的强度、红硬性、耐磨性和热韧性,而且还必须有良好的耐热性、耐热冲击和抗粘结性;切屑与刀具之间的摩擦系数应尽可能小,刀具的槽型应保证排屑流畅、易于散热。目前,干式切削中应用较多的刀具材料有立方氮化硼(CBN)和陶瓷等。哈尔滨理工大学机械工业切屑控制及高效刀具技术(黑龙江省高校)重点实验室对聚晶立方氮化硼(PCBN)和聚晶金刚石2类先进超硬刀具材料的刀具制造技术及产品技术进行开发研究,并对超硬刀具的使用技术和高效硬态精密切削技术进行了深入研究,加工出了 $R_a=0.195\mu\text{m}$ 的高质量精密表面。目前,这一指标处于国际先进水平。另外,刀具涂层技术(CVD和PVD涂层技术、纳米涂层技术等)的应用可以延长刀具寿命,也能较好地满足干式切削的要求。刀具涂层可起到润滑减摩作用,90%以上的切削热可被切屑带走。优化刀具的几何参数,可以提高加工精度和延长刀具使用寿命,这也是推动干式切削技术发展的重要手段之一。

1 导电加热切削

传统干切削技术在铸铁、铝合金等材料的切削加工中已经获得应用。为实现绿色切削的功能目标,出现了一种新的干切削技术即导电加热技术。导电加热切削技术是一种典型的复合加工工艺,在切削过程中,刀



绿色切削技术分类

削加工技术。

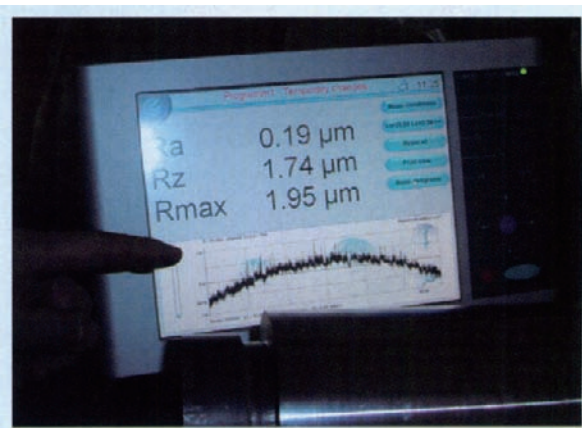
与湿切削相比,由于缺少了切削液的冷却、润滑和辅助排屑等功能,干切削过程中刀具、工件和切屑之间摩擦以及刀具磨损加剧;切削力、切削热和切削区温度急剧增加;同时,加工精度和工件表面质量变差。但是,干切削具有对大气和水环境无污染、切屑上无残液从而降低了清洁处理成本、对人的健康无害且不会损伤皮肤或造成过敏等优点。而且通过改进刀具技术、机床性能和切削工艺可以消除干切削的不利影响。

德国、美国和日本等工业发达国家非常重视对干式切削的研究。干式切削技术已经成功地应用到生产领域,取得了良好的社会效益和经济效益。许多世界知名的机床厂商在他们的目录中都有干切削机床加工中心。据统计,欧洲工业界10%~15%的加工已经采用了干切削工艺。德国在干式切削领域中处于领先地位,其企业的大批量生产中已有10%~15%采用干式切削,并且取得了良好的经济效益。干式切削技术是未来切削加工发展的一个方向。

工件加工精度的一个重要因素。因此,机床应配置循环冷却系统以带走切削热量,并在结构上有良好的隔热措施。

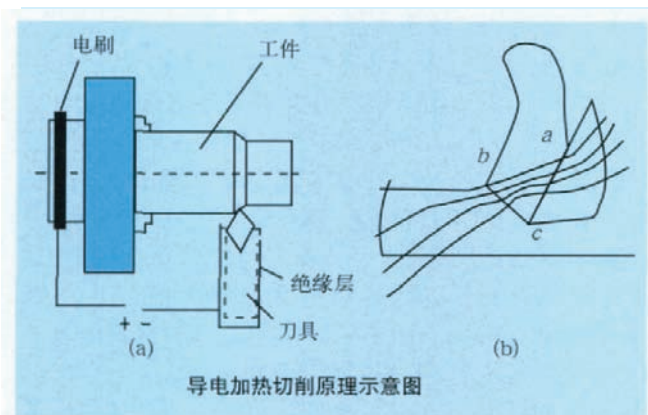
研究表明,干式切削的理想条件应是高速切削,以减少传到刀具、工件和机床上的切削热量。干式切削应与高速数控机床相联系。当今,切削加工已朝着高速、超高速方向发展。高速切削机床技术的发展为干式切削的实现创造了良好的条件。干式切削机床在结构上应尽可能采用立式主轴和倾斜式床身,以便于将大量热切屑排出,而且机床上应配有自动排屑装置。因此,干切削机床在结构和功能上有其特殊性。

(2) 对刀具提出了新的要求,主要包括刀具材料的选择和刀具几何参数的设计。通过提高刀具材料的导热性、耐热性、自润滑性和耐磨性,延长刀具使用寿命,保证干式切削的加工精度。干切削



加工表面粗糙度可达 $0.195\mu\text{m}$

具和工件构成回路,通以低压大电流后,电流的热效应辅助提高切削温度,使切削区材料受热软化。金属软化效应的实质是:切削温度的升高使金属硬度降低或金属材料屈服强度降低,从而引起流动应力的变化,即流动应力随着温度的上升而减小。降低材料的剪切抗力可使切削变得顺利。通过导电加热切削能获得相当于磨削的表面粗糙度,而且已加工表面无硬化或软化现象。长期以来,



导电加热切削原理示意图

导电加热切削一直被视为对付难加工材料的有效方法之一。

导电加热切削的加热装置电源一端与碳刷连接,另一端与刀具相连。刀具因垫有绝缘层而与刀架绝缘。切削工件时,电流经碳刷和机床主轴、卡盘及工件、刀具而形成闭合回路。在闭合回路中产生的焦耳热使切削变形区得到加热。

2 干式静电冷却切削

干式静电冷却切削技术是前苏联 20 世纪 80 年代发明的干式切削技术,其基本原理是用电离装置将空气电离成臭氧,由喷嘴送至切削区,从而使其周围形成特殊的气体氛围。这不仅能降低切削温度,更重要的是能在刀具与切屑及与工件间形成起润滑作用的氧化薄膜,并使加工表面呈压应力,增加了零件使用寿命。俄罗斯罗士技术公司曾对此做过大量试验,取得了一些参考数据。据介绍,目前俄罗斯的国防和汽车企业中约有 5000 台机床使用此项技术。

准干式切削

介于湿式切削与干式切削之间的加工技术称为准干切削技术(Near Dry Machining)。其工作原理是在保持切削工作的最佳状态(即不缩短刀具寿命,不降低加工表面质量等)的同时,使切削液的用量最少。

准干切削技术的优势:少量的冷却液或润滑油借助压缩空气或者冷风对切削部位进行冷却,使加工后刀具、工件、切屑仍然保持干燥,不需要进行废液处理,对人体无危害,对环境无污染;节约资源,减小了刀具与工件、刀具与切屑的摩擦,抑制温升,防止粘结,延长了刀具寿命,提高了加工表面质量;由于使用的切削液量最少,因此系统结构简单,占地面积小,易布局。

准干切削技术是绿色制造技术的一个重要组成部分,它在减少环境污染的同时,减小了切削过程中的摩擦,降低了温度,减小了刀具磨损,提高了工件加工质量。目前,国内外对准干切削的研究主要集中在雾化冷却润滑切削技术、低温切削技术(液氮冷却润滑切削及冷风冷却润滑切削)、微量润滑切削技术和低温微量润滑切削技术等方面。

1 雾化冷却润滑切削技术

雾化冷却润滑技术采用雾滴汽化方法对切削区进行冷却润滑。雾化的切削液滴易于渗透到切削区,能充分发挥切削液的润滑作用,提高了工件表面质量和切削效率。

与传统的浇注方法相比,雾化冷却方法具有以下特点:

(1) 高速气流带着微小水珠很容易渗透到加工面,有效降低了摩擦

和摩擦热,延长了刀具寿命;

(2) 在降低摩擦的同时,使精密加工成为可能,更容易实现工件的微米级精加工;

(3) 润滑效果明显,当冷却润滑液中的水分蒸发后,润滑成分滞留在工作区并在加工表面上形成润滑薄膜,同时也保持了机床的干燥。

2 水蒸汽冷却切削

水蒸汽冷却切削是将过热水蒸汽喷射到切削区,以达到冷却润滑的一种切削方法。其切削系统由水蒸汽发生装置、水蒸汽传输与控制系统和机床系统组成。前苏联学者 Podgorkv V V 和 Godelvski V A 在 20 世纪 90 年代提出了这种切削加工方法。哈尔滨工业大学也对该方法做过初步研究,并取得了一定成果。研究表明,水蒸汽冷却切削可以减小切削力和工件表面粗糙度值,明显降低切削温度,使生成的切屑更规则合理,润滑性有所提高。水蒸汽价格低廉又无污染,是一种很好的绿色润滑剂。

喷雾法最适合用于切削速度高而切削区域低(如端铣)的加工。选用冷却性能好的切削液,细小的液滴与热的刀具、工件或切屑接触,能通过迅速蒸发把热带走。喷雾冷却不需防溅板,喷雾量控制得当工件是干燥的。目前,该技术仍处于研究阶段,缺点是润滑性能略差。

3 微量润滑(MQL)切削

微量润滑(Minimal Quantities of Lubricant, MQL)切削是国内外都比较重视的一种准干式切削,它将压缩空气与少量的润滑剂混合汽化,将形成的毫、微米级气雾喷向切削区,对刀具与切屑、刀具与工件的接触界面进行润滑,以减少摩擦和防止切屑粘到刀具上,同时也冷却了切削区并有利于排屑,从而显著地改善了切削加工条件。

MQL 法中润滑液的用量非常少,一般为 0.03 ~ 0.2L/h,而一台

典型的加工中心在进行湿切削时的切削液用量高达 20 ~ 100L/min。只要使用得当,采用 MQL 技术加工后的刀具、工件和切屑都是干燥的,避免了后期的处理,而且清洁干净的切屑经过压缩还可以回收使用,完全不污染环境。

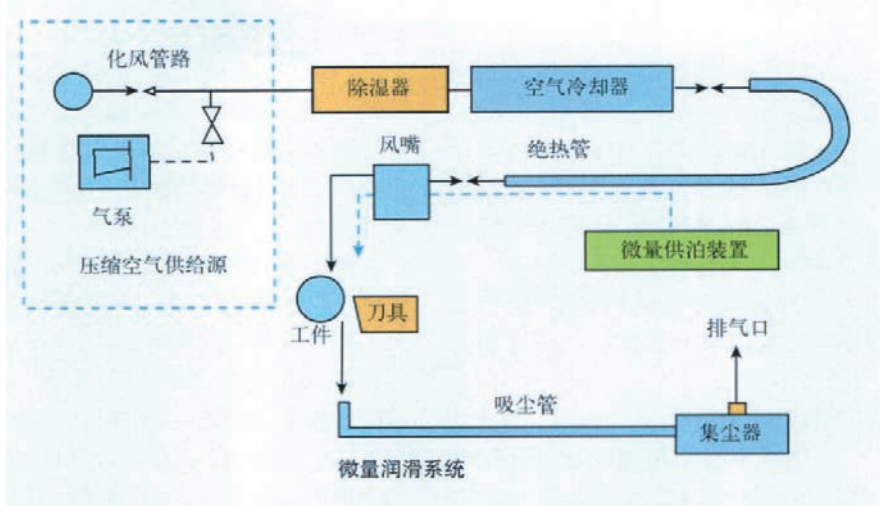
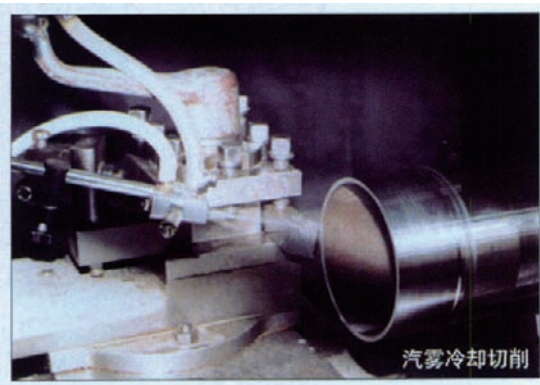
目前, MQL 技术主要用于在铸铁、钢和铝合金上进行钻孔、铰孔和攻丝加工,以及深孔钻削和铝合金的端面铣削等。美国的 Tbyssen 公司将润滑系统集成在主轴中,其流量由 CNC 程序控制。该单元在 6.5s 内可钻削 10 个直径 8mm、中心距 20mm 的孔;每小时使用 1 杯润滑油,且大部分被蒸发,切屑中切削液含量大大减少,因此处理费用大幅降低。

在德国,近几年来 MQL 装置每年有 15000 套的市场,而且还将进一步增加。MQL 与新型刀具的结合使用也方兴未艾。可以预测,在未来几年里,德国制造的加工中心中将有 5% 用 MQL 与润滑性涂层刀具相结合的方法来取代浇注式冷却。

结合目前的研究开发现状,提出的 MQL 切削技术的研究方向如下。

(1) 对油雾微粒的生成机理进行深入研究,并提出有效、实用的防护措施。通过技术措施将油雾微粒在大气中的浓度降至最低,实现对人体和环境无害(或危害最低)的准绿色切削。

(2) 加强对 MQL 油雾发生装置的设计研究。目前,大多数 MQL 装置采用压缩空气作为油雾传载体。



由于很难控制油雾微粒的大小和分布,因此传送单元和油雾控制口的设计将是研究重点。

(3) 因为切削参数和切削速度都会对油雾微粒生成率造成影响,因此还需深入研究切削参数对油雾微粒生成率的影响。

4 低温微量润滑切削

低温微量润滑切削(MQLAC)是 MQL 切削技术和低温风冷切削技术的有机结合,是一种新型切削工艺技术。该技术充分利用微量润滑切削的强润滑性和低温风冷的低温,使用效果远远超出二者单独使用时。这种方法能延长刀具的使用寿命,抑制积屑瘤的产生,提高加工表面精度,可省去废液和废液处理系统,降低生产成本,防止环境污染。

低温切削

低温切削技术指在机械加工中采用不同冷却方法,使工件材料的切削区处于低温下进行切削加工的方法。在现阶段研究中,根据冷却介质不同,低温切削可分为液氮冷却切削和低温风冷切削。

1 液氮冷却切削

液氮冷却切削是使用低沸点介质,在压力作用下利用液氮特性将氮气发生装置所生成的氮气以液氮

形式送入切削点,代替大量油剂的切削方法。液氮冷却切削主要有 2 种应用形式,一种是利用瓶装压力将液氮像切削液一样直接喷射到切削区;另一种是利用液氮受热蒸发循环来间接冷却刀具或工件。由于液氮在使用后直接挥发成气体返回大气中,因此不会留下任何污染。

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。林肯大学的 Z.Y.Wang 采用 H13A 硬质合金刀具,并用液氮循环冷却刀具的方法对钛合金进行了低温切削加工试验。试验结果表明,与传统的切削方法相比,刀具磨损明显减少,切削温度降低了 30%,工件表面加工质量得到很大改善。液氮冷却切削对于钛合金、低合金钢、软钢及一些高塑(韧)性复合材料等难加工材料的加工非常有效。

液氮冷却中,由于金属的热胀冷缩作用,零件的加工尺寸会产生误差,而且液氮容易挥发,所以传输比较困难,而且喷嘴处温度较低,易结成冰,堵塞喷嘴。

目前,液氮冷却切削技术主要存在以下问题:

- (1) 液氮的存储、运输等费用带来了附加成本;
- (2) 液氮在切削加工中的润滑性

不够;

(3) 液氮使用的安全性需要特别注意;

(4) 在超低温下切削出来的工件表面具有极强的化学活性,暴露在空气中会很快生锈,因此必须解决工件防锈问题;

(5) 尚需对不同工件材料的低温切削性能以及刀具的切削特性等进行深入研究。

2 低温风冷切削

低温风冷切削是在加工过程中用 $-100 \sim -10^{\circ}\text{C}$ 的冷风强烈冲刷加工区,从而降低刀具和工件温度的一种切削技术。其切削系统主要由冷风发生装置和切削加工系统组成。日本对此项技术的研究较早,开发水平较高。1996年,横川和彦教授开始对低温风冷切削进行较全面的研究。国内重庆大学也进行过此类研究,并取得了一定成果。研究表明,低温风冷切削可显著降低切削区温度,提高刀具耐磨性,延长刀具使用寿命,改善加工表面质量,且对环境完全无污染。它可以显著而均匀地降低加工区、刀具及工件的温度,利用材料的低温脆性,在韧性降低、塑性减小的情况下完成切

屑和工件的分离,有效地抑制刀具磨损,提高刀具耐用度,改善已加工表面的加工质量。这种加工工艺避免了切削液的使用,如果在冷风中供给微量高性能切削油,改善效果更加明显。

有关该技术的研究还存在一些问题。首先,低温冷风切削对不同的加工材料有着不同影响,但国内在这方面的研究较少,缺乏试验数据,难以提供科学、合理的切削参数。其次,该方法的冷却润滑系统比较复杂,不利于推广应用。第三,该方法只有冷却功能而无润滑功能(如果在冷风中添加微量切削油,可以解决润滑性问题,但对环境有一定影响,属于准绿色切削)。此外,低温风冷切削时发出的噪声较大。最后,对风冷切削技术缺乏系统性的试验研究,对一系列技术参数没有进行量化和优化。对不同条件下不同材料的切削性能仍有待进一步研究。

低温风冷切削技术有一定的应用前景,但以下问题还需进一步进行研究。

(1) 开发低耗能、高效率、调节范围大和无污染的低温风冷装置。

(2) 开展系统性的研究。对不同

条件下不同材料的低温切削性能进行大量试验研究,整理和分析试验数据,为下一步研究做准备。

(3) 调整机床结构,提高与低温风冷系统的适配性,推动低温风冷切削技术在机械工业中的小范围应用。

低温冷风冷却中,由于气态介质的动能小,所以在流向切削区时易受到切削位置、工件形状、刀具和机床部位的阻碍而改变方向。而且刀具和工件材料之间的润滑较差,切屑收集困难,噪声等问题也很严重,同时低温气体产生装置也比较复杂。

气体射流冷却切削

气体射流冷却切削是以一定压力的射流气体冲刷加工区而获得冷却效果的切削加工方法。日本对这种加工方法的研究较多。我国华东船舶工业学院也对此进行了一些研究,并取得了较好的效果。研究表明,气体射流冷却切削对冷却效果、工件加工质量和刀具使用寿命等均有益处。目前,国内对该技术的研究还处于起步阶段,尚须开展以下研究:

(1) 对气体射流冷却切削参数(包括气体压力、温度、气流速度、喷口直径及喷射方向等)的优化设计;

(2) 对气体射流冷却切削机理的分析研究;

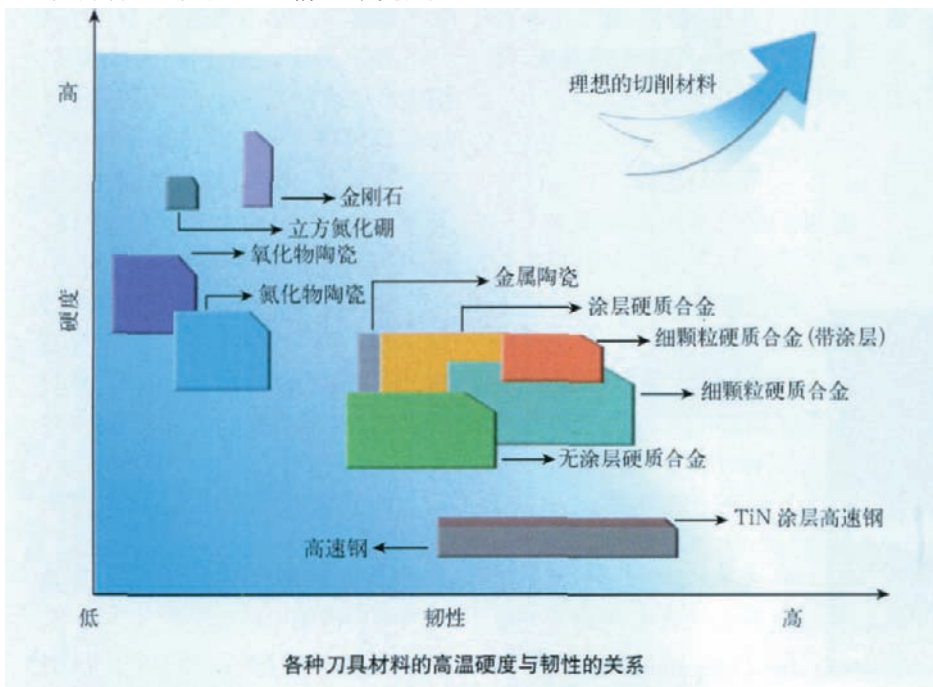
(3) 对不同工件材料的气体射流冷却切削性能的研究。

干切削的刀具技术

现代干切削技术不再采用冷却润滑液,这使加工技术取得了巨大的进步。目前,许多加工工艺和工件材料的加工可以通过现代切削刀具和涂层、适当的刀具设计和加工策略以及机床的优化来实现。

由于干切削工艺不使用切削液,刀具能承受的切削热是实现干切削的关键,一般采取如下措施。

(1) 采用新型的绿色刀具材料。



干切削的工况条件要求刀具材料具有优良的热性能,高的红硬性和热韧性,良好的抗粘结性、耐热冲击性和耐磨性。

陶瓷刀具(Al_2O_3 , Si_3N_4)和金属陶瓷(Cermet)具有很好的红硬性,比较适于一般目的的干切削,但这类材料的热韧性不好,不适于进行断续切削,即适于进行干切削而不适于进行干铣削。

立方氮化硼(CBN)材料的硬度仅次于金刚石,高达HV 3200~4000,具有很高的耐磨性、热稳定性和化学稳定性,适于黑色金属材料及合金如淬火钢、马氏体铸铁、硬化轴承钢、镍铬合金的干切削。

超细晶粒硬质合金具有良好的韧性和耐热性,也适于干切削。此外,对在 Al_2O_3 基体中添加20%~30%的SiC晶须形成的晶须增韧陶瓷,增强相SiC晶须能阻挡或改变裂纹发展方向,使得刀具韧性大幅提高,是一种极具发展潜力的干切削刀具材料。

(2) 采用绿色刀具涂层技术。干切削刀具涂层技术通过在刀具基体上涂上一层或多层特殊性能的材料来改善和提高刀具的整体性能。对刀具表面进行涂层处理可以减小刀具、工件和切屑之间的摩擦因数,降低切削力,提高刀具使用寿命,改善工件表面质量。

涂层有类似切削液的功能,把刀具与切削热隔离开来,从而能够长时间保持刀刃的坚硬和锋利。在进行

高速干切削时,高温对化学反应有很大的催化作用,因此涂层还能够保护刀具材料不发生化学反应。

目前,用于干切削刀具的涂层主要有2类。一类是“硬”涂层,如TiC、TiN和 Al_2O_3 等涂层,其优点是硬度高、耐磨性好。其中,TiC涂层刀具具有很强的抗后刀面磨损能力,TiN涂层刀具则具有理想的抗月牙洼功能。一类是“软”涂层,如 MoS_2 、 WS_2 等涂层,这类涂层刀具也称为“自润滑刀具”,其刀具、工件和切屑之间的摩擦因数很小,只有约0.1,能降低切削力和切削温度。如德国Gühring公司研发的“MOVIC”软涂层技术就是在刀具表面涂覆一层 MoS_2 ,从而提高了刀具的耐用度。刀具涂层还可采用软/硬组合涂层,即先在刀具上涂覆“硬”涂层如TiN,再在上面涂“软”涂层如 MoS_2 ,形成多层刀具,使得涂层刀具既具有高的硬度和耐磨性,又具有摩擦因数小、切屑易流出的特点。目前,已有多达13层的涂层刀具。

刀具几何形状

月牙洼磨损是干切削刀具失效的主要原因,这是由于加工中没有切削液,刀具和切屑接触区域的温度升高引起的。因此,通常应使刀具有大的前角和刃倾角,但前角增大后,刀刃强度会受影响,此时应配以适宜的负倒棱或前刀面加强单元,以使刀尖和刃口有足够体积的材料和较合理的方式承受切削热和切削力,同时减轻了冲击和月牙洼扩展对刀具的不利影响,使刀尖和刃口可在较长的切削时间里保持足够的结构强度。

近几年来,国外开发了许多大前角车削刀片

(如美国Carboloy公司推出的一种ME-13新型硬质合金刀片上的前角达 34°)和带正前角的螺旋形刃铣削刀片(刀片沿切削刃有几乎不变的前角,背前角或侧前角可由负变正或由小变大),旨在减少机床的驱动功率,并通过减小切削力降低切削温度来满足干切削时对刀具的要求。

日本三菱金属公司开发出一种适用于干切削的“回转型车刀”。该刀具采用圆形超硬刀片,刀片的支持部分装有轴承,在加工中刀片能自动回转,使切削刃始终保持锋利,具有工效高、加工质量好、刀具寿命长等特点。

还有一种热管式刀具也可以获得较理想的干切削效果,即热管式车刀。该刀具的结构与普通车刀基本相同,所不同的是在刀杆体内部制成了热管。热管内的工作介质一般为丙酮、乙醇和蒸馏水。热管是一种高效的传热元件,它利用的是沸腾吸热和冷凝放热这2个最强的传热机理,其热导率是银、铜棒的几百倍。热管刀具是一种自冷却刀具,故无需再从外部浇注切削液,尤其适用于数控机床、加工中心和自动生产线。

结束语

切削技术是机械加工工业的关键技术,其发展水平决定着一个国家机械制造业的面貌。目前,高速(超高速)干式切削技术和无污染的生态切削液是绿色切削技术的发展重点。在21世纪的制造业中,绿色切削技术将得到更快的发展和更广泛的应用。可见,干式切削是切削技术发展的趋势,但在相当长时间内还不能完全实施,即在过渡期内还要使用切削液,因此开发具有绿色性能的切削液及相应的冷却润滑技术势在必行。为使此项技术能够更好地应用于机械制造过程,还应系统深入地研究新型绿色切削技术的应用。

(责编 良辰)

