

DOI : 10.3901/JME.2016.17.001

磁场辅助加工的研究现状及其发展趋势*

姜 峰¹ 言 兰² 黄 阳¹ 徐西鹏¹

(1. 华侨大学制造工程研究院 厦门 361021 ;

2. 华侨大学机电及自动化学院 厦门 361021)

摘要：将高密度能量场(声、光、电、热、磁等)引入加工区域，辅助或直接形成材料去除是先进制造技术发展的重要方向。磁场辅助加工是能量场加工中出现较早的一个技术，其原位吸热和主动控制残余应力的特点，预示了这一技术在材料加工领域的巨大应用前景。从加工过程的磁致效应、工具/工件磁化加工、磁场辅助加工基本理论三个方面对磁场辅助加工的发展现状进行了综述，并对其未来的发展方向进行了展望。

关键词：磁致效应；刀具磁化；工件磁化；磁-热-变形转化机理

中图分类号：TG50

Review on Magnetic Field Assisted Machining Technology

JIANG Feng¹ YAN Lan² HUANG Yang¹ XU Xipeng¹

(1. Institute of Machining Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021;

2. College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Xiamen 361021)

Abstract High-density energy field manufacturing technology is a hot topic in recent advanced manufacturing technology. Vibration, laser, electric, heat, magnetic of high density are applied into machining zone to perform or assist material removal. Magnetic field assisted manufacturing technology is pioneered in 1960. This technology could be more and more popular due to the in-situ heat elimination and active control of residual stress. The researches focused on magnetic field assisted manufacturing technology are reviewed in the items of magnetic effect in the machining process, magnetization of cutting tool/workpiece materials, transition mechanism among magnetization, heat and material deformation. The improvement direction of magnetic field assisted manufacturing in the future is proposed.

Key words : magnetic effect ; magnetization of cutting tool ; magnetization of workpiece materials ; transition mechanism among magnetization; heat and material deformation

0 前言

零件加工追求的往往是一定工艺条件下的极限尺寸精度和加工表面质量，已有研究发现单纯依靠刀具、机床和工艺参数的改进和调整，很难有效提升极限加工精度。这种情况下，借助外界能量场抵消材料加工中的局部高温和材料大变形引起的负面影响是一个值得探索的新思路。

能量场辅助加工方法是加工技术研究中的一个前沿和热点问题，具体工艺包括磁场辅助加工^[1]、超声振动辅助加工^[2-5]、离子束辅助加工^[6]、等离子注入辅助加工^[7]、激光辅助加工^[8]等多种具体的工

艺方法。这些工艺方法的突出特点在于通过将高密度的外界能量(磁、振动、热、光)输入到加工区域，辅助或直接形成材料去除，从而达到许多传统加工方法难以达到的加工效果，如难加工材料的高效去除、脆性材料的塑性去除、黑色金属的金刚石刀具精密切削等。在这些加工方式中，磁场辅助加工是开展最早的一种能量场辅助加工方法，相对于其他能量场辅助加工，磁场辅助加工有成本低、操作简单、外加场容易移除、适用范围广等一系列优点。国外从 20 世纪 60 年代就开始有工业应用的案例，而我国的相关研究起步也比较早，20 世纪 70 年代就有工业应用的案例。

磁场辅助加工主要应用于导磁材料，而对于不导磁材料，其磁导率低于某一临界值，并非完全不导磁，在足够大的磁场作用下也有可能被磁化，所以磁场辅助加工的对象材料较广。另外在航空航天、

* 国家自然科学基金(51405168)、福建省自然科学基金面上(2016J01237)、福建省高校杰出科研人才培育计划(JA14013)和华侨大学青年教师科研提升计划(13J0521)资助项目。20151026 收到初稿，20160411 收到修改稿

核电、精密检测等领域,磁性会对零部件的使用性能造成影响,因此一般不能使用磁场加工,或者在磁场辅助加工后采用消磁手段以保证零件的使用性能要求。

1 加工过程磁场作用机理

磁场对加工过程可能的影响机制主要包括以下几种。

(1) 磁致冷却效应。导磁材料在消磁的过程中发生磁畴方向的混乱,这个过程会吸收大量的热,同时这个吸热过程发生在材料内部,不需要传热过程,因此冷却效率和冷却速度均很高。1881 年 WARBURG 首先观察到金属铁再外加磁场中的热效应,1895 年 LANGEVIZ 发现了磁热效应。1918 年 Weiss 首次发现铁磁体绝热磁化会伴随着可逆的温度改变。1926 年 DEBYE 等提出利用绝热退磁降温方法获取低温。1933 年 GIANGUE 等采用磁性材料作为工质,用等温磁化和绝热退磁方法获得 1K 以下的低温。美国宇航局(NASA)一直致力于绝热消磁冷冻器(Adiabatic demagnetization refrigerator, ADR)的开发,如图 1 所示,可以使冷却区域温度迅速降低,接近绝对零度^[9]。这项技术始于 20 世纪 60 年代,可达到的最低温度从开始的 1 K 降至 30 mK,助力美国多项航天计划。

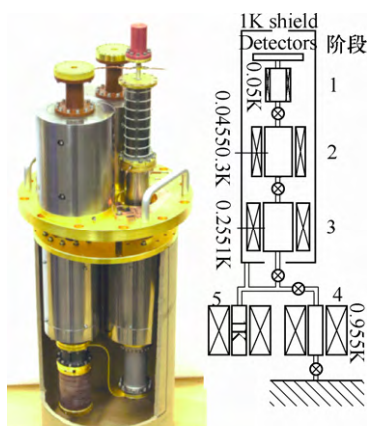


图 1 5 段绝热消磁冷冻器的外形图及消磁吸热原理图

LORENZ^[10]认为磁场的施加和移除会改变原子间距及其运动方式,进而出现吸热和放热的现象,而且这是个绝热过程,不发生热交换现象。ARKHANGELSKAYA 等^[11]的研究发现不同工件材料的动态磁滞回线差距较大,表明不同材料在消磁过程中的吸能不同,如图 2 所示。由于磁致冷却效应的原位作用特性,磁致冷却效应对于绝热状况下热能的耗散有明显帮助,因此可能通过连续的外界

充磁(主动充磁)和切削热消磁(被动消磁),快速、有效地带走加工区域的热量,降低加工区域产生的局部高温。而常规的冷却方式由于其可达性的限制,往往难以对切削区域内,特别是工具-工件接触区域内的局部高温进行直接冷却^[12]。

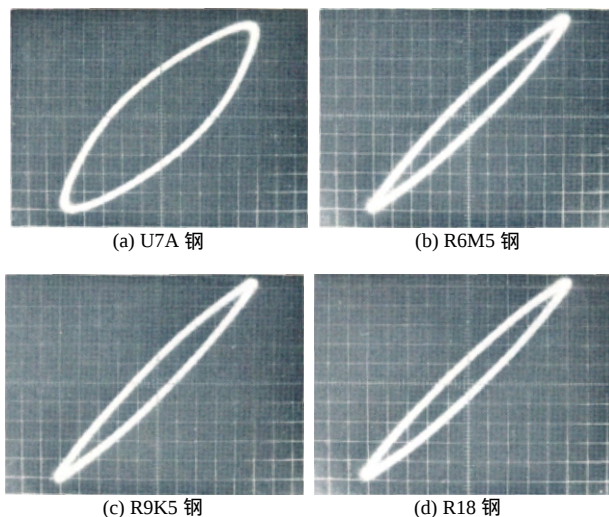


图 2 不同工件材料的动态磁滞回线

(2) 磁致伸缩效应。导磁材料在外界磁场的作用下,尺寸发生变化,这是应用最为广泛的一种磁致效应,广泛应用于位移传感器^[13]、换能器^[14]、伸缩制动器^[15]、泵^[16]等器件的设计。导磁材料在交变磁场中的伸缩可以看作是一个“锻造”过程,可以造成材料晶粒的细化,进而使得材料强化,如图 3 所示^[17]。已有研究认为这是磁化刀具性能得到提升的主要原因^[18]。另外,利用磁致伸缩效应,可以改善工件材料去除过程的回弹现象,控制工件材料的非期望流动,有利于精密超精密加工过程中极限加工精度和加工表面质量的实现^[19]。

(3) 磁致相变效应。导磁材料的微观组织在磁场所造成的体积力作用下可能发生相变或阻止相变的发生,比如高速钢刀具材料中的残余奥氏体可以在磁场的作用下转变为马氏体,从而提高了刀具材料的韧性^[20]。ALSHITS 等^[22]将这种现象归结为“磁致塑性”,并在文献[21]中对这种现象产生的机理进行了初步探讨,并且预测此种方法对于残余应力的消除十分有效,后续的研究者验证了 ALSHITS 的推论,发展了一系列磁处理方法来消除残余应力。从现有研究中可以看出,磁场辅助加工可以降低加工过程产生的残余应力(主要是加工后快速去除),另外,磁致相变效应对控制残余奥氏体的产生有很大帮助,因此在加工过程中对马氏体钢等工件材料进行磁化,可以降低白层等变质层出现的可能性。

(4) 磁致扩散效应。同时相关研究指出,在足

够大的磁场强度条件下,材料晶界处会堆积大量的位错,降低材料的塑性^[17],对于高速钢刀具材料而言,这是一个不利的影响,但是对于工件材料而言,这有利于减小加工过程的材料变形,从而降低切削力和切削热。同时材料内部位错和空位的出现将增加切削液的毛细作用,可能提高精密超精密加工过程中切削液向加工区域的渗透能力。

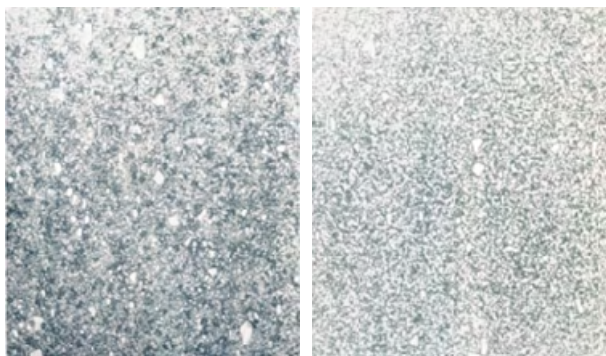


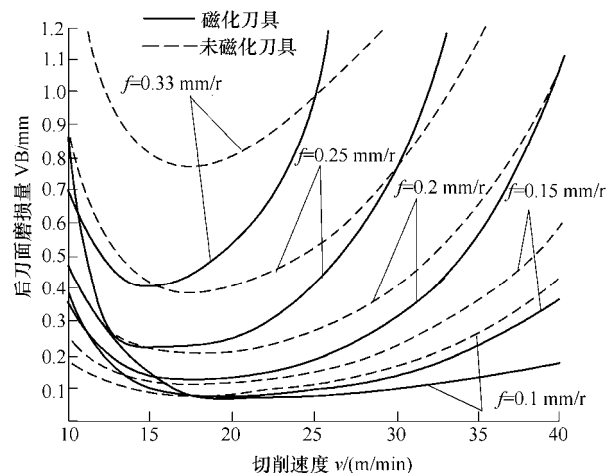
图3 高速钢磁处理前后的金相组织对比

2 磁化对刀具材料的性能影响

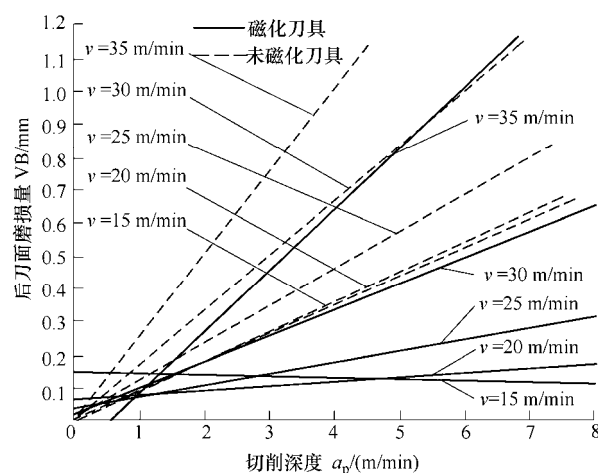
磁场在加工过程中的第一个应用就是处理刀具材料,主要是高速钢材料。许立和刘为民发现磁化处理高速钢刀具可提高其耐用度 1.5 ~ 3.0 倍,特定情况下,刀具寿命可提高 4 ~ 6 倍^[23],如图 4 所示。但是从图中可以看出,随着切削速度的提高,磁化刀具的切削性能提升不明显,甚至不如相同切削条件下的未磁化刀具。

李庆华等^[20]利用低频脉冲对高速钢刀具进行磁化,发现磁化后的刀具材料强度和韧性均有提高。周春喜对钨系(W16)和钨钴系(W6)两种高速钢刀具材料的磁化切削效果进行了分析,发现钨钴系高速钢的剩磁稳定性好^[24],因此其磁化切削效果比钨系高速钢好。波斯特尼柯夫认为磁场可以使高速钢内的残余奥氏体转化为马氏体,同时使碳化物的分布更加均匀,提高刀具的抗冲击和抗崩刃能力,同时磁化处理造成高速钢的磁致伸缩强化或磁致扩散硬化,从而提高了刀具的强度和耐用度。但是波斯特尼柯夫也发现充磁时的磁场强度并非越大越好,过高的磁场强度会使高速钢材料变脆^[17],可以归结为第 1 节中提到的“磁致扩散”效应。景旭文等^[25]的研究认为磁化可以减少刀具的残余应力,从而提高刀具的耐用度。张建中的研究认为利用磁化处理的刀具加工非磁性材料时,刀具内部最好留有剩磁且极性为 N 极,以减小热电磨损。同时他指出磁化刀具的加工效果与切削温度的高低密切相关^[26]。

BOBROVOSKII 等^[27-28]发现在钻削过程中在线磁化钻头可以使钻头寿命明显增加,而且效果要优于离线磁化钻头的方法。PAL 等^[29]认为脉冲磁场对刀具性能的提升比稳态磁场更加有效。BAGCHI 等^[30]利用磁化高速钢刀具切削低碳钢,发现磁场的存在可以使刀屑摩擦因数降低,从而降低了刀具磨损。而大量在磁场作用下的摩擦学研究成果也表明,磁场确实可以显著降低摩擦副之间的摩擦因数和磨损率^[31-34]。但是, GHOSH 等^[35]的后续研究发现磁场的施加可能加剧刀具材料和被加工工件材料之间的扩散磨损。景维钟等^[36]认为磁化刀具在切削过程中产生的积屑瘤较普通刀具的稳定且牢固,从而使刀具的切削性能得到改善,这也从一个侧面验证了 GHOSH 等提出的“磁场的施加可能加剧刀具材料和被加工工件材料之间的扩散磨损”这一推论。



(a) 不同进给量下切削速度的影响
(切削深度 1 mm, 切削时间 60 min)



(b) 不同切削速度下切削速度的影响
(进给量 0.1 mm/r, 切削时间 60 min)

图4 切削工艺参数对磁化前后刀具寿命的影响

磁化刀具切削性能方面,曹志锡等^[37]综合比较了磁化刀具和非磁化刀具对切削力、切削功率、切

削热及加工精度方面的影响,发现磁化切削可以改善高速钢刀具的切削性能。郭培全等^[38]的研究表明,磁化刀具可以有效降低切削力。黄传真等^[39]的研究认为相对于高速切削,低速切削时磁化刀具能达到较好效果,这与文献[23]的结论相吻合。原因在于:随着切削速度的提高,切削温度升高,结合切削冲击的作用下,出现了消磁现象,磁致伸缩强化刀具现象被弱化,从而丧失了磁化刀具的优势。胡凤兰等^[40]研究了钻头磁化对深孔零件加工质量的影响,认为磁化钻头可以带走更多的切削热,但是钻头的充磁强度要达到一定值时,对加工质量的提升作用才会变得明显。唐馨如^[41]的研究表明,磁化高速钢刀具车削中碳钢(45 钢)时,切削温度有所降低,在刀具极性为 N 极和低速切削时,降温效果更加显著。但是 MANSORI 等^[42]的研究发现同样使用高速钢刀具车削中碳钢(XC38),磁场的施加反而增加了切削温度(利用红外热像仪测量),可能的解释是磁化造成了刀具材料热物理属性的变化,从而改变了刀具和工件材料之间的热量分配和传递,进而影响了切削温度的分布。NECIB 等^[43]的研究也得到了类似的结论,如图 5 所示。

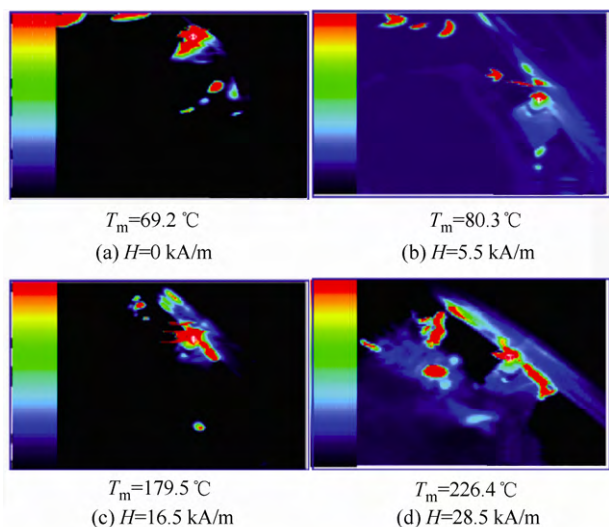


图 5 不同磁场强度对最高切削温度的影响

高速钢材料均为铁磁性材料,具有较高的剩磁感应强度和较大的矫顽磁力,高速钢的消磁温度(居里点)在 760 °C 左右,而高速钢刀具应用条件下的切削温度一般都在这个温度以下,所以高速钢刀具的磁化切削具有较好的效果。但是,随着工具技术的发展,大部分高速钢刀具被硬质合金刀具所取代,而硬质合金材料的磁导率和磁化强度(只有硬质合金中的 Co 元素具有铁磁性)远低于高速钢材料,因此刀具磁化的效果不明显。另外涂层硬质合金刀具得到了广泛的应用,而涂层材料的磁导率和磁化强

度更低,因此磁化刀具方法在硬质合金刀具,特别是涂层硬质合金刀具的应用上受到很大的限制。从文献年代上也可以看出,大部分刀具磁化的相关文献集中在 1980—2000 年之间,2000 年之后的相关研究较少。

3 磁化对工件材料性能的影响

加工过程中磁化工件的可操作性比磁化刀具难度大得多,因此相关研究较少。汤铭权对磁化切削的形式和工作原理进行了详尽的说明,并用大量的工业应用实例说明了磁化刀具或磁化工件对工艺效果的提升^[1]。周效才介绍了苏联研究成功的一种轴类零件的磁场磨削新工艺,在零件的加工区内(不是整个零件)建立一个磁场,专门磨削大型高强度铸铁轴类零件。此种方法可以降低磨削力、提升磨削质量,但是并没有对其机理进行探讨^[44]。

PRASAD 等^[45]利用脉冲磁场对冷轧钢进行了磁处理,发现磁处理后的冷轧钢硬度有所降低,冷轧变形量越大,磁处理后的硬度下降越明显,原因应该是磁场降低了冷轧钢内部的塑性变形。KLAMECKI 等^[46-47]的研究表明处理冷轧钢的脉冲磁场(100 Hz)强度增加(从 100 G 到 500 G),冷轧钢的硬度明显下降,残余应力越高,硬度的下降越明显。缪霞等^[48]的研究发现磁处理可以显著降低 GCr15 轴承环内部的残余应力,并引入了弗兰克-瑞德源的位错增殖机制,从位错角度阐释磁处理对残余应力的作用机制。HOCKMAN 等^[49]的研究也发现交变低强度磁场可以改变材料内部位错和空位的分布状态。但是 JOHNSON 和 LO 分别对冷拔钢棒、冷作硬化镍棒和磁薄膜三种材料进行了磁处理,却并未发现材料性能的明显改变^[50-51]。通过脉冲磁场^[52]、静态磁场^[53]或交变磁场^[53]对钢材进行热处理后,均发现钢材的疲劳强度有所提升,交变应力条件下的裂纹扩展被有效抑制。因此有理由相信磁场的施加对残余应力、磨削裂纹等加工缺陷的产生会有一定的抑制作用。但是磁场对工件材料性能,尤其是与加工过程相关的动态力学性能的影响还未有一个统一的结论,还需要深入研究。

BATAINEH 等^[54]对高速钢钻头和待钻削的冷轧钢分别进行脉冲磁场的磁化处理,发现利用磁化钻头加工未磁化工件材料时,钻头寿命增加 15%,而使用磁化钻头加工磁化后的工件材料时,钻头寿命提高了 35%,他认为磁化可以使冷轧态工件材料的硬度降低,同时工件材料内部硬质点的分布更加均匀,这分别与 PRASAD 等^[45]和波斯特尼夫^[17]的

研究结论不谋而合。NECIB 等^[43]发现脉冲磁场的施加会提高工件材料的韧性，工件材料的断屑难度增加，如图7所示。

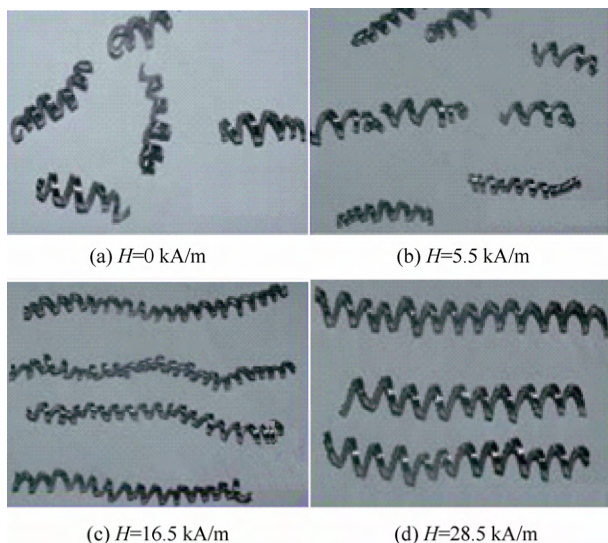


图6 不同磁场强度对切屑形貌的影响

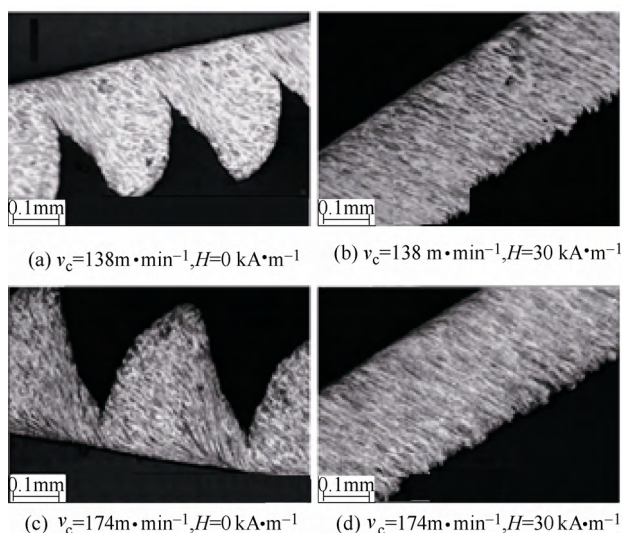


图7 磁场对切屑锯齿化的影响

MANSORI 等^[55]对磁场辅助切削的表面塑性变形进行了研究，工件材料为调质态的45钢，研究发现随着磁场强度的增加，第二变形区的厚度有所增加，同时切屑的锯齿化程度大幅度减轻，如图7所示。但是，本文作者进行了类似的磁场辅助车削试验，工件材料、刀具和车削工艺参数相同，所施加的磁场和文献^[55]中的类似，但是并未发现切屑形貌的明显变化。MANSORI 等^[56]还发现磁场的施加提高了工件材料的可加工性，改变了剪切角、剪应变和切削厚度比，并且影响了刀屑接触状态，并且磁性材料和非磁性材料的磁场辅助加工均可达到较好的效果，如图8所示。

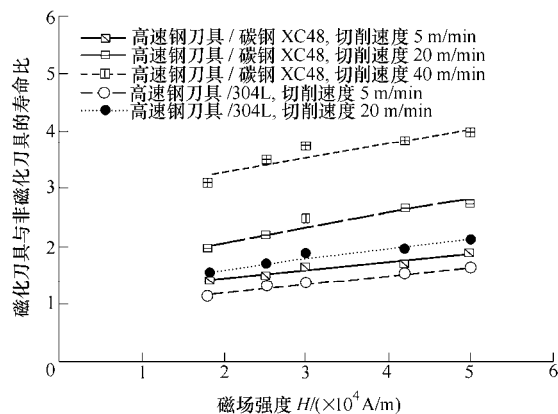


图8 铁磁材料和非铁磁材料的加工效果

磁性材料和非磁性材料在磁场中均会被磁化，区别在于：撤掉磁场后，磁性材料保留一定的磁性(剩磁)，而非磁性材料基本没有磁性。磁致效应发生的基础是工件材料在加工过程中被磁化，因此磁致效应作用的效果取决于磁化过程材料的性能变化，与是否为磁性材料无关。从原理上说，只要磁场足够强大，任何导电材料都会被磁化，所以从某种意义上说，磁场辅助加工的工件材料对象范围很广。

4 加工过程中磁场作用的基本理论

在磁场作用下的导磁材料，可以看成是一个热力学系统，近似为一个无限小状态变化的可逆过程，满足热力学第二定律^[57]，即

$$dU = Tds + dA \quad (1)$$

式中， dU 是系统内能的变化； $Tds=dQ$ 是系统吸收的热量(ds 是系统内能的变化)； dA 为外力对系统做的功，其表达式为

$$dA = \mu_0 HdM - pdV \quad (2)$$

式(2)中第一项是使系统磁化的功， μ_0 为磁导率， H 为磁场强度， M 为磁化强度；第二项是机械功， p 为内应力，可以认为与材料变形过程中的外应力大小相同， V 为变形材料体积。式(1)可以写成

$$TdS = dU - \mu_0 HdM + pdV \quad (3)$$

考虑到内能 U 是绝对温度 T 和磁化强度 M 的函数，则有

$$TdS = \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_m dT + \left[\left(\frac{\partial U}{\partial M} \right)_T - \mu_0 H \right] dM + pdV \quad (4)$$

磁介质内能 U 只是温度 T 的函数即

$$\left(\frac{\partial U}{\partial M} \right)_T = 0$$

式(4)可以写成

$$TdS = C_m dT - \mu_0 H dM + p dV \quad (5)$$

式中, $C_m = \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_m$ 称为磁化热容量, 是正数。式(5)是磁化效应的热力学方程。

等温磁化过程, $dT=0$, 同时不存在材料去除引起的外应力, 则 $p dV=0$, 式(5)变为 $TdS = -\mu_0 H dM$, 因为 $dM>0$, 所以 $TdS = dQ < 0$, 系统放出热量; 绝热退磁过程, $dQ=TdS=0$, 式(5)变为

$$dT = \frac{\mu_0 H dM - p dV}{C_m}$$

因为 $dM<0$, $C_m>0$, 材料加工中, 外界对材料做功, 材料发生塑性变形, $p dV>0$, 所以 $dT<0$, 系统温度降低。

从上述理论推导中可以发现, 在热磁转化过程中, 材料变形会导致系统温度的降低; 而在变形能转化过程中, 材料变形能转化成热能, 导致系统温度的升高, 这个矛盾过程的平衡决定了热-磁-变形相互转化的最终结果。电磁学研究往往忽略固态磁性材料体积的微小变化, 也就是认为 $p dV=0$, 并以此为基础开展相应的热磁效应研究, 对于材料加工过程, 这个简化是不合理的。因此磁场辅助加工的热-磁-变形三种能场耦合规律的研究是非常重要的。

外应力可以引起材料内应力, 进而改变磁热效应的最终结果。磁场本身也可以使材料内部的应力状态发生改变, 这也是磁致伸缩现象发生的本质原因, 磁致应变往往和磁场强度存在线性关系, 如式(6), 这也是磁致伸缩应用于精密驱动装置的基础

$$\lambda_H = wH \quad (6)$$

式中, λ_H 是沿磁场方向的磁致伸缩应变; w 为磁致应变和磁场强度的比例系数。

磁致伸缩应力和磁致伸缩应变存在近似线性的关系

$$\sigma_{im} \approx G\lambda_H \quad (7)$$

式中, σ_{im} 是磁致伸缩应力的绝对值; G 为材料的弹性模量。

磁场作用条件下的内应力可以用式(8)表示

$$\sigma_{iH} = \sigma_i - \sigma_{im} = \sigma_i - G\lambda_H \quad (8)$$

式中, σ_{iH} 是磁场作用条件下材料的内应力; σ_i 是未施加磁场条件下的初始应力。

磁致应变同时影响了材料内部的位错运动^[58], 而位错运动引起材料的塑性应变, 甚至材料的去除。MUJU 等^[59-60]的研究发现, 有无磁场条件下的位错

运动速度符合下列关系

$$\frac{V_H}{V_0} = \exp\left(\frac{-vG\lambda_s}{kT}\right) \quad (9)$$

式中, V_H 和 V_0 分别是有无磁场作用条件下的位错运动速度; v 是活化体积; k 是 Boltzmann 常数; T 为绝对温度; λ_s 为 λ_H 在位错运动方向上的分量。

ALSHITS 等^[61]还特别对非磁性材料在磁场中的位错运动速度进行了分析, 发现有无磁场条件下的位错运动速度符合下列关系

$$\frac{V_H}{V_0} \approx \exp(\mu_0 H^2 / B) \quad (10)$$

式中, B 为磁感强度。

从上述理论推导中可以发现, 磁场对材料的位错运动有一定的促进作用, 同时磁场会降低温度, 进而降低材料的位错运动, 而且位错运动的形式多种多样, 位错运动与材料塑性变形的关系十分复杂, 因此磁场和材料位错运动之间的关系难以确定, 这也是为什么已有的研究成果在许多磁场辅助加工的核心问题上均未达成一致, 甚至出现了完全矛盾的试验结果。磁场最终是否能对材料去除过程起到积极作用取决于热-磁-变形三种能场的耦合结果, 因此三种能场的耦合规律需要更加深入的研究。

6 结论

磁场辅助加工方法出现于 20 世纪 50 年代, 时至今日积累了大量的试验数据和实践经验, 在技术发展的长河里沉沉浮浮, 但一直未有实质性的突破, 主要原因在于这是一个多学科交叉的领域, 只有材料、机械、传热、电磁等不同学科知识的交汇融合才能充分揭示磁致效应的耦合机制。

能量场辅助加工方法逐渐成为机械加工领域的研究热点, 磁场辅助加工的低成本、便捷性优势在所有能量场辅助加工方法中尤其突出, 同时相关技术的发展进步也为磁场辅助加工技术的再次繁荣提供了条件。

(1) 磁-热-力耦合理论的突破: 强磁场作为一种外界输入能量, 影响了已有材料去除过程中的热-力耦合平衡, 消磁过程抵消了热量, 从而降低了温度, 材料软化程度的降低又会增加切削力, 力的增加又会增加热量产生, 最终热-力-磁耦合会达到一个平衡点。热-力耦合过程已有大量的研究, 而磁-热-力耦合过程的研究将成为一个新的理论突破口, 同时学科交叉及各个学科理论水平和试验技术的提升为磁-热-力耦合理论的突破提供了必要条件。

(2) 大功率电源的发展: 产生磁场所需的直流或脉冲大功率电源技术在近十年有了长足进步, 可以提供磁场辅助加工所需的高强度稳定磁场或脉冲磁场。

(3) 磁场聚能技术的发展: 传统磁场往往是开放式的, 真正用于加工区域的磁场能量只有总磁场能量的十分之一甚至更少, 而近年来出现的磁场聚能技术, 通过一个高导磁率材料做成的聚能器将磁力线精确集中在某一区域, 将此区域加热或磁化, 从而使得磁场具有方向性, 同时改变了磁场的分布梯度, 实现了高密度磁能的定向输入, 提高磁化的效果和磁化的连续性。

(4) 磁体制造技术的发展: 对零件, 特别是具有复杂几何形状零件的磁化, 需要几何形状复杂的磁体, 而磁体的几何形状精度和表面质量都对磁化效果有巨大的影响。随着粉末冶金、精密加工技术的发展, 异型磁体的制造不再是一个难题, 也为磁场辅助加工设备提供了硬件支持。

(5) 磁场设计技术的发展: 随着仿真技术的进步, 磁场设计手段更加完善, 甚至可以实现根据磁场场型设计磁体的布置和电流参数的设置, 相关技术为磁场辅助加工设备提供了软件支持。

随着关键科学问题和核心技术问题的解决, 磁场辅助加工技术将焕发青春, 取得突破性的进展, 期待着更多学者加入到这一领域的研究中来。

参 考 文 献

- [1] 汤铭权. 磁化切削——一种新型的切削加工方法[J]. 江苏机械, 1987, 7(3): 21-26.
TANG Mingquan. Magnetic cutting-a new type of cutting method[J]. Jiangsu Machinery, 1987, 7(3): 21-26.
- [2] ZHOU Ming, WANG X J, NGOI B K A, et al. Brittle-ductile transition in the diamond cutting of glasses with the aid of ultrasonic vibration[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 121(1): 243-251.
- [3] LIANG Zhiqiang, WANG Xibin, ZHAO Wenxiang, et al. A feasibility study on elliptical ultrasonic assisted grinding of sapphire substrate[J]. International Journal of Abrasive Technology, 2010, 3(3): 190-202.
- [4] ZHENG Shuyou, FENG Pingfa, XU Xipeng, et al. Experimental study on ultrasonic face machining of glass[C]//Proceedings of the 16th International Symposium on Electromachining, 2010, 407-410.
- [5] 潘洪平, 梁迎春. 陶瓷球的超声振动研磨[J]. 哈尔滨理工大学学报, 1999, 4(3): 29-33.
PAN hongping, LIANG Yingchun. Ultrasonic vibration lapping of ceramics ball[J]. Journal Harbin University of Science and Technology, 1999, 4(3): 29-33.
- [6] 廖文林, 戴一帆, 周林, 等. 离子束抛光加工矩形离轴非球面镜[J]. 国防科技大学学报, 2011, 33(1): 100-104.
LIAO wenlin, DAI Yifan, ZHOU Lin, et al. Ion beam figuring for rectangular off-axis aspheric mirrors[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2011, 33(1): 100-104.
- [7] FANG F Z, CHEN Y H, ZHANG X D, et al. Nanometric cutting of single crystal silicon surfaces modified by ion implantation[J]. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2011, 60(1): 527-530.
- [8] 钟敏霖, 刘文今. 国际激光材料加工研究的主导领域与热点[J]. 中国激光, 2008, 35(11): 1653-1659.
ZHONG Minlin, LIU Wenjin. Leading areas and hot topics on global laser materials processing research[j]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35(11): 1653-1659.
- [9] RICHARDS P L. Support of NASA ADR/cross-enterprise NRA advanced adiabatic demagnetization refrigerators for continuous cooling from 10K to 50mK, development of a heat switch[J]. NASA Report, 2005.
- [10] LORENZ E N. Static stability and atmospheric energy[M]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, Department of Meteorology, 1957.
- [11] ARKHANGELSKAYA G A, DIKAN A I, DOBROKHOTOVA V B. In questions of electrophysics of friction and cutting[J]. Tr. Grok. Politekh. Ins.t, 1974, 30(4): 40.
- [12] 姜峰. 不同冷却润滑条件 Ti6Al4V 高速加工机理研究[D]. 济南: 山东大学, 2009.
JIANG Feng. Study on Ti6Al4V high-speed mechanism under different cooling conditions[D]. Jinan: Shandong University, 2009.
- [13] 李春楠, 卢云, 兰中文, 等. 磁致伸缩位移传感器的研究进展[J]. 实验科学与技术, 2008, 6(1): 10-12.
LI chunnan, LU Yun, LAN Zhongwen, et al. Progress in research of magnetostrictive position sensor[J]. Experiment Science and Technology, 2008, 6(1): 10-12.
- [14] 薛淼. 超磁致伸缩材料在换能器中的应用研究[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2007.
XUE Miao. The research on application of giant magnetostrictive materials in transducer[D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science and Technology, 2007.
- [15] 张成明. 超磁致伸缩致动器的电—磁—热基础理论研究与应用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
ZHANG Chengming. Research on the electric-magnetic-thermal characteristics of giant magnetostrictive actuator and its applications[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [16] 赵亚鹏. 超磁致伸缩泵设计理论与实验研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013.
ZHAO Yapeng. Design theory and experiments study of giant magnetostrictive pumps[D]. Wuhan: Wuhan

- University of Technology, 2013.
- [17] 波斯特尼柯夫. 摩擦和切削及润滑中的电物理和电化学现象[M]. 北京: 国防工业出版社, 1983.
- POSTNIKOV S N. Electrophysical and electrochemical phenomena in friction, cutting and lubrication[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1983.
- [18] 周建强, 刘智军. 磁化刀具磨损机理研究[J]. 莱阳农学院学报, 1997, 14(3): 228-230.
- ZHOU Jianqiang, LIU Zhijun. Investigation on wear mechanism of cutting tools treated by magnetic field[J]. Journal of Laiyang Agricultural College, 1997, 14(3): 228-230.
- [19] 袁巨龙, 张飞虎, 戴一帆, 等. 超精密加工领域科学技术发展研究[J]. 机械工程学报, 2010, 46(15): 161-177.
- YUAN Julong, ZHANG Feihu, DAI Yifan, et al. Development research of science and technologies in ultra-precision machining field[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(15): 161-177.
- [20] 李庆华, 母德强. 低频脉冲磁化对刀具性能的影响[J]. 制造技术与机床, 2006, 49(4): 63-65.
- LI Qinghua, MU Deqiang. The influence of low frequency pulse magnetization on the performance of tools[J]. Manufacturing Technology and Machine Tools, 2006, 49(4): 63-65.
- [21] ALSHITS V I, DARINSKAYA E V, KOLDAEVA M V, et al. Magnetoplastic effect: Basic properties and physical mechanisms[J]. Crystallography Reports, 2003, 48(5): 768-795.
- [22] 蔡志鹏, 林健. 磁处理过程中磁致伸缩与残余应力关系的研究[J]. 机械工程学报, 2010, 46(22): 36-40.
- CAI Zhipeng, LIN Jian. Study on the relation of magnetostriction and residual stress relief in the process of magnetic treatment[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(22): 36-40.
- [23] 许立, 刘为民. 磁化处理高速钢车刀的切削性能[J]. 大连铁道学院学报, 1985, 6(1): 11-24.
- XU Li, LIU Weimin. Property of magnetized HSS turning tools[J]. Journal of Dalian Railway Institute, 1985, 6(1): 11-24.
- [24] 周春喜. W18 和 W6 两种刀具材料对磁化切削影响机理分析[J]. 机电工程, 1994, 1(2): 36-37.
- ZHOU Chunxi. The mechanism of W18 and W6 impact on magnetization cutting [J]. Journal of Mechanical and Electrical Engineering, 1994, 1(2): 36-37.
- [25] 景旭文, 唐馨如. 提高刀具耐用度的磁处理技术研究[J]. 机械设计与制造, 2004, 25(5): 81-83.
- JING Xuwen, TANG Xinru. Research on magnetic technology of improving cutter lifespan[J]. Machinery Design and Manufacture, 2004, 25(5): 81-83.
- [26] 张建中. 刀具刃磨后磁化处理与刀具寿命[J]. 工具技术, 1994, 28(10): 27-31.
- ZHANG Jianzhong. Magnetic treatment of tools after grinding and wear resistance of tools[J]. Tool Engineering, 1994, 28(10): 27-31.
- [27] BOBROVOSKII V A. Extending tool life by break-in TEME circuit[J]. Russ. Eng. J, 1966, 18: 70.
- [28] KANJI M, PAL D K. Thermoelectric compensation in drilling[C]//Proc. of the 3rd AIMTDR Conference, Bombay, 1969.
- [29] PAL D K, GUPTA N C D. Some experimental studies on drill wear in the presence of an alternating magnetic field[J]. J. Inst. Eng., 1973, 53: 195-200.
- [30] BAGCHI P, GHOSH A. Mechanism of cutting-tool wear in the presence of a magnetic field[J]. Indian J. Technol., 1971, 9(5): 165-169.
- [31] ZAIDI H, PAN L, PAULMIER D, et al. Influence of a magnetic field on the wear and friction behaviour of a nickel/XC 48 steel couple[J]. Wear, 1995, 181(2): 799-804.
- [32] HIRATSUKA K, SASADA T, NOROSE S. The magnetic effect on the wear of metals[J]. Wear, 1986, 110(86): 251-261.
- [33] HIRATSUKA K, SASADA T. Wear of metals in a magnetic field[J]. Wear, 1993, 160(1): 119-123.
- [34] KUMAGAI K, TAKAHASHI M, KAMIYA O. Research for wear behavior in the magnetic field[C]// Japan International Tribology Conference. II. 1990: 881-886.
- [35] MUJU M K, GHOSH A. Effect of a magnetic field on the diffusive wear of cutting tools[J]. Wear, 1980, 58(1): 137-145.
- [36] 景维中, 周汝忠. 带磁切削的机理研究[J]. 西南交通大学学报, 1994, 29(2): 170-175.
- JING Weizhong, ZHOU Ruzhong. Investigation on mechanism of cutting tools treated by magnetic field[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 1994, 29(2): 170-175.
- [37] 曹志锡, 郑梅莲. 磁化切削研究初探[J]. 江苏机械制造与自动化, 2001, 8(4): 97-99.
- CAO Zhixi, ZHENG Meilian. Elementary study on magnetic cutting[J]. Jiangsu Machine Building and Automation, 2001, 8(4): 97-99.
- [38] 郭培全, 钟康民. 高速钢刀具带磁切削[J]. 机械制造, 1998, 36(10): 23-24.
- GUO Peiquan, ZHONG Kangmin. Speed steel cutting tool treated by magnetic field[J]. Machinery, 1998, 36(10): 23-24.
- [39] 黄传真, 周建强. 磁化高速钢刀具的磨损性能研究[J]. 陶瓷学报, 1998, 19(2): 65-67.
- HUANG Chuazhen, ZHOU Jianqiang. Study on the wear performance of magnetic high speed steel cutting tool and its magnetic mechanisms[J]. Journal of Ceramics, 1998, 19(2): 65-67.
- [40] 胡凤兰, 魏华. 利用磁化切削提高深孔零件的加工质量[J]. 煤矿机械, 2010, 31(9): 119-121.

- HU Fenglan ,WEI Hua. Make use of magnetize to slice to pare to raise processing of deep bore spare parts quality[J]. Coal Mine Machinery , 2010 , 31(9) : 119-121.
- [41] 唐馨如. 磁化刀具切削温度的试验研究[J]. 镇江船舶学院学报 , 1987 , 2(2) : 55-60.
- TANG Xinru. Experimental study of cutting temperature of magnetized cutting tool[J]. Journal of Zhenjiang Shipbuilding Institute , 1987 , 2(2) : 55-60.
- [42] MANSORI M E ,PIERON F ,PAULMIER D. Reduction of tool wear in metal cutting using external electromotive sources[J]. Surface and Coatings Technology , 2003 , 163(2) : 472-477.
- [43] NECIB D ,BOUCHOUCHA A. Influence of the magnetic field on the morphology of the wear of the insert in P25 carbide without lubrication[J]. International Journal of Mechanical Engineering , 2013 , 2(4) : 65-74.
- [44] 周效才. 磁场磨削[J]. 机械制造 , 1983 , 21(9) : 46.
- ZHOU Xiaocai. Grind by magnetic field[J]. Machinery 1983 , 21(9) : 46.
- [45] PRASAD S N , SINGH P N , SINGH V. Influence of pulsating magnetic field on softening behavior of cold rolled AISI 4340 steel at room temperature[J]. Scripta Materialia , 1996 , 34(12) : 1857-860.
- [46] KLAMECKI B E. Residual stress reduction by pulsed magnetic treatment[J]. Journal of Materials Processing Technology , 2003 , 141(3) : 385-394.
- [47] KLAMECKI B E. Effects of pulsed magnetic field on rolling contact bearings[J]. International Journal of Applied Mechanics and Engineering , 2004 , 9 : 205-210.
- [48] 缪霞, 钱东升, 宋燕利. 磁处理对 GCr15 轴承环冷轧-淬火残余应力影响规律[J]. 机械工程学报 , 2014 , 50(16) : 112-118.
- MIAO Xia , QIAN Dongsheng , SONG Yanli. Influence rule of steel GCr15 in process of cold ring rolling-quenching by magnetic treatment[J]. Journal of Mechanical Engineering , 2014 , 50(16) : 112-118.
- [49] HOCHMAN R F , TSELESIN N , DRITS V. Magnetic fields :Fertile ground for materials processing[J]. Advance Materials and Processes , 1988 , 134(8) : 36-41.
- [50] JOHNSON M J ,KERDUS L C ,LO C C H ,et al. Studies on the effects of pulsed-magnetic field treatment on magnetic materials[C]//Quantitative Nondestructive Evaluation. AIP Publishing , 2002 , 615(1) : 1569-1576.
- [51] LO C C H ,JILES D C ,MINA M ,et al. Evaluation of the effects of pulsed magnetic field treatment as a nondestructive treatment for magnetic materials[J]. Materials Evaluation , 2002 , 60(8) : 971-975.
- [52] FAHMY Y , HARE T , CONRAD H , et al. Effects of a pulsed magnetic treatment on the fatigue of low carbon steel[J]. Scripta Materialia , 1998 , 38(9) : 1355-1358.
- [53] LU Baotong ,QIAO Shengru ,SUN Xiaoyan. Exploration on repairing fatigue damage of steel specimens with magnetic treatment[J]. Scripta Materialia , 1999 , 40(7) : 767-771.
- [54] BATAINEH O ,KLAMECKI B ,KOEPEKE B G. Effect of pulsed magnetic treatment on drill wear[J]. Journal of Materials Processing Technology , 2003 , 134(2) :190-196.
- [55] MANSORI M E , MKADDEM A. Surface plastic deformation in dry cutting at magnetically assisted machining[J]. Surface and Coatings Technology , 2007 , 202(4) : 1118-1122.
- [56] MANSORI M E , IORDACHE V , SEITIER P , et al. Improving surface wearing of tools by magnetization when cutting dry[J]. Surface and Coatings Technology , 2004 , 188(11) : 566-571.
- [57] 武淑萍. 工程热力学[M]. 重庆 :重庆大学出版社 ,2006.
- WU Shuping. Engineering thermodynamics[M]. Chongqing : Chongqing University Press , 2006.
- [58] ZENG W G , LIN H Q , ZHANG J X , et al. Studies of domain wall motion. I. Internal friction under magnetization[J]. Journal of Physics Condensed Matter , 1990 , 2(48) : 9531.
- [59] MUJU M K , GHOSH A. A model of adhesive wear in the presence of a magnetic field—I[J]. Wear , 1977 , 41(1) : 103-116.
- [60] MUJU M K , GHOSH A. Effect of a magnetic field on the diffusive wear of cutting tools[J]. Wear , 1980 , 58(1) : 137-145.
- [61] ALSHITS V I , DARINSKAYA E V , KOLDAEVA M V , et al. Magnetoplastic effect :Basic properties and physical mechanisms[J]. Crystallography Reports , 2003 , 48(5) : 768-795.

作者简介：姜峰，男，1981 年出生，博士，讲师。主要研究方向为先进制造技术。

E-mail : jiangfeng@hqu.edu.cn

言兰，女，1981 年出生，博士，讲师。主要研究方向为计算机辅助设计技术、先进制造技术。

E-mail : yanlan@hqu.edu.cn

黄阳，男，1991 年出生，硕士研究生。主要研究方向为高效精密磨削技术。

E-mail : 478717633@qq.com

徐西鹏，男，1965 年出生，博士，教授，博士研究生导师。主要研究方向为硬脆材料先进加工科学与技术。

E-mail : xpxu@hqu.edu.cn