

微纳织构涂层刀具研究进展*

Development of Micro/Nano-Textured Coated Cutting Tool

山东大学机械工程学院 张克栋 邓建新 姜超 陈帅 刘亚运



张克栋

博士研究生,主要从事微纳复合织构涂层刀具制备及其切削性能研究。

国内外相关研究学者采用电火花、光刻、激光等织构加工技术与气相沉积等涂层制备技术,在硬质合金、高速钢等刀具上制备了尺寸从微米级到纳米级的多种表面织构以及各种软、硬涂层,研究了其切削加工钢、铝合金、钛合金等工件材料的切削性能。结果表明,织构涂层刀具在改善涂层性能、刀-屑接触面摩擦润滑状态、降低切削力和切削温度、延缓刀具磨损等方面具有显著的效果。

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.06.038

始于材料表面,表面性能是决定其耐磨性能的关键,利用表面工程技术提高材料耐磨性能一直是研究的热点。

表面涂层技术自 20 世纪六七十年代问世以来得到迅速发展,在现代工业中应用越来越广泛,金属切削刀具、模具和耐磨零部件等都可以进行表面涂层处理,提高其表面硬度抗高温氧化性及耐磨性等,从而大幅提高涂层产品的性能和使用寿命。涂层刀具按涂层种类可分为硬涂层刀具和软涂层刀具。硬涂层刀具是在韧性较好的刀具基体上,沉积一层或多层耐磨性好的难熔化合物,如一些金属的氮化物、碳化物、氧化物、硼化物以及金刚石等,使刀具结合了基体高强度、高韧性和涂层高硬度、高耐

磨性的优点,提高了刀具的耐磨性,而不降低其整体韧性,可以有效提高刀具寿命。软涂层刀具是指在刀具表面通过涂层的方法沉积一层具有低的剪切强度和摩擦系数的固体润滑剂,如 MoS_2 、 WS_2 、石墨、软金属镍、锡、BN、石蜡等,这些具有低剪切强度的固体润滑剂易附着于摩擦表面,从而可在切削过程中起到减磨作用。涂层刀具通用性广,加工范围显著扩大,使用涂层刀具可以获得明显的经济效益,涂层刀具已经成为现代刀具的标志,也是刀具技术发展的重要方向^[2],在刀具中的使用比例已超过 50%。但传统涂层刀具仍存在着一些不足之处,比如硬涂层刀具的刀具/切屑接触区的摩擦系数较大,导致切削力、切削温度较高;软涂层刀

金属切削过程是指将工件上多余的材料层,通过切削加工被刀具切除,成为切屑,从而得到所需要的零件几何形状的过程,此过程中始终存在着刀具切削工件和工件材料抵抗切削的矛盾,从而产生一系列物理现象,如切削变形、切削力、切削热与切削温度以及工件材料的黏着和刀具磨损等^[1]。因机械、热磨损而引起的刀具快速失效早已成为制约切削加工技术发展的重要因素。磨损

* 国家自然科学基金项目(51375271)、山东省科技发展计划项目(2014GGX103026)和济南大学自主创新基金项目(201401226)资助。

具的软涂层较易磨损,磨损后难以补充,一旦磨损或脱落,涂层作用就将失效,刀具寿命较低;由于涂层厚度较薄,很容易产生尺寸效应等。

为了更进一步提高切削刀具的性能,国内外有些学者已经提出表面涂层技术与表面织构技术结合的方法,综合利用表面织构与表面涂层的作用。表面织构指利用特定的加工方法将平整的材料表面加工为具有规则造型的非光滑表面。表面织构在活塞缸套、滑动轴承、密封圈、发动机汽缸、导轨等机械零部件上的应用研究表明,它具有改善表面润滑状态和抗摩减磨的作用^[3-13]。目前,国内外已有学者进行了表面织构在切削刀具上应用的研究,研究结果均证明了表面织构具有提高刀具切削性能的功效。

微纳织构涂层刀具是在涂层刀具的基础上,利用表面织构技术,克服涂层刀具的不足,进一步提高刀具性能的一种新型切削刀具。根据织构与涂层的加工顺序不同,如图1所示,微纳织构涂层刀具可分为先织构再涂层(TCT)刀具(图1(e))以及先涂层再织构(CTT)刀具(图1(d))。将表面织构与表面涂层结合应用于刀具表面的研究虽处于起步阶段,但其研究结果均证明了表面织构与表面涂层结合应用具有进一步提高刀

具切削性能的效果。

微纳织构涂层刀具的制备

微纳织构涂层刀具的制备主要包括两部分:表面织构的制备以及表面涂层的制备。表面织构在切削刀具上的作用机理主要包括:减少刀屑接触长度、产生流体压力以及存储润滑剂和捕捉磨屑等。目前,表面织构的加工方法主要包括微切削加工^[14]、磨削加工^[15]、磨料射流加工^[16]、电火花加工^[17-18]、激光加工^[19-20]、反应离子刻蚀^[21]、光刻技术^[22-23]等,而涉及切削刀具的表面织构加工方法主要有电火花加工、光刻技术、激光加工技术。电火花加工是一种利用工具电极与工件电极之间脉冲性火花放电产生的电腐蚀现象来蚀除工件材料,以获得一定的加工形状的非接触加工方法。电火花加工方法能够满足用传统机械加工方法难于加工的硬质合金等材料的成型加工,并适用于深孔加工及复杂形状造型。光刻技术是一种利用照相复制与化学腐蚀相结合,在工件表面制备微细薄层图形的加工方法。该技术多用于半导体元器件及集成电路的制作加工,文献报道最近有研究学者已将光刻技术引入了切削刀具表面织构的制备。激光加工是一种利用激光束照射工件表面,使材料融化、气化的加工方法。激光加工方法因能量密度高、加工可控性好、加工速度快以及易实现精密加工等优点,广泛应用于制造业的诸多领域。在目前已报道的切削刀具表面织构的加工方法中,激光加工技术的应用最为广泛。

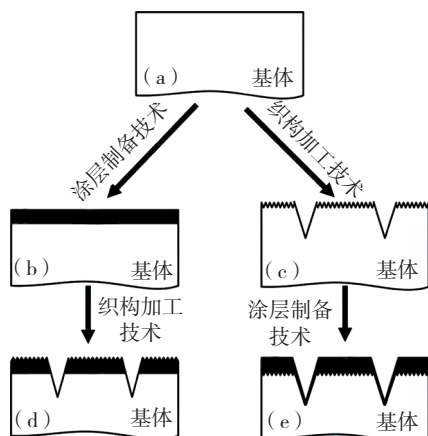
表面涂层的制备方法主要包括气相沉积、热喷涂、化学热处理、热反应扩散沉积、化学镀、复合镀、溶胶凝胶、阳极氧化(微弧氧化)等,而涉及涂层刀具的表面涂层制备方法主要为气相沉积。气相沉积技术分为物理气相沉积和化学气相沉积。物理气相沉积(Physical Vapor Deposition,

PVD)是利用某种物理过程,如物质的热蒸发或受到粒子轰击时物质表面原子的溅射等现象,实现物质原子从源物质到沉积涂层的可控转移过程,是在分子、原子的尺度上沉积涂层。真空蒸发沉积、溅射沉积、离子镀沉积、离子束合成沉积和分子束外延等属于物理气相沉积技术。它们的特点为:(1)需要使用固态或熔融态的物质作为沉积涂层的源物质;(2)源物质经过物理过程进入气相;(3)需要相对较低的气体压力环境;(4)在气相中及在衬底表面并不发生化学反应。化学气相沉积(Che-mical Vapor Deposition, CVD)是利用气态的先驱反应物通过原子、分子间化学反应的途径生成固态涂层的技术。与PVD相比,CVD过程多是在相对较高的压力和较高的沉积温度环境下进行的,因为较高的压力有助于提高涂层的沉积速率,且较高的沉积温度可保证化学反应的顺利进行。

将上述表面织构加工技术与表面涂层制备技术结合应用,可制备出不同类型的微纳织构涂层刀具。

1 TCT 刀具

Obikawa等^[23]利用光刻技术与化学气相沉积方法制备了TCT刀具。该研究首先采用直流磁控溅射的方法在硬质合金刀具基体表面涂覆厚度为0.5~1.2 μm 的金属镍,利用湿法刻蚀的光刻技术在已涂层刀具前刀面刻蚀出4种特定的织构图案,然后利用等离子化学气相沉积法(PCVD)在织构表面涂覆类金刚石薄膜(DLC)或利用直流磁控溅射法涂覆氮化钛(TiN)。图2为Obikawa等^[23]制备的4种DLC涂层微织构形貌。Enomoto等^[24]利用飞秒激光加工技术在硬质合金刀具前刀面加工出平行于主切削刃以及垂直于主切削刃的微纳复合织构(深度为100~150nm,间距为700nm),然后在织构表面利用电弧离子镀方法



(a) 基体试样; (b) 仅涂层试样;
(c) 仅织构试样; (d) 先涂层再织构试样;
(e) 先织构再涂层试样
图1 微纳织构涂层刀具制备过程示意图

沉积类金刚石(DLC)膜,制备出微纳结构 DLC 涂层刀具。本课题组利用激光加工技术与 PVD 方法制备了多种 TCT 刀具^[25-26]。首先在硬质合金刀具前刀面利用 Nd:YAG 激光加工出平行于主切削刃的微结构(深度为 50 μm ,间距为 200 μm)和用钛宝石飞秒激光加工出纳结构(深度为 150nm,间距为 550nm),然后利用 PVD 方法在织构刀具表面涂覆厚度为 1 μm 的 WS₂ 软涂层或 2 μm 的 TiAlN 硬涂层。图 3 为制备出的纳结构 WS₂ 软涂层刀具形貌。

2 CTT 刀具

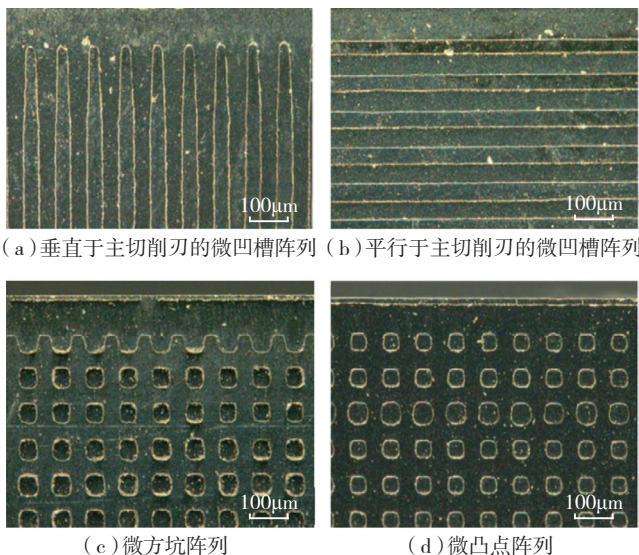


图2 刀具表面的DLC涂层微结构形貌

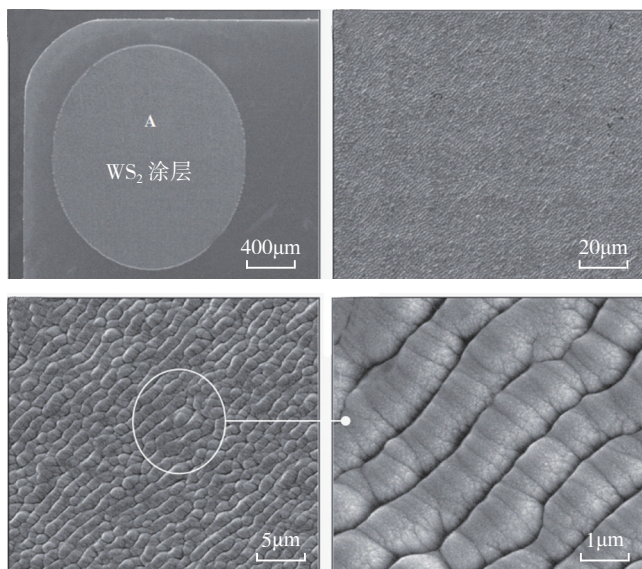


图3 纳结构WS₂软涂层刀具前刀面形貌

Da Silva 等^[27]首先利用化学沉积方法在硬质合金刀具前刀面涂覆厚度为 10.5 μm 的 TiCN-Al₂O₃-TiN 复合涂层,然后在复合涂层表面利用 Nd:YAG 激光加工出深度大约为 2.05 μm 的微结构,制备出 CTT 刀具,如图 4 所示。

作者曾利用激光加工方法与 PVD 方法制备了 CTT 刀具。首先利用 PVD 方法在硬质合金刀具表面涂覆厚度为 2 μm 的 TiAlN 硬涂层,然后利用钛宝石飞秒激光在涂层刀具表面前刀面加工出两种深度为 120nm,间距为 650nm 的纳结构图

案,制备出的 TiAlN 涂层纳结构刀具如图 5 所示。

微纳结构涂层刀具的切削性能及其作用机理

1 微纳结构涂层刀具的切削性能

本课题组利用制备的纳结构 WS₂ 软涂层刀具进行了干车削 45# 淬火钢的切削试验。结果表明,相比普通的硬质合金刀具以及仅表面织构硬质合金刀具,这种 WS₂ 软涂层纳结构刀具能够降低切削力和切削温度,在刀屑接触区域加工纳米微槽并沉积一层 WS₂ 软涂层,能够显著降

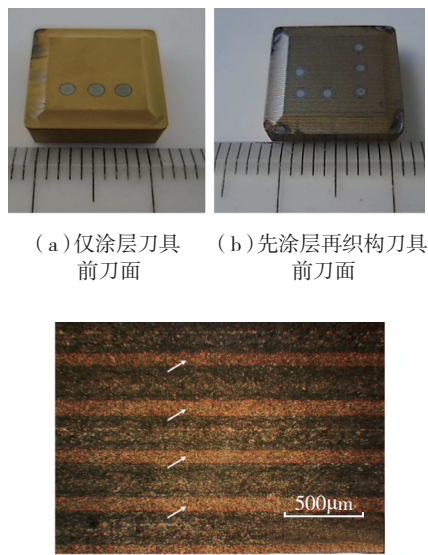


图4 CTT刀具

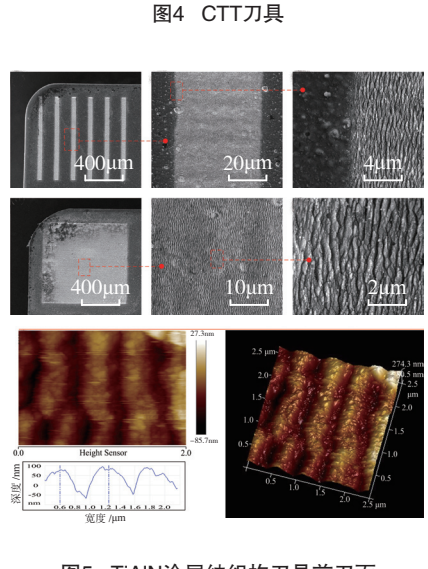


图5 TiAlN涂层纳结构刀具前刀面纳结构形貌

低刀具与切屑的平均摩擦系数,减轻工件材料粘结及刀具磨损(见图6)。随后又利用制备的微结构 TiAlN 硬涂层刀具在不同润滑方式下进行了车削 45# 淬火钢的切削试验。结果表明,不论在贫油润滑或完全润滑条件下织构涂层刀具与普通涂层刀具比较,均能够降低切削力和切削温

度(见图7);在完全润滑条件下织构涂层刀具性能最优,与普通涂层刀具比较,其高速切削下可降低切削力 21.2%~34.7%;刀具前刀面的微结构能够有效促进润滑剂渗入到刀屑接触区域,从而显著增强润滑剂的润滑作用,降低刀具磨损,提高刀具寿命。

Obikawa 等^[23]利用光刻技术在

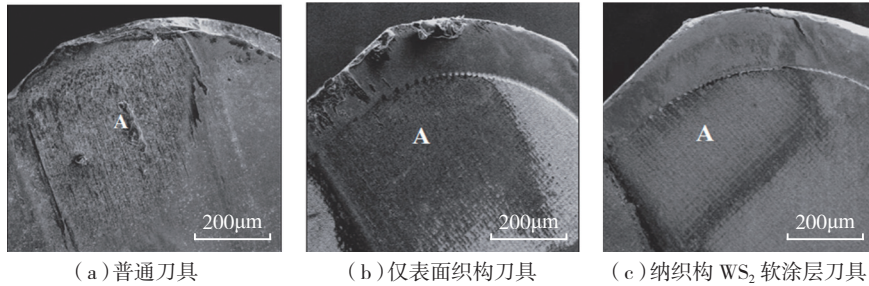


图6 织构涂层刀具、仅织构刀具与普通刀具的前刀面磨损情况对比($v=150\text{m/min}$, $a_p=0.3\text{mm}$, $f=0.1\text{mm/r}$, $t=3\text{min}$)

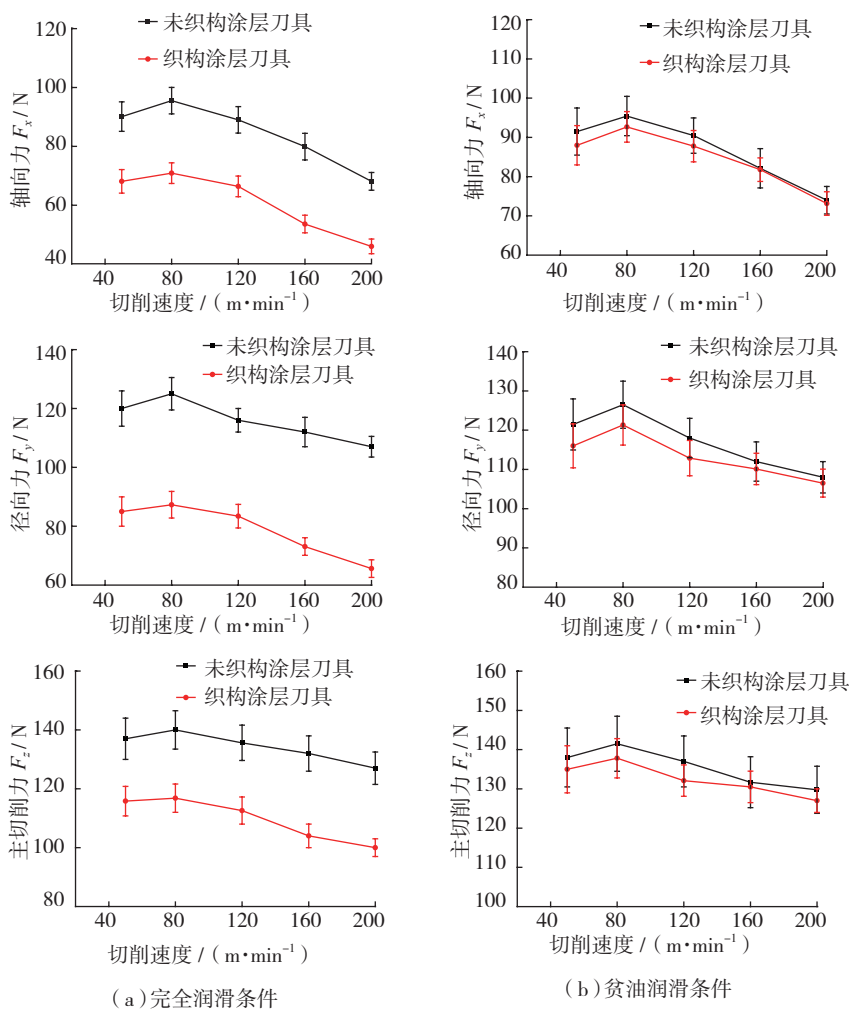


图7 不同润滑条件下未织构涂层刀具与织构涂层刀具切削45#淬火钢的切削力对比 ($a_p=0.3\text{mm}$, $f=0.1\text{mm/r}$)

硬质合金车刀前刀面加工了4种微结构(垂直于主切削刃的微凹槽阵列、平行于主切削刃的微凹槽阵列、微方坑阵列和微凸点阵列),在织构表面涂覆了类金刚石薄膜(DLC)或氮化钛(TiN),制备了微结构涂层刀具。使用该微结构涂层刀具进行直角切削 A6061 铝合金的试验研究,结果表明,在使用切削液润滑条件下,平行于主切削刃的微凹槽阵列和微凸点阵列两种织构形式的微结构涂层刀具相比未织构的普通刀具能够有效降低前刀面的摩擦系数和摩擦力;单元织构宽度的减小和织构深度的增加都将有助于提高涂微结构层刀具的切削性能。

Nevesa 等^[28]在4mm厚水层下或空气中利用 Nd:YAG 激光在2种不同平均功率(9W、15W)条件下对硬质合金刀具表面织构化,再利用 PVD 技术在织构表面沉积一层厚度为 $1.8\mu\text{m}$ 的 TiAlN 涂层,制备了4种微结构 TiAlN 涂层刀具,与未织构涂层刀具比较;然后利用制备的试样进行纳米压痕试验以及干车削 1045 钢试验,结果表明,涂层在织构试样表面的结合力均大于在未织构试样表面的结合力,因此织构涂层刀具的寿命高于未织构涂层刀具;由激光加工导致基体表面粗糙度增加从而提高涂层与基体的机械结合,以及由激光热导致的硬质合金颗粒化学改性是织构涂层刀具性能得到改善的原因。

Sugihara 等^[29]利用飞秒激光在硬质合金铣刀片前刀面加工了微纳结构,然后在刀具表面涂覆类金刚石薄膜(DLC),制备了微纳结构 DLC 涂层刀具。使用该刀具进行铣削 A5052 铝合金的试验结果表明,在润滑液作用下,微纳结构涂层刀具相比普通刀具具有良好的抗粘能力;微纳结构刀具的抗粘作用与织构的结构形式有关,带状微纳结构刀具的抗工件材料粘结的效果优于均匀

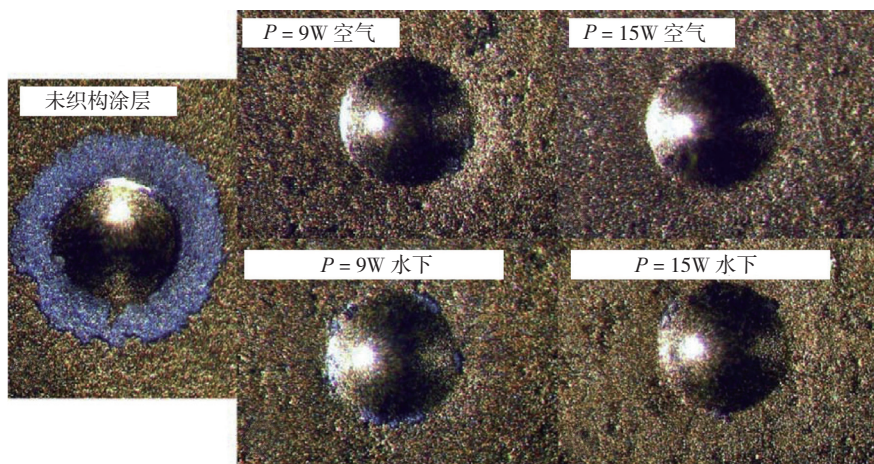


图8 未织构涂层与织构涂层试样纳米压痕标记

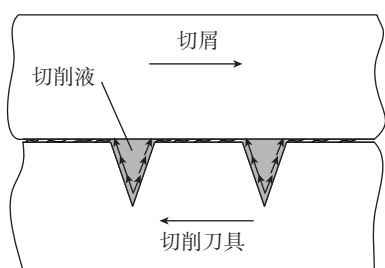


图9 液体流入前刀面织构刀具刀屑接触区域示意图

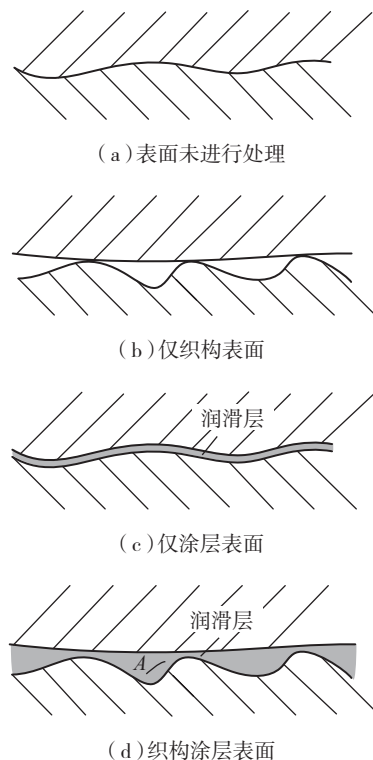


图10 滑动摩擦过程中,不同试样作用原理示意图

分布微纳织构刀具。

2 微纳织构涂层刀具改善切削性能的作用机理

上述切削试验均表明,表面织构能够有效提高涂层刀具的切削性能。目前确认的织构改善涂层刀具切削性能的作用机理包括以下3个方面:(1)刀具表面加工表面织构能够有效改善涂层性能,从而提高涂层刀具性能,如对于先织构再涂层刀具,表面织构能够提高涂层与基体的结合力。图8为织构化与未织构化TiAlN涂层刀具表面经过纳米压痕试验后表面形貌图,可以发现与未织构涂层试样比较,表面织构均能提高TiAlN涂层的结合力。(2)在刀具前刀面加工表面织构有利于润滑剂作用的发挥,能够提高刀具的润滑效果。对于液体润滑条件下的切削,涂层刀具表面织构有利于润滑剂渗入到刀屑接触区域,从而提高涂层刀具性能。如图9所示,浇注的切削液能够从刀屑接触区域外的沟槽渗入到刀屑接触区域内的沟槽,刀屑摩擦副之间产生的相对运动能够带动织构中润滑剂,将其“挤压”出表面,从而在刀屑接触区域形成润滑膜。对于织构软涂层刀具,基体表面织构有利于软涂层润滑剂的存储和供给,从而提高软涂层有效作用时间。滑动摩擦中,不同刀具作用原理见图10。如图10(d)所示,当刀屑接触区域的初始润滑层

被耗尽后,存储在织构内的润滑剂能够及时被挤压出拖覆在光滑表面,从而维持润滑层的存在^[30]。(3)表面织构的存在能够减少刀-屑实际接触面积。表面织构改善涂层性能、润滑剂作用性能以及使刀-屑接触面积的减小都将降低切屑与刀具之间的摩擦力,从而降低切削力、切削温度,并减缓刀具磨损。

结束语

微纳织构涂层刀具是将表面织构与表面涂层技术结合以改善刀具切削摩擦润滑状态的新型刀具。国内外相关研究学者采用电火花、光刻、激光等织构加工技术与气相沉积等涂层制备技术,在硬质合金、高速钢等刀具上制备了尺寸从微米级到纳米级的多种表面织构以及各种软、硬涂层,研究了其切削加工钢、铝合金、钛合金等工件材料的切削性能。结果表明,织构涂层刀具在改善涂层性能、刀-屑接触面摩擦润滑状态、降低切削力和切削温度、延缓刀具磨损等方面具有显著的效果。织构涂层刀具是一种极具发展潜力的刀具,已成为当前切削刀具研究领域的一个研究热点,在今后的研究中应将重点放在微纳复合织构在软硬复合涂层刀具上的应用,以进一步提高织构涂层刀具的切削加工性能。

参考文献

- [1] 艾兴. 高速切削加工技术. 北京: 国防工业出版社, 2004.
- [2] Klocke F, Krieg T. Coated tools for metal cutting features and applications. *Annals of the CIRP*, 1999, 48(2):515-525.
- [3] Ronen A, Etsion I, Kligerman Y. Friction-reducing surface-texturing in reciprocating automotive components. *Tribology Transactions*, 2001, 44(3):359-366.

本文共有参考文献30篇,因篇幅有限,未能一一列出,如有需要,请向本刊编辑部索取。(责编 玲犀)