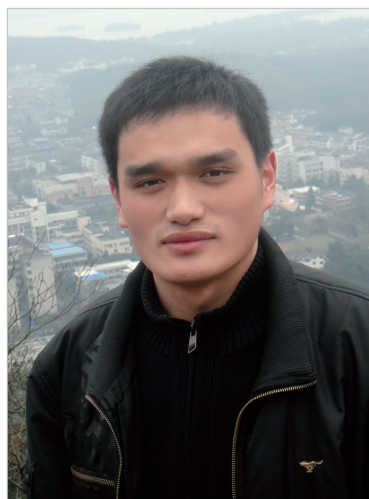


表面织构刀具的研究现状与进展*

Development and Perspective of Surface Textured Cutting Tool

山东大学机械工程学院 吴 泽 邓建新 连云崧 程宏伟 闫光远



吴 泽
博士研究生,主要从事微结构刀具
及刀具材料摩擦磨损性能的研究。

国内外相关研究学者采用电火花、光刻、激光等加工技术在硬质合金、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,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,结果表明表面织构刀具在改善刀-屑接触面摩擦润滑状态、降低切削力和切削温度、延缓刀具磨损方面具有显著的效果。

金属切削过程中,刀具与工件之间的恶劣摩擦以及切削热的共同作用将引起刀具磨损并降低工件加工质量。尤其是在难加工材料的高速切削加工过程中,切削环境更为恶劣,刀具耐用度很低。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一个重要因素,为解决这一问题,国内外众多从事切削刀具研究的学者不断寻求开发新型刀具材料、优化刀具结构、研究刀具涂层技术以及先进切削润滑冷却工艺。

近年来,摩擦学研究领域提出了一种表面织构的概念^[1-3]。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^[4-8]、滑动轴承^[9-12]、密封圈^[13-14]、发动机汽缸^[15]、导轨^[16-17]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。当前,国内外已有少数学者进行了表面织构在切削刀具上应用的研究,研究虽处于起步阶段,但其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。

* 国家自然科学基金项目(51075237)、山东省自然科学基金重点项目(ZR2010EZ002)、教育部高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20110131130002)和山东大学自主创新基金项目(2011JC001)资助。

效。

刀具表面织构的加工技术

进行结构化处理的表面因具有存储润滑剂^[18-19]、容纳磨屑^[20-21]以及提高表面润滑承载能力^[22-25]等优点,已成为当前摩擦学领域的一个研究热点。在表面织构的应用研究进程中,表面织构的加工技术也随之不断发展和丰富。目前,表面织构的加工技术主要包括微切削加工^[26]、磨削加工^[27]、磨料射流加工^[28]、电火花加工^[29-32]、激光加工^[4-10,33-34]、反应离子刻蚀^[35]、LIGA技术^[36]、光刻技术^[37]、超声加工^[38]、表面压刻技术^[39]等,而涉及切削刀具的表面织构的加工方法主要有电火花加工、光刻技术、激光加工技术。

1 刀具表面织构的电火花加工技术

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。

作者^[29-31,40-43]曾利用微细电火花加工方法在硬质合金刀具上加工微孔阵列,制备了微池自润滑刀具。采用离线制作工具电极的方式制备了直径 $\phi 0.1\text{mm}$ 的紫铜电极,使用DZW-10微细电火花加工机床在硬质合金刀具前刀面刀-屑接触区或后刀面易磨损带加工出了直径 $\phi 0.15\text{mm}$ 、深度 0.3mm 的微孔阵列(图1)。

Koshy等^[32]采用电火花的加工方法在高速钢车刀的前刀面加工了连续面型和凹槽阵列的两种表面织构。加工的两种表面织构示意图如图2所示,其中织构凹槽的宽度和深度均约为 $100\mu\text{m}$ 。

2 刀具表面织构的光刻加工技术

光刻技术是一种利用照相复制

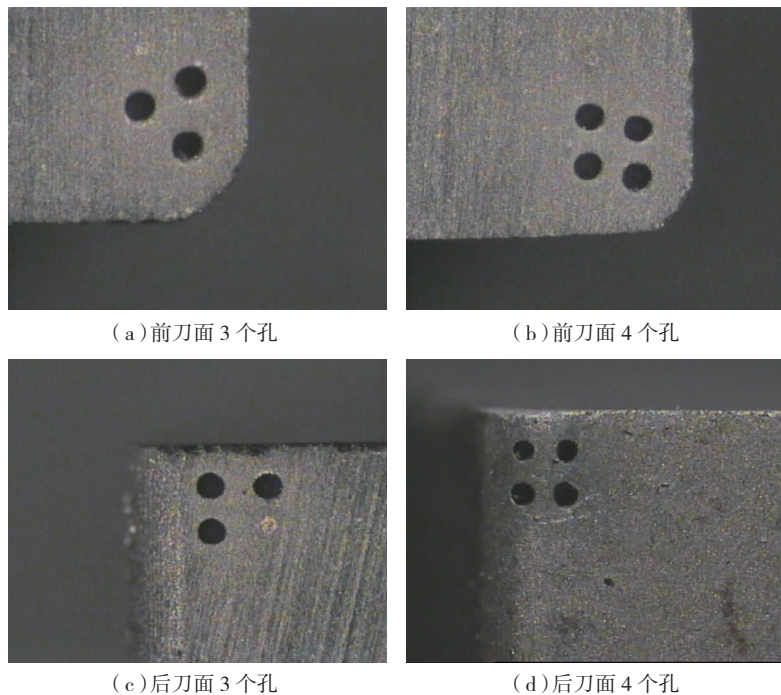


图1 硬质合金刀具前/后刀面电火花加工的微孔形貌

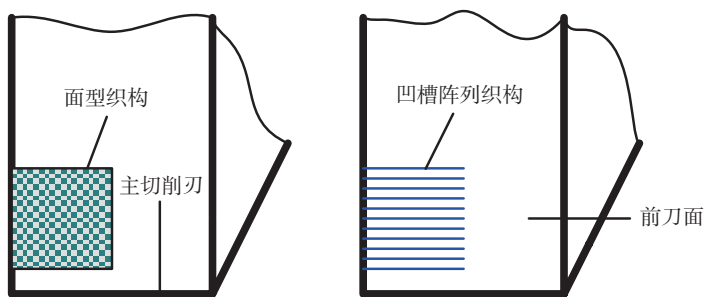


图2 高速钢刀具前刀面的织构形式

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。

Obikawa等^[37]利用光刻加工方法在硬质合金刀具前刀面制备了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、微方坑阵列及微凸点阵列4种表面织构。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 $0.5\sim 1.2\mu\text{m}$ 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3为Obikawa等制备的4种DLC涂层微织构形貌。

3 刀具表面织构的激光加工技术

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,被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也最为广泛。按照所使用的激光加工设备的不同,目前刀具表面织构的激光加工方法又

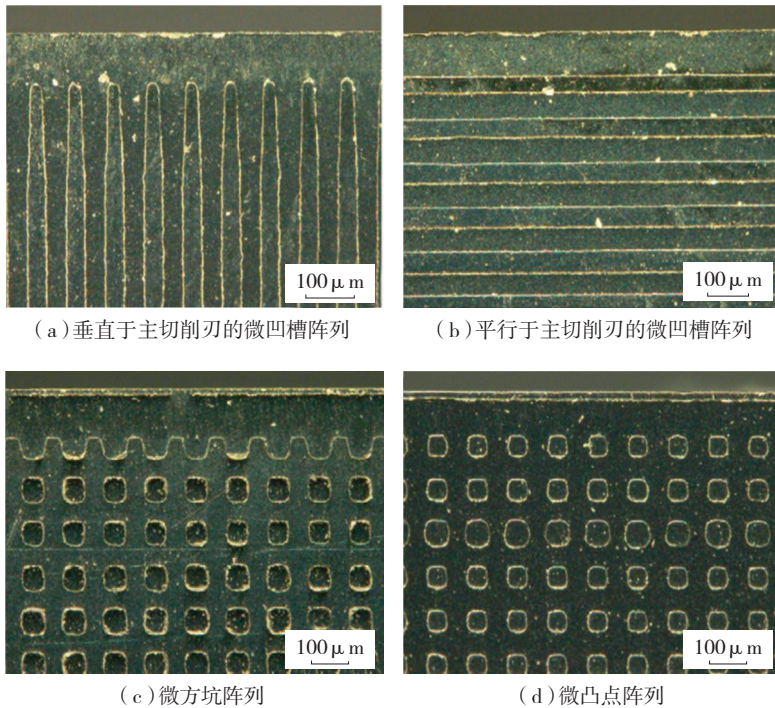


图3 刀具表面的DLC涂层微结构形貌

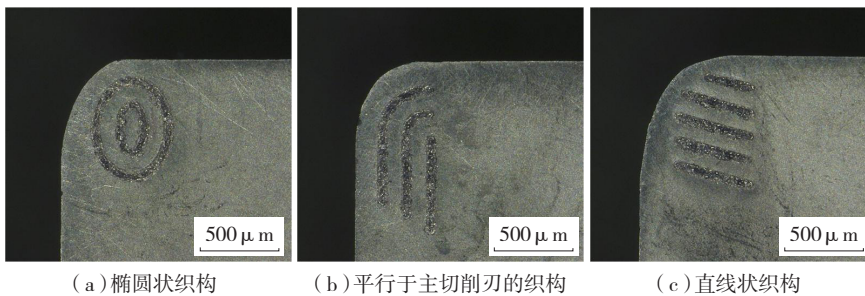


图4 微结构自润滑刀具形貌

分为Nd:YAG激光加工和钛宝石飞秒激光加工两类。

作者^[44-47]利用Nd:YAG激光打标机在硬质合金车刀片前刀面刀-屑接触区加工了多种微凹槽结构,并在结构凹槽中填充二硫化钼固体润滑剂,制备了微结构自润滑刀具(图4)。所加工的结构凹槽的宽度和深度分别约为 $50\mu\text{m}$ 和 $100\mu\text{m}$ 。李亮等^[48]同样利用激光打标机在硬质合金YG8车刀的前刀面加工了宽度 $27\mu\text{m}$ 、深度 $12\mu\text{m}$ 的微沟槽阵列。

飞秒激光因具有飞秒级超短脉冲、非常高的瞬时功率和精确的聚焦性能,在医学、超精细加工、高密度信息存储和记录等方面得到了快速

应用和发展。最近,本课题组利用钛宝石激光加工方法在硬质合金车刀

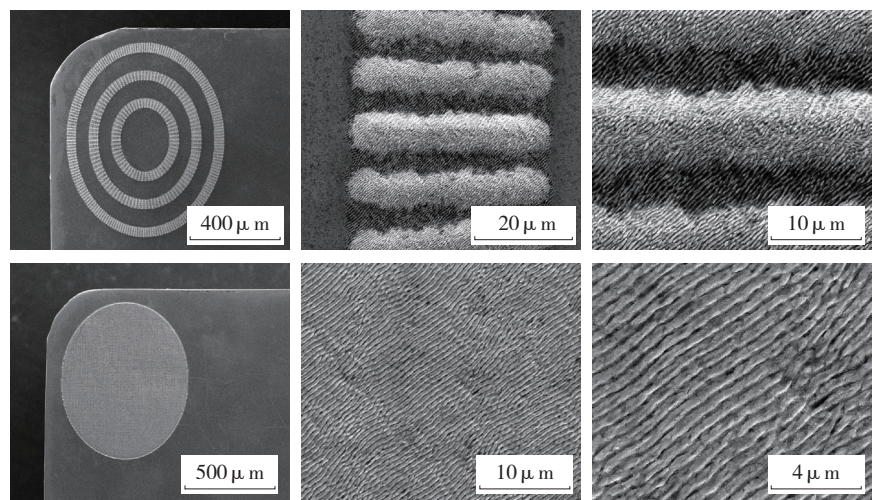


图5 飞秒激光加工的刀具前刀面纳结构形貌

片前刀面刀-屑接触区加工了纳结构(图5),所加工的结构凹槽的宽度和深度分别约为 300nm 和 400nm ,并采用非平衡磁控溅射的方法在纳结构刀具表面涂覆了二硫化钨软涂层。

Lei等^[49]利用钛宝石飞秒激光加工技术在硬质合金车刀片前刀面刀-屑接触区加工了直径为几十到几百 μm 的微孔阵列,在微孔中填充固态或液态润滑剂(图6),制备了微池刀具。Sugihara和Enomoto^[50-51]利用钛宝石飞秒激光加工技术在硬质合金铣刀片前刀面加工了微纳结构(图7),并采用等离子化学气相沉积或电弧离子镀膜方法在微纳结构表面涂覆了类金刚石薄膜;Sugihara等^[52]随后仍然利用飞秒激光加工方法在硬质合金铣刀片前刀面加工了宽度为 $20\mu\text{m}$ 、深度为 $5\mu\text{m}$ 的条纹状表面纳结构。Kawasegi等^[53]也进行了类似的研究,他们采用钛宝石飞秒激光在硬质合金车刀前刀面分别加工了垂直于切屑流动方向、平行于切屑流动方向和交叉网格状的3种表面微纳凹槽结构,凹槽的宽度和深度大约分别为 $5\mu\text{m}$ 和 $1.5\mu\text{m}$ 。

表面纳结构刀具的切削性能及其作用机理

1 表面纳结构刀具的切削性能

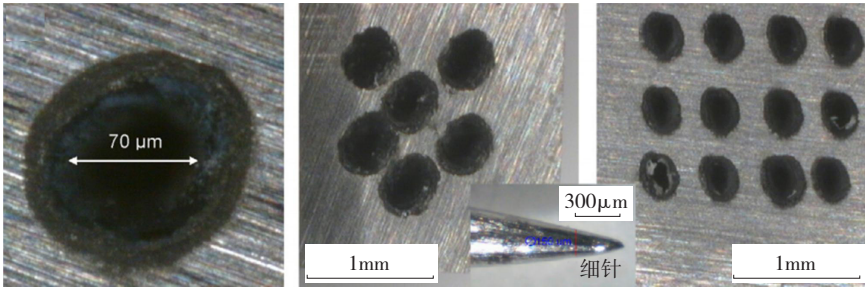
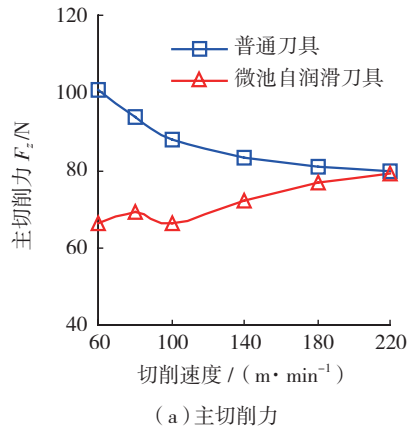
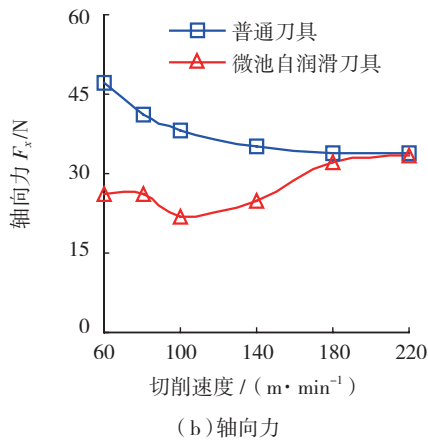


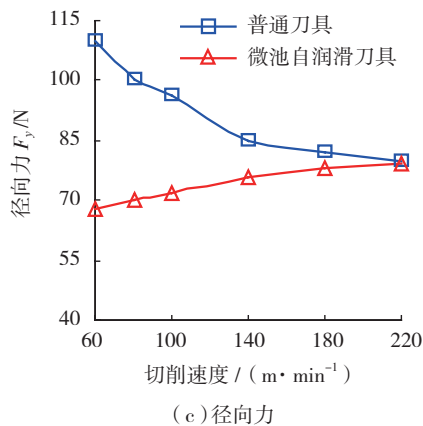
图6 飞秒激光加工的刀具前刀面微结构形貌



(a) 主切削力



(b) 轴向力

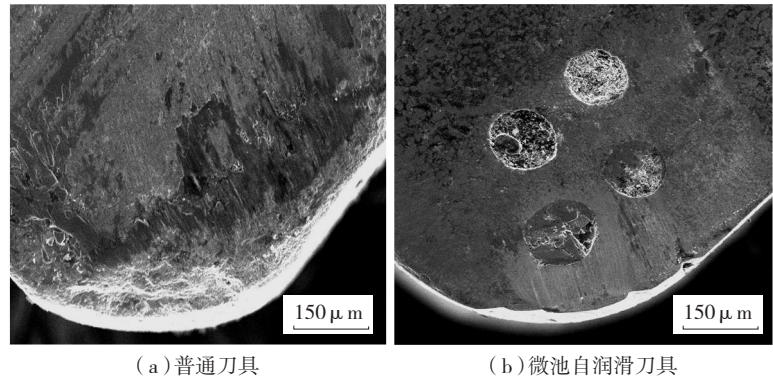


(c) 径向力

图7 微池自润滑刀具与普通刀具切削45#淬火的切削力对比($a_p=0.2\text{mm}$, $f=0.1\text{mm/r}$)

不同的表面织构加工方法所加工的刀具表面织构具有不同的微观结构,刀具表面织构的结构形式对刀具的切削性能具有一定的影响。

本课题组对制备的微池自润滑刀具进行了干车削45# 淬火的切削试验。结果表明,相比普通的硬质合金刀具,这种微池自润滑刀具能够使切削力降低25%~35%(图7),切削温度降低15%~20%;在前刀面刀-屑接触区加工微孔并填充固体润滑剂能够有效降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(图8);在后刀面加工微孔并填充固体润滑剂能够有效延缓刀具后刀面磨损。随后又制备了微织构自润滑刀具(图4),并对其进行了干车削45# 钢和Ti-6Al-4V的试验研究^[44-47]。结果表明,无论是切削钢或钛合金,这种微织构自润滑刀具与普通硬质合金刀具相比均能够降低切削力和切削温度(图9),减小切屑变形(图10和图11)并增大切屑卷曲;在切削钛合金试验中,微织构刀

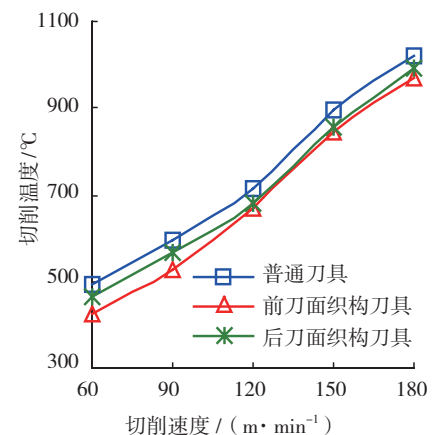
图8 微池自润滑刀具与普通刀具的前刀面磨损情况对比 ($v=220\text{m/min}$, $a_p=0.2\text{mm}$, $f=0.1\text{mm/r}$, 切削时间3min)

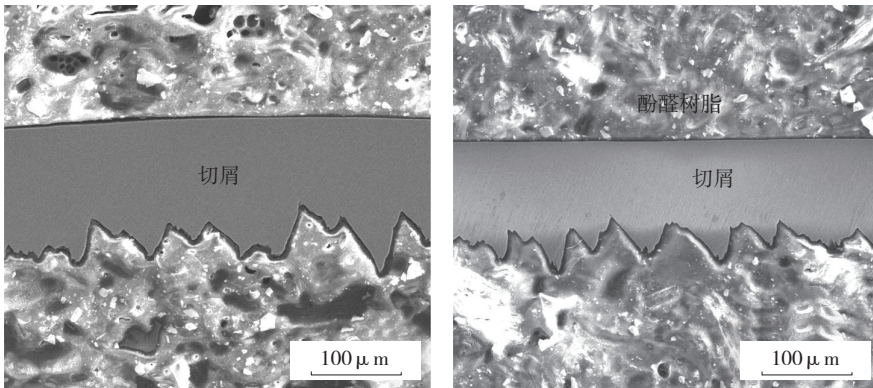
具的使用寿命相比普通刀具提高了15%左右(图12)。

Lei等^[49]利用飞秒激光在硬质合金刀具前刀面加工了微孔阵列,在微孔中填充液态或固态润滑剂,制备了微池刀具,并对其进行了车削冷轧1045钢的切削试验。结果得到了与本研究类似的结论:与普通刀

具相比,这种微池刀具使切削力降低10%~30%,刀-屑接触长度降低30%左右。

Kawasegi等^[53]使用其制备的微纳织构刀具进行了最小微量润滑(MQL)条件下车削A5052铝合金的试验研究。结果表明,在最小微量润滑切削条件下,当切削速度高于400m/min时,微纳织构刀具相比普通刀具能够有效减少铝合金材料的

图9 微织构刀具与普通刀具切削Ti-6Al-4V的切削温度对比($a_p=0.2\text{mm}$, $f=0.1\text{mm/r}$)



(a) 普通刀具 (b) 前刀面织构刀具
图10 微织构刀具与普通刀具切削Ti-6Al-4V的切屑厚度对比
($a_p=0.2\text{mm}, f=0.1\text{mm/r}, v=180\text{m/min}$)

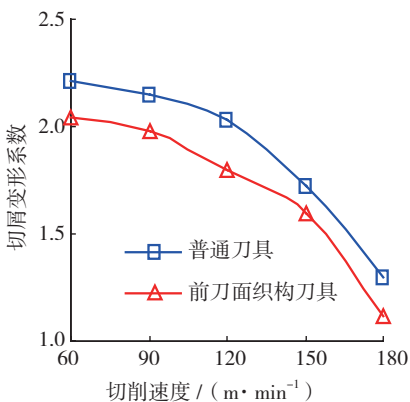


图11 微织构刀具与普通刀具切削Ti-6Al-4V的切屑变形系数对比($a_p=0.2\text{mm}, f=0.1\text{mm/r}$)

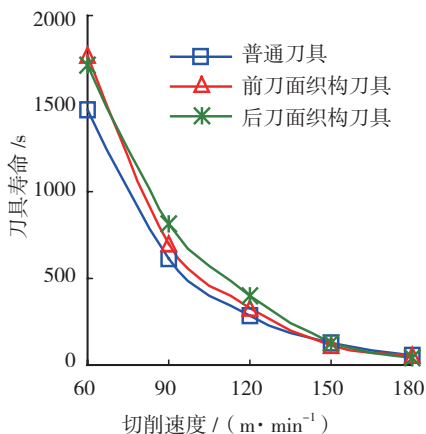


图12 微织构刀具与普通刀具切削Ti-6Al-4V的刀具寿命对比($a_p=0.2\text{mm}, f=0.1\text{mm/r}$)

粘结(图 13),从而减小刀具表面的摩擦系数、降低切削力。

Koshy 等^[32]使用其制备的表面织构高速钢车刀(图 2)进行了切削 1045 钢和 6061 铝合金的试验研究,

试验在浇注切削液条件下进行,分别采用了连续和断续两种直角切削方式。结果表明,无论是在连续还是断续切削条件下,表面织构刀具相比普通刀具均能够降低切削力;连续面型织构刀具改善切削性能的效果要优于凹槽阵列织构刀具;表面织构刀具降低切削力的效果与切削参数、表面织构的密度、偏度和峰度等参数有密切的关系。

李亮等^[48]使用其制备的微织构车刀进行了最小微量润滑条件下直角切削 Ti-6Al-4V 的试验研究。结果表明,表面微沟槽结合微量润滑可以有效改善刀-屑摩擦状况,降低切削力和切削温度;同时,表面微织构的置入在润滑条件下可有效改善钛合金的粘结状况。

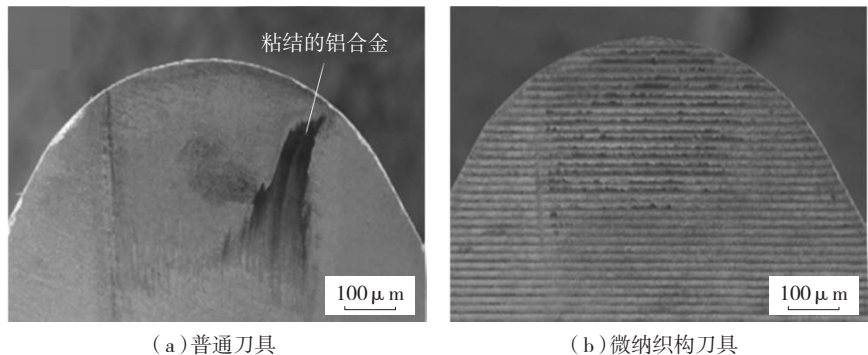
刀具涂层具有耐磨或润滑的作用,将涂层与表面织构相结合能够进

一步提高刀具的切削性能。Sugihara 等利用飞秒激光在硬质合金铣刀片前刀面加工了微纳织构,然后在刀具表面涂覆类金刚石薄膜(DLC),制备了 DLC 涂层微纳织构刀具^[50-51]。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,涂层微纳织构刀具相比普通刀具具有良好的抗粘结能力;微纳织构刀具的抗粘结作用与织构的结构形式有关,带状微纳织构刀具的抗工件材料粘结的效果优于均匀分布微纳织构刀具。

Obikawa 等利用光刻技术在硬质合金车刀前刀面加工了 4 种微织构(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),制备了涂层微织构刀具^[37]。使用该涂层微织构刀具进行直角切削 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涂层微织构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层微织构刀具的切削性能。

2 表面织构刀具改善切削性能的作用机理

切削试验研究表明,表面织构能够有效提高刀具的切削性能。认为



(a) 普通刀具 (b) 微纳织构刀具
图13 微纳织构刀具与普通刀具切削铝合金时刀具表面粘结形貌对比
($v=600\text{m/min}, f=0.1\text{mm/r}, a_p=0.2\text{mm}$)

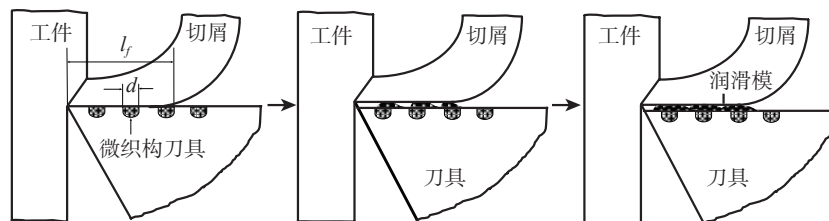
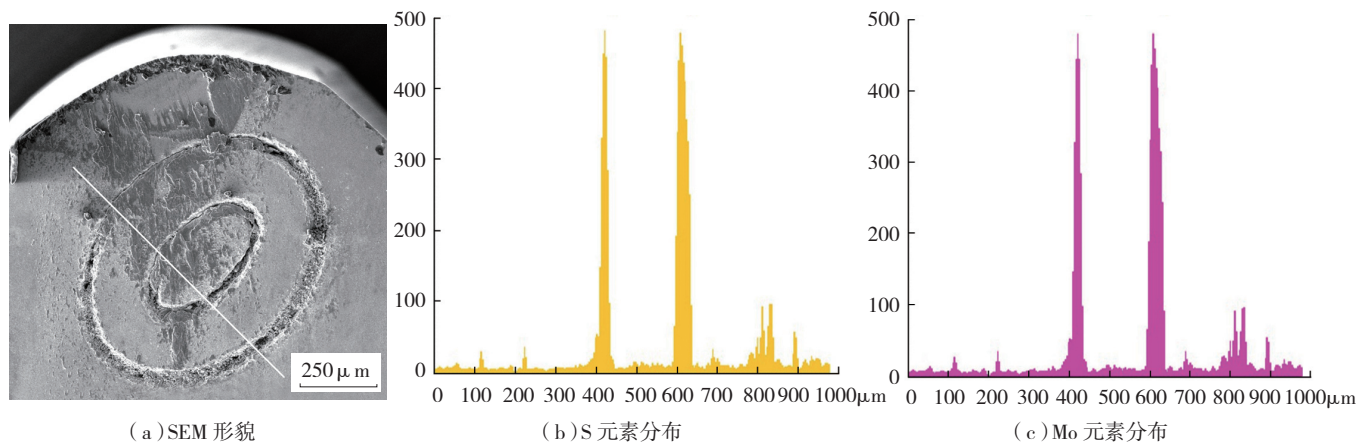


图14 微结构自润滑刀具切削过程中前刀面润滑膜形成示意图

图15 微结构自润滑刀具切削Ti-6Al-4V后的前刀面磨损形貌以及对应的S元素和Mo元素的线分布($a_p=0.2\text{mm}$, $f=0.1\text{mm/r}$, $v=60\text{m/min}$)

表面织构改善刀具切削性能的作用机理主要包括两个方面:第一,在刀具前刀面加工表面织构有利于润滑剂存储,能够提高刀具的润滑效果;其次,表面织构的存在能够减少刀-屑实际接触面积。图14给出了微结构自润滑刀具切削过程中前刀面润滑膜形成示意图,在切屑摩擦挤压作用下,填充在微结构中的润滑剂拖覆在前刀面形成润滑膜。图15为微结构自润滑刀具切削Ti-6Al-4V后的前刀面磨损形貌以及S元素和Mo元素的线分布情况,可以看出,固体润滑剂MoS₂在切屑的摩擦挤压作用下拖覆分布于前刀面。表面织构刀具前刀面润滑性能的提高和刀-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

表面织构刀具是一种在刀具前刀面加工一定规则形貌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、激光等加工技术在硬质合金、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,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,结果表明表面织构刀具在改善刀-屑接触面摩擦润滑状态、降低切削力和切削温度、延缓刀具磨损方面具有显著的效果。表面织构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,在今后的研究中应更加注重尺寸更小的纳结构在刀具上的应用,同时加强表面织构与涂层等表面改性技术的结合,以进一步提高表面织构刀具的切削加工性能。

参考文献

- [1] Volchok A, Halperin G, Etsion I. The effect of surface regular microtopography on fretting fatigue life. *Wear*, 2002, 253(3-4): 509-515.
- [2] Etsion I. State of the art in laser surface texturing. *Journal of Tribology*, 2005, 127(1): 248-253.
- [3] Petterson U, Jacobson S. Influence of

surface texture on boundary lubricated sliding contacts. *Tribology International*, 2003, 36(11): 857-864.

[4] Ronen A, Etsion I, Kligerman Y. Friction-reducing surface-texturing in reciprocating automotive components. *Tribology Transactions*, 2001, 44(3): 359-366.

[5] Ryk G, Kligerman Y, Etsion I, et al. Experimental investigation of partial laser surface texturing for piston-ring friction reduction. *Tribology Transactions*, 2005, 48(4): 583-588.

[6] Kligerman Y, Etsion I, Shinkarenko A. Improving tribological performance of piston rings by partial surface texturing. *Journal of Tribology*, 2005, 127(3): 632-638.

[7] Ryk G, Etsion I. Testing piston rings with partial laser surface texturing for friction reduction. *Wear*, 2006, 261(7-8): 792-796.

[8] Etsion I, Sher E. Improving fuel efficiency with laser surface textured piston rings. *Tribology International*, 2009, 42(4): 542-547.

[9] Brizmer V, Kligerman Y, Etsion I. A laser textured parallel thrust bearing. *Tribology Transactions*, 2003, 46(3): 397-403.

[10] Etsion I, Halperin G, Brizmer V, et al. Experimental investigation of laser surface textured parallel thrust bearings. *Tribology Letters*, 2004, 17(2): 295-300.

[11] Tala-lghil N, Fillon M, Maspeyrot P. Effect of textured area on the performances of a hydrodynamic journal bearing. *Tribology International*, 2011, 44(3): 211-219.

Tribology Transactions, 2005, 48(4): 583-588.

[6] Kligerman Y, Etsion I, Shinkarenko A. Improving tribological performance of piston rings by partial surface texturing. *Journal of Tribology*, 2005, 127(3): 632-638.

[7] Ryk G, Etsion I. Testing piston rings with partial laser surface texturing for friction reduction. *Wear*, 2006, 261(7-8): 792-796.

[8] Etsion I, Sher E. Improving fuel efficiency with laser surface textured piston rings. *Tribology International*, 2009, 42(4): 542-547.

[9] Brizmer V, Kligerman Y, Etsion I. A laser textured parallel thrust bearing. *Tribology Transactions*, 2003, 46(3): 397-403.

[10] Etsion I, Halperin G, Brizmer V, et al. Experimental investigation of laser surface textured parallel thrust bearings. *Tribology Letters*, 2004, 17(2): 295-300.

[11] Tala-lghil N, Fillon M, Maspeyrot P. Effect of textured area on the performances of a hydrodynamic journal bearing. *Tribology International*, 2011, 44(3): 211-219.

本文共有参考文献53篇,因篇幅所限未能一一列出,如有需要请向本刊编辑部索取。

(责编 良辰)