

由宏观至微观的刀具表面改形技术

康正阳

南京工业大学

摘要: 刀具断屑槽以及近年来出现的刀具表面微织构同为表面改形技术,但二者一直属于两个独立的研究领域。本文梳理刀具表面宏观和微观结构的国内外最新研究进展,分析两者在结构功能、设计方法和加工方法上的异同,探讨它们在未来交叉融合的可能性,帮助读者对刀具表面改形技术形成系统认识,加速相关技术的推广和应用。

关键词: 表面技术;表面改形;切削刀具;跨尺度

中图分类号: TG17;TG71;TH161.14 **文献标志码:** A **DOI:**10.3969/j.issn.1000-7008.2020.10.014

Macro-micro Research on Surface modification of Cutting Tools

Kang Zhengyang

Abstract: Chip breaker and the emergent micro surface texturing of cutting tools are surface shaping technologies while they belong to two independent research fields. This paper reviews the latest research progress of tool surface shaping technologies in both macro and micro scales, analyzes the similarities and differences in their functions, design and processing methods, and investigates the possibility of technology fusion in the future. A comprehensive understanding of the technologies will contribute to the related researches and accelerate their applications.

Keywords: surface technology; surface shaping; cutting tool; trans-scale

1 引言

表面改形是提升刀具性能的重要途径。上世纪50年代,出现了在车刀前刀面设置宏观断屑槽来调控切屑卷曲和断裂行为的应用研究。从此,断屑槽

相关研究一直被视为智能制造关键刀具技术之一。

近年来,出现了刀具表面微织构化的研究热潮。在刀具表面设置尺寸为100nm~100 μ m的阵列微沟槽、微凹腔或凸台状等结构,以产生减阻脱黏、抗磨增寿的效果。宏观断屑槽和微织构化技术在本质上均是对刀具表面实施改形,但由于出现间隔久远、尺度和功能差异等原因,这两种技术一直是相对独立的研究领域。

随着研究的深入,宏观和微观结构的功能相似

基金项目: 江苏省高等学校自然科学研究面上项目(19KJB460005);江苏省博士后创新基金面上项目(2020Z410);江苏省产学研合作项目(BY2019006)

收稿日期: 2020年4月

- [5] 杨振朝,薛阳,徐瑾,等. 16Co14Ni10Cr2Mo 超高强度钢铣削加工切削力仿真与试验研究[J]. 航空精密制造技术, 2018,54(1):6-10.
- [6] 胡永科. 液氮冷却切削 35CrMnSiA 高强度钢的研究[D]. 太原:太原科技大学,2011:18-22.
- [7] 程耀楠,王超,贾炜坤,等. 重型切削硬质合金刀具破损寿命可靠性研究[J]. 制造技术与机床,2019,(1):84-88.
- [8] 王新刚,李鹤,吕春梅,等. 硬质合金刀具的动态可靠性灵敏度研究[J]. 兵工学报,2014,35(1):114-119.
- [9] 张翔,邓建新,张贵梁,等. 基体表面纳织构化对 AlCrN 涂层刀具界面结合强度影响的研究[J]. 工具技术, 2017,51(9):17-21.
- [10] 何耿煌. 碳化物添加剂对硬质合金刀具综合性能的影响[J]. 稀有金属与硬质合金,2019,47(2):87-92.
- [11] 江启军,李颖,何海明. 涂层对硬质合金基体强度的影

响[J]. 工具技术,2018,52(11):124-125.

- [12] He Genghuang, Liu Xianli, Wen Xiao, et al. An investigation of the destabilizing behaviors of cemented carbide tools during the interrupted cutting process and its formation mechanisms [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 89:1959-1968.
- [13] 何耿煌,李凌祥,邹伶俐,等. 亚微观倒棱切削刃对硬质合金刀片切削性能的影响特性研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程,2017,37(3):46-54.
- [14] 王亮,李亮,戚宝运. 表面微坑织构刀具结构强度的有限元仿真[J]. 工具技术,2011,45(9):12-15.
- 作者:程程,工程师,厦门金鹭特种合金有限公司,361100 福建省厦门市
- Author: Cheng Cheng, Engineer, Xiamen Golden Egret Special Alloy Co., Ltd., Xiamen, Fujian 361100, China

性被越来越多地揭示出来。但现阶段对两者的认识还未统一,也缺少对刀具表面改性技术发展方向的思考。为此,本文开展综述研究,梳理刀具表面改形技术国内外最新研究进展,探讨刀具表面宏、微观改形相关技术交叉融合的可能性,并指出潜在的研究重点及研究手段。

2 宏观断屑槽及其优化

断屑槽为设置在刀具前刀面上的宏观凹槽或凸台结构。当切屑通过断屑槽时,由于曲率及应力突变,可获得特定长度和螺旋半径的理想切屑形态。合理的断屑槽设计还能降低切削力^[1]、切削能耗^[2]和切削温度,延长刀具寿命^[3]。因此,断屑槽已成为刀具选型的重要依据,并受到国内外刀具企业的重视。

2.1 试验优化方法

断屑分布图法是在切削工况坐标系中统计刀具实际断屑性能分布的一种方法。一方面,该方法可以确定某款刀具能够有效断屑的工况区间,包括背吃刀量、切削速度和进给量等^[4];另一方面,该方法能够从若干候选方案中筛选出与目标工况相匹配的断屑槽结构^[5],进而优化断屑槽的圆角半径、过渡跨度和槽底宽度^[6]。

试验设计方法能够显著提升试验效率。有学者采用田口试验法,发现在诸多断屑槽结构尺寸中,宽度对断屑性能的影响最为显著^[7]。而运用单一因素方法,能够更加深入地揭示出不同复杂槽型结构对切削力^[8]和切削功耗^[9]的影响。

2.2 理论优化方法

由于试验优化的工作量大、周期长,因此一些学者致力于理论优化方法进行研究。早期研究采用滑移线场理论分析切屑流动来优化断屑槽位置、高度等参数^[10]。随着计算机技术的发展,有限元方法已成为主流,且仍在不断完善之中。例如,考虑切屑的塑性变形,建立热弹塑性有限元模型^[11]或基于韧性断裂理论描述切屑断裂行为^[12]。而针对复杂断屑槽结构,往往需要建立三维有限元模型,分析其几何特征对刀具切削性能的影响^[13,14]。

2.3 数据优化方法

人们很早就尝试将工业生产的大量数据收集起来建立一个智能化数据系统。输入工件材料、刀具几何形状、刀具材料等参数就能查找出最佳切削条件。该方法的优势在于能够获得不错的优化结果,而不必完全理解和掌握背后的复杂理论。Jawahir

I. S.^[15]相信,这种数据库系统将极大提高工艺规划的效率和效果,有助于实现自动化生产。目前,除了一些比较知名的数据库(如德国的 INFOS 和美国的 CUTDATA^[16])外,一些制造企业也在积极搭建自己的智能刀具管理系统^[17]。

还有学者尝试将神经网络算法应用于断屑槽设计。采用这种方法时,要建立合适的神经网络结构,确定每一个神经元输入 X_i 的权重因子 W_{ij} ;对加权输入 $W_{ij}X_i$ 进行求和,添加偏差 θ_j ,并把结果作为传递函数 $f(z)$ 的输入来获得该神经元的输出 y_j ;以实际切削数据训练神经网络,优化神经元权重因子组合,不断提升神经网络的预测准确度^[18]。

3 前刀面微织构及其优化

前刀面微织构化技术发端于 Enomoto 等^[19]对技术可行性的探讨,并在 Kawasegi 和 Lei 等^[20,21]完成初步试验后受到广泛关注。目前,多国研究团队在该领域持续角力。虽然各自的研究侧重点不尽相同,但均是以调控界面接触特性为出发点,在前刀面设置微沟槽、微凹腔、微凸台等拓扑结构来优化刀-工-屑三者间摩擦学特性^[22]。

刀具微织构的有益效果如下:

①降低切削力。受益于刀-工-屑接触特性的改变,切削力降幅一般为 10% ~ 25%,但对织构尺度、织构方向和织构深度等较为敏感^[23-25];

②提高前刀面抗磨损性能。在多种切削工况下,微织构均能产生显著的抗磨损效果^[26]。其机理包括:降低刀-屑接触面积;储存切削液/润滑剂^[27];在刀面形成稳定滞留层以替代切削刃进行切削,进而延缓刀具磨损^[28];强化切削液冷却效果^[29];

③提高前刀面抗粘结性能。微织构在接触界面置入间隙,可有效降低分子间的作用力,产生显著的脱黏效果。可通过加工出微凹槽结构^[30]或加工出微凸体结构^[31]来实现;

④良好的切屑控制。微织构会影响切屑形态,使切屑更加卷曲、侧面锯齿减少^[32],长度缩短约 90%^[33]。有研究利用微沟槽对切屑的引导效应,配合在刀尖远端设置的切屑牵引装置,实现切屑稳定归集^[34];

⑤降低刀具温度。微沟槽织构刀具的平均温度降低了 103℃,刀尖温度下降约 62%^[24]。即使是在较低切削速度、刀具升温不显著的工况下,刀-屑界面温度仍能下降约 12%^[35],其主要机制是微织构

促进流体散布,提高了切削液的换热效率^[36];

⑥储存固体润滑剂。在表面微织构中注入固体润滑剂,既可在刀-屑界面形成固体润滑薄膜,又可避免对刀具强度的破坏。目前的研究多聚焦于寻找与固体润滑相匹配的微织构形貌^[37,38]。

3.1 试验优化方法

由于金属切削过程十分复杂,给刀具表面微织构的优化设计带来了一定困难。而切削试验是评价刀具性能最直接的方法,因此可采用面铣削、正交车削、斜角车削、钻削等切削形式来优化刀具结构。其中,面铣削形式较容易观测刀具磨损和粘结,但无法分析切削力的变化规律;正交车削能够方便地观测刀面磨损和刀-屑接触等情况,并且只有两个有效切削力方向,力分析过程相对简单,但需要提前制备圆盘或管状工件;斜角车削则更接近真实切削过程。为了揭示前刀面微织构的减阻抗磨机理,有学者基于刀-屑摩擦副运动状态,在球-盘/盘-盘摩擦学试验机上测试沟微织构化表面的摩擦学特性^[39]。

3.2 理论优化方法

(1)有限元方法

早期研究主要通过开展切削试验优化前刀面微织构的拓扑结构,但试验研究工作量大且复现性差,存在较大不确定性。运用有限元方法已能较准确预测刀具性能变化,并揭示微织构的作用机理和优化规律;但有限元模型很难考虑微织构的润滑效应,因此通常假定切削过程中刀-工-屑系统的摩擦系数保持恒定,且更多应用于干切削过程^[40-42]。

(2)数值计算方法

运用摩擦学润滑理论来研究刀面微织构润滑减阻机理。基于 Payvar-Salant Cavitation 方程,模拟矩形微沟槽在钻头边缘产生的空化和润滑现象后发现层叠交叉排布,面积占有率 10%~20% 的微织构方案性能较优^[43];基于 Reynolds 方程,对前刀面微织构的润滑效应开展理论研究,求解出流体动压润滑压力数值,并由此对前刀面微织构进行拓扑优化^[44]。

4 宏观-微观结构的差异性及互补性

刀具表面宏观断屑槽和微观织构同属表面改形技术,两者在研究方法、加工工艺和结构功能方面的差异与共同点如下。

(1)结构功能

大量微织构形貌的微观效应累积,能够产生宏

观传热学和力学效应,赋予前刀面优异的抗粘结性能。而将表面微织构与固体润滑结合,为缓解干切削的刀-屑摩擦和磨损提供了新的思路。研究表明,宏、微观结构在切屑控制、抗磨损、降低切削力和刀具温度等方面表现均有积极作用,但现阶段还缺少对两种尺度表面结构进行协同优化的统一理论及试验研究方法。

(2)研究方法

宏观断屑槽的研究出现较早且臻于完善,其研究方法具有一定借鉴意义。特别是随着研究的深入,刀具表面改形与刀具涂层、微量润滑等技术的交叉融合,使刀具设计愈发困难。大数据和神经网络算法十分适合处理多参数优化问题,值得继续深入研究。此外,摩擦学试验作为一种基础研究手段,能够支撑微织构相关的减阻抗磨机理和机理研究。

(3)制造方法

电火花、磨削和激光烧蚀加工技术能够在刀具表面实现跨尺度加工。其中,激光烧蚀加工的柔性更佳,但也需要考虑激光热效应对刀具表层材料的影响;另一方面,受制于优化理论及柔性制造手段的缺失,现阶段对刀面微织构进行主动优化仍较难。为了充分发挥刀具表面改形的技术效能,亟需在成形方法、成形精度和工艺柔性等方面寻求突破。

5 结语

(1)表面改形是提升刀具切削性能的重要途径,包括宏观断屑槽和前刀面微织构化两条技术路线。研究发现,不同尺度的前刀面结构具有功能相似性,能够在切削过程中共同发挥润滑减阻、抗磨增寿和切屑控制等作用,预示了刀具表面宏-微观结构具备交叉融合的可能性。

(2)针对 PCD、PCBN、陶瓷等超硬刀具的表面微织构化的试验研究方法正在逐渐增多,而针对切削、润滑和接触机理的相关研究则较少,且主要采用有限元和摩擦学理论数值计算方法,两者能够相互补充和完善,服务于刀具表面改形方案设计。

(3)刀具表面改形技术与刀具涂层、润滑技术关系密切,这些技术的集成和协同是目前的研究热点。由于金属切削过程非常复杂,因此需要运用多种试验和理论研究方法,大数据和神经网络算法十分适合处理多参数优化问题,并且已在宏观断屑槽设计成功应用,值得持续关注。

参考文献

- [1] Mesquita R, Marques M. Effect of chip-breaker geometries

- on cutting forces[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1992, 31(1-2): 317-325.
- [2] Jawahir I S, Oxley P L B. The tool restricted contact effect as a major influencing factor in chip breaking: an experimental analysis[J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 1988, 37(1): 121-126.
- [3] 吴弋杨, 黄必忠. 浅谈硬质合金刀片断屑槽型的设计和选择[J]. *工具技术*, 1992, 26(3): 11-14.
- [4] Kim J D. A chip-breaking system for mild steel in turning [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 1997, 37(5): 607-617.
- [5] Jawahir I S, Oxley P L B. The tool restricted contact effect as a major influencing factor in chip breaking: an experimental analysis[J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 1988, 37(1): 121-126.
- [6] Choi J P, Lee S J. Efficient chip breaker design by predicting the chip breaking performance[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2001, 17(7): 489-497.
- [7] Kuo R Y, Wang J J, Lee R N. Effect of insert groove geometry on chip breaking performance[J]. *Journal of Mechanics*, 2016, 1: 1-7.
- [8] Gurbuz H, Kurt A, Ciftci I, et al. The influence of chip breaker geometry on tool stresses in turning[J]. *Strojnicki Vestnik*, 2011, 57(2): 91-99.
- [9] Soares R B, Jesus A, Neto R, et al. Comparison between cemented carbide and PCD tools on machinability of a high silicon aluminum alloy[J]. *Journal of Materials Engineering & Performance*, 2017, 26(4): 1-20.
- [10] Fang N, Jawahir I S, Oxley P L B. A universal slip-line model with non-unique solutions for machining with curled chip formation and a restricted contact tool [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2001, 43(2): 557-580.
- [11] Shinozuka J, Obikawa T, Shirakashi T. Chip breaking analysis from the viewpoint of the optimum cutting tool geometry design[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1996, 62(4): 345-351.
- [12] Buchkremer S, Klocke F, Veselovac D. 3D FEM simulation of chip breakage in metal cutting[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 82(1-4): 645-661.
- [13] Lotfi M, Farid A A, Soleimanimehr H. The effect of chip breaker geometry on chip shape, bending moment, and cutting force; FE analysis and experimental study[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 78(5-8): 917-925.
- [14] Wu M, Liu L, Wang B, et al. Research on chip shapes analysis and optimization design of chip-breaker in cutting the cylindrical shell material [J]. *Integrated Ferroelectrics*, 2016, 172(1): 117-124.
- [15] Jawahir I S. A survey and future predictions for the use of chip breaking in unmanned systems[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1988, 3(4): 87-104.
- [16] 刘献礼, 丁明娜, 刘铭, 等. 切削数据库技术现状及发展趋势[J]. *工具技术*, 2013, 47(4): 12-17.
- [17] 刘会刚, 王建军, 姜建芳, 等. 智能制造刀具管理系统数据库的设计与实现[J]. *工具技术*, 2018, 52(6): 54-57.
- [18] Kim H G, Sim J H, Kweon H J. Performance evaluation of chip breaker utilizing neural network[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, 209(2): 647-656.
- [19] Enomoto T, Watanabe T, Aoki Y, et al. Development of a cutting tool with micro structured surface[J]. *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers C*, 2007, 73(5): 1560-1565.
- [20] Kawasegi N, Sugimori H, Morimoto H, et al. Development of cutting tools with microscale and nanoscale textures to improve frictional behavior[J]. *Precision Engineering*, 2009, 33(3): 248-254.
- [21] Lei S, Devarajan S, Chang Z. A study of micropool lubricated cutting tool in machining of mild steel[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, 209(3): 1612-1620.
- [22] Liu Y, Deng J, Wu F, et al. Wear resistance of carbide tools with textured flank-face in dry cutting of green alumina ceramics[J]. *Wear*, 2017, 372-373: 91-103.
- [23] Enomoto T, Sugihara T. Improving anti-adhesive properties of cutting tool surfaces by nano-/micro-textures [J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2010, 59(1): 597-600.
- [24] Xie J, Luo M J, Wu K K, et al. Experimental study on cutting temperature and cutting force in dry turning of titanium alloy using a non-coated micro-grooved tool [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2015, 73(1): 25-36.
- [25] Obikawa T, Kamio A, Takaoka H, et al. Micro-texture at the coated tool face for high performance cutting [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2011, 51(12): 966-972.
- [26] Sugihara T, Nishimoto Y, Enomoto T. Development of a novel cubic boron nitride cutting tool with a textured flank face for high-speed machining of Inconel 718 [J]. *Precision Engineering*, 2016, 48: 75-82.
- [27] Liu Y, Deng J, Wu F, et al. Wear resistance of carbide tools

- with textured flank-face in dry cutting of green alumina ceramics[J]. *Wear*,2017,372 – 373:91 – 103.
- [28] Kümmel J, Gibmeier J, Müller E, et al. Detailed analysis of microstructure of intentionally formed built-up edges for improving wear behaviour in dry metal cutting process of steel[J]. *Wear*,2014,311(1 – 2):21 – 30.
- [29] Alagan N T, Beno T, Wretland A. Investigation of modified cutting insert with forced coolant application in machining of alloy 718[J]. *Procedia Cirp*,2016,42:481 – 486.
- [30] Sugihara T, Enomoto T. Improving anti-adhesion in aluminum alloy cutting by micro stripe texture[J]. *Precision Engineering*,2012,36(2):229 – 237.
- [31] Kang Z, Fu Y, Chen Y, et al. Experimental investigation of concave and convex micro-textures for improving anti-adhesion property of cutting tool in dry finish cutting[J]. *International Journal of Precision Engineering & Manufacturing Green Technology*,2018.
- [32] Arulkirubakaran D, Senthilkumar V, Kumawat V. Effect of micro-textured tools on machining of Ti-6Al-4V alloy: an experimental and numerical approach [J]. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*,2016,54:165 – 177.
- [33] Xie J, Luo M J, He J L, et al. Micro-grinding of micro – groove array on tool rake surface for dry cutting of titanium alloy[J]. *International Journal of Precision Engineering & Manufacturing*,2012,13(10):1845 – 1852.
- [34] Shamoto E, Aoki T, Sencer B, et al. Control of chip flow with guide grooves for continuous chip disposal and chip-pulling turning[J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*,2011,60(1):125 – 128.
- [35] Fatima A, Mativenga P T. Performance of flank face structured cutting tools in machining of AISI/SAE 4140 over a range of cutting speeds[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B Journal of Engineering Manufacture*,2014.
- [36] Grabas B. Vibration-assisted laser surface texturing of metals as a passive method for heat transfer enhancement[J]. *Experimental Thermal & Fluid Science*,2015,68:499 – 508.
- [37] Deng J, Song W. Fabrication and properties of a self-lubricated tool in dry cutting[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*,2009,49(1):66 – 72.
- [38] Sharma V, Pandey P M. Geometrical design optimization of hybrid textured self-lubricating cutting inserts for turning 4340 hardened steel[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*,2016,89(5 – 8):1 – 15.
- [39] Xing Y, Deng J, Wang X, et al. Effect of laser surface textures combined with multi-solid lubricant coatings on the tribological properties of Al₂O₃/TiC ceramic [J]. *Wear*,2015,342 – 343:1 – 12.
- [40] Ma J, Duong N H, Lei S. 3D numerical investigation of the performance of microgroove textured cutting tool in dry machining of Ti-6Al-4V[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*,2015,79(5 – 8):1313 – 1323.
- [41] Kim D, Bajpai V, Kim B, et al. Finite element modeling of hard turning process via a micro-textured tool[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*,2015,78(9 – 12):1393 – 1405.
- [42] Olleak A, Tugrul Ö. 3D finite element modeling based investigations of micro-textured tool designs in machining titanium alloy Ti-6Al-4V [J]. *Procedia Manufacturing*,2017,10:536 – 545.
- [43] Ling T D, Liu P, Xiong S, et al. Surface texturing of drill bits for adhesion reduction and tool life enhancement[J]. *Tribology Letters*,2013,52(1):113 – 122.
- [44] Kang Z, Fu Y, Ji J. Numerical investigation of micro – texture cutting tool on hydrodynamic lubrication[J]. *Journal of tribology*,2017,139(5):054502.
- 作者:康正阳,博士,讲师,南京工业大学机械与动力工程学院,211816 南京市
- Author: Kang Zhengyang, Ph. D., Lecturer, School of Mechanical and Power Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China*