

激光微织构对硬质合金 TiAlN 涂层结合性能的影响

冯爱新^{1,2}, 王博², 何叶², 杨润², 刘源², 钟国旗²

(1.温州大学 机电学院, 浙江 温州 325035; 2.江苏大学 机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要:为了研究硬质合金表面激光微织构对涂层性能的影响,利用光纤激光在硬质合金基体表面制备具有不同深度、直径及密度的微织构。采用 CC800/9XL 型超高真空多功能磁控溅射系统在硬质合金表面制备 TiAlN 涂层。通过 Leica DM2500 M 透射光学显微镜、扫描电镜分析了 TiAlN 涂层的表面形貌。利用 MFT-4000 型涂层附着力自动划痕仪对涂层-基体结合力进行表征。结果表明,激光微织构工艺能提高硬质合金基体与 TiAlN 涂层的结合力,比基体表面未织构工艺提高了近 5 倍。

关键词:硬质合金;微织构;结合力;TiAlN 涂层;光纤激光

DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.2017.14.045

中图分类号: TG174.4

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2017)14-0155-04

Study on Influence of Laser Micro-texture on Bonding Properties of Cemented Carbide TiAlN Coating

FENG Aixin^{1,2}, WANG Bo², HE Ye², YANG Run², LIU Yuan², ZHONG Guoqi²

(1. School of Techtronic Engineering, Wenzhou University, Wenzhou 325035, China; 2. School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract In order to study the influence of laser micro texture on cemented carbide surface on the properties of the coating, the micro-texture with different depths, diameters and destinies on the cemented carbide substrate was prepared by optical fiber laser, and then TiAlN coating on the substrate was prepared by CC800/9XL type ultrahigh vacuum magnetron sputtering system. Using Leica DM2500 M transmission optical microscopy and scanning electron microscope, the surface morphology of TiAlN coating was analyzed. Using MFT-400 type coating adhesion automation scratch device, the bonding adhesion force of coating to substrate was analyzed. The results show that the adhesion force of cemented carbide matrix and TiAlN coating improves by laser micro texture, which is nearly 5 times higher than no textured matrix surface.

Key words cemented carbide; micro texture; adhesion force; TiAlN coating; optical fiber laser

刀具表面涂层是提高刀具性能的重要手段,可用极少量材料赋予刀具表面耐磨、耐热、耐腐蚀等性能,充分发挥基体材料与涂层材料的潜能,降低刀具生产成本。硬质合金具有良好的综合性能,国外 90%以上的车刀及 55%以上的铣刀均采用硬质合金材料制造^[1]。在石油天然气能源领域中,石油管螺纹成型梳刀采用硬质合金基体表面制备多元复合涂层

(TiAlN 涂层),但由于梳刀加工工况复杂,刀具易出现涂层破损,且表面摩擦磨损条件恶劣。

基体表面前处理是提高膜-基结合强度或使涂层具有特殊性能(如防腐性、防磨损)的重要手段。近几年,在热喷涂涂层中,通过基体表面的凹凸不平或基体表面粗化来提高其膜-基结合性能的研究越来越多,并取得了较好的效果^[2,3]。但是对基体前处理在提高硬质涂层和超硬涂层结合力的研究还很少。

在减摩上,为提高刀具表面的减摩润滑特性,提出了刀具表面微织构工艺——在刀具表面或刀具涂层表面的特定位置上加工出各种图形的微结构阵列^[4-7]。日本 T Enomoto 和 T Sugihara 对涂层前硬质合金铣刀前刀面进行飞秒微纳织构,改善了铣削铝合金时的粘刀现象^[4]。Lei Shuting 通过飞秒激光在未

收稿日期:2015-04-09

基金项目:江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(CXLX12_0621);国家自然科学基金项目(51175237,51305050)

作者简介:冯爱新(1970-),男,江苏东台人,教授,博士生导师,主要从事激光方面的研究工作;Email:aixfeng@126.com

通讯作者:王博(1988-),男,江西吉安人,硕士研究生,从事激光加工工艺方面的研究工作;Email:wangbozai@gmail.com

涂层硬质合金刀具前刀面制造微凹坑减小了刀屑接触长度^[5]。邓建新等^[6]通过在靠近主切削刃的前刀面上进行飞秒激光纳米织构与表面沉积 WS_2 固体润滑剂复合工艺,干摩擦下,刀屑接触长度及摩擦力减小,刀具性能增强。科研工作者先后研究了刀具表面微织构摩擦磨损性能的影响,涂层性能改善也集中在通过改进涂层制备工艺上^[8]。迄今为止,关于激光表面微织构对基体前处理工艺对硬质涂层 TiAlN 的膜-基结合性能研究还鲜有报道,也没有人探讨过激光微织构参数对膜-基性能的影响。本课题组针对梳刀的膜-基系统结合强度低和涂层摩擦磨损状态差的问题,提出梳刀基体激光微织构工艺。为了验证该思想,本文对硬质合金基体和 TiAlN 涂层组成的膜-基系统进行了研究。为此,本文采用激光对硬质合金基体材料表面进行微织构前处理,通过划痕仪及涂层二维形貌定性分析了不同微织构工艺参数对 TiAlN 涂层结合性能的影响,验证了硬质合金基体微织构工艺的可行性,并提供了一定的理论依据。

1 试验材料及方法

试验采用石油管螺纹梳刀的基体材料——硬质合金,其化学成分(质量分数,%)为:64.5WC、25.5(Ti, Ta, Nb)C、10Co。试样尺寸为 20 mm×10 mm×10 mm。采用粒度为 0.5 μm 金刚石喷雾对试样表面进行抛光处理,乙醇清洗,冷风吹干。

涂层前对基体进行一系列激光微织构处理,采用 YLP-HP 系列掺镱脉冲光纤激光器进行矩形阵列微织构工艺,激光波长 1064 nm,脉宽 100 ns,频率为 20 kHz,光斑直径为 50 μm ,功率为 5 W,对基体试样进行不同微凹坑直径(25、50、60、70、80、90 μm)、不同微凹坑深度(2.35、26.94、30.85、38.05、40.48 μm)及不同微织构密度(5%、8%、10%、12%、15%)的微织造型。微织构后的试样表面采用粒度为 0.5 μm 金刚石喷雾对试样表面进行抛光处理,以去除微凹坑的热影响区,采用乙醇清洗,冷风吹干。

选用 CemeCon 公司研制生产的 CC800/9XL 型超高真空多功能磁控溅射系统对硬质合金表面进行 TiAlN 涂层制备,厚度 6 μm ,其化学成分如表 1。磁控溅射系统采用计算机控制立式结构的高真空磁控溅射镀膜装置,工作气体氩气及靶材纯度都 $\geq 99.999\%$,沉积时间 90 min。TiAlN 薄膜沉积试验参数如表 2 所示。

表 1 氮化铝钛涂层的化学成分(质量分数,%)

Tab.1 Chemical composition of TiAlN coating (wt%)

N	Al	Ti	Na, Si
0.85	41.40	55.02	2.73

表 2 TiAlN 薄膜沉积参数

Tab.2 Deposition parameters of TiAlN film

背景压力 /Pa	氮气压力 /Pa	氩气压力 /Pa	溅射功率 /W		
			Ti 靶	Al 靶	Cr 靶
7.0×10^{-5}	1.0	1.0	0.192	0.216	300

采用 Leica DM2500 M 透射光学显微镜观察硬质合金表面涂层的形貌。采用 MFT-4000 型涂层附着力自动划痕仪对硬质合金微织构表面 TiAlN 涂层区域的结合力进行测试,试验加载速度 20 N/min,划痕长度 3 mm,终止载荷 60 N。由于微织构对摩擦力及摩擦系数曲线变化不明显,综合本文试验以声信号发生第一次突变时作为涂层破坏点,并以此处对应的结合力表征结合的优劣。

2 试验结果与分析

2.1 未织构工艺对涂层的影响

图 1 为未经激光微织构表面处理的硬质合金基体与 TiAlN 涂层横截面的 SEM 形貌。图 2 为该工艺下 TiAlN 涂层在光学显微镜下的形貌。可看出,硬质合金基体上制备的 TiAlN 涂层厚度均匀,厚度在 6 μm 左右。综合图 1、2 可看出, TiAlN 较好

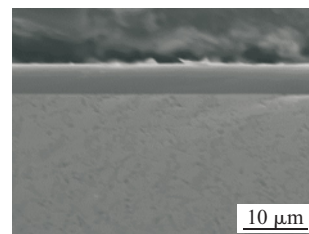


图 1 基体表面未织构下硬质合金与 TiAlN 涂层截面的 SEM 形貌

Fig.1 SEM image of the cross section of cemented carbide and TiAlN coating under the matrix surface without texture

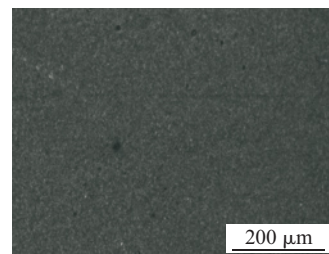


图 2 硬质合金基体表面未织构下 TiAlN 涂层表面光学照片

Fig.2 Optical morphology of TiAlN coating surface of cemented carbide matrix surface without texture

沉积在硬质合金基体表面,涂层与基体间没有空隙,结合紧密,没有局部脱落。这说明该涂层工艺制备参数适用于本文的研究。MFT-4000型涂层附着力自动划痕仪测出涂层发生破坏的值为2.56N。

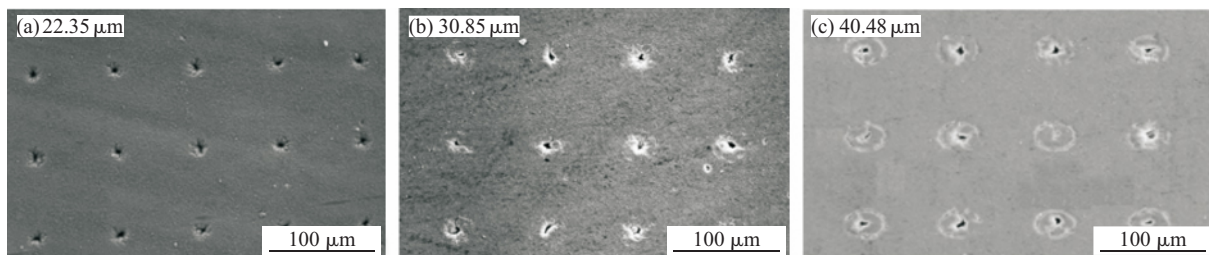


图3 不同微织构深度下 TiAlN 涂层的 SEM 形貌

Fig.3 SEM images of TiAlN coating under different micro-structure depths

微凹坑,直径只有不到 10 μm。随深度的增加,微凹坑周围表面涂层变得不平整。

图4为硬质合金基体表面不同微织构深度下所测得的 TiAlN 涂层破坏时的结合力。可看出,随微织构深度的增加,结合力没有明显变化,在 13 N 附近波动,范围为±1 N。分析认为,随微织构深度的增加,硬质合金表面润湿性能减弱^[9],涂层附着能力降低,TiAlN 涂层不易在硬质合金表面沉积。当深度达 40.08 μm 时,TiAlN 涂层不能均匀沉积在硬质合金表面。微织构深度增加是通过增加激光加工次数获得,这导致热影响区的累积热效应增加,抛光效果变差,使得涂层与热影响区表面以机械啮合方式结合,导致结合力增加。

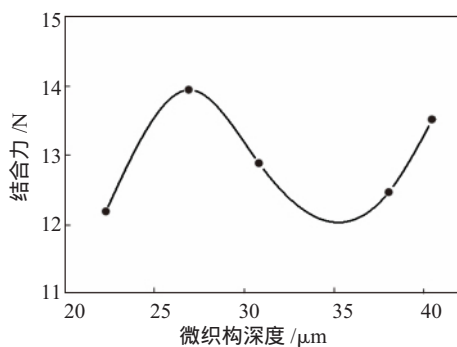


图4 微织构深度与基体-涂层结合力关系

Fig.4 The adhesive force between substrate and coating and surface micro-structure depth

2.3 微织构直径对涂层的影响

图5为硬质合金基体表面不同微织构直径下 TiAlN 涂层的二维形貌。可看出,织构直径为 25 μm,基体涂层后能自然形成小微坑;直径增加到 60 μm 时,微织构被涂层填满,直径大于 70 μm 后,涂层不能在表面形成规则的微织构,涂层不能将微织构填满。

图6为硬质合金基体表面不同微织构直径下所

2.2 微织构深度对涂层的影响

图3为硬质合金表面不同微织构深度下的涂层表面形貌。可看出,在该密度下,微凹坑在涂层之后,在表面上仍然可形成微凹坑,且涂层后表面形成的

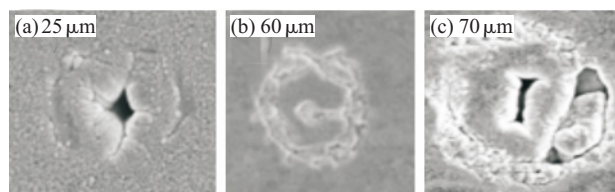


图5 硬质合金不同微织构直径下的 TiAlN 涂层表面 SEM 形貌

Fig.5 SEM images of TiAlN coating surface of cemented carbide under micro-structure with different diameters

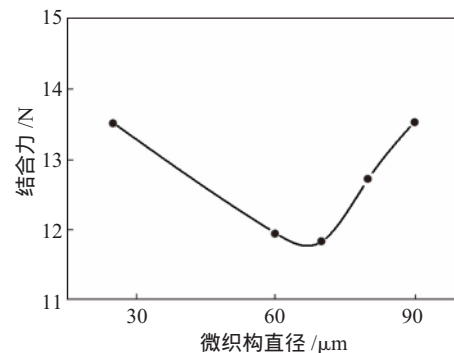


图6 微织构直径与基体-涂层结合力关系

Fig.6 The adhesive force between matrix and coating and micro-structure diameter

测得的 TiAlN 涂层破坏时结合力。可看出,随着基体微织构直径的增加,基体与涂层结合力先由微织构直径 25 μm 对应的 13.52 N 减到微织构直径 70 μm 对应 11.83 N,微织构直径继续增加到 90 μm 后,结合力增加到 13.53 N。分析认为,微织构周围由陡峭变得平缓而微织构内壁由平缓变得陡峭,微织构内更易沉积。当基体微织构直径增加,导致涂层不能涂覆区域增加,结合力骤减,随涂覆面积的增加,结合力有所恢复。

2.4 微织构密度对涂层的影响

图7为硬质合金基体表面不同微织构密度下 TiAlN 涂层的形貌。可看出,基体微织构密度增加,

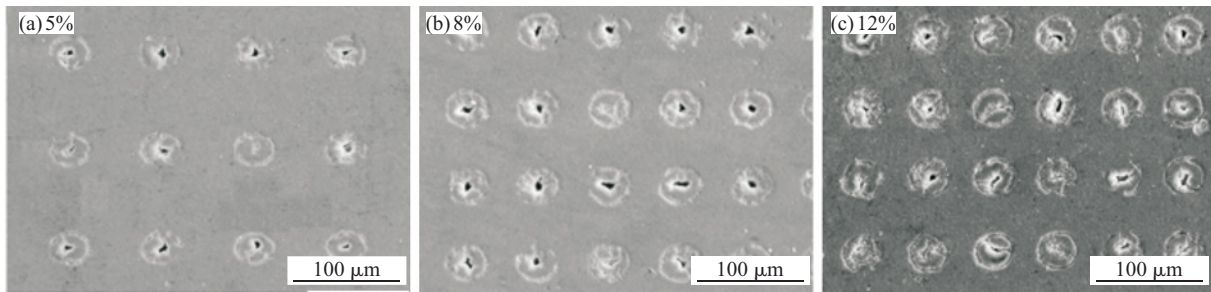


图7 不同微织构密度下 TiAlN 涂层的表面形貌

Fig.7 SEM images of TiAlN coating surface with different micro-texture densities

TiAlN 涂层沉积面积变大,微织构变得越来越不规则,涂层质量变差。

图8为硬质合金基体表面不同微织构密度下 TiAlN 涂层与硬质合金基体结合力的关系。可看出,随基体微织构密度的增加,基体与涂层结合力先减小后增加,但是波动范围不大。分析认为,随微织构密度的增加,尽管表面润湿性能先变好再变差,但是由于密度的增加,织构密度为8%和10%时,材料的重熔区不完全重合。而织构密度为15%时,微凹坑表面的重熔物发生了重合,甚至可能是重铸现象,从而在凹坑周围的表面也引入了机械啮合机制,使得结合力变好。

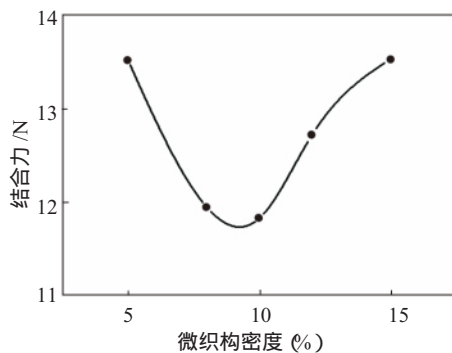


图8 表面微织构密度与基体-涂层结合力关系

Fig.8 The adhesive force between matrix and coating and micro-texture density

结合图4、6、8可知,基体经微织构工艺的膜-基系统的结合力是基体无织构工艺的膜-基结合力的5倍。分析认为:与无织构的相比,微凹坑造型引入了机械啮合机制,且机械啮合机制对结合力的贡献占主导地位,从而基体微织构的膜-基结合力比基体无织构的膜-基结合力大。

3 结论

(1) 激光基体微织构这一前处理工艺能显著提高硬质合金基体与 TiAlN 涂层的结合力,在本文试

验范围内,比基体表面未织构对基体涂层的结合力提高了近5倍。

(2) 微织构深度、直径及密度能调控涂层与基体的结合力,但是通过他们来控制结合力,使得涂层沉积不均匀,导致 TiAlN 涂层表面不能形成所谓规则的微凹坑织构。

参考文献:

- [1] 韩韩,许晓静,刘延山. 硬质合金刀具材料的研究现状与发展思路[J]. 工具技术, 2002 (10): 3-8
- [2] 杨震晓,刘敏,邓春明,等. 热喷涂基体表面预处理技术的研究进展[J]. 中国表面工程, 2012, 25(2): 8-14.
- [3] 孟模,张治民,徐宏妍. 热喷涂铝涂层与镁合金基体结合强度的研究[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2011, 32(3): 376-381.
- [4] Sugihara T, Enomoto T. Development of a cutting tool with a nano/micro-textured surface-improvement of anti-adhesive effect by considering the texture patterns[J]. Precision Engineering, 2009, 33(4): 425-429.
- [5] 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.
- [6] Lian Y, Deng J, Yan G, et al. Preparation of tungsten disulfide (WS₂) soft-coated nano-textured self-lubricating tool and its cutting performance[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 68 (9/12): 2033-2042.
- [7] 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.
- [8] 宋贵宏,杜昊,贺春林. 硬质与超硬涂层结构、性能、制备与表征[M]. 北京:化学工业出版社, 2007.
- [9] 冯爱新,杨润,施芬,等. 激光微织构硬质合金表面润湿性[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(2): 260-266. [H]