

U71Mn 钢轨铣削用 PVD-TiAlN 涂层刀片失效分析

王梦超¹, 王丽君², 陈辉¹

(1.西南交通大学, 成都 610031; 2.成都工业职业技术学院, 成都 610218)

摘要:目的 分析研究 PVD-TiAlN 涂层刀片铣削钢轨(U71Mn)后的失效行为, 确定涂层刀片铣削 U71Mn 的磨损机制及失效机理, 为进一步改进铣削 U71Mn 用涂层刀片的使用性能提供指导。方法 采用多弧离子镀技术在硬质合金基体刀片上制备了厚度约 2.13 μm 的 TiAlN 涂层, 通过扫描电子显微镜、能谱仪、金相检测仪等仪器, 检测了刀片基体和涂层的显微组织和金相结构。采用立式铣床对 U71Mn 进行铣削, 通过扫描电子显微镜观察失效刀片前刀面、刃口和后刀面的微观形貌, 结合能谱仪微区成分分析, 确定涂层刀片的磨损机制和失效机理。结果 通过金相检测仪和扫描电子显微镜检测, YG10 细晶粒硬质合金基体无明显组织缺陷。采用多弧离子镀制备的涂层膜基结合力等级为 HF1, 具有较好的膜基结合强度。失效刀片的刃口处存在贯穿前刀面、刃口和后刀面的裂纹, 并且刃口区域的裂纹内部有被加工材料的填充物。后刀面裂纹尖端有涂层的微崩裂, 前刀面的磨损带边界较后刀面磨损带边界平齐。刃口附近的涂层表面上出现了相互交联的裂纹。失效刃口多出现锯齿形缺口, 缺口内部有大量的碎屑填充物, 缺口对应的后刀面处分布着深浅不同的沟槽。磨损的刃口上粘接有大量的被加工材料。结论 刀片的磨损机制有磨粒磨损、粘接磨损和氧化磨损。另外, 刃口的崩裂在刀片失效过程中也扮演着重要角色, 崩裂的缺口会为硬质颗粒提供存储空间, 从而加剧磨料磨损, 在多种磨损机制共同作用下, 刀片刃口最终被磨耗而失效。可通过提高基体的强韧性、合理的刃口设计、改善涂层的韧性和结合力、提高涂层的抗氧化性等方面, 提高涂层刀片铣削 U71Mn 的性能。

关键词: TiAlN 涂层; U71Mn; 涂层刀片; 失效分析; 磨损机制; 失效机理

中图分类号: TG174.4; TH117.7 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2020)03-0300-09

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.03.038

Failure Analysis of PVD-TiAlN Coated Tools for Rail Milling

WANG Meng-chao¹, WANG Li-jun², CHEN Hui¹

(1.Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2.Chengdu Vocational & Technical College of Industry, Chengdu 610218, China)

ABSTRACT: In order to provide guidance for further improving the performance of coated tools for rail(U71Mn) milling, the failure behavior of PVD-TiAlN coated tools for U71Mn milling was analyzed. Simultaneously, the wear mechanism and failure

收稿日期: 2019-07-31; 修订日期: 2019-11-16

Received: 2019-07-31; Revised: 2019-11-16

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFB0305905)

Fund: Supported by the National Key Research and Development Program of China (2017YFB0305905)

作者简介: 王梦超(1991—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为表面工程。

Biography: WANG Meng-chao (1991—), Male, Doctor Student, Research focus: surface engineering.

通讯作者: 陈辉(1965—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为激光焊接和表面工程。邮箱: xnrpt@swjtu.edu.cn

Corresponding author: CHEN Hui (1965—), Male, Doctor, Professor, Research focus: laser welding and surface engineering. E-mail: xnrpt@swjtu.edu.cn

引文格式: 王梦超, 王丽君, 陈辉, 等. U71Mn 钢轨铣削用 PVD-TiAlN 涂层刀片失效分析[J]. 表面技术, 2020, 49(3): 300-308.

WANG Meng-chao, WANG Li-jun, CHEN Hui, et al. Failure analysis of PVD-TiAlN coated tools for rail milling[J]. Surface technology, 2020, 49(3): 300-308.

mechanism of the coated tools were determined. The TiAlN coating with a thickness of about 2.13 μm was prepared on cemented carbide tools by multi-arc ion plating technology. The substrate and coating of the tools were detected by scanning electron microscope (SEM), energy dispersive spectroscopy (EDS) and metallography. Vertical milling machine with the PVD-TiAlN coated tools was used to mill U71Mn. SEM was used to observe the micro morphology of the front surface, edge and flank surface of the failed tools. The wear mechanism and failure mechanism of the coated tools were determined by EDS micro-zone composition analysis and SEM micro morphology analysis. Through metallographic and SEM tests, YG10 fine grain cemented carbide had no obvious structural defects. The film-substrate adhesion strength of the coating prepared by multi-arc ion plating was HF1, which indicated that the film-substrate adhesion strength was good. There were cracks through the front surface, edge and flank surface of the failed tools, but there were fillings of processed materials inside the cracks only in the edge area. The coating on the crack tip of the flank surface of failed tools was slightly broken. The wear zone boundary of the rake face is flatter than the wear zone boundary of the flank face. Cross cracks appeared on the coating surface near the edge. There were many jagged edges with many fragmental fillings at the edges of the failed tools. Many grooves of different depth were distributed the flank surface corresponding to these gaps. The worn edge was covered with a large amount of processed material. The wear mechanism of tools included abrasive wear, adhesive wear and oxidation wear. In addition, the collapse of the edge also played an important role in the failure process of the coated tools. The cracks provided storage space for the hard particles, which promoted abrasive wear. Under the action of multiple wear mechanisms, the edge was finally worn out. The milling performance of coated tools for U71Mn milling could be improved by improving the strength and toughness of the substrate, rational cutting-edge design, improving the toughness and adhesion of the coating, and improving the oxidation resistance of the coating.

KEY WORDS: TiAlN coating; U71Mn; coated tools; failure analysis; wear mechanism; failure mechanism

随着铁路运量的增加和火车运行速度的提高,钢轨表面损伤问题越来越突出,其中常见的损伤有内侧肥边、轨顶面擦伤或剥离、侧磨、鱼鳞纹等^[1-3],这些损伤将严重影响行车安全和钢轨服役寿命。钢轨铣磨车是一种新型的钢轨在线整修设备^[4],采用圆周铣削技术使其具有作业效果好、作业成本低、高效、环保等诸多优势^[5]。目前,国外对钢轨成形铣削技术进行封锁,国内的科研人员对钢轨成形铣削技术进行了大量研究。在钢轨铣削装备的研究方面,岳红强等人^[6-7]设计了一种钢轨铣削作业单元试验平台,并采用西门子 Sinumerik 840D SL 为核心数控系统实现了铣削作业的控制;占国栋等人^[8]通过计算反求了钢轨铣磨车用铣刀盘的理论截面轮廓,并采用有限元方法对该铣刀盘刀体进行结构拓扑优化,实现了铣刀盘高精度和轻量化的目的;潘超^[9]基于对称标准廓形设计的钢轨铣磨车无法满足特殊应用的需求,提出轨道曲线路段钢轨的非对称铣削方法,并介绍了非对称成形铣削所用可转位成形刀粒和大直径铣盘的设计方法。在钢轨铣削技术的研究方面,丁郭等人^[10]采用一定比例的成形铣刀盘搭建了用于铣削 U71Mn 钢轨的试验台,通过在线检测铣削力获得了铣削速度、铣削宽度和没吃进给量对铣削力的影响规律,并建立了铣削力数学模型;金滩等人^[11]采用 AdvantEdge 对 U71Mn 铣削过程建立了 3D 模型,并采用人工热电偶测量了铣削温度,探讨了铣削参数对铣削温度的影响规律;王海文等^[12]利用最小二乘法对曲线进行回归分析,得到了切削钢

轨的切削温度经验公式,并分析了不同的切削参数对切削温度的影响规律;Wilhelm 等人^[13]通过有限元模拟建立了大型钢轨铣磨车的铣削单元模型,详细分析了钢轨铣削和铣削后钢轨的滚动接触行为;Gu^[14]通过应用硬质合金刀片对 U75V 钢轨进行高速加工实验,从微观上研究了随着绝热剪切的演变以及切削速度的提高引起的切屑形态的发展。这些研究在一定程度上推进了我国在钢轨铣削装备和技术方面的进步,然而在钢轨铣削成形用铣刀片,特别是铣刀片在加工钢轨后的失效形式和失效机理方面的研究鲜有报道。本研究在硬质合金刀片基体上采用 PVD 的方法制备 TiAlN 涂层,并用于铣削 U71Mn 钢轨材料,针对铣削 U71Mn 后失效的硬质合金涂层刀片进行失效分析,旨在研究涂层刀片的破坏方式及失效机理,为进一步改进该领域专用刀片的使用性能提供指导。

1 试验

1.1 涂层制备及失效刀片取样

实验用刀片基体采用株洲韦凯切削工具有限公司生产的 VK30 硬质合金,可转位刀片型号为 APMT160408PDER-M2,涂层制备前分别采用酒精、丙酮对基体进行清洗,去除表面油污。采用欧瑞康巴尔查斯公司生产的 METAPLAS.DOMINO MINI 涂层设备进行涂层制备,涂层用的靶材采用 TiAl 合金靶材,涂层炉的本底真空度为 4.0×10^{-3} Pa,基体加热温

度为 350 ℃,涂层沉积前采用 Ar^+ 刻蚀清洗基体表面,以清洁表面,提高涂层粘接强度。涂层沉积过程中, N_2 流量为 250 mL/min,基体直流负偏压为 100 V,涂层沉积总量为 200 Ah(Ah:靶材电流与时间的乘积)。涂层刀片制备后,采用 Xh715D 立式加工中心对符合标准的 U71Mn 钢轨材料进行干式铣削试验,U71Mn 的材料成分及力学性能见表 1-2。铣削参数为:铣削速度 170 m/min,切深 1 mm,进给量 0.2 mm/z。铣削 20 min 后,取下刀片,本研究中只挑选 3 个具有代表性的失效刀片进行详细分析,各刀片分别采用酒精、丙酮对失效刀片进行清洗,去除表层粘附的油污及碎屑,以便进行失效刀片刃口形貌的观察和微区成分的检测。为分析失效刀片的基体和涂层成分,在刀片远离失效刃口涂层完好的部位进行线切割取样,取样大小为 5 mm×5 mm×5 mm,通过镶样、预磨、抛光、去除镶样材料、酒精/丙酮清洗制备光滑的磨面,采用铁氰化钾和氢氧化钠水溶液进行金相腐蚀。为了便于测定涂层的硬度,涂层表面进行轻微抛光以减小涂层表面颗粒的影响。

表 1 U71Mn 主要化学成分
Tab.1 The main chemical composition of U71Mn

C	Mn	Si	P	S	Fe
0.65~0.77	1.1~1.4	0.15~0.35	≤0.03	≤0.03	Bal.

表 2 U71Mn 力学性能
Tab.2 Mechanical properties of U71Mn

ρ /($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	Modulus /Pa	Hardness (HBW)	ψ /%
7800	≥1080	460	2×10^{11}	320~380	≥10

1.2 性能测试及形貌观察

在金相腐蚀前,采用 SEM、EDS 对磨抛的硬质合金基体和涂层进行观察和成分检测。根据国家标准

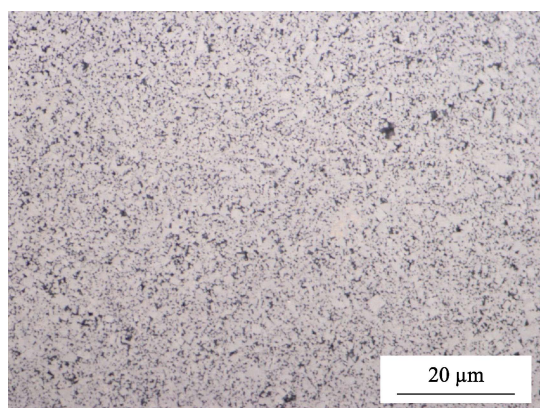
GB/T 3488—2018《硬质合金 显微组织的金相测定》,进行金相组织的评定和 WC 晶粒尺寸的测量。根据 GB/T 7997—2014《硬质合金 维氏硬度测试方法》,测定硬质合金基体的硬度。根据 GB/T 33819—2017《硬质合金巴氏韧性试验》,采用压痕法测定基体的巴氏韧性。使用德国安捷伦公司 G200 纳米压痕仪,采用连续刚度法测定涂层的硬度和弹性模量,在涂层样品表面测定 5 个点并求取平均值。采用美国 FEI Quanta FEG 250 扫描电子显微镜,对失效刀片的前刀面、刃口和后刀面进行形貌观察和微区成分分析。

2 结果及分析

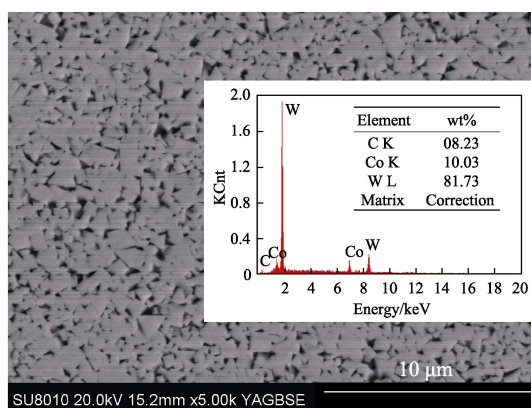
2.1 基体及涂层

2.1.1 基体组织与性能

刀片基体的金相组织如图 1 所示。磨抛面在腐蚀前进行孔隙和 η 相($\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$)的观察,测定基体孔隙度级别为 A02B00,基体中无 η 相存在,无非化合碳存在,说明基体烧结过程中无明显的组织缺陷。图 1a 为基体腐蚀后的金相组织,视野内金相组织中无固溶体相,初步判断基体属于 YG 类硬质合金,其中白色部分为 α 相(WC 相),组织细小, α 相的平均截线晶粒度约为 0.92 μm ,初步判断属于细晶粒硬质合金;黑色部分为 β 相(Co 相),在 WC 颗粒间弥散分布,Co 相的平均自由程约为 0.5 μm 。刀片基体的 SEM 图片及 EDS 面扫描成分如图 1b 所示,可知所用刀片基体材料中含有 W、C、Co 三种元素,且 Co 含量约为 10% (质量分数),因此基体材质属于 YG10 硬质合金,图中灰色相为 WC 相,黑色相为 Co 相,WC 相在整个视野内分布均匀,无异常长大的晶粒缺陷。采用截线法测得 WC 相的平均截线晶粒度为 0.88 μm 。经测试,基体材料的硬度为 1541HV₂₀,巴氏韧性为 10.5 $\text{MPa}\cdot\text{mm}^{1/2}$ 。



a 微观形貌



b 基体的SEM和EDS分析

图 1 基体的微观形貌和成分

Fig.1 Microstructure and composition of substrate: a) metallographic photo of substrate, b) SEM and EDS analysis results of substrate

2.1.2 涂层形貌与性能

图 2 为刀片涂层的微观形貌和成分。从图 2a 可知,涂层厚度为 $2.13\ \mu\text{m}$,涂层与基体之间界面清晰,涂层在 WC 颗粒上粘接紧密,涂层与基体的界面和涂层内部都不存在裂纹缺陷,图 2a 中的插图为压痕法评定膜基结合强度等级的压痕形貌,可以看出压痕周围存在裂纹,但是压痕周围并无涂层剥落,根据 VDI 3198 可知,膜基结合强度等级评定为 HF1 级,

表明膜基结合强度较好。图 2b 为刀片表面涂层形貌,可以看出涂层表面存在微米尺度的液滴和孔洞,这些缺陷是多弧离子镀膜技术存在的固有缺陷^[15],在整个视野内未发现表面裂纹。成分分析表明,涂层的 Ti:Al 原子比为 0.53:0.47,属于中铝含量的 TiAlN 涂层。采用纳米压痕法测定涂层的硬度和弹性模量,分别为 $(30.40\pm 0.43)\ \text{GPa}$ 和 $(416.50\pm 5.97)\ \text{GPa}$,如图 2c 和 2d。

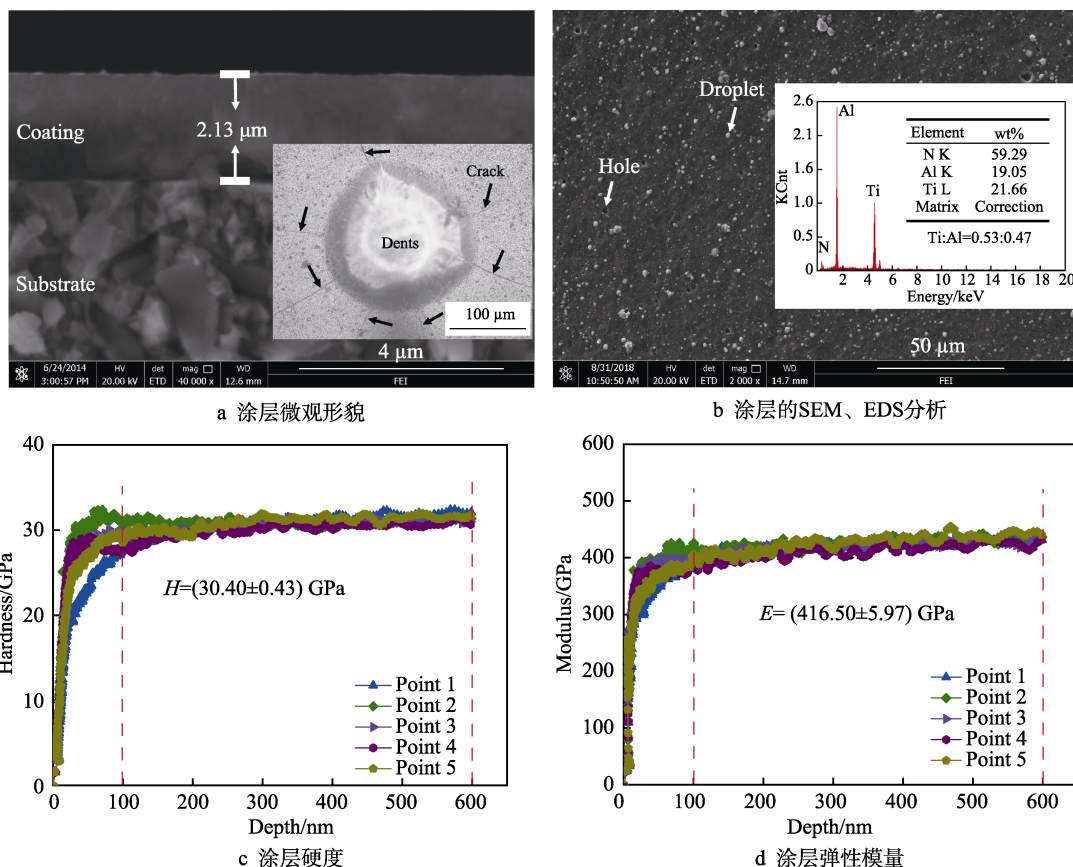


图 2 涂层的微观形貌、成分和力学性能

Fig.2 Microscopic morphology, composition and mechanical properties of the coating: a) section and indentation morphology of the coating, b) SEM and EDS of the coating, c) depth-hardness curves of the coating, d) depth-modulus curves of the coating

2.2 失效刀片微观形貌及失效机理分析

2.2.1 失效刀片微观形貌

图 3 为 1#失效刀片前后刀面微观形貌。图 3a 为前刀面微观形貌,涂层表面留下的磨痕方向可以判断切屑流经前刀面的方向(图示黄色箭头所示),磨痕的出现说明切屑与前刀面产生了强烈的挤压。从刃口处形貌可以看出,初始的圆弧形刃口已经被磨耗,成为连接前刀面和后刀面的倒棱结构。在刃口附近磨损带的边界较为平整,这是切屑与前刀面滑动挤压造成的,但磨损带内的涂层产生了不均匀的磨损形貌,这是由于铣削过程中,由于刀盘转动造成刃口切入角度的变化使切屑变形程度不同,从而使切屑与前刀面挤压的区域不同。在磨损带内可观察到几条垂直于刃口

的裂纹,靠近刃口处裂纹较宽,远离刃口处裂纹变窄,从而可以判断裂纹是从刃口部位产生并向内侧扩展的,图 3a 中插图所示的红色虚线框放大图表明裂纹中无填充物。图 3b 为后刀面微观形貌,后刀面是在铣削过程中对着钢轨已铣削面的刀具表面,后刀面与钢轨间的接触压力大,使刀具的后刀面与钢轨加工面产生强烈的摩擦,引起后刀面发生磨损,后刀面磨损量过大会造成刀具变钝,铣削功率消耗上升,铣削表面精度降低。从图 3 中可以看出,后刀面磨损带不平直,磨损边界的局部位置有崩裂的小缺口,而且在小缺口处都有裂纹贯穿,这些裂纹从刃口向刀片内侧延伸,可判断锯齿形缺口的产生是由于萌生于刃口的裂纹扩展造成脆性基体和涂层的微崩裂。从后刀面刃口处的局部放大图中可以发现裂纹内部有填充物,这与前刀面裂

纹不同,而且区域1处的裂纹上部及附近大片区域完全被粘接物覆盖,微观上呈现出具有层次的台阶形貌。

图4为2#失效刀片微观形貌。从图4a可以看出,刀片前刀面由于切屑挤压,在涂层及刃口表面留下了切屑流的痕迹,基体上的涂层保持完好。从图4b可以发现,后刀面存在类似火山坑的崩裂区,在崩裂区表面分散着大量的粘接物;在崩裂区边界处,涂层在垂

直后刀面方向的断口比较平齐,说明涂层的失效不是由磨损造成的,而是由于基体大块剥落造成涂层的脆性剥落。从后刀面观察,如图4c所示,整个刃口呈现不规则的形状,初始的圆弧形刃口已经被磨耗,从后刀面到前刀面存在贯穿刃口的裂纹,在刃口区域的裂纹中存在填充物。从图4d可以看出,磨损的刃口在凸起区域出现层片状的台阶形貌,凹陷区域堆积了大量粘接物。

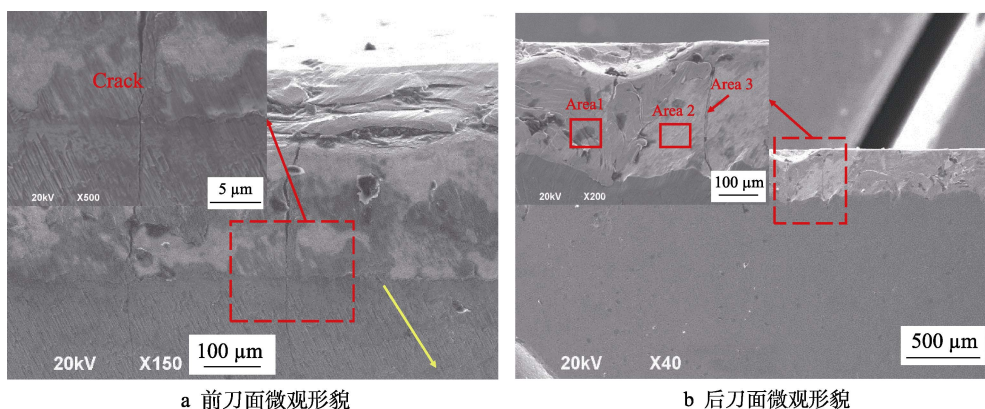


图3 1#失效刀片微观形貌

Fig.3 Micro morphology of 1# failed tool: a) micro morphology of front surface, b) micro morphology of flank surface

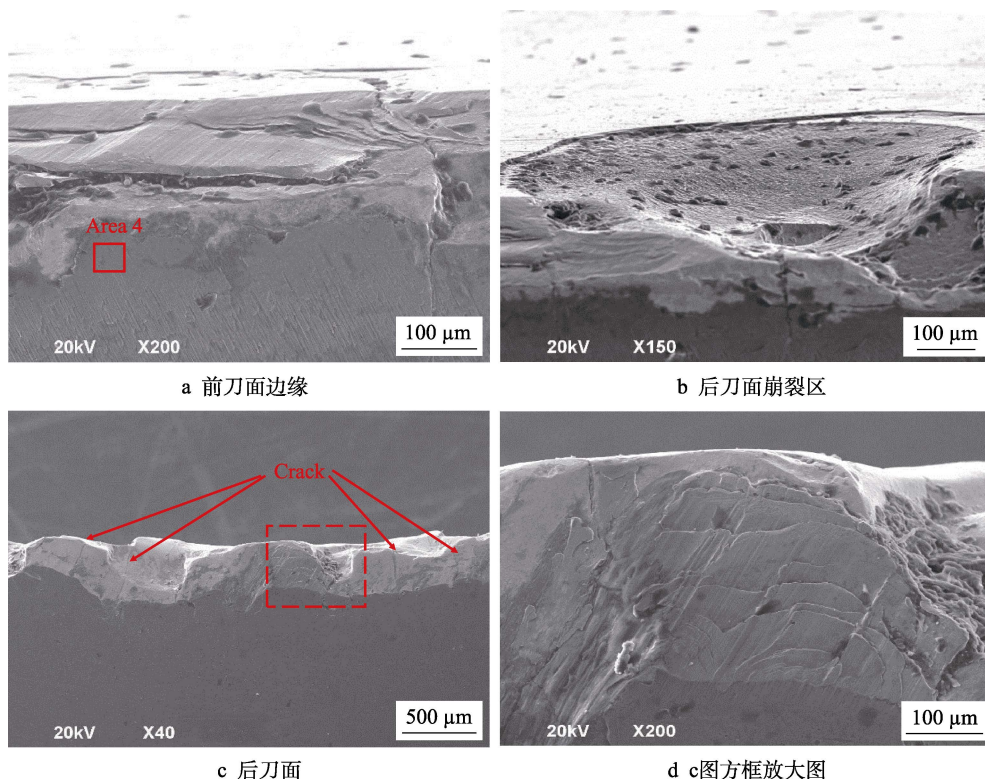
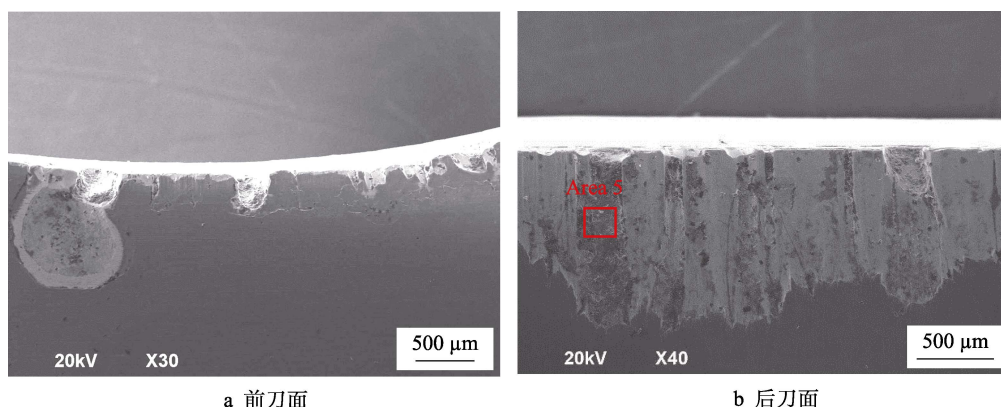


图4 2#失效刀片微观形貌

Fig.4 Micro morphology of 2# failed tool: a) micro morphology of edge in front surface, b) micro morphology of collapse of flank surface, c) micro morphology of flank surface, d) a larger view of the area in figure c

图5为3#失效刀片微观形貌。从图5a可以看出,前刀面刃口处出现了锯齿形的缺口,在缺口边缘还出现了大块基体和涂层的剥落,但是在完整的刃口处,基体上的涂层比较完好,因此可初步判断此处剥落的

涂层不是因为涂层的结合力不够造成的,而是刃口异常磨耗造成基体崩落连带涂层一起撕裂剥落。在磨损带内涂层表面可以观察到如图6所示的网状交叉裂纹,这些网状裂纹的出现可能由两方面的原因造成:

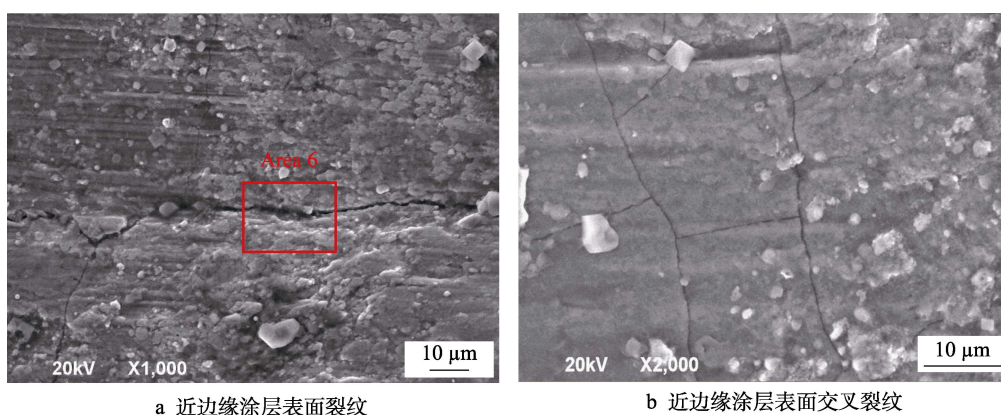


a 前刀面

b 后刀面

图 5 3#失效刀片微观形貌

Fig.5 Micro morphology of 3# failed tool: a) micro morphology of front surface, b) micro morphology of flank surface



a 近边缘涂层表面裂纹

b 近边缘涂层表面交叉裂纹

图 6 涂层表面的交叉裂纹

Fig.6 Cross cracks on the surface of coating: a) cracks in the coating surface near the edge, b) cross cracks in the coating surface near the edge

一方面是由于间断切削的冲击载荷造成刃口开裂,在力的持续作用下,裂纹向内侧扩展,当多个裂纹从不同方向交汇时,便会在涂层表面出现交叉的网状裂纹;另一方面是由于热冲击引起的^[16],刀片表面的温度在切削时迅速上升,在空切时下降,热胀冷缩使脆性的涂层容易产生裂纹,加速涂层产生剥落而失效。图 5b 中后刀面的磨损带弯曲不规则,在磨损带内显露出基体,而且对应于前刀面缺口的位置,在后刀面上出现间隔分布的沟槽,在沟槽内填充着大量的碎屑。

2.2.2 磨损机制分析

涂层硬质合金刀片的失效模式多种多样,这与刀具材料、服役环境、加工材料等因素有关。钢轨铣削刀片的服役工况具有以下特点:单个刀片刃口与钢轨的接触是断续的,刀具承受的是冲击载荷;钢轨材料 U71Mn 的硬度高,韧性好,铣削时需要很大的切削力,使刀具与钢轨产生强烈的挤压^[17];强烈的摩擦会导致刀片温度升高,进而引起刀片性能的变化,特别是红硬性。根据失效刀片的微观形貌,结合微区的成分分析对失效刀片的失效模式进行分析:

1) 粘结磨损。图 3 中各区域 EDS 成分分析如图 7 所示。区域 1 成分中存在大量的 Fe 元素,表明此处基体上部粘结有一层被加工材料;区域 2 的成分分析中显示,该区域有较多的 W、C 和 Co,及少量的 Fe、Mn 元素,表明硬质合金基体已经完全暴露;区域 3 为裂纹内部填充物的成分分析,其中含有大量的 C、O、Mn、Fe 元素,表明填充物主要来自被加工材料,但是 Mn 含量远高于基体中的含量,可能是由于在较高的铣削温度下 Fe 元素被氧化烧蚀,而造成 Mn 元素相对含量升高。图 7 中区域 4 为前刀面涂层磨损边界处的成分分析,可知涂层上也有被加工材料的粘接。在铣削过程中,刀片与切屑和工件接触的区域产生强烈挤压和摩擦,且保持着新鲜的接触表面,在高温和高压下,两者很容易产生粘接现象^[18]。另外,由于刀片与工件的相对运动会造成粘接点撕裂,粘接点撕裂会带走一方的材料而造成粘接磨损;粘接和撕裂是一个动态重复的过程,可以推断区域 2 表面在切削某一时刻也被覆盖一层被加工材料,粘结层撕裂后,该区域含有少量的 Fe、Mn 元素,但含有大量的 W,说明被加工材料从硬质合金基体上撕裂,带走了基体上的合金颗粒,从而露出基体材料。

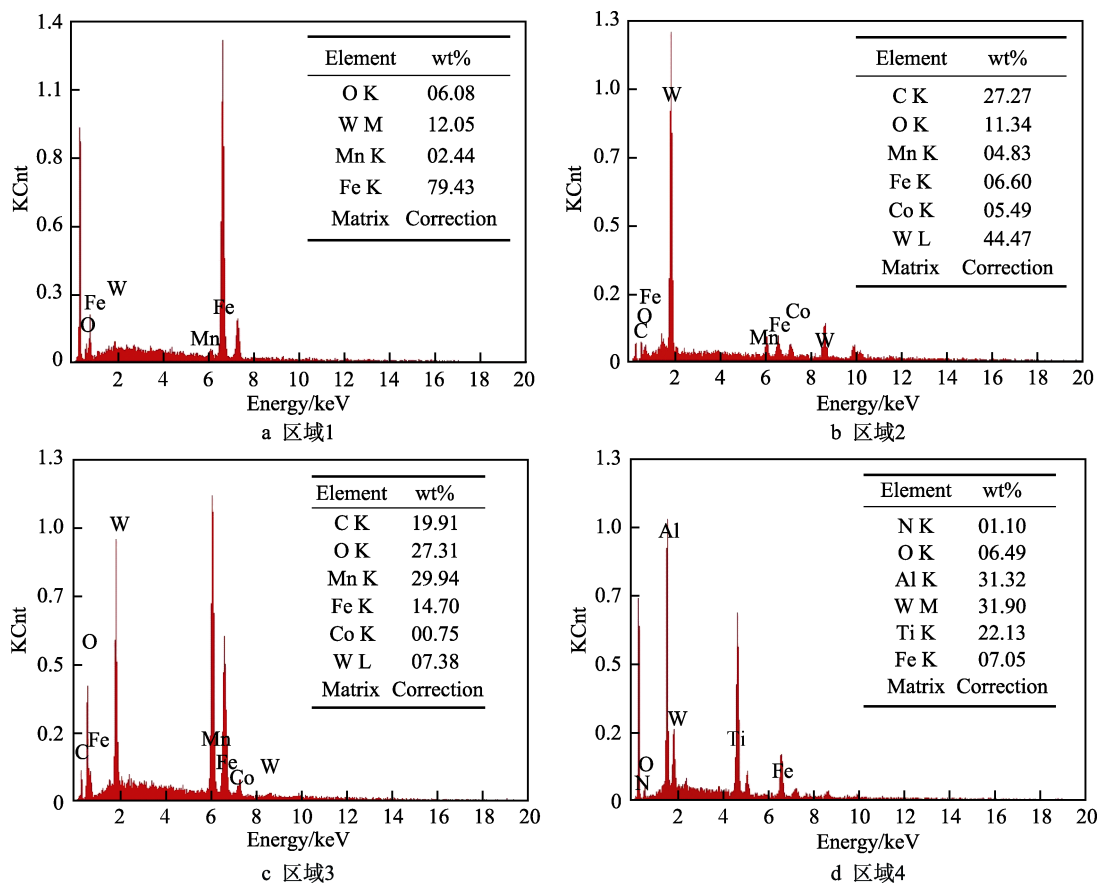


图7 区域1、区域2、区域3和区域4 EDS分析

Fig.7 EDS analysis results of area 1, 2, 3, 4

2) 磨粒磨损。由图5中后刀面的微观形貌可知,后刀面分布有较多的沟槽,而且沟槽内部有较多的填充物,此形貌具有磨粒磨损的特征^[19]。图5中框选区域的EDS成分分析如图8所示,Ti、Al、N元素来自于涂层,Fe元素来自于被加工材料,但是含量较少,由此可知来自于被加工材料的C元素也不会很多,因此C、W元素主要来自于基体WC相;而Co元素含量也较少,表明Co容易随铁屑流失。由以上分析可知,沟槽内的填充物主要由脱落的涂层、磨损的基体材料和少量被加工材料组成。其中被加工的钢轨材料硬度约为330HV,而硬质合金基体(硬度1541HV₂₀)和涂层的硬度(纳米压痕测定的硬度为30.4 GPa)远高于钢轨材料,所以钢轨切屑碎块不会在刀具上产生划痕,而从基体上脱落的涂层具有较高的硬度,能够充当硬质磨粒,在后刀面挤压作用下对暴露的基体产生强烈的磨损。当粘接相Co被逐渐磨掉后,WC颗粒脱落,纯WC颗粒具有比硬质合金基体更高的硬度,也可以充当硬质磨粒对基体造成损伤,而且随着局部沟槽深度的增加,沟槽对硬质颗粒的容纳能力加强,进一步促进了沟槽磨损,而没有形成沟槽或者沟槽较浅的区域,对硬质颗粒的容纳能力较弱,这些区域的磨损速率减慢,因此在形貌上呈现出不均匀分布的沟槽。另外,在铣削过程中,由于刀

具摩擦热产生的高温,导致刀片红硬性下降,也会为基体的磨粒磨损创造条件。

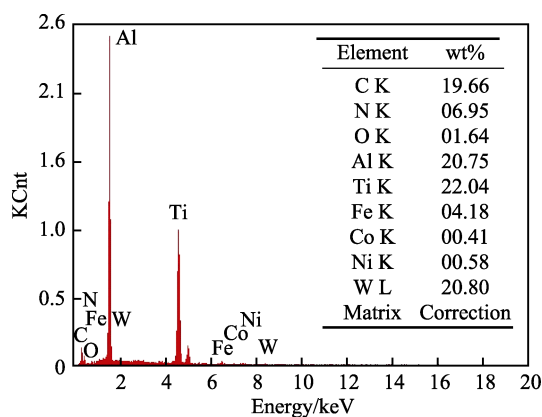


图8 区域5 EDS

Fig.8 EDS analysis results of area 5

3) 氧化磨损。图9为图6中区域6处的EDS成分分析,可以看出此处除了来自涂层的Ti、Al、N元素和来自基体的W元素外,还有大量的O元素,表明在干式铣削过程中产生的高温造成涂层氧化。从表面形貌也可看出,裂纹附近存在较多的白色颗粒。TiAlN涂层在高温下会产生TiO₂和Al₂O₃^[20],其中TiO₂为疏松结构,形成后体积膨胀,会促进表面涂层

的开裂和剥落,因此网状交叉裂纹的形成除了与切削力冲击、热冲击有关外,还与氧化造成的损伤有关。另外,裂纹的形成会为氧气扩散提供通道,进一步促进涂层的氧化失效,从图 7 中也可以看到较多的小颗粒分布在涂层表面。如果氧化形成了较为致密的 Al_2O_3 层,致密、高化学惰性和具有自润滑性能的 Al_2O_3 能够抑制氧向涂层内部扩散,减小粘接和摩擦,对于提高涂层的耐磨性具有一定的优势,但这取决于涂层中的 Al 含量和切削速度^[21]。

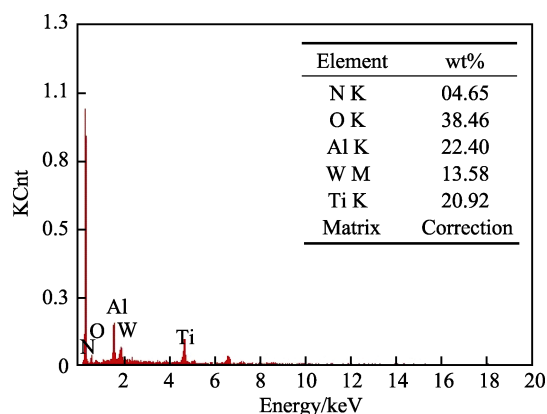


图 9 区域 6 EDS

Fig.9 EDS analysis results of area 6

2.2.3 失效机理分析

图 4 和图 5 所示的失效刃口形貌都呈现出大量不规则的锯齿形特征,而且在后刀面刃口附近出现大块基体和涂层的剥落,这些特征与正常磨损的刃口形貌不同,说明在刀片磨损后期出现了异常磨耗,而图 4 和图 5 显示的证据表明刀片刃口出现了崩刃。

硬质合金属于硬脆性材料,而刀片刃口是整个刀片中的薄弱部位,当刀片和钢轨材料产生强烈的冲击和挤压时,在刃口强度较高的情况下,刃口表面涂层承受着主要的磨损,在粘接磨损、氧化磨损共同作用下,涂层产生裂纹和磨耗,并逐渐失效暴露出基体;在刃口强度较低的情况下,刃口在冲击载荷下产生崩裂掉块或在刃口处形成裂纹,裂纹在持续应力作用下向内部扩展,图 3b 中可以观察到后刀面裂纹会造成涂层微小崩裂,促进涂层快速失效。另外,交联的多条裂纹也会造成涂层局部剥落(如图 6),涂层失效使刃口急剧磨损,切削力增大,当刃口处的应力超过合金强度后会造成刃口局部破裂,在刃口处形成小缺口,这些小缺口会为硬质颗粒提供存储空间,从而产生磨粒磨损(如图 5 所示),而露出的硬质合金基体与被加工材料产生强烈的粘接磨损。后刀面裂纹在工件的强烈挤压下会填充大量的被加工材料,进而促进裂纹的扩展。在上述行为共同作用下,最终导致刃口完全失效。

3 结论

1) 失效刀片在刃口处有垂直于刃口的裂纹,裂纹贯穿前刀面、刃口和后刀面,且前刀面处裂纹内无填充物,而刃口处的裂纹由于挤压作用,内部填充了大量的被加工材料,促进了裂纹扩展。

2) 刀片磨损方式有磨粒磨损、氧化磨损、粘接磨损,由于裂纹扩展造成的涂层崩裂会成为磨粒磨损的硬质颗粒,而刃口崩裂形成的缺口会成为硬质颗粒提供存储空间,进而促进磨粒磨损。

3) 刀片的失效机理为在氧化磨损和粘接磨损作用下,涂层逐渐失效暴露出刀片基体,促使基体迅速磨损增大切削力,造成刃口崩裂,崩裂刃口在磨粒磨损和粘接磨损的共同作用下加剧磨耗而失效。

4) 可通过提高基体的强韧性、合理的设计刃口形式、改善涂层的韧性和结合力、提高涂层的抗氧化性等方面,来提高铣削钢轨用刀片的性能。

参考文献:

- [1] 刘启跃, 王文健, 周仲荣. 高速与重载铁路钢轨损伤及预防技术差异研究[J]. 润滑与密封, 2007, 32(11): 12-14.
LIU Qi-yue, WANG Wen-jian, ZHOU Zhong-rong. An investigation on difference of rail damage and preventive technique of high-speed and heavy-haul railway[J]. Lubrication engineering, 2007, 32(11): 12-14.
- [2] 赵雪芹, 钟雯, 王文健, 等. 高速重载线路钢轨损伤特性分析[J]. 润滑与密封, 2007, 32(10): 100-102.
ZHAO Xue-qin, ZHONG Wen, WANG Wen-jian, et al. Analysis of rail damage behavior of high-speed and heavy-haul railway[J]. Lubrication engineering, 2007, 32(10): 100-102.
- [3] 钟萍. 浅谈铁路钢轨常见问题的原因、预防和处理[J]. 甘肃科技, 2013, 29(21): 57-58.
ZHONG Ping. Discussion on the causes, prevention and treatment of common problems of railway rails[J]. Gansu science and technology, 2013, 29(21): 57-58.
- [4] 崔瀚钰, 潘超, 吉鸿海, 等. 钢轨铣磨车铣削刀组建模与优化[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(5): 1318-1322.
CUI Han-yu, PAN Chao, JI Hong-hai, et al. Modeling and optimization of the milling cutter group for rail milling train[J]. Journal of railway science and engineering, 2018, 15(5): 1318-1322.
- [5] 余念东, 张蒙. SF03-FFS 型钢轨铣磨车的应用[J]. 铁路技术创新, 2013(1): 37-38.
YU Nian-dong, ZHANG Meng. Application of SF03-FFS rail milling train[J]. Railway technology innovation, 2013(1): 37-38.

- [6] 岳红强, 商文杰, 刘博, 等. 钢轨铣削作业单元试验平台的设计[J]. 机电产品开发与创新, 2018, 31(5): 31-32.
YUE Hong-qiang, SHANG Wen-jie, LIU Bo, et al. Design of test platform for rail milling device[J]. Development & innovation of machinery & electrical products, 2018, 31(5): 31-32.
- [7] 岳红强, 刘博, 刘青松. 钢轨铣削作业控制系统的研究和设计[J]. 机电产品开发与创新, 2018, 31(6): 78-79.
YUE Hong-qiang, LIU Bo, LIU Qing-song. Research and design of rail milling device control system[J]. Development & innovation of machinery & electrical products, 2018, 31(6): 78-79.
- [8] 占国栋, 尚振涛, 谢桂芝, 等. 钢轨铣磨车铣刀盘的优化设计研究[J]. 机械设计与制造, 2016(12): 78-82.
ZHAN Guo-dong, SHANG Zhen-tao, XIE Gui-zhi, et al. The optimal design of the milling cutter for rail milling machine[J]. Machinery design & manufacture, 2016(12): 78-82.
- [9] 潘超. 钢轨铣磨车非对称成形铣削方法研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2017, 14(7): 1526-1530.
PAN Chao. Method of asymmetric profile forming milling for rail milling train[J]. Journal of railway science and engineering, 2017, 14(7): 1526-1530.
- [10] 丁郭, 全燕鸣, 刘佩杰, 等. U71Mn 钢轨的成形铣削力测试与建模[J]. 工具技术, 2018, 52(11): 32-35.
DING Guo, QUAN Yan-ming, LIU Pei-jie, et al. Testing and modeling of form milling force of U71Mn rail steel[J]. Tool engineering, 2018, 52(11): 32-35.
- [11] 金滩, 杜成志, 尚振涛, 等. 刀具角度对钢轨铣削温度的仿真与试验研究[J]. 机械科学与技术, 2017, 36(11): 1740-1746.
JIN Tan, DU Cheng-zhi, SHANG Zhen-tao, et al. Simulation and experimental research on influence of tool angle on milling temperature of rail[J]. Mechanical science and technology for aerospace engineering, 2017, 36(11): 1740-1746.
- [12] 王海文. 基于 BP-GA 的钢轨整形切削用量优化应用研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2011.
WANG Hai-wen. Application study of rail remoulding cutting parameters optimization based on BP-GA methods[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011.
- [13] WILHELM Kubin, WERNER Daves, RICHARD Stock. Analysis of rail milling as a rail maintenance process: Simulations and experiments[J]. Wear, 2019, 438-439: 203029.
- [14] GU L. Experimental study on energy dissipation characteristics of adiabatic shear evolution in high-speed machining of U75V steel[J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2018, 99: 557-565.
- [15] 周军, 樊湘芳, 李涛, 等. 弧电流对多弧离子镀 TiAlN 涂层表面形貌和性能的影响[J]. 材料保护, 2018, 51(6): 74-78.
ZHOU Jun, FANG Xiang-fang, LI Tao, et al. Effect of arc current on surface morphology and performance of TiAlN coatings deposited by multi-arc ion plating[J]. Material protection, 2018, 51(6): 74-78.
- [16] 李广旭, 刘强, 李刘合. 纳米 TiAlN 涂层硬质合金刀具高速铣削 AerMet100 钢的磨损机理[J]. 摩擦学学报, 2010, 30(2): 150-156.
LI Guang-xu, LIU Qiang, LI Liu-he. Wear mechanism of nano-TiAlN coated carbide tools in high speed milling AerMet100 steel[J]. Tribology, 2010, 30(2): 150-156.
- [17] 丁郭. 钢轨铣磨修复的实验模拟测试及切削性能研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
DING Guo. Research on the test of experimental simulation of rail milling & grinding and cutting performance[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018.
- [18] 龙震海, 王西彬, 刘志兵. 高速铣削难加工材料时硬质合金刀具前刀面磨损机理及切削性能研究[J]. 摩擦学学报, 2005, 25(1): 83-86.
LONG Zhen-hai, WANG Xi-bin, LIU Zhi-bing. Study on wear mechanism and cutting performance of carbide cutting tool in high speed milling for hard machining materials[J]. Tribology, 2005, 25(1): 83-86.
- [19] 赵晟琪, 刘雅荣. TiAlN 涂层刀具切削性能及磨损机理研究[J]. 机械设计与制造, 2019(3): 91-93.
ZHAO Sheng-qi, LIU Ya-rong. Study on cutting property and wear mechanism of TiAlN coated tools[J]. Machinery design & manufacture, 2019(3): 91-93.
- [20] 梁启超, 王天国. 多弧离子镀 TiAlN 薄膜的制备及其抗氧化性能[J]. 材料保护, 2017, 50(1): 1-4.
LIANG Qi-chao, WANG Tian-guo. Preparation of TiAlN films by multi-arc ion plating techniques and its oxidation resistance[J]. Material protection, 2017, 50(1): 1-4.
- [21] 杨鸿泰, 代明江, 李洪, 等. Al 含量对 TiAlN 涂层组织结构 and 性能的影响[J]. 材料导报 B, 2018, 32(10): 3573-3578.
YANG Hong-tai, DAI Ming-jiang, LI Hong, et al. Effect of Al content on microstructure and properties of TiAlN coating[J]. Materials reports B, 2018, 32(10): 3573-3578.