

硬质合金涂层刀具铣削堆焊合金试验研究

尹亮¹, 赵红瑞², 李海豹³

(1. 包头职业技术学院, 内蒙古 包头 014030; 2. 中国兵器集团内蒙古北方重工业集团有限公司, 内蒙古 包头 014030;
3. 内蒙金属材料研究所, 内蒙古 包头 014030)

摘要:对试验堆焊合金合理加工参数与涂层刀具磨损机制进行了分析。采用逆变直流焊机与特制的含稀土药皮耐磨堆焊焊条在试板表面进行堆焊焊接, 采用数控铣床分组加工试验堆焊合金, 分别对堆焊层进行了成分检测与金相组织分析, 对试验用 APMT1604PDER 型硬质合金涂层刀具进行了金相分析、电镜形貌观测以及能谱分析, 研究了不同参数及加工量条件下刀具涂层与内部基体铣削表面特征以及磨损分析。数控铣床采用 4 齿刀盘时, 相同每齿进给量试验堆焊合金材料的合理加工参数为 $V_f: 0.085 \text{r/min}$, $f_f: \leq 0.05 \text{mm/min}$, $a_p: \leq 0.2 \text{mm}$ 。试验刀具的表面涂层为 AlTiN 类型, 刀具基体材料主要为 500nm~2 μm 不规则碳化钴、碳化钨合金粉末组成; 试验刀具的失效形式: 初期为磨粒磨损, 中期与后期以黏结磨损与扩散磨损为主。

关键词: 铣削; 涂层; 刀具; 堆焊; 组织; 磨损机制

中图分类号: TH16; TG506 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3997(2024)10-0230-05

Experimental Study on Carbide Coated Tools Milling Surfacing Alloy

YIN Liang¹, ZHAO Hong-rui², LI Hai-bao³

(1. Baotou Vocational and Technical College, Inner Mongolia Baotou 014030, China;

2. China North Group Inner Mongolia North Heavy Industry Group Co., Ltd., Inner Mongolia Baotou 014030, China;

3. Inner Mongolia Institute of Metal Materials, Inner Mongolia Baotou 014030, China)

Abstract: The reasonable machining parameters and coating tool wear mechanism of the experimental surfacing alloy were analyzed. Adopt inverter dc welding machine and special hardfacing electrode containing rare earth, surfacing welding was carried out on the surface of the test plate, with CNC milling machine grouping processing surfacing welding alloy of surfacing welding layer, respectively, component testing and microstructure analysis, the test with APMT1604PDER cemented carbide coating tools for the metallographic analysis and electron microscopy morphology observation and energy spectrum analysis, The milling surface characteristics and wear analysis of cutter coating and internal matrix under different parameters and processing amount were studied. When 4 tooth cutters are used in CNC milling machine, the reasonable processing parameters of the test surfacing of alloy material with the same feed per tooth are $n: 400 \text{r/min}$, $V_f: \leq 80 \text{mm/min}$, $a_p: \leq 0.2 \text{mm}$. The surface coating of the test tool was AlTiN type, and the tool matrix material was mainly composed of irregular cobalt carbide and tungsten carbide alloy powder of 500nm~2 μm . The failure modes of the test tool are: abrasive wear in the early stage, bonding wear and diffusion wear in the middle and late stage.

Key Words: Milling; Cutters; Surfacing; Organizations; Wear Mechanism

1 引言

在冶金、煤电及矿山等行业,失效零部件表面进行堆焊修复或增材制造后,堆焊层组织不均匀、硬度高、导热性差,且组织中含有大量碳化物硬质点,故铣削加工对刀具要求较高^[1]。硬质合金涂层具有极高的微硬度和热硬度,是一种适合高热应力的工具涂层,特别是用于加工高硬度钢合金,并具备良好的耐热冲击性,

广泛用于硬质合金车削,铣削等^[2]。近些年国内外学者以 TC₄ 合金、铝锂合金、及镍基堆焊合金的铣削加工刀具磨损特性研究居多,对耐磨堆焊铸件的切削加工研究较少;其次研究主要集中在堆焊修复层的组织性能、新型堆焊工艺和堆焊材料设计等,对切削用刀具的磨损机理研究较少^[3-4]。试验采用 4 齿刃刀盘与进口 APMT 1604PDER 型硬质合金涂层刀具对试验焊合金进行铣削加

来稿日期:2023-08-20

基金项目:APMT 1604PDER 型硬质合金涂层刀具铣削稀土 Cr-Ni-W 堆焊合金的试验研究,包头职业技术学院(KJ202002)

作者简介:尹亮,(1979-),男,内蒙古包头人,本科,副教授,主要研究方向:机械制造与自动化

工,分析了切削工艺参数对刀具磨损的影响规律,深入分析了刀具磨损机理,为进一步确认经济的加工参数、提高刀具寿命以及生产效率等方面提供理论支撑。

2 铣削试验设计

2.1 试验材料

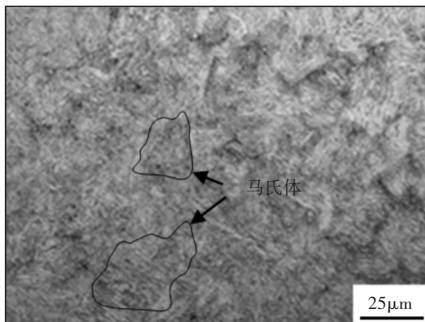
试验工件堆焊所用焊条为 $\text{CaCO}_3\text{-CaF}_2\text{-TiO}_2$ 碱性渣系,焊条药皮合金组份主要为 Cr-Ni-W 体系,药皮稀土中 Dy_2O_3 与 LaCe 混合稀土氧化物加入量为 8%(按重量百分比计),堆焊合金成分与机械力学性能,如表 1、表 2 所示。工件堆焊层材料的显微组织制品,如图 1 所示。从图 1 金相组织图谱中可以看出,所有焊层金相组织均以马氏体+少量残余奥氏体+碳化物为主的铸造组织;马氏体形态包含针状、条状等,含 Cr、Ni 与 W 的碳化物尺寸在 (2~80) μm 不等,马氏体板条和碳化物都较粗大,碳化物呈条带、岛状分布在晶界和晶内。试件堆焊层室温冷却组织硬度为 HRC49~54,退火态硬度 HRC35~40,含 Cr、Ni 及 W 的碳化物显微硬度 HV710~760(0.2kgf)。

表 1 试验工件堆焊焊缝主要化学成分表 (wt%)
Tab.1 Main Chemical Composition of Surfacing Weld of Test Workpiece (wt%)

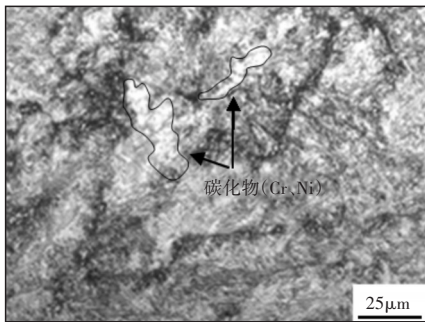
C	Si	Mn	P	S
0.575	0.952	1.4	0.021	0.008
Cr	W	V	Ni	--
5.68	1.42	0.175	0.925	--

表 2 试验工件堆焊合金材料机械力学性能表
Tab.2 Mechanical and Mechanical Properties of Surfacing Alloy Materials of Test Workpieces

抗拉强度 (MPa)	洛氏硬度 (HRC)	显微硬度 (HV)
(420~460)	49~54	580~630



(a)



(b)

图 1 堆焊层显微组织

Fig.1 Microstructure of the Surfacing Layer

2.2 试验参数

在 Q235 钢表面进行电弧堆焊试验,堆焊 2 层至 3 层,堆焊面积控制在长×宽:(40×80)mm,层间温度控制在 (150±20) $^{\circ}\text{C}$ 的范围内。将试件加工至尺寸为 (35×70×25)mm,其中,堆焊层尺寸(长×宽:(35×70)mm),厚度(3~6)mm,误差为 (±0.1)mm。堆焊层铣削共设计 8 组对比试验,每组试验刀盘对称安装 2 枚刀具并对刀片依次编号;铣削试验方案(1~4)组中,铣削深度为 0.5mm 与 0.2mm 分别对应同一刀片的两个刀尖,铣削试验具体方案,如表 3 所示。所有刀具加工的均为焊后室温冷却状态试验堆焊合金发的。

表 3 铣削试验方案
Tab.3 Milling Test Scheme

组别	1	2	3	4
刀片编号	a#&b#	c#&d#	e#&f#	g#&h#
切削速度	0.256m/min	0.171m/min	0.171m/min	0.171m/min
每齿进给量	0.07mm/min	0.05mm/min	0.025mm/min	0.05mm/min
切削深度	0.5/0.2mm	0.5/0.2mm	0.5/0.2mm	0.5/0.2mm
加工时间	9min	9min	9min	9min
组别	5	6	7	8
刀片编号	1#&2#	3#&4#	5#&6#	7#&8#
切削速度	0.085r/min	0.085r/min	0.085r/min	0.085r/min
每齿进给量	0.05mm/min	0.05mm/min	0.05mm/min	0.05mm/min
切削深度	0.2mm	0.2mm	0.2mm	0.2mm
加工时间	9min	26min	54min	104min

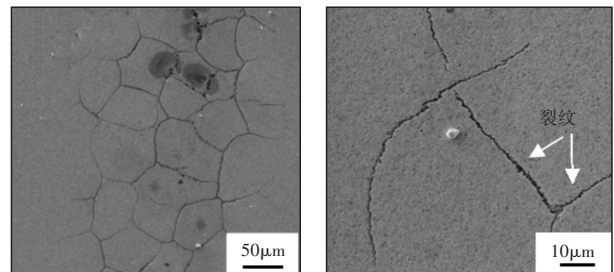
2.3 试验刀具与分析仪器

因堆焊层内部有碳化物硬质点,为增强刀具的抗崩刃性能,试验采用 APMT 1604PDER 型硬质合金涂层刀具,其基本参数为:边长 16mm、厚 4mm、后角 7°、圆弧角 0.8°;涂层特性:显微硬度 HV4500~4900、摩擦系数 3.300。刀盘采用 400R 型 90°R0.8 平面铣刀盘^[5-6]。试验选用 DMG635 型数控立式铣床,单向顺铣铣削且全程浇注冷却液。试验刀具质量称量采用万分之一天平,试验金相观测采用蔡司 HAL100 型金相显微镜,采用日立 JSM6510 进行 SEM 形貌观测与图像采集,采用 FEI QUANTA 400 型扫描电子显微镜对刀具切削刃进行能谱(EDS)与线扫描分析。

3 试验结果与分析

3.1 刀具基体显微组织

从图 2(a)、图 2(b)可以看出,刀具内部截面显微组织并非典型的金属晶体金相组织,电镜视野中从纳米级至微米级的颗粒呈现粉末压制工艺组织形态;刀具基体断面部分区域存在微米级的微裂纹,裂纹呈网状分布将基体分裂为宽度达 (50~100) μm 的近似岛状区域。



(a)

(b)

图 2 刀具基体显微组织图(a)×200,(b)×1000

Fig.2 Microstructure Diagram of Tool Matrix

(a)×200,(b)×1000

3.2 刀具涂层与基体EDS分析

图3中刀具表面涂层放大1500倍后,涂层主要为(1~5) μm 的黑色与白色颗粒相,分析5047/48两点的EDS结果,可以得出刀具涂层为AlTiN合金涂层,白色颗粒含有较高的C与O元素判断为与AlTiN形成的氧化物,涂层含有Ti、Cr等合金强化元素。根据图4SEM及EDS分析,可以得出刀具基体材料主要为碳化钨与少量碳化钴超细合金粉末组成。

从图中可看出基体颗粒均匀度较高,颗粒为不规则三角、方形及类球形,颗粒尺寸从几百纳米到几微米不等(500nm~2 μm);图中黑色近似圆孔区域为气孔缺陷且基体内部此类缺陷极少。

3.3 刀具划痕能谱点分析

1#刀具主刀刃磨损微观形貌,及5039点元素能谱分析,如图5所示。可以看出,此处为明显的堆焊合金材料的黏结物,说明刀具发生黏结磨损;而图5(b)显示刀具基体材料主要为W、C、Co三种元素。

图5(b)中检测到少量Fe元素与微量Cr元素证明堆焊合金材料中的化学元素已经扩散到刀具的基体当中,刀具发生了扩散磨损^[7-9]。

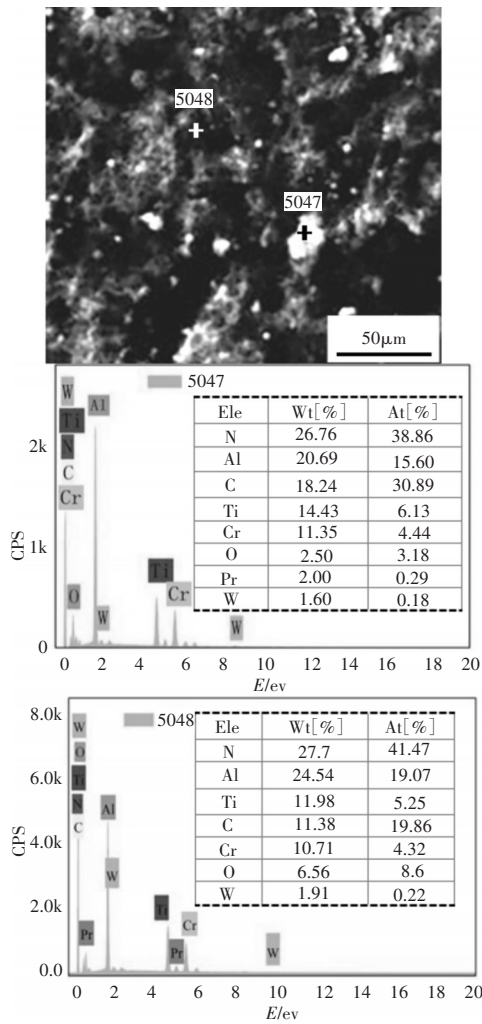


图3 5#刀片涂层SEM及EDS
Fig.3 SEM and EDS of 5# Blade Coating

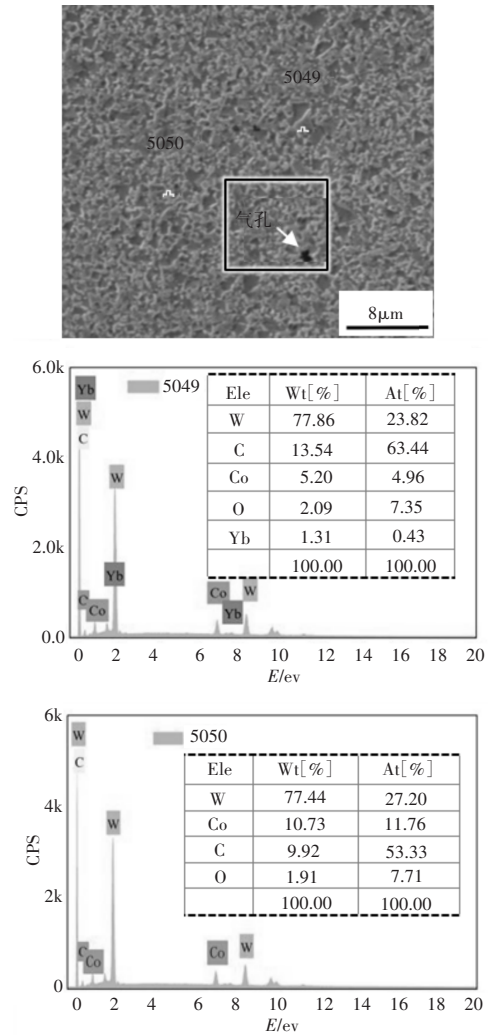
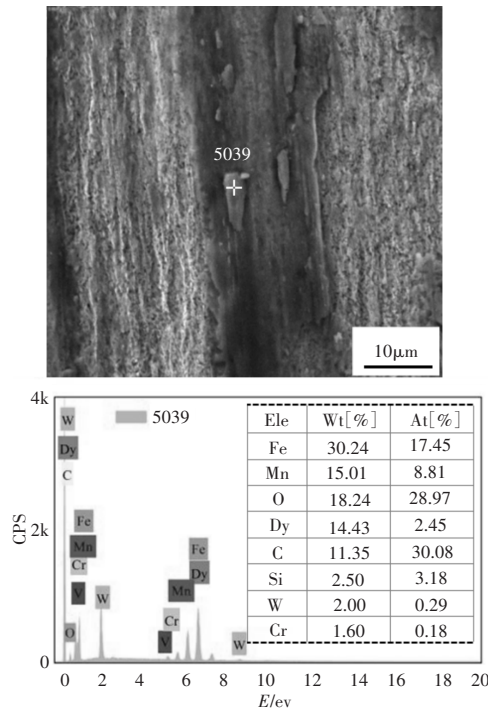


图4 5#刀具基体SEM及EDS

Fig.4 SEM and EDS of 5# Tool Matrix



(a)

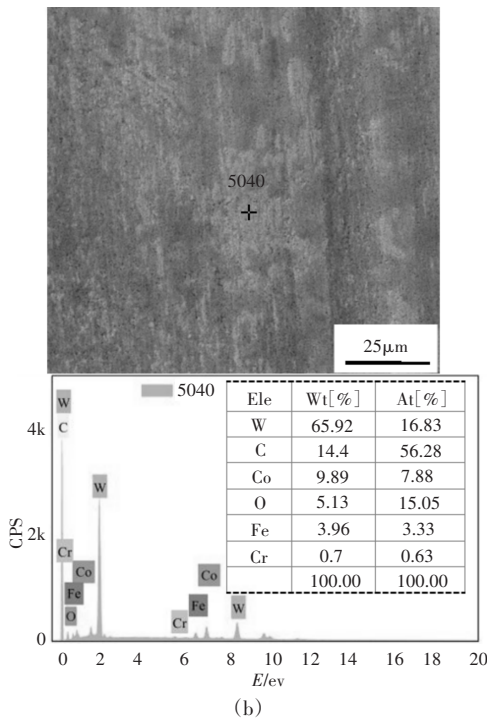


图5 1#刀片主刀刃后刀面SEM及EDS

Fig.5 SEM and EDS of the Main Blade Surface of 1# Tool

3.4 刀具磨损分析

对应2.1铣削试验方案,表2中a#~d#刀具在铣削深度为0.5mm和0.2mm两种试验情况下,对刀后开始加工随即发生崩刃,e#与f#刀具在加工时间达8min后发现崩刃,调整加工参数后,g#与h#刀具在两种加工参数下未发生崩刃,1#~8#刀具未发生崩刃,且刀具刀刃属于正常加工磨损状态。根据表2与表4,可以得出铣削参数对刀具稳定性的影响程度依次为转速、进给速度、铣削深度。采用4号刀时,试验堆焊合金材料的合理加工参数为 $V_c: 0.085r/min, f_r: \leq 0.05mm/min, a_p: \leq 0.2mm$;当转速不变进给速度与铣削深度降低时,刀具寿命相应延长;退火态试验堆焊合金的合理加工参数为 $n: (800\sim 1200)r/min, V_f: \leq 120mm/min, a_p: \leq 0.4mm$ 。通过分析图6曲线变化趋势,可以看出随着铣削时间的增加,刀具失重量在加工时间为52min以前呈现线性递增的关系,在52min以后刀具失重量异常增大,说明在加工时长52min前后刀具涂层发生剥落。

表4 1#~8#刀具铣削质量统计表

Tab.4 Milling Quality Statistics Table of 1#~8# Cutter

刀具编号	原始质量(g)	加工后质量(g)	失重量(g)	刀刃状态
1#	6.1159	6.1154	0.0005	正常
2#	6.0983	6.0977	0.0006	正常
3#	6.1208	6.1201	0.0007	正常
4#	6.1122	6.1111	0.0011	正常
5#	6.1204	6.1194	0.0010	正常
6#	6.1196	6.1183	0.0013	正常
7#	6.1160	6.1140	0.0020	正常
8#	6.1148	6.1133	0.0015	正常

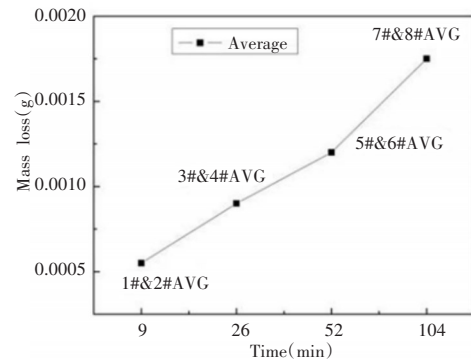
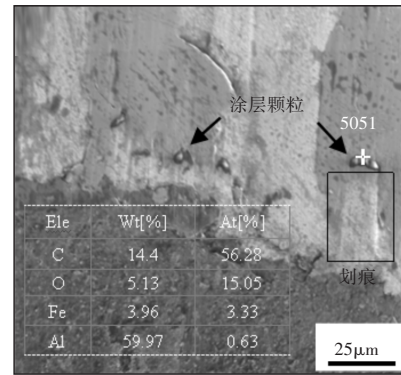


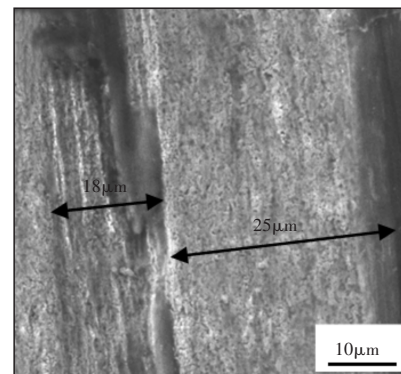
图6 1#~8#刀具铣削质量损失量变化曲线

Fig.6 Change Curve of Milling Quality Loss of 1#~8# Cutter

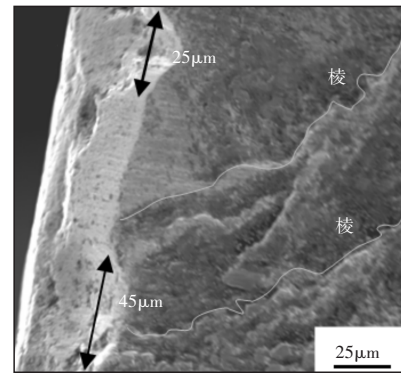
从图7可以看出切削主刀刃口部位发生严重的破损或崩刃,刀具涂层磨掉或剥落后基体表面呈现出宽度达几微米至25微米的壕沟与划痕。



(a)



(b)



(c)

图7 切削刃后刀面SEM及5051点EDS,(c)前刀面

Fig.7 SEM of the Cutting Edge Back Surface and EDS in 5051 Point,(c) the Front Cutting Surface

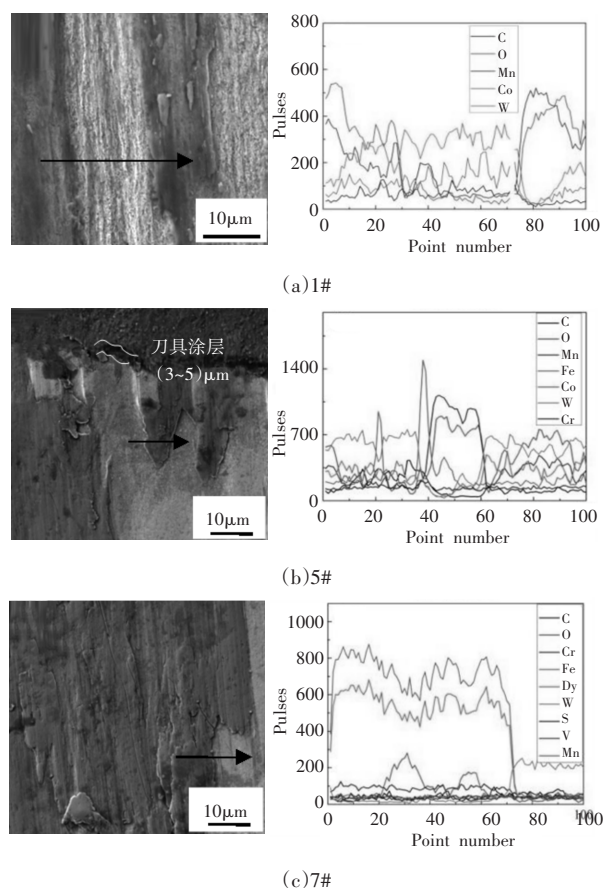


图8 刀具主刀刃SEM线扫描

Fig.8 SEM Line Scanning of the Tool's Main Blade

如图7(a)所示,通过5051号点EDS分析判定铣削试验堆焊合金过程中,刀具涂层受到加工材料施加的冲击力剥落成尺寸为(1~10) μm 的微小颗粒并移至刀具基体表面,且微颗粒沿着切削的反方向在基体表面形成对应划痕;刀具主切削刃前刀面涂层呈现棱状磨损形貌。图8中黑色线为线扫描路径指示线,从图8可以看出Fe与Cr元素在基体与粘附层两侧含量差距较大,通过对比线扫描与上节点分析元素变化可以得出四图中黑灰色部分为粘附在刀具基体上的试验堆焊合金材料,白灰色部分为刀具基体。结合刀具涂层EDS点分析数据可以得出图8(b)中黑色不平整部分为刀具涂层,且涂层厚度为(3~5) μm 。

切削初期刀具涂层在堆焊合金高速冲击与剪切力作用下,刀具主刀切主要以磨粒磨损为主。随着刀具涂层磨掉或剥落后,刀具和工件接触应力面上产生了明显的“黏结”现象,母材堆焊合金微颗粒粘结在刀具基体表面,随着切削时间的增加,黏结层的厚度和面积不断增加,大部分黏结材料与少部分刀具基体随切屑带走,造成刀具刃口破损面逐步增大,切削进入一个动态缓慢失效的过程即切削中期,此阶段为稳定磨损期刀具磨损主要以黏结磨损与扩散磨损为主^[10-12]。在稳定期末至后期,黏结层与刀具基体应力面受到堆焊合金碳化物硬质点的冲击出现壕沟和脱落现象,刀具切削刃演变为切削面,此时刀具的切削加工性能受到极大削弱,导致刀具加速失效。至此试验刀具的失效形式主要为硬质合金磨粒磨损、黏结磨损与扩散磨损三种形式^[13-14]。实际生产中,铣削加工退火态试验堆焊合金可大幅延长刀具使用寿命;当

堆焊母材不允许热处理时,可选用上述加工工艺与参数;而堆焊母材允许热处理可以采取退火后机械精加工最后再进行热处理达到所要求的强韧性。

4 结论

(1)采用400R型刀盘时,试验工件堆焊合金的合理铣削参数为 $V_c: 0.085\text{r/min}$, $f_i: \leq 0.05\text{mm/min}$, $a_p: \leq 0.2\text{mm}$ 。(2)试验用APMT 1604PDER型硬质合金涂层刀具的表面涂层为AlTiN类型,刀具基体材料主要为粒径500nm~2mm的不规则三角、方形及类球形碳化钨与少量碳化钴合金粉末组成。(3)试验刀具的失效形式:初期为磨粒磨损,中期与后期以黏结磨损与扩散磨损为主。

参考文献

- [1] 韩旭.堆焊钴基合金切削性能及刀具磨损实验研究[D].大连理工大学,2019.
(Han Xu.Experimental study on cutting properties and tool wear of surfacing cobalt alloy[D].Dalian:Dalian University of Technology,2019.)
- [2] 侯庆坤,李嫚,裴江涛.等离子堆焊镍基合金切削性能的试验研究[J].工具技术,2017,51(12):18-22.
(Hou Qing-kun, Li Man, Pei Jiang-tao.Experimental study on machining properties of nickel base alloy by plasma surfacing[J].Tool Engineering,2017,51(12):18-22.)
- [3] 翟大军,文仲波,侯勇,等.汽轮机叶片热锻模具堆焊层组织与力学性能[J].热加工工艺,2018,47(17):81-84.
(Zhai Da-jun, Wen Zhong-bo, Hou Yong, et al.Microstructure and mechanical properties of surfacing layer of steam turbine blade hot forging die[J].Hot Working Technology,2018,47(17):81-84.)
- [4] 罗丽莎.镍基合金690焊缝力学性能研究[D].上海:上海交通大学,2018.
(Luo Li-sha.Study on mechanical properties of Nickel-based alloy 690 weld[D].Shanghai:Shanghai Jiaotong University,2018.)
- [5] 刘胤,王金星,张德玉,等.TiAlN涂层硬质合金刀具铣削4J32低膨胀合金的磨损机理分析[J].工具技术,2019,53(9):47-50.
(Liu Yin, Wang Jin-xing, Zhang De-yu, et al.Wear mechanism analysis of 4J32 low expansion alloy milled by TiAlN coated cemented carbide tool[J].Tool Technology,2019,53(9):47-50.)
- [6] 张家雨.基于中心复合响应曲面法的42CrMo高速铣削试验分析[J].工艺与制,2019(2):94-99.
(Zhang Jia-yu.Experimental analysis of 42CrMo high speed milling based on central composite response surface method[J].Technology and Manufacturing,2019(2):94-99.)
- [7] 徐慧.稀土低合金耐磨钢堆焊熔敷层性能研究[J].热加工工艺,2008,37(3):25-26+48.
(Xu Hui.Study on the properties of cladding layer for hardfacing electrode of rare earth low alloy wear resistant steel[J].Hot Working Technology,2008,37(3):25-26+48.)
- [8] 钟平,孙方宏.TiAlN涂层铣刀铣削9SiCr钢切削性能试验研究[J].现代制造工程,2005(2):91-92.
(Zhong Ping, Sun Fang-hong.Experimental study on machining properties of 9SiCr steel with TiAlN coated milling cutters [J]. Modern Manufacturing Engineering,2005(2):91-92.)

(下转第241页)

- [4] Zou ZH, Chen J, Pang XP. Task space-based dynamic trajectory planning for digging process of a hydraulic excavator with the integration of soil-bucket interaction [J]. Institution of Mechanical Engineers, 2019, 233(3):598-616.
- [5] 刘征, 陈谊超, 丁华锋. 一种新型矿用正铲液压挖掘机的运动学分析 [J]. 机械工程学报, 2014, 50(15):28-33.
(Liu Zheng, Chen Yi-chao, Ding Hua-feng. Kinematic analysis of a new mineral positive shovel hydraulic excavator [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(15):28-33.)
- [6] 吴攀峰, 谢良喜, 孙欢, 等. 基于液压摆缸的反铲液压挖掘机的设计与运动学分析 [J]. 机床与液压, 2020, 48(2):63-66.
(Wu Pan-feng, Xie Liang-xi, Sun Huan, et al. Design and kinematics analysis of backhoe hydraulic excavator based on hydraulic swing cylinder [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2020, 48(2):63-66.)
- [7] Angeles J, Alivizatos A, Zsombor-Murray P J. The synthesis of smooth trajectories for pick-and-place operations [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1988, 18(1):173-178.
- [8] 管成, 王飞, 张登雨. 基于NURBS的挖掘机器人时间最优轨迹规划 [J]. 吉林大学学报(工学版), 2015, 45(2):540-546.
(Guan Cheng, Wang Fei, Zhang Deng-yu. Time optimal trajectory planning of mining robot based on NURBS [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2015, 45(2):540-546.)
- [9] 钟星, 邵辉, 叶贤成. 多障碍物环境下挖掘机的连续避障轨迹规划 [J]. 计算机工程与科学, 2018, 40(7):1310-1315.
(Zhong Xing, Shao Hui, Ye Xian-cheng. Continuous obstacle avoidance trajectory planning for excavators in multiple obstacle environments [J]. Computer Engineering and Science, 2018, 40(7):1310-1315.)
- [10] 黄真, 赵永生, 赵铁石. 高等空间机构学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2005.
(Huang Zhen, Zhao Yong-sheng, Zhao Tie-shi. Advanced Space Mechanism [M]. Beijing: Higher Education Press, 2005.)
- [11] 于千源, 饶晓波, 李朋阳, 等. 一种新型腿部机构自由度分析与驱动输入研究 [J]. 机械设计与制造, 2021(6):279-283.
(Yu Qian-yuan, Rao Xiao-bo, Li Peng-yang, et al. Research on freedom analysis and driving input of a new leg mechanism [J]. Machinery Design & Manufacture, 2021(6):279-283.)
- [12] 韩建友, 杨通, 于靖军. 高等机构学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2017.
(Han Jian-you, Yang Tong, Yu Jing-jun. Mechanism of Higher Learning [M]. Beijing: China Machine Press, 2017.)
- [13] 孙伟, 李二洋, 王晓邦, 等. 面向智能挖掘机的最优挖掘轨迹规划 [J]. 大连理工大学学报, 2018, 58(3):246-253.
(Sun Wei, Li Er-yang, Wang Xiao-bang, et al. Optimal trajectory planning for intelligent excavator [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2018, 58(3):246-253.)
- [14] Lin C, Chang P, Luh J. Formulation and optimization of cubic polynomial joint trajectories for industrial robots [J]. IEEE Transactions on automatic control, 1983, 28(12):1066-1074.
- [15] 郭卫东, 李守忠, 马璐. ADAMS 2013 应用实例精解教程 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2015.
(Guo Wei-dong, Li Shou-zhong, Ma Lu. ADAMS 2013 Application Example Precision Solution Tutorial [M]. Beijing: China Machine Press, 2015.)

(上接第 234 页)

- [9] 王琰, 赵中华, 胡天宇. 不同涂层刀具铣削退火 H13 钢加工性能研究 [J]. 制造业自动化, 2019, 41(4):116-118+126.
(Wang Yan, Zhao Zhong-hua, Hu Tian-yu. Research on machining properties of H13 steel milled with different coating tools [J]. Manufacturing Automation, 2019, 41(4):116-118+126.)
- [10] 莫继良. 物理气相沉积(PVD)涂层的摩擦学行为研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2008.
(Mo Ji-liang. Study on tribological behavior of physical vapor deposition (PVD) coating [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2008.)
- [11] 寇植达. 铣削加工每齿进给量的决定因素研究及验证 [J]. 工具技术, 2020, 54(2):58-60.
(Kou Zhi-da. Research and validation of determinant factors of feed per tooth in milling [J]. Tool Engineering, 2020, 54(2):58-60.)
- [12] 卢布. AlTiN/AlCrN 涂层硬质合金铣刀制备及铣削性能研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2017.
(Lu Bu. Preparation and milling performance of AlTiN/AlCrN coated cemented carbide cutters [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017.)
- [13] 杨晓旻. 司太立焊材车削加工刀具磨损机理及应用研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2010.
(Yang Xiao-min. Research on tool wear mechanism and application in turning of sitaili welding materials [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2010.)
- [14] 姚倡锋. TiAlN 涂层硬质合金刀具大进给铣削高温合金的加工性能评价 [J]. 工具技术, 2018, 23(3):122-127.
(Yao Chang-feng. Machining performance evaluation of TiAlN coated cemented carbide tool in large feed milling of superalloy [J]. Tool Technology, 2018, 23(3):122-127.)