

## 激光与光电子学进展

## 数控机床高速钢刀具激光熔覆 Co-WC 的组织与切削加工性能

胡桂领\*, 师鹏, 张磊

河南科技职业大学机电工程学院, 河南 周口 466000

**摘要** 在数控机床损伤的高速钢刀具表面激光熔覆制备了 Co 基 WC 复合修复层, 结果表明: 高速钢基体与修复层的界面冶金结合良好, 无明显缺陷, 修复层主要由 Co 基 FCC 晶体结构和三种类型的碳化物组成, 显微硬度最高达到  $(1625 \pm 63)$  HV, 比高速钢基体的显微硬度提高了大约 364.3%, 平均摩擦系数达到 0.65, 磨损表面相对于高速钢刀具较为完好。同时, 切削试验表明具有 Co-WC 修复层的高速钢刀具切削后前刀面 O 含量较低, 具有更好的切削性能。

**关键词** 激光技术; 激光熔覆; 数控机床; 金属基复合材料; 高速钢刀具; 切削加工性能

中图分类号 TG665

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1114008

## Microstructure and Machinability of Laser Cladding Co-WC on High Speed Steel Tools for Numerical Control Machine Tools

Hu Guiling\*, Shi Peng, Zhang Lei

College of Mechanical and Electrical Engineering, Henan Vocational University of Science and Technology, Zhoukou 466000, Henan, China

**Abstract** In this paper, Co-based WC composite coating was prepared by laser cladding on the surface of high speed steel (HSS) tools damaged for numerical control machine tools. The results show that the interface metallurgical bonding between HSS substrate and repair layer is good without obvious defects. The repair layer is mainly composed of a Co-based FCC crystal structure and three types of carbides. The microhardness is about  $(1625 \pm 63)$  HV, which is 364.3% higher than that of the HSS substrate. The average friction coefficient is 0.65. The wear surface is relatively intact compared with the HSS tool. Cutting experiments show that the HSS tool with the Co-WC repair layer has lower O content on the rake face and better cutting performance.

**Key words** laser technique; laser cladding; computer numerical control machine tools; metal substrate composites; high speed steel tool; machinability

## 1 引言

高速钢(HSS)属于 Fe-C-X 高合金钢, 其中 X 代表铬、钨、钼、钒等强碳化物元素, 铸态高速钢的典

型组织是大量高硬度碳化物分布在马氏体基体中, 由于具有更高的强度和冲击韧性, 高速钢在数控机床的刀具制造中得到了广泛应用<sup>[1-2]</sup>。然而, 高速钢刀具容易发生磨料和黏着磨损, 极端环境下的氧化

收稿日期: 2021-11-10; 修回日期: 2021-12-08; 录用日期: 2022-01-05

基金项目: 2020 年度河南省高等学校青年骨干教师培养计划(2020GGJS300)

通信作者: \*Huguilin1984@126.com

程度对高速钢的热磨损性能提出了更高的要求<sup>[3]</sup>。具有良好附着力和高致密性的连续保护涂层可以降低刀具在切削过程中的摩擦系数,被广泛用来改善高速钢刀具的加工性能<sup>[4-5]</sup>。

激光熔覆是一种重要的表面改性和再制造技术,可以在破损的基底上形成具有特殊物理、化学和机械性能的修复涂层,已被众多学者用来强化或修复各类极端环境下的工程构件<sup>[6-7]</sup>。Guévenoux 等<sup>[8]</sup>研究了基体材料和激光熔覆修复区域界面附近的微观结构,指出应变局部化现象主要由熔覆后的晶粒尺寸效应决定。韩晨阳等<sup>[9]</sup>针对冷轧辊的疲劳和磨损缺陷采用激光熔覆正交试验对其进行修复,发现冷轧辊的硬度和耐磨性有很大的提升。张可召等<sup>[10]</sup>将具有通槽的 5A06 铝合金进行激光熔覆修复,发现熔覆区的显微组织由  $\alpha$  相、 $\beta$  相及沿  $\alpha$  相晶界分布的 Al-Si 共晶组织构成。Li 等<sup>[11]</sup>采用激光熔覆 NiCu/Fe-36Ni 低膨胀复合合金对球墨铸铁进行了深坑修复,发现修复层具有低膨胀系数和良好的力学性能。Walker 等<sup>[12]</sup>通过激光熔覆工艺修复了飞机起落架 AerMet<sup>®</sup>100 钢,发现修复后的试样裂纹扩展寿命比原始试样长 3~4 倍,这归因于修复过程产生的残余压应力。

上述文献表明,激光熔覆已被证明是修复受损金属部件并提高其机械性能的有效技术。而粉末对最终熔覆涂层的性能起着关键作用,添加各种硬质相的钴基合金粉末在过去几年中得到了广泛探索,获得了更高的硬度和更好的磨损性能。其中,碳化钨(WC)具有优异的耐磨性,是熔覆粉末的理想材料,纳米级 Co 基 WC 复合材料一直是人们感兴趣的主题和研究焦点<sup>[13]</sup>。虽然已有研究揭示了工艺参数对 Co 基 WC 复合材料熔覆层微观结构、形貌、硬度、耐磨性和耐腐蚀性的影响,但很少有关于 Co 基 WC 复合材料激光修复数控机床破损高速钢刀具的研究报道。因此,本文在钴基合金粉末中添

加了适当 WC 颗粒作为熔覆材料,在数控机床损伤的高速钢刀具表面制备 Co-WC 复合涂层,并研究了高速钢刀具基体与 Co-WC 的冶金结合、组织演变和耐磨性能,最后探索了激光修复后高速钢刀具切削后的磨损行为。

## 2 试验材料与方法

Amado 等<sup>[14]</sup>曾指出 WC 微细颗粒可以提高材料的极限拉伸强度和屈服强度,但当颗粒含量较高或较低时,均会造成基体材料的延性变差。因此,本文根据 Li 等<sup>[13]</sup>和 Amado 等<sup>[14]</sup>的研究,在 Co 基合金粉末(颗粒尺寸约为 55  $\mu\text{m}$ ,化学成分见表 1)中添加质量分数为 25% 的 WC 粉末作为增强颗粒(颗粒尺寸为 55~80  $\mu\text{m}$ ,物理性质见表 2),将两者在球磨机中混粉 8 h,混粉温度保持在 (55 $\pm$ 5)  $^{\circ}\text{C}$ ,转速为 220 r/min,最后烘干处理。试验前将真空铸造的高速钢刀具(牌号:W18Cr4V)预热,化学成分见表 3,采用 6 kW 横流同轴送粉半导体激光熔覆系统(型号:SPI TL 20-1 FQ 1030 nm),设定聚焦光斑直径为 1 mm,在充满超纯氩气(体积分数>99.99%)的密封腔内,对破损高速钢进行激光表面修复,其中送粉速率为 8.3 g/min,熔覆功率为 3 kW,扫描速度为 260 mm/min,搭接率为 33%,每层扫描完成后时间间隔为 60 s,且其扫描方向旋转 67 $^{\circ}$ ,使热分布均匀,修复完成后用砂纸打磨修复层表面的黏结粉末,使其表面粗糙度达到切削使用要求,如图 1(a)所示。

表 1 Co 基合金粉末的化学成分

Table 1 Chemical composition of Co alloy powder

Element	C	Cr	Mo	Ni	Si	Fe	Co
Mass fraction / %	0.28	28.6	5.4	2.27	0.9	0.5	Bal.

将修复完成后的高速钢进行金相试样制备,经打磨、抛光后用 Murakami's 试剂([10 g  $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ ], 10 g NaOH, 100 mL  $\text{H}_2\text{O}$ ) 腐蚀,用 LV-UEPI-N 金

表 2 WC 粉末的物理性质

Table 2 Thermo-physical properties of WC powder

Parameter	Density / ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	Melting point / $^{\circ}\text{C}$	Thermal conductivity / ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )	Thermal expansion coefficient / $\text{K}^{-1}$	Hardness / HV
Value	15800	2687	84	$6.9\times 10^{-6}$	1650

表 3 真空铸造高速钢的化学成分

Table 3 Chemical composition of vacuum cast high speed steel

Element	C	Cr	W	V	Mo	Si	Mn	Ni
Mass fraction / %	0.81	3.97	6.09	1.73	4.89	0.24	0.27	0.25

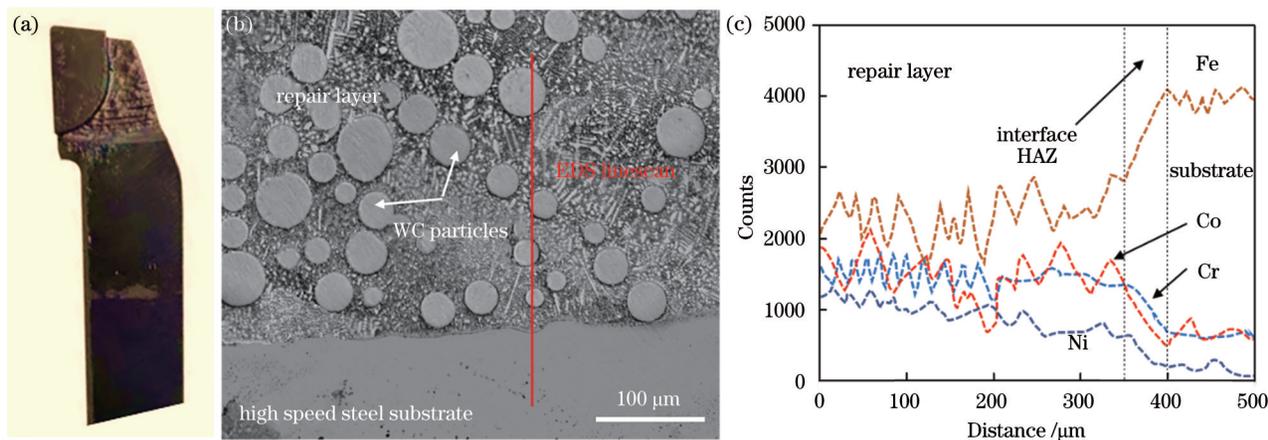


图1 修复后的刀具宏观形貌与显微组织结构。(a)修复后的刀具宏观形貌;(b)显微组织;(c)EDS元素分布

Fig. 1 Macro morphology and microstructure of repaired tool. (a) Macro morphology of repaired tool; (b) microstructure; (c) EDS element distribution

相显微镜(OM)观察显微组织。利用蔡司S-4800场发射扫描电镜搭载Octane SDD能谱仪(EDS)分析修复层的元素分布变化;采用MHV2000型显微硬度计,设置载荷为150 gf,加载时间为5 s,每个平行位置测量5次,取平均值进行硬度测试;修复后的表面物相结构采用D/Max-2500PC型X射线衍射仪(XRD)进行分析,其中扫描角度为 $25^{\circ}\sim 80^{\circ}$ ,扫描速度为 $2(^{\circ})/s$ ;采用HT-600摩擦磨损仪对比了修复和未修复的高速钢刀具的摩擦磨损性能,其中载荷为1.2 kg时,滑动速度为0.06 m/s,滑动时间为60 min,选用直径为3 mm的陶瓷 $Al_2O_3$ 球作为摩擦对偶件;样品的磨损质量用电子天平测量,感量为0.1 mg,磨损后的表面形貌采用蔡司S-4800场发射扫描电镜观察。修复层与基体的结合强度采用Insekt100 Table型微机控制电子万能试验机,采用位移控制,加载速率为1 mm/min,测试样品结合处拉伸抗剪力学性能。为了对比修复和未修复刀具的切削性能,切削试验均在CAK3665数控机床上进行,其中主轴转速范围为 $20\sim 2400$  r/min,以切削锻造 $\Phi 56$  mm的棒状316L不锈钢为例,其中切削参数如下:切削速度 $v_c=140$  m/min,进给量 $F=0.18$  mm/rev,切削宽度 $a_w=1$  mm,切削厚度 $a_c=5$  mm,切削过程中采用切削液进行冷却。切削后的刀具形貌采用上述扫描电镜进行形貌观察,并对其进行EDS元素分析,通过切削后刀具前刀面的破碎程度和氧化程度判定切削性能的好坏。

### 3 结果及讨论

数控机床高速钢刀具修复后的微观截面显微

组织如图1(b)所示,显微组织分为基体、界面(HAZ)和修复层三部分。其中修复层由两部分组成:第一部分为组织致密、无裂纹的等轴晶和枝晶组织,第二部分即球形的WC颗粒。基体与修复层的界面结合处,冶金结合良好,无明显缺陷生成。EDS线扫描结果如图1(c)所示,各个位置详细的元素含量变化如表4所示,可以发现主要元素Fe、Co、Cr、Ni从修复层到基体发生了明显的变化,这是由于激光熔覆具有快速熔化和凝固的热循环特性,冷却速度可达 $10^5\sim 10^6$  K/s,在控制零件最终凝固形态中具有很大的稀释特性<sup>[15-16]</sup>。从表4可以看出,界面区由具有FCC结构的W和Co元素共晶组成,颗粒表面的部分熔融和与基体的互扩散使WC颗粒与基体形成良好的冶金结合。进一步观察表4可以发现,凝固过程中Cr、W和C在枝晶处发生偏析,在等轴晶处广泛形成了富含Cr和C的共晶相。在高温快冷的成形过程中,一般认为元素的偏析是由热毛细力驱动和熔体黏度引起的摩擦力拖动造成的<sup>[11]</sup>。因此,通过控制激光热输入来降低表面张力和熔体黏度,可以增强热毛细力,促进粉末颗粒在熔池中的重排从而形成致密无缺陷零件,对修复破损高速钢刀具至关重要。

图2(a)为破损高速钢刀具修复层的X射线衍射分析,结果表明,修复层主要由Co基FCC晶体结构和三种类型的碳化物组成。 $Cr_7C_3$ 共晶碳化物为正交晶结构,WC为六方晶结构,还能观察到具有正交晶状结构的 $W_2C$ 碳化物。可以看出,WC颗粒一部分溶解在Co基合金熔体中,另一部分在高能辐照下分解为W和C,新相WC的出现可以从两个方面

表 4 修复层 EDS 分析  
Table 4 EDS analysis result of the layer

Item	Mass fraction %							
	C	Cr	W	Fe	Co	Si	Mn	Ni
Dendritic crystal	2.3	21.9	1.6	2.7	53.4	1.3	0.05	17.1
Equiaxed grain	8.9	35.0	9.3	1.7	36.1	0.9	1.6	6.5
WC particles	5.3	—	94.7	—	—	—	—	—
Interface(HAZ)	3.1	8.5	60.3	1.7	21.1	—	0.8	4.5

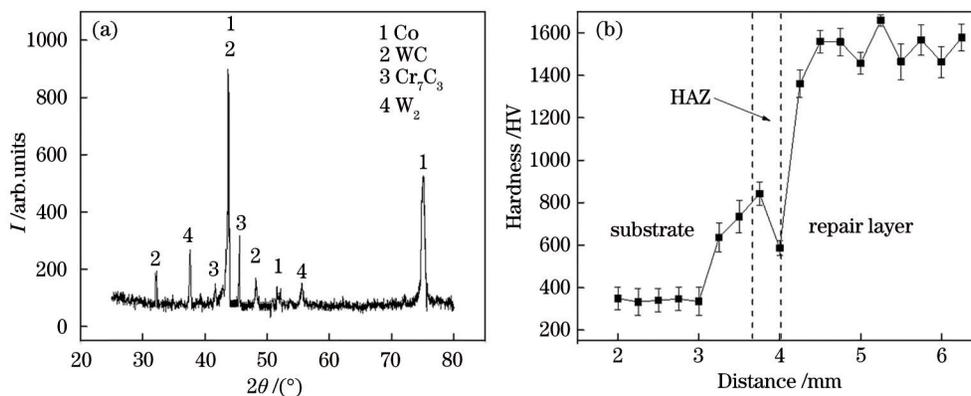


图 2 试验结果。(a)破损高速钢修复层的 XRD 图谱;(b)硬度分布曲线

Fig. 2 Experimental results. (a) XRD pattern of damaged high speed steel repair layer; (b) hardness distribution curve

解释,一是 WC 颗粒没有完全溶解,二是碳继续扩散到  $W_2C$  中形成 WC 相,WC 的分解和随后形成的碳化物可以认为有三个阶段<sup>[17]</sup>:

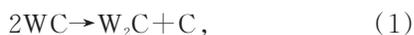


图 2(b)显示了激光修复高速钢刀具截面上沿深度的显微硬度,从高速钢基体到修复层逐渐升高,显微硬度最高达到  $(1625 \pm 63)$  HV,比高速钢基体的显微硬度提高了大约 364.3%。可以看到,修复层的显微硬度波动范围较大,这是由于 Co 基修复层内部未熔化的 WC 颗粒分布所致。分析认为在稳定的激光熔池作用下,熔池黏结和凝固之前的熔融态时间会延长,形成良好的 Co-WC 金属修复层,但由于高硬度的 WC 粒子部分熔化并分解,使得未溶解的 WC 颗粒无规律分散在修复层内部,导致硬度增大。当材料吸收能量到达一定的阈值之后,较低的熔体黏度无法提供足够数量的熔体来填充前一层未熔化的空隙,进一步影响 Co-WC 合金的熔融成形,降低其硬度<sup>[7, 18]</sup>。另一方面,等轴晶受热流和晶体取向控制,而树枝晶生长与等轴晶生长不同,在枝晶生长过程中,晶体取向决定生长方向,树枝晶的生长方向是一个特定的方向,在该方向生长和

凝固速度最快,因此显微组织形态和织构取向也是修复层硬度产生波动的一个主要原因<sup>[8, 19]</sup>。

激光修复与未修复的高速钢刀具的摩擦磨损试验结果对比如图 3 所示,由于陶瓷  $Al_2O_3$  球所载荷是一个常数,因此可以采用摩擦力计算试样表面的摩擦系数,如图 3(a)所示。可以看出,具有修复层的高速钢刀具的摩擦系数(平均为 0.65)波动幅度小于原始未修复高速钢刀具的摩擦系数(平均为 0.83),表明修复层具有更稳定的耐磨性。进一步,磨损试验后的试件损失质量如图 3(b)所示,原始高速钢的损失质量约为 6.2 mg,而具有修复层的刀具损失质量约为 5.3 mg,比原始高速钢刀具降低了 14.5%。观察图 3(c)和(d)中磨损后的 SEM 表面形貌可以发现,原始高速钢刀具表面凹凸不平,出现大量的犁沟和层状剥离带,并带有较多的磨损颗粒,磨痕边缘出现因剪切作用而引起的塑性变形[图 3(c)]。而带有修复层的刀具主要为磨粒磨损和滑动磨损,且剥落的碎屑要小于原始高速钢刀具。结合图 1(a)和 XRD 图谱分析可知,修复层中未溶解的 WC 颗粒可以减小刀具表面的摩擦面积,同时细小微纳 WC 颗粒在摩擦过程中起到了“微纳滚珠”的作用,隔离了刀具与摩擦副之间的直接接触,导致具有修复层的刀具磨损量减小,摩

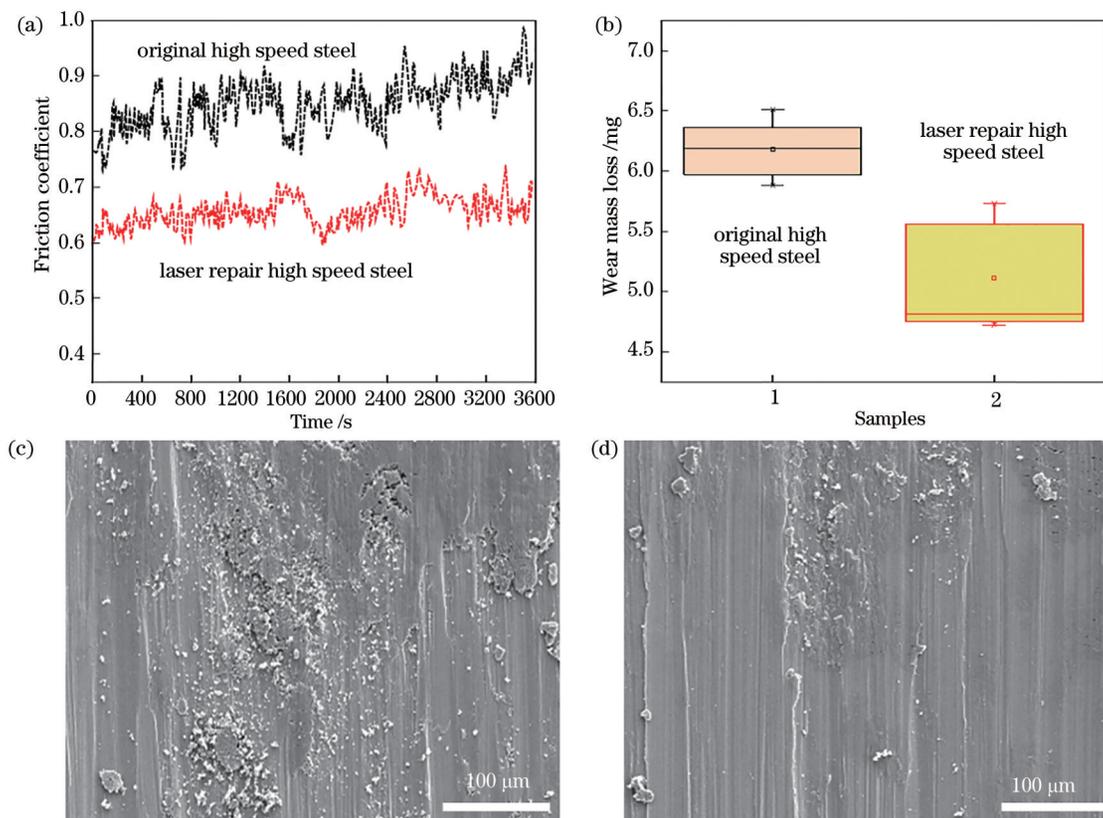


图 3 修复与未修复的高速钢刀具摩擦磨损试验对比。(a)摩擦系数对比;(b)磨损后损失质量对比;(c)原始高速钢表面 SEM 形貌;(d)激光修复高速钢表面 SEM 形貌

Fig. 3 Comparison of friction and wear tests between repaired and unrepaired HSS tools. (a) Comparison of friction coefficients; (b) comparison of mass loss; (c) SEM morphology of original HSS surface; (d) SEM morphology of HSS surface repaired by laser

擦学性能较好,摩擦系数较低。随着时间的推移,修复层中的 WC 颗粒逐渐脱落,磨损以黏着磨损为主,磨粒磨损为辅,在随后相对滑动中修复层刀具某些位置发生断裂,部分修复层从刀具表面被“拉拽”脱离,从而产生了犁沟和层状剥离带,但最终的磨损表面相对于未修复的原始刀具较为完好,表明修复层刀具的抗磨损能力变强。

基体与修复层的结合强度抗剪切试验的试件尺寸如图 4(a)所示,接头最大断裂载荷为 6.23 kN,且抗剪切断口无明显的塑性变形,如图 4(b)所示,但出现了明显的撕裂棱和河流状形貌,非均匀变形明显,推测此处断裂为脆性断裂。结合文献[20]计算的抗剪切试验结果可知,基体与修复层搭接接头处的最大抗剪强度可以达 226.67 MPa。在刀具切

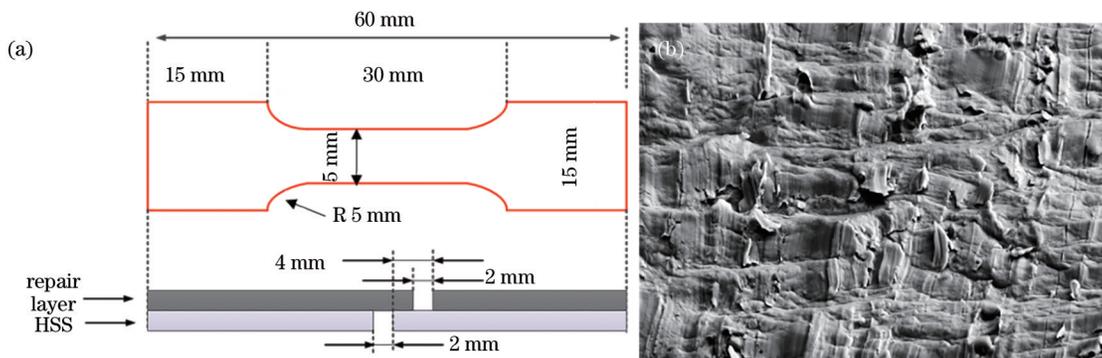


图 4 基体与修复层结合强度试验。(a)拉伸剪切试件尺寸;(b)SEM 断口

Fig. 4 Bonding strength test of substrate and repair layer. (a) Size of tensile shear specimen; (b) SEM fracture

削过程中,零件表面完整性取决于加工过程中刀尖的形状和刀具的运动,为了进一步对比激光修复与未修复的高速钢刀具的切削性能,本文进行了刀具的切削试验,刀具前刀面切削后的切削磨损情况如图 5 所示。为方便解释刀具的切削磨损行为,图 5(a)给出了刀具前刀面在切削条件下的三维模型,切削完成后采用扫描电镜观察了两种刀具的表面形貌,如图 5(b)和(c)所示。可以发现,原始高速钢前刀面经切削后具有明显的磨损和刀具材料剥落[图 5(b)],在高接触应力和高温摩擦下,前刀面的循环切削过程会加速刀具的磨损,切屑容易粘附在刀具前刀面上,然后随刀具材料剥落,严重时可导致刀具失效。对图 5(b)中的刀具前刀面选取的标记区域进行 EDS 元素分析,可以发现原始刀具切削后存在较高质量分数的 O 元素,说明原始高速钢刀具

前刀面发生了严重的氧化磨损,推测是由于切削过程中间歇性加工引起的机械热应力交变和温度变化造成的<sup>[21]</sup>。在相同切削条件下,具有激光修复层的高速钢刀具前刀面未发现明显的材料剥落,同时黏着磨损和扩散磨损不明显[图 5(c)]。对图 5(c)标记区域进行 EDS 分析,可以发现刀具前刀面 O 元素含量较低。一方面在相同主轴转速切削条件下,随着切削温度的升高,润滑剂的喷射位置集中在前刀面,刀屑界面液滴的渗透性可起到冷却或润滑的作用,进一步降低切削黏性阻力。另一方面,由于 WC 颗粒的存在,可在切削过程中充当磨料颗粒,提高了切削系统的可靠性和稳定性,从而降低了前刀面的磨损率,有效防止了刀具表面的擦伤。由此可见,具有 Co-WC 涂层的高速钢刀具具有更好的切削性能。

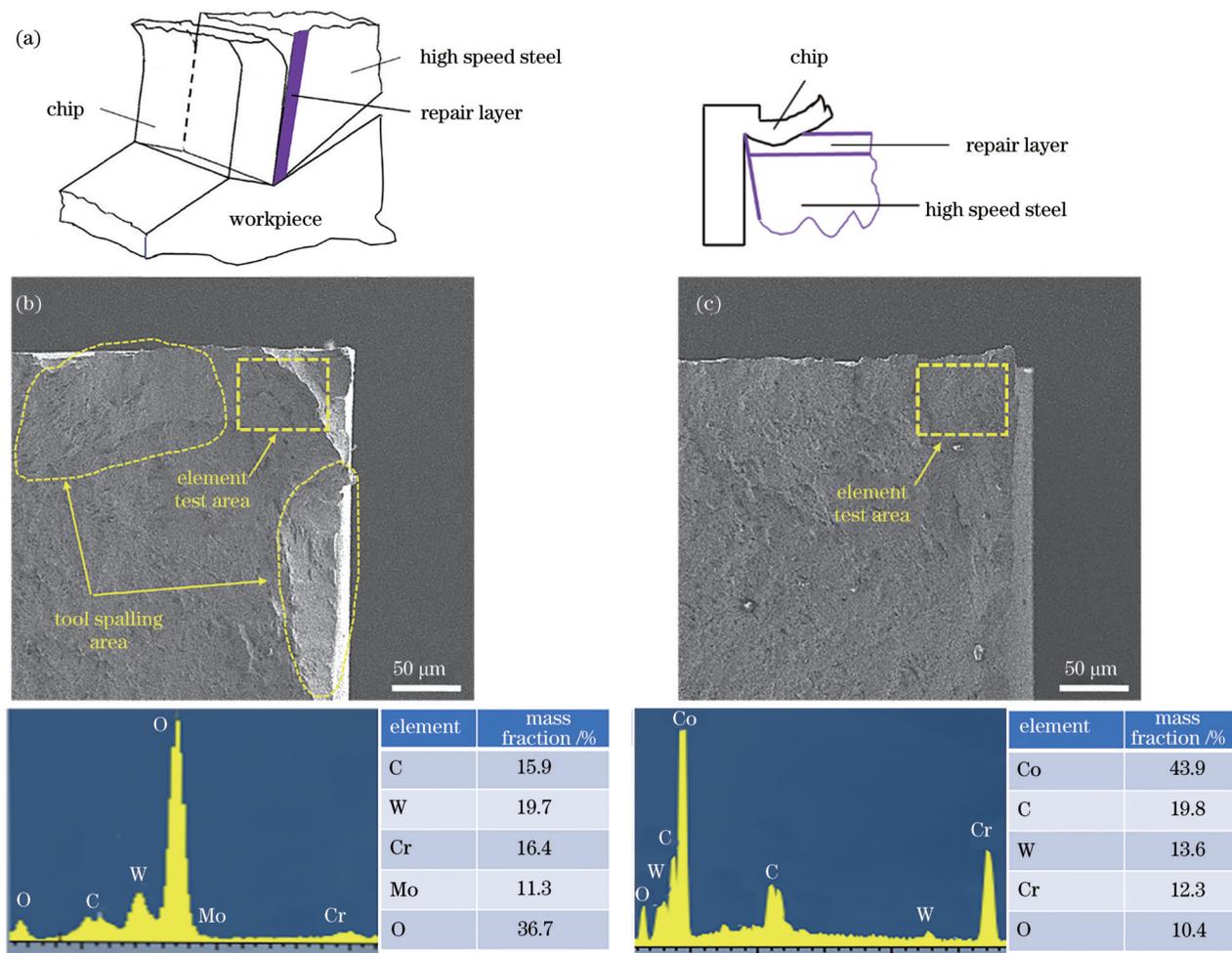


图 5 两种刀具切削后的磨损行为对比。(a)刀具前刀面切削模型;(b)原始高速钢刀具;(c)激光修复刀具  
Fig. 5 Comparison of wear behavior of two tools after cutting. (a) Cutting model of tool face; (b) original HSS tool; (c) laser repair tool

### 3 结 论

本文在数控机床破损的高速钢刀具表面采用激光熔覆制备了 Co-25%WC 复合涂层,研究了高速钢刀具基体与 Co-WC 修复层的冶金结合、组织演变和耐磨性能,最后探索了激光修复高速钢刀具的切削磨损行为,主要结论如下:1)高速钢基体与 Co-WC 修复层的界面冶金结合良好,无明显缺陷生成,由于激光熔覆具有快速熔化和凝固的热循环特性,主要元素 Fe、Co、Cr、Ni 从高速钢基体到修复层具有明显的变化。2)修复层主要由 Co 基 Fcc 晶体结构和  $Cr_7C_3$ 、 $W_2C$ 、WC 三种类型的碳化物组成,显微硬度最高达到  $(1625 \pm 63)$  HV;同时,摩擦磨损试验表明,原始高速钢的损失质量约为 6.2 mg,而具有修复层的刀具损失质量约为 5.3 mg,比原始高速钢刀具降低了 14.5%。3)切削试验表明,具有激光修复层的高速钢刀具前刀面未发现明显的材料切削剥落,且刀具前刀面 O 元素含量较低,氧化磨损较弱,与原始高速钢刀具相比具有更好的切削性能。

### 参 考 文 献

- [1] Gsellmann M, Klünsner T, Mitterer C, et al. Strength ranking for interfaces between a TiN hard coating and microstructural constituents of high speed steel determined by micromechanical testing[J]. *Materials & Design*, 2021, 204: 109690.
- [2] Tang H, Zhang H, Chen L, et al. Novel laser rapidly solidified medium-entropy high speed steel coatings with enhanced hot wear resistance[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 772: 719-727.
- [3] Chaus A S, Sahul M, Moravčík R, et al. Role of microstructural factor in wear resistance and cutting performance of high-speed steel end mills[J]. *Wear*, 2021, 474/475: 203865.
- [4] Jin G, Cai Z B, Guan Y J, et al. High temperature wear performance of laser-cladded FeNiCoAlCu high-entropy alloy coating[J]. *Applied Surface Science*, 2018, 445: 113-122.
- [5] Park J, Brady D J, Zheng G A, et al. Review of bio-optical imaging systems with a high space-bandwidth product[J]. *Advanced Photonics*, 2021, 3: 044001.
- [6] 顾冬冬, 张红梅, 陈洪宇, 等. 航空航天高性能金属材料构件激光增材制造[J]. *中国激光*, 2020, 47(5): 0500002.  
Gu D D, Zhang H M, Chen H Y, et al. Laser additive manufacturing of high-performance metallic aerospace components[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(5): 0500002.
- [7] Hu Z P, Liu Z Z, Zhan Z J, et al. Advances in metal halide perovskite lasers: synthetic strategies, morphology control, and lasing emission[J]. *Advanced Photonics*, 2021, 3: 034002.
- [8] Guévenoux C, Hallais S, Balit Y, et al. Plastic strain localization induced by microstructural gradient in laser cladding repaired structures[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2020, 107: 102520.
- [9] 韩晨阳, 孙耀宁, 王国建, 等. 不锈钢冷轧辊激光表面修复工艺研究[J]. *应用激光*, 2020, 40(4): 598-604.  
Han C Y, Sun Y N, Wang G J, et al. Study on laser surface repair technology of stainless steel cold roll [J]. *Applied Laser*, 2020, 40(4): 598-604.
- [10] 张可召, 何超威, 林雨杨, 等. 激光熔覆修复 5A06 铝合金组织及力学性能[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(23): 231409.  
Zhang K Z, He C W, Lin Y Y, et al. Microstructures and mechanical properties of laser cladding repaired 5A06 alloys[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(23): 231409.
- [11] Li Y J, Dong S Y, Yan S X, et al. Deep pit repairing of nodular cast iron by laser cladding NiCu/Fe-36Ni low-expansion composite alloy[J]. *Materials Characterization*, 2019, 151: 273-279.
- [12] Walker K F, Lourenço J M, Sun S, et al. Quantitative fractography and modelling of fatigue crack propagation in high strength AerMet<sup>®</sup>100 steel repaired with a laser cladding process[J]. *International Journal of Fatigue*, 2017, 94: 288-301.
- [13] Li W, Xu P Q, Wang Y Y, et al. Laser synthesis and microstructure of micro- and nano-structured WC reinforced Co-based cladding layers on titanium alloy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 749: 10-22.
- [14] Amado J M, Tobar M J, Alvarez J C, et al. Laser cladding of tungsten carbides (Spherotene<sup>®</sup>) hard facing alloys for the mining and mineral industry[J]. *Applied Surface Science*, 2009, 255(10): 5553-5556.
- [15] DebRoy T, Wei H L, Zuback J S, et al. Additive manufacturing of metallic components: process, structure and properties[J]. *Progress in Materials Science*, 2018, 92: 112-224.
- [16] Chen J, Wan C H, Zhan Q W. Engineering photonic angular momentum with structured light: a review[J]. *Advanced Photonics*, 2021, 3: 064001.

- [17] Wang H R, Sun Y F, Qiao Y Z, et al. Effect of Ni-coated WC reinforced particles on microstructure and mechanical properties of laser cladding Fe-Co duplex coating[J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 142: 107209.
- [18] 陈子豪, 孙文磊, 黄勇, 等. 镍基高温合金激光熔覆涂层组织及性能研究[J]. *激光技术*, 2021, 45(4): 441-447.  
Chen Z H, Sun W L, Huang Y, et al. Study on microstructure and properties of laser cladding coating for base superalloy[J]. *Laser Technology*, 2021, 45(4): 441-447.
- [19] 鲁耀钟, 雷卫宁, 任维彬, 等. K418 合金叶片激光再制造 Inconel718 覆层匹配与强化[J]. *激光技术*, 2020, 44(1): 54-60.
- Lu Y Z, Lei W N, Ren W B, et al. Matching and strengthening between Inconel718 cladding and K418 alloy blades by laser remanufacturing[J]. *Laser Technology*, 2020, 44(1): 54-60.
- [20] Singh K, Singh G, Singh H. Review on friction stir welding of magnesium alloys[J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2018, 6(4): 399-416.
- [21] Zhou C C, Guo X H, Zhang K D, et al. The coupling effect of micro-groove textures and nanofluids on cutting performance of uncoated cemented carbide tools in milling Ti-6Al-4V[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2019, 271: 36-45.