

激光熔覆制备 WC/Co50/Al 硬质合金涂层刀具的 微观结构及切削性能

刘洪喜, 董涛, 张晓伟, 刘子峰, 石海

昆明理工大学材料科学与工程学院, 云南 昆明 650093

摘要 利用激光熔覆增材制造技术制备了宏观形貌良好、组织致密均匀、无气孔和裂纹的 WC/Co50/Al 硬质合金涂层刀具。研究表明, 刀具熔覆层由 WC、 W_2C 、 Al_2O_3 、 Co_3W_3C 、固溶体 CoCr 和 $(Co, Ni, Fe, Cr)_2Si$ 等物相组成; 涂层表面的硬质 WC 大颗粒包覆在粘接相 Co50 中, 部分熔化和分解的 WC 小颗粒形成了固溶体; 切削过程中, 轴向切削力和径向切削力相对稳定, 切向切削力波动较大; 激光熔覆硬质合金刀具产生的切向切削力和切削热均高于 YG8 硬质合金刀具的, 但经前者加工处理后的工件的摩擦系数和表面粗糙度均小于后者的。

关键词 激光技术; 硬质合金涂层刀具; 激光熔覆; 微观结构; 切削性能

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0802002

Microstructure and Cutting Performance of WC/Co50/Al Cemented Carbide Coated Tools Fabricated by Laser Cladding Process

Liu Hongxi, Dong Tao, Zhang Xiaowei, Liu Zifeng, Shi Hai

School of Materials Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650093, China

Abstract The WC/Co50/Al cemented carbide coated tools with good macro morphology, uniform and dense microstructure, no pores and cracks are prepared by the laser cladding additive manufacturing technique. The study results show that the laser cladding layer of tools mainly consists of WC, W_2C , Al_2O_3 , Co_3W_3C , solid solution CoCr and $(Co, Ni, Fe, Cr)_2Si$ phases. The large hard WC particles on the laser cladding coating surface is coated in the Co50 bonding phase. The solid solution is formed by small WC particles with partial melting and decomposition. The axial and the radial cutting force are relatively stable in the cutting process, while the tangential cutting force fluctuates greatly. The tangential cutting force and the cutting heat of the laser-cladding cemented carbide tools are higher than those of YG8 cemented carbide cutting tools. However, the friction coefficient and the surface roughness of the work piece treated by the former are less than those by the latter.

Key words laser technique; cemented carbide coating tool; laser cladding; microstructure; cutting performance

OCIS codes 140.3390; 310.1515; 160.3900; 240.6700

1 引言

金属切削是零件成型的主要加工手段之一, 在制造业中占有十分重要的地位。目前, 各种加工材料被大量应用, 加工对象变得复杂化、多样化, 机械加工效率和自动化水平不断提高, 这些均对切削刀具提出了更高要求。硬质合金被广泛用作刀具材料, 具有硬度高、热硬性和耐磨性好以及切削速度快的优点^[1-2]。硬质合金刀具传统制备方法^[3-5]的工序较为复杂, 且刀片磨损或烧损后不能修复。

收稿日期: 2017-01-24; 收到修改稿日期: 2017-03-03

基金项目: 国家自然科学基金(61368003, 11674134)、云南省应用基础研究计划重点项目(2016FA020)、云南省中青年学术和技术带头人后备人才资助项目(2014HB007)

作者简介: 刘洪喜(1972—), 男, 博士, 教授, 主要从事离子束表面改性和激光增材制造方面的研究。

E-mail: piiliuhx@sina.com

激光熔覆是以激光为热源的增材制造技术,经高能量密度的激光束辐照加热,熔覆材料和基材表面薄层同时熔化,快速凝固后,形成稀释度极低且与基材呈良好冶金结合的表面涂层,基材耐磨、耐蚀、耐热、抗氧化和抗疲劳性能均能得到显著改善^[6-8]。与传统制造方法及堆焊、喷涂、电镀、气相沉积等表面改性技术相比,激光熔覆增材技术所制备的涂层具有组织致密、节能环保等优点,且适合熔覆的材料类型较多,故该技术已成为近年来新材料制备、快速直接成型、失效金属零部件再制造或修复的必备手段,在航空、航天、汽车、机械、钢铁冶金、石油化工、军事、生物医学等领域都有广阔的应用前景^[9-11]。激光熔覆具有非平衡凝固过程急热骤冷的特点,因此熔覆层中极易产生气孔和裂纹。气孔和裂纹的存在不仅会降低涂层的综合性能,还会减少涂层的服役寿命,限制激光熔覆增材制造技术的推广。

Zhang 等^[12]制备了 WC 颗粒增强的 Ni 基高硬度硬质合金涂层,发现提高激光功率、降低扫描速率和送粉率可减少熔覆层中的气孔,但会导致熔覆层中裂纹的出现和 WC 颗粒的分解;增大基材向熔覆层的稀释度会降低熔覆层硬度,增加扫描面积会使熔覆层中裂纹出现的几率增大。Qiu 等^[13]探讨了激光熔覆 WC/Co 硬质合金的气孔问题,结果表明,在激光熔覆 WC/Co 的过程中容易形成气孔,细粉熔覆层的气孔率比粗粉的高,多道叠加的气孔率比单道的高。Yang 等^[14]分析了 WC 的添加量对 Co 基合金激光熔覆层凝固组织特征、微观结构成分和硬度梯度的影响,结果表明,加入 WC 后,激光熔覆层凝固组织的基本特征没有改变,但树枝晶及晶间共晶组织的凝固行为受到影响,各元素的分布发生了变化,即凝固组织尺寸减小,晶粒细化,而随着合金中 WC 的增加,激光熔覆层的硬度得到提高。王志坚等^[15]研究了铝添加剂对激光熔覆硬质合金涂层质量的影响,结果表明,当在硬质合金 YG12 中加入质量分数为 1% 的 Al 粉时,熔覆层硬度较高。张佳琪等^[16]在高速钢表面激光熔覆了高硬金属陶瓷涂层,该陶瓷涂层显著改善了高速钢的切削加工性能。张爱荣等^[17]研究了激光熔覆 AlCrCoFeNiMoTi_{0.75}Si_{0.25} 高熵合金涂层刀具的性能,该涂层刀具具有较好的高温稳定性,表面硬度高,摩擦系数小,断屑效果好,被加工材料的表面粗糙度好。Darmawan 等^[18]探讨了 M2 高速钢表面激光熔覆层的耐磨性和切削性能,结果表明,激光熔覆后,M2 高速钢耐磨性和切削加工性得到了提高。

目前,采用激光熔覆制备刀具的研究主要集中在涂层方面,关于直接在刀杆前端制备整体刀片的研究鲜有报道。为了缩短现有刀片的制备工艺流程,实现硬质合金刀片制备和钎焊的一体化,解决失效刀片的回收与再利用问题,本文采用激光熔覆增材制造技术,在 45 钢外圆车刀的刀槽内制备了 WC/Co50/Al(50% 为质量分数)硬质合金刀片;观察了刀片的宏观形貌和微观组织结构,分析了刀片的物相组成及变化规律;结合普通车床和压电式三向车削测力仪采集的切削性能参数,比较了制备的刀具与 YG8 硬质合金刀具的切削性能。

2 实验材料与方法

2.1 试样制备

实验基材为 45 钢,其主要化学成分见表 1。使用金相砂纸打磨刀槽以除锈,使用丙酮溶液对刀槽进行超声清洗,清洗时间为 15 min,结束后将其置于 80 °C 的环境中干燥 1 h。

表 1 45 钢化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of 45 steel (mass fraction, %)

Composition	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	Fe
Content	0.42-0.50	0.17-0.37	0.50-0.80	≤0.25	≤0.30	≤0.25	Bal.

实验采用 Co50 自熔性合金粉末作为粘结相,其主要化学成分见表 2。在粉末中加入一定量的 WC 颗粒(硬质相)与 Al 粉(质量分数为 1%),其中 Co50 和 WC 粉末的粒度均为 100 μm。为了与 YG8 硬质合金(WC 的质量分数为 92%,其余为 Co)进行对比,令激光熔覆粉末中 WC 与 Co50 的质量比为 53:10。使用球磨(转速为 50 r · min⁻¹)对激光熔覆粉末进行混合,处理时间为 4 h,处理完成后将粉末置于 80 °C 的干燥箱中待用。

表 2 Co50 自熔性合金粉末化学成分(质量分数,%)

Table 2 Chemical composition of Co50 self-fluxing alloy powder (mass fraction, %)

Composition	C	W	Si	B	Cr	Mo	Fe	Ni	Co
Content	0.6	3.0	3.5	2.25	20.0	5.1	5.0	14.0	Bal.

实验采用深圳大旋公司生产的 GS-TFL-6000 型横流多模 CO₂ 激光器作为光源,其最高输出功率为 6 kW,光源配有德国西门子公司生产的五轴四联动数控系统。具体工艺参数如下:激光功率为 3 kW,扫描速率为 200 mm · min⁻¹,离焦量为 45 mm,圆形光斑尺寸为 5 mm,氩保护气(质量分数为 99.99%)流量为 15 L · min⁻¹。

2.2 切削实验

切削实验采用上述 YG8 硬质合金刀具(洛氏硬度为 69 HRC)和激光熔覆硬质合金刀具(洛氏硬度为 62 HRC)。对激光熔覆刀具进行刃磨,采用普通车床及压电式三向车削测力仪测试刀具切削过程中的切削力,通过动态数据检测系统实时采集数据,收集切屑并测定工件的表面粗糙度。刀具的几何参数对切屑变形、切削力、切削温度和刀具磨损有明显影响。为了充分发挥刀具的性能,应合理选择刀具的几何参数,具体见表 3,其中 γ_0 为刀具前角, α_0 为刀具后角, K_r 为主偏角, K'_r 为副偏角, λ_s 为刃倾角。为了充分测试刀具的切削性能,结合机床实际情况,制定了切削参数,见表 4。表中 1~6 号样品由 YG8 硬质合金刀具进行处理,7~12 号样品由激光熔覆硬质合金刀具进行处理,其中 v 为切削速率, a_p 为设定切削深度, f 为进给速率。

表 3 切屑刀具的几何参数

Table 3 Geometric parameters of cutting tools

Tool type	$\gamma_0 / (^{\circ})$	$\alpha_0 / (^{\circ})$	$K_r / (^{\circ})$	$K'_r / (^{\circ})$	$\lambda_s / (^{\circ})$
YG8 tool	10	10	45	5	5
Tool made by laser cladding	10	10	45	5	5

表 4 切削参数

Table 4 Cutting parameters

Sample number	$v / (r \cdot \text{min}^{-1})$	a_p / mm	$f / (\text{mm} \cdot \text{r}^{-1})$
1	105	0.5	0.2
2	210	0.5	0.2
3	260	0.5	0.2
4	105	1.0	0.1
5	210	1.0	0.1
6	260	1.0	0.1
7	105	0.5	0.2
8	210	0.5	0.2
9	260	0.5	0.2
10	105	1.0	0.1
11	210	1.0	0.1
12	260	1.0	0.1

2.3 性能表征

通过线切割,垂直于激光扫描方向切取激光熔覆刀片试样,试样经超声清洗、打磨抛光、腐蚀后,将其制成金相试样,其中腐蚀剂由 FeCl₃ 溶液、HCl 溶液和 C₂H₅OH 溶液组成,体积比为 1:3:16,腐蚀时间为 15 s。借助日本理学公司生产的 D/max-3BXJ 型 X 射线衍射(XRD)仪(X 射线源为 Cu 的 K α 谱线,波长为 0.15406 nm)分析激光熔覆层的物相组成,其管压为 40 kV,管流为 30 mA,采用连续扫描模式,扫描速率为 10($^{\circ}$) · min⁻¹,扫描范围为 20 $^{\circ}$ ~100 $^{\circ}$ 。通过德国徕卡公司生产的 DMI5000M 型倒置金相显微镜,观察熔覆层微观组织和车刀切削后的磨损特征。通过荷兰飞利浦公司生产的 XL30-ESEM-TMP 型扫描电子显微镜(SEM)及其配套的美国 EDAX 公司生产的 Phoenix 能谱仪(EDS)分析熔覆层形貌和不同区域的元素分布。

3 结果分析与讨论

3.1 熔覆涂层的宏观形貌

如图 1 所示,激光熔覆制备的 WC/Co50/Al 硬质合金刀片与 45 钢刀杆结合紧密,涂层表面无气孔和裂纹。由于所选光斑尺寸和搭接率较大,因此熔覆层表面较为平整。



图 1 激光熔覆车刀的形貌

Fig. 1 Macro morphology of cutting tool made by laser cladding

3.2 熔覆涂层的微观结构

图 2 所示为激光熔覆刀具涂层横截面的 SEM 照片。可以看出,采用较小光斑尺寸和较大搭接率得到的涂层,整体上组织较为均匀、致密,未出现波浪形结构和分层现象。熔覆层呈现出典型的激光快速凝固特征,涂层内部弥散分布着大量细小的等轴晶和部分柱状晶,且柱状晶主要集中在散热方向较紊乱的区域。

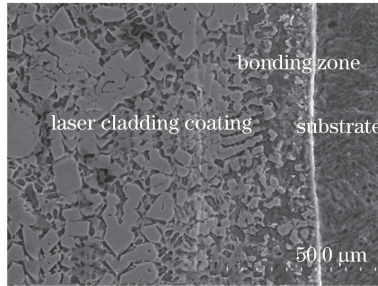


图 2 激光熔覆 WC/Co50/Al 涂层的横截面 SEM 照片

Fig. 2 Cross-sectional SEM image of laser-cladding WC/Co50/Al coating

高能量密度激光束辐照预置涂层时会形成很高的温度梯度,涂层在极短时间内内冷却,熔池为非平衡凝固。熔覆层的凝固组织形态取决于固-液界面温度梯度 G 与凝固速率 R 的比值。熔池凝固时,与基材接触的液态金属通过基材散热,固-液界面前沿呈正温度梯度, G/R 值较大,涂层出现平面晶^[19];随着温度梯度的减小和凝固速率的增大,凝固界面与散热方向平行,涂层出现树枝状晶。第一层涂层表面初次凝固时,液态金属直接散热到空气中,过冷度和形核率均较大,组织细小,为弥散且无方向的等轴晶。第二层熔覆层在第一层基础上形成,激光工艺参数与第一层的相同,凝固过程与第一层的相似。在第二层与第一层界面处的 G/R 值较大,且激光作用于上一涂层表面的等轴晶,凝固后涂层为平面晶与细小等轴晶的混合;由于循环加热,等轴晶有所长大,上一涂层中部的部分树枝晶熔断再结晶,树枝晶出现分解和增殖,故第二层整体上呈趋向于弥散分布的等轴晶结构。最后一层熔覆层的凝固过程遵循第二层凝固过程的规律,最终熔池表面形成弥散分布的粘接相包覆 WC 颗粒的复合结构。

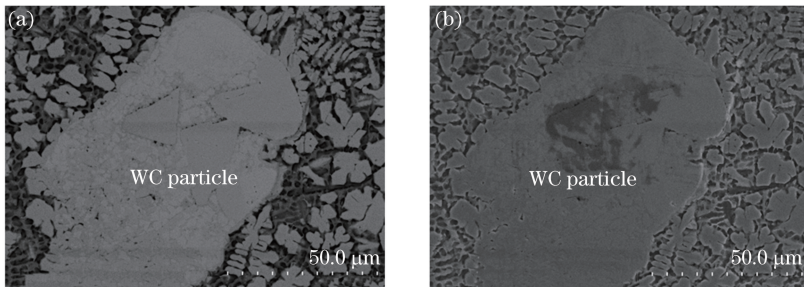


图 3 基体与涂层界面处的 WC 颗粒 SEM 照片。(a)背散射成像;(b)二次电子成像

Fig. 3 SEM images of WC particles at interface between coating and substrate. (a) Back scattering image; (b) secondary electron image

凝固过程中,由于熔池保持时间较短,含量高、体积较大的 WC 颗粒不能完全熔化,呈多边形。块状 WC 颗粒边缘发生碎化分解,W 原子扩散并均匀分布于 Co 基合金结晶时的枝晶界面处;在合金熔体与 WC 接触的瞬间,Co 基熔体与 WC 间的界面出现浓度平衡,在后续冷却过程中,二者互相扩散,析出图 3 所示的细小合金化合物,并逐渐形成网络状细小颗粒的显微组织。块状 WC 颗粒具有的纤维颗粒状结构是导致其在熔覆层中被加热到高温时发生离散的根本原因,较小的 WC 颗粒完全熔解,在重新凝固过程中,这些 WC 颗粒提供了很好的非均匀形核核心或基底,与粘接相相互作用,生长成图 4 所示的花瓣状析出物。

图 4 中点 1~3 位置处不同元素的 EDS 分析结果见表 5,可以看出,W 和 C 元素含量从内向外逐渐减小,而 Fe 和 Co 元素含量的变化趋势相反。这是因为 WC 分解温度为 1400 °C,相对熔池温度较低,分解后的 W、C 原子与粘结相 Co、Fe 互相扩散,内表面 Co、Fe 不断向 WC 推移,WC 尺寸变小;外表面 W、C 原子向外扩展,形成过渡相,这种过渡相正是 WC 与 Co 润湿性良好的标志,是激光作用下不同颗粒相之间发生相互作用的结果。粘结相与硬质相的良好结合,有利于提高激光熔覆层中陶瓷颗粒的抗剥落性。随后,分解出的 W 元素与粘接相 Co 以及扩散到涂层中的 Fe 形成了图 5 所示的细小析出物。同样,表 5 也给出了图 5 中点 4 处的 EDS 分析结果,可以看出,Co 和 Fe 元素的原子含量之和与 W 的原子含量接近。

表 5 图 4~6 中不同点处的 EDS 分析结果

Table 5 EDS analysis results of different points in Fig. 4-6

Element	Point in Fig. 4-6 (mass fraction, %)						Point in Fig. 4-6 (atomic fraction, %)					
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
C	16.26	15.33	19.41	16.29	37.36	72.58	73.54	66.46	68.99	65.29	72.58	68.99
Cr		2.15	1.22	1.86	2.56	1.15		2.15	1.01	1.72	1.15	1.01
Fe	2.53	9.96	20.08	15.99	32.45	13.56	2.46	9.29	15.53	13.78	13.56	15.35
Co		2.58	1.66	3.54	2.15	0.85		2.28	1.20	2.89	0.85	1.20
W	81.22	69.99	57.51	62.31	17.89	2.27	24.00	19.83	13.36	16.31	2.27	13.36
Mn			0.11		0.33	0.14			0.09		0.14	0.09
Al					0.91	0.79					0.79	
Ni					0.56	0.22					0.22	
O					5.78	8.43					8.43	

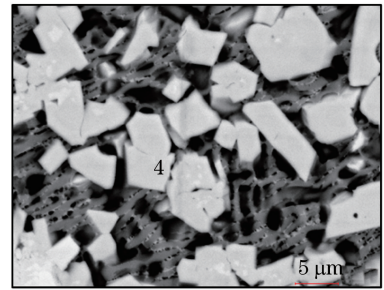
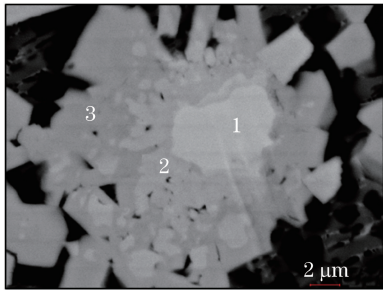


图 4 WC 颗粒在激光熔覆过程中的熔解和扩散

图 5 激光熔覆过程中析出物的显微组织

Fig. 4 Dissolution and diffusion of WC particles in laser cladding process

Fig. 5 Microstructure of precipitations in laser cladding process

图 6 所示为熔覆层中树枝晶组织的 SEM 照片,表 5 给出了图 6 中点 5 和点 6 处的 EDS 分析结果。该区域熔覆层在形核过程中的冷却速度大,凝固界面与散热方向平行,导致出现了分布杂乱且明显含有 W 的鱼骨状莱氏体共晶组织。图 6 中点 5 和点 6 处的 Fe 原子含量较高,表明基材中的 Fe 已熔化,并扩散到了熔覆层中。随着凝固过程的进行,低熔点的 Co(1495 °C)和 Fe(1538 °C)以高熔点的 WC(2720 °C)为骨架或异质形核的核心,填充到相应间隙中。另外,WC 的晶体结构较复杂,对称性差,且 WC 在结晶过程中表现出了很强的方向性。以上为不规则网状共晶组织的成因。

3.3 熔覆涂层的物相组成

图 7 所示为激光熔覆涂层的 XRD 谱,可以看出,涂层中出现了 WC、W₂C、Al₂O₃、Co₃W₃C、固溶体 CoCr 和 (Co, Ni, Fe, Cr)₂Si 等物相。分析认为,WC 相大部分来自未充分熔化的原始 WC 颗粒,小部分来自重

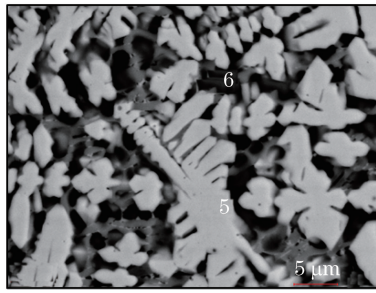


图 6 激光熔覆涂层中枝晶组织的 SEM 照片

Fig. 6 SEM image of dendritic microstructure in laser cladding coating

新凝固得到的 WC 颗粒, W_2C 和 Co_3W_3C 等物相由 WC 扩散和分解得到^[20]。 Al_2O_3 相的存在是由于混合粉末中加入了活性元素 Al, Al 在高温下与 O 的亲合力大于 C 的, 因此 Al 优先于 C 与 O 结合形成 Al_2O_3 , 这有效抑制了熔池中 C 与 O 的反应, 从而避免了由 C 与 O 结合产生的 CO 或 CO_2 气孔。同时, 形成的 Al_2O_3 还可作为硬质相和保护层, 增加刀片硬度和切削过程中的抗氧化能力。另外, Co50 粉末中含有 Co、Cr、Mo、Ni、Si、W 等元素, Cr、W、Ni 和 Mo 在高温下可与 Co 形成置换固溶体, 故涂层中出现了大量复杂的固溶体相 CoCr 和 $(Co, Ni, Fe, Cr)_2Si$ 。这些固溶体相在一定程度上增加了基体强度, 改善了涂层的综合性能。结合表 5, 可判断图 5 中点 4 处的析出物为由 Fe_3W_3C 和 Co_3W_3C 等组成的复杂碳化物。

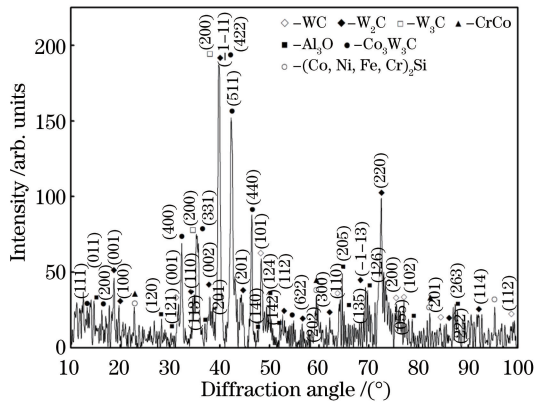


图 7 激光熔覆涂层的 XRD 图谱

Fig. 7 XRD pattern of laser cladding coating

3.4 切削过程中的切削力变化特征

在切削过程中, 切削力直接影响切削热、刀具磨损程度、刀具耐用度、被切削零件的加工精度、已加工零件表面质量以及切屑形态。图 8 给出了通过粉末冶金和钎焊工艺制备的 YG8 硬质合金刀具(1~6 号样品)与激光熔覆制备的 WC/Co50/Al 硬质合金刀具(7~12 号样品)在切削过程中的切削力随时间变化的关系曲线。可以看出, 进给运动方向的切削力 F_x (轴向力) 和深度方向的切削力 F_y (径向力) 相对稳定, 而主运动方向的切削力 F_z (切向力) 存在着较大波动, 且 F_z 均大于 F_x 和 F_y 。

切削力的理论公式为

$$F_z = \tau_s a_c a_w (1.4\xi + C), \quad (1)$$

式中 τ_s 为材料剪切屈服极限; a_c 为切削层厚度; a_w 为切削宽度; ξ 为变形系数; C 为特征常数, 由被加工材料的种类、热处理状态以及刀具前角等决定。由(1)式可知, 在切削过程中, 激光熔覆 WC/Co50/Al 硬质合金刀具较易形成积屑瘤, 导致切削用量不断改变, 前角受积屑瘤影响最大, 这引起了 ξ 值和 C 值的变化, 从而引起了切削力的波动。形成的积屑瘤同时也增大了切削深度, 这亦引起了切削力的波动。

不同工艺条件下三种切削力的大小见表 6, 其中 Q 为切削热, a_{ch} 为实际切削深度, μ 为摩擦系数, R_a 为表面粗糙度。在低转速下, 两种刀具的 F_z 波动均较小; 随着转速的增加, 在相同切削用量下, 激光熔覆硬质合金刀具的 F_z 及其波动大于 YG8 硬质合金刀具的, 这说明前者切削时的摩擦角大于后者的, 而剪切角小于

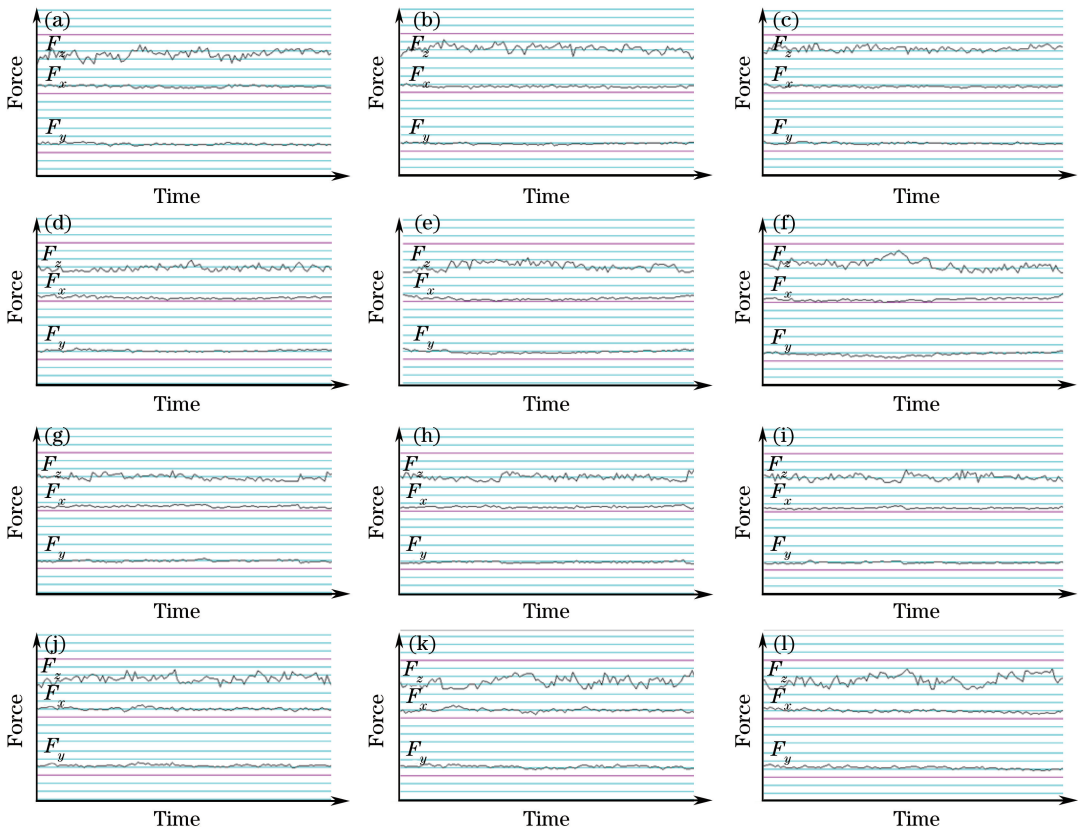


图 8 削力随时间的变化。(a)~(f) 1~6 号样品;(g)~(l) 7~12 号样品

Fig. 8 Cutting force versus time. (a)-(f) Samples 1-6; (g)-(l) samples 7-12

后者的。激光熔覆硬质合金刀具与 YG8 硬质合金刀具后刀面的磨损和温升有所不同,前者的磨损大于后者的,前者后刀面上的法向力和摩擦力较大,加之在前者的制备过程中,工件材料会产生较大变形,加工硬化程度大于后者的,因而相对较易形成积屑瘤,致使切削力增大。两种刀具的 F_x 和 F_y 值相仿,变化较为平缓,说明在切削过程中,两种刀具的刀尖圆弧半径和主偏角的变化较小,且磨损情况相似。

切削过程中会产生切削热。切削热主要来源于切削层金属发生弹性、塑性变形时所产生的热,以及切屑与前刀面、工件、后刀面间的摩擦热。单位时间内产生的切削热可表示为

$$Q = F_z \cdot v = \tau_s a_c a_w (1.4\xi + C)v. \quad (2)$$

不同条件下的切削热见表 6。可以看出,在相同条件下,YG8 硬质合金刀具的切削热低于激光熔覆硬质合金刀具的。这是因为 YG8 硬质合金的导热系数高于 WC/Co50/Al 硬质合金的,切削热相对较易从 YG8 刀具传导出去,降低了切削区温度,这有利于刀具耐用度的提高。因此,随着温度的升高,激光熔覆硬质合金刀具的强度有所下降,导致了刀具与切屑间的相互扩散,加速了扩散磨损。

3.5 两种刀具在切削过程中的参数变化

切削参数的变化见表 6。变形系数可直观反映切屑的变形程度,从表 6 可以看出,两种刀具引起的切屑变形基本相同。在切削过程中,切屑和刀具的粘结层会与其上层的金属产生内摩擦,内摩擦力的大小与摩擦系数相关。可以看出,对于同样的工件材料,激光熔覆硬质合金刀具的摩擦系数小于 YG8 硬质合金的。这是因为激光熔覆硬质合金刀具材料的硬度和强度相对低于 YG8 硬质合金的,当切削速度一定时,切削温度的升高会引起摩擦系数的下降。在较低的切削速度下,直接切削塑性毛坯料会产生积屑瘤,切屑与工件会发生碰撞摩擦,故形成的表面较为粗糙。另外,在两种刀具表面粗糙度相近的情况下,激光熔覆硬质合金刀具切削后的工件表面粗糙度更好。初始加工时,由于激光熔覆硬质合金刀具的硬度低,积屑瘤和切屑的摩擦更大,但随着切削速度的增加和进给量的降低,积屑瘤和鳞刺减小,工件的塑性变形也减小,使得激光熔覆硬质合金刀具切削后的工件表面粗糙度降低。也就是说,激光熔覆 WC/Co50/Al 硬质合金刀具比 YG8 硬质合金刀具更易加工出表面粗糙度小的工件。当然,激光熔覆涂层中存在的硬质相和固溶体也对切削参数有一定程度的影响。

表 6 两种切削刀具在切削过程中的切削参数对比

Table 6 Comparison of cutting parameters of two cutting tools in cutting process

Sample number	F_x /N	F_y /N	F_z /N	Q /J	a_{ch} /mm	a_c /mm	ξ	μ	R_a / μm
1	142	112	461	177	0.50	0.17	2.94	0.61	50
2	116	104	451	346	0.60	0.17	3.53	0.58	25
3	103	101	442	421	0.60	0.17	3.53	0.57	12.5
4	118	139	554	213	0.50	0.09	5.56	0.63	25
5	161	122	521	401	0.50	0.09	5.56	0.59	12.5
6	127	119	508	484	0.50	0.09	5.56	0.59	6.3
7	165	147	673	259	0.60	0.17	3.53	0.55	50
8	127	125	655	503	0.50	0.17	2.94	0.50	6.3
9	121	117	629	598	0.50	0.17	2.94	0.48	6.3
10	156	171	774	297	0.50	0.09	4.44	0.56	50
11	172	156	748	575	0.50	0.09	5.56	0.53	3.2
12	159	144	731	696	0.50	0.09	5.56	0.51	3.2

4 结 论

通过激光熔覆增材制造技术,在 45°外圆车刀的刀槽部位制备了宏观形貌良好、组织均匀致密且无气孔和裂纹的 WC/Co50/Al 硬质合金涂层刀具。与 YG8 硬质合金刀具相比,激光熔覆 WC/Co50/Al 硬质合金涂层刀具的制备工艺得到了极大简化,降低了成本。研究表明,在相同切削条件下,激光熔覆涂层刀具产生的主切削力和切削热较大,经其加工处理后的工件的摩擦系数和表面粗糙度较小,但切削稳定性和刀具寿命不及 YG8 硬质合金刀具的。

参 考 文 献

- [1] Ren X Y, Miao H Z, Peng Z J. A review of cemented carbides for rock drilling: An old but still tough challenge in geo-engineering[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2013, 39: 61-77.
- [2] Raihanuzzaman R M, Xie Z H, Hong S J, et al. Powder refinement, consolidation and mechanical properties of cemented carbides-An overview[J]. Powder Technology, 2014, 261: 1-13.
- [3] Guo Feng, Wang Tongtong, Yuan Fusheng. Overview on cemented carbide processing industry market[J]. Nonferrous Metals Engineering & Research, 2016, 37 (5): 46-49.
郭 峰, 王彤彤, 袁孚胜. 硬质合金加工产业市场综述[J]. 有色冶金设计与研究, 2016, 37(5): 46-49.
- [4] Tanaka S, Shirochi T, Nishizawa H, et al. Micro-blasting effect on fracture resistance of PVD-AlTiN coated cemented carbide cutting tools[J]. Surface and Coatings Technology, 2016, 308: 337-340.
- [5] Guo Y J, Wang Y Q, Gao B X, et al. Rapid diffusion bonding of WC-Co cemented carbide to 40Cr steel with Ni interlayer: Effect of surface roughness and interlayer thickness[J]. Ceramics International, 2016, 42(15): 16729-16737.
- [6] Robles-Hernandez F C, Okonkwo A O, Kadekar V, et al. Laser cladding: The alternative for field thermite welds life extension[J]. Materials & Design, 2016, 111: 165-173.
- [7] Zhang P R, Liu Z Q. Physical-mechanical and electrochemical corrosion behaviors of additively manufactured Cr-Ni-based stainless steel formed by laser cladding[J]. Materials & Design, 2016, 100: 254-262.
- [8] Li Fuquan, Feng Xinyou, Chen Yanbin. Influence of WC content on microstructure of WC/Ni60A laser cladding layer [J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(4): 0403009.
李福泉, 冯鑫友, 陈彦宾. WC 含量对 WC/Ni60A 激光熔覆层微观组织的影响[J]. 中国激光, 2016, 43(4): 0403009.
- [9] Li Chuang, Liu Hongxi, Zhang Xiaowei, et al. Microstructure and property of Co-based carbide composite coating fabricated by laser cladding on 40Cr tool steel surface[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(11): 1103002.
李 闯, 刘洪喜, 张晓伟, 等. 40Cr 刀具钢表面激光熔覆钴基碳化物复合涂层的组织与性能[J]. 中国激光, 2015, 42(11): 1103002.
- [10] Weng F, Yu H J, Chen C Z, et al. Effect of process parameters on the microstructure evolution and wear property of the laser cladding coatings on Ti-6Al-4V alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 692: 989-996.

- [11] Leunda J, Sanz C, Soriano C. Laser cladding strategies for producing WC reinforced NiCr coatings inside twin barrels [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2016, 307: 720-727.
- [12] Zhang F G, Zhu X P, Lei M K. Surface characterization and tribological properties of WC-Ni cemented carbide irradiated by high intensity pulsed electron beam[J]. *Vacuum*, 2017, 137: 119-124.
- [13] Qiu W B, Liu Y, Ye J W, *et al.* Effects of (Ti, Ta, Nb, W) (C, N) on the microstructure, mechanical properties and corrosion behaviors of WC-Co cemented carbides[J]. *Ceramics International*, 2017, 43(3): 2918-2926.
- [14] Yang Q M, Yang J G, Yang H L, *et al.* The effects of fine WC contents and temperature on the microstructure and mechanical properties of inhomogeneous WC-(fine WC-Co)-cemented carbides [J]. *Ceramics International*, 2016, 42(16): 18100-18107.
- [15] Wang Zhijian, Zhao Qinghe, Shang Xiaofeng, *et al.* Effects of aluminium additives on the quality of hard alloy laser cladding[J]. *Laser & Infrared*, 2012, 42(11): 1244-1247.
王志坚, 赵青贺, 尚晓峰, 等. 铝添加剂对激光熔覆硬质合金涂层质量的影响[J]. *激光与红外*, 2012, 42(11): 1244-1247.
- [16] Zhang Jiaqi, Dong Liang, Ju Huan, *et al.* Microstructure and properties of surface coating on a high speed steel by laser cladding[J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2016, 37(9): 196-200.
张佳琪, 董 梁, 鞠 恒, 等. 高速钢表面激光熔覆高硬涂层的组织性能 [J]. *材料热处理学报*, 2016, 37(9): 196-200.
- [17] Zhang Airong, Liang Hongyu, Li Ye. Property of AlCrCoFeNiMoTi_{0.75}Si_{0.25} high-entropy alloy coating tool prepared by laser cladding[J]. *China Surface Engineering*, 2013, 26(4): 27-31.
张爱荣, 梁红玉, 李 焯. 激光熔覆 AlCrCoFeNiMoTi_{0.75}Si_{0.25}高熵合金涂层刀具的性能 [J]. *中国表面工程*, 2013, 26(4): 27-31.
- [18] Darmawan W, Quesada J, Marchal R. Characteristics of laser melted AISI-T1 high speed steel and its wear resistance [J]. *Surface Engineering*, 2007, 23(2):112-119.
- [19] Wang X Y, Zhou S F, Dai X Q, *et al.* Evaluation and mechanisms on heat damage of WC particles in Ni60/WC composite coatings by laser induction hybrid cladding [J]. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2017, 64: 234-241.
- [20] Bartkowski D, Młynarczyk A, Piasecki A, *et al.* Microstructure, microhardness and corrosion resistance of Stellite-6 coatings reinforced with WC particles using laser cladding[J]. *Optics & Laser Technology*, 2015, 68: 191-201.