https://doi.org/10.12442/j.issn.1002-185X.20240396

# 激光定向能量沉积制备WC-25Co硬质合金及其 摩擦磨损性能研究

叶 楠1,李诗宇1,伍子纯2,毛 杰2,卓海鸥1,唐建成1

(1. 南昌大学 国际材料创新研究院,江西 南昌 330031)(2. 南昌大学 物理与材料学院,江西 南昌 330031)

摘 要:本实验以球形致密WC-12Co复合粉和球形Co粉为原料,通过激光定向能量沉积技术制备了WC-25Co(质量分数,%)硬质合金,研究了激光功率对WC-25Co硬质合金微观组织和摩擦磨损性能的影响。结果表明:Co颗粒熔化并形成液相,显著提高了WC-12Co的沉积质量。升高激光能量促进了Co液相的流动,合金致密化程度和组织均匀性显著改善。合金组织均由WC相和Co相组成,未发现Co<sub>3</sub>W<sub>3</sub>C、Co<sub>6</sub>W<sub>6</sub>C和W<sub>2</sub>C等脱碳相的存在。随激光功率的升高,合金硬度逐渐升高,磨损率呈现先减小后增大的趋势。在1400W功率下WC-25Co硬质合金磨损率最低,为(0.81±0.11)×10<sup>-5</sup> mm<sup>3</sup>/(N·m),其磨损机制主要为磨料磨损,此外还存在少量的氧化磨损。

关键词:WC-25Co硬质合金;激光定向能量沉积技术;激光功率;摩擦磨损性能
中图法分类号:TG135<sup>+</sup>.5 文献标识码:A 文章编号:1002-185X(2025)02-0497-08

WC-Co材料因具有高硬度、高耐磨性以及优异的断裂韧性等优点,被广泛应用于切削刀具、矿山工具、机械密封环、侵蚀防护涂层和弹道冲击防护涂层<sup>[1-3]</sup>。传统的WC-Co硬质合金是通过粉末冶金法制备而成,低熔点Co熔融形成液相填充WC颗粒间隙实现高致密化,所制备的WC-Co硬质合金组织均匀、晶粒细小,机械性能较为优异<sup>[4-6]</sup>。然而,受限于模具加工难、工艺流程长、设备投入大等工艺条件,难以实现复杂几何形状硬质合金构件的近净成形制备<sup>[7]</sup>。由激光熔覆技术衍生的同轴送粉式激光定向能量沉积技术具有快速凝固、复杂构件一体化成型的特点,是获得WC-Co复杂构件的设计及制备极具潜力的一种制备技术<sup>[8-10]</sup>。

激光定向能量沉积技术(laser directed energy deposition, LDED)具有快速凝固以及独特的马兰戈尼效应,可以在短时间促进颗粒重排,通过液相填充空隙从而获得细小致密的组织以及优异的力学性能<sup>[11-13]</sup>,成为目前国内外的研究热点。Erfanmanesh等<sup>[14]</sup>在不锈钢上成形了WC-12Co硬质合金涂层,研究表明,由于大尺寸WC颗粒以及硬脆W<sub>2</sub>C相的形成,涂层硬度水平与摩擦磨损性能得到显著提高。Traxel等<sup>[15]</sup>在SS410钢上沉积了WC-12Co(质量分数,%)硬质合金,结果表明,WC-12Co硬质合金硬度(HV<sub>0.3/15</sub>, 10780~15680 MPa)较SS410钢提高5~6倍。实际上,在激光增材制造技术中,

激光工艺参数对零部件成形质量具有直接影响,然而,目 前针对不同激光工艺参数下成形WC-Co硬质合金的研 究主要采用的技术为选区激光熔化。Zhang等<sup>[7]</sup>研究了 不同激光能量密度下WC-12Co硬质合金的显微组织演 变规律、显微硬度与摩擦磨损性能,结果表明,提高激光 能量密度有利于WC-12Co硬质合金的致密化以及晶粒 尺寸的细化,但会导致硬脆相W,C形成,硬度与摩擦磨 损性能得到提高。Schwanekamp等<sup>[16]</sup>研究了激光功率对 WC-12Co硬质合金显微组织的影响规律,结果表明, WC-12Co硬质合金对于激光功率较为敏感,在低激光能 量输入下产生更少的能够润湿WC颗粒的液相,导致颗 粒间孔隙率更为严重,随着激光功率的提高,样品致密度 提升,但产生了缺碳相。综上所述,国内外学者系统研究 了激光工艺参数对低Co含量WC-12Co硬质合金显微组 织与性能的影响,即使通过提高激光能量密度的方式提 升低Co含量WC-12Co硬质合金致密度,也易导致缺碳 相的形成。本研究前期采用激光定向能量沉积制备低 Co含量WC-12Co硬质合金时也存在致密度低,产生缺 碳相等问题[17]。

为提高WC-12Co硬质合金激光沉积质量,本实验以 球形WC-12Co复合粉末和球形Co粉预混合后的WC-25Co混合粉末为原料,采用激光定向能量沉积技术在不 同功率下成形WC-25Co硬质合金,分析激光功率对WC-

收稿日期:2024-09-11

基金项目:国家重点研发计划(2022YFB3806700);江西省重点研发计划(20224BBE51044,20224BBE51042)

作者简介:叶 楠,男,1987年生,博士,副研究员,南昌大学国际材料创新研究院,江西 南昌 330031,E-mail:yenan@ncu.edu.cn

25Co硬质合金显微组织的影响规律,研究WC-25Co硬质合金显微组织对摩擦磨损性能的影响机制,为高硬度、优异摩擦磨损性能WC-Co硬质合金的制备提供理论基础。

## 1 实验

实验所用原料粉末为通过三维运动混料机(SYH-5型,转速24r/min)将WC-12Co球形复合粉末(粒径范围为50~150 µm,D<sub>50</sub>=101 µm)与球形Co粉(粒径范围为50~120 µm,D<sub>50</sub>=76 µm)混合后的WC-25Co混合粉末,WC-12Co复合粉末与Co粉的SEM形貌特征如图1a、1b所示,所有粉末皆为球形或近球形,保证了粉末的流动性。复合粉末的截面形貌显示颗粒近乎全致密,如图1c、1d所示。进行激光定向能量沉积实验前,将WC-25Co混合粉末置于真空干燥箱内,80℃保温6h,以降低粉末残余氧含量及湿度,保证粉末流动性。实验所使用基板的尺寸为150 mm(L)×150 mm(W)×10 mm(H),对基板表面进行喷砂处理,清洗后烘干,以去除不锈钢表面氧化部分,减少氧元素对沉积过程中造成的影响。

激光定向能量沉积实验所采用的设备为BLT-C400 型送粉式增材制造设备,该设备主要由激光系统、粉末及 气体供给系统、水冷系统、数控系统以及可控氛围成形舱 组成。激光束焦距为固定值25 mm,光斑直径为2 mm, 激光功率最大可达2000 W,进行沉积实验时成形舱内为 氩气氛围,氧含量低于200 µL/L。在激光定向能量沉积 过程中,高能激光束熔融基材及WC-12Co复合粉末、Co 粉形成熔池,经由氩气流输送的混合粉末进入熔池中快 速熔化、凝固,形成沉积层,随后以90°层间交替的方式进 行逐层堆积,最终实现零件成形。本实验设置的工艺参 数为:3种激光功率1200、1400、1600 W,扫描速度 360 mm/min,送粉速率25 r/min。

采用 Bruker D8 Advance型X射线衍射分析仪对硬质合金进行物相分析,扫描步长为0.05°,扫描范围为15°~90°。采用 Zeiss Gemini 300型扫描电子显微镜对沉积试样显微组织进行观察,并通过设备自带的EDS能谱仪进行成分分析与元素分布状态检测。采用 XHVT-50Z型

一体式维氏硬度计,测量沉积试样的显微硬度值,实验载 荷为30kg,保压时间为15s,每个样品随机选择10个区 域进行测量,取算术平均值,减小测量误差。

采用中国科学院兰州化学物理研究所的HSR-2M往 复式摩擦磨损试验仪进行室温摩擦磨损性能测试,载荷 设定为60N,时间为60min,往复速度为500次/min,磨 损轨迹长度设定为5mm,所使用的对磨球为 $\Phi$ 5mm的 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>陶瓷球(G5级,维氏硬度为16660MPa),磨损率计 算公式如下:

$$W_{\rm r} = \frac{V}{PS} \tag{1}$$

式中:Wr为磨损率(mm<sup>3</sup>/(N·m)),V指磨损体积(mm<sup>3</sup>),P 为实验载荷(N),S为摩擦磨损总长度(m)。随后,采用 Zeiss LSM 300激光共聚焦显微镜获取磨损轮廓,通过 SEM 对磨损形貌进行观察,采用 EDS 对磨损形貌特征区 域进行成分分析。

### 2 结果与分析

#### 2.1 显微组织

图2为不同激光功率下激光定向能量沉积WC-25Co 硬质合金的XRD结果。如图所示,3种试样均由WC相 与Co相组成,无脆性相Co<sub>3</sub>W<sub>3</sub>C、Co<sub>6</sub>W<sub>6</sub>C或是W<sub>2</sub>C的衍 射峰,表明熔池中主要反应为Co的熔化与填充,以及 WC的溶解。这归因于在激光沉积过程中产生的高局部 温度和冷却速率易导致WC分解形成脱碳相,但Co能够 在溶液中保持一定量的W和C,在形成脱碳相之前,W 和C的化学计量不平衡可以在一定程度上被Co相缓冲, 因此在本研究中所成形的高Co含量硬质合金的XRD中 并未发现脱碳相。这与选区激光熔化WC-25Co硬质合 金相关研究<sup>[16]</sup>一致,在Co含量为25%时,激光功率在一 定区间内变化时,均未产生脱碳相。

图3为不同激光功率下激光定向能量沉积WC-25Co 硬质合金的水平截面的SEM照片。3种试样均存在球状 浅灰色颗粒与周围区域的深灰色相,这是由于高能激光 束熔融WC-12Co复合粉末与球形Co粉的混合粉末时, 低熔点Co与WC-12Co颗粒边缘的Co率先熔化,形成的



#### 图1 粉末SEM形貌

Fig.1 SEM images of powder: (a) WC-12Co composite powder, (b) Co powder, (c) cross-section of WC-12Co composite powder and (d) highmagnification microstructure in box in Fig.1c





液相主要在颗粒间发生迁移,而颗粒内部Co分布较为均 匀、局部含量较少,导致颗粒间与颗粒内部Co存在浓度 梯度,产生衬度差异性。如图3a所示,在激光功率为 1200W时,硬质合金中存在大量尺寸不均的孔洞,表现 出较差的致密性,致密度仅为76.3%,这主要由于在激光 定向能量沉积过程中,较低的激光功率难以完全熔融粉 末,粉末间润湿不足,从而导致孔隙形成<sup>[16]</sup>;随着激光功 率提高至1400、1600W,如图3b、3c所示,孔洞数量急剧 减小,合金致密性进一步提高,致密度分别达85.1%、 95.2%,这是由于激光功率提高,粉末与部分基材完全熔 融,形成的熔池完全铺展开并润湿补充粉末,此外,高激 光功率下熔池张力梯度增大,诱发形成的强对流作用导 致WC颗粒发生重排,低熔点Co相填充孔隙,从而提高 合金致密性<sup>[18]</sup>。值得注意的是,激光功率为1400W时部



图 3 不同激光功率下定向能量沉积 WC-25Co 硬质合金 SEM 照片 Fig.3 SEM images of WC-25Co cemented carbide deposited by LDED under different laser powers: (a) 1200 W, (b)1400 W, and (c) 1600 W

分区域仍存在较大尺寸Co池,随着激光功率提高至 1600W,残留的Co池尺寸减小,整体上Co相在颗粒间呈 均匀分布,存在部分亮白色WC粗晶区。

图4为不同激光功率下定向能量沉积WC-25Co硬 质合金高倍下的显微组织。如图所示,激光定向能量沉 积WC-25Co硬质合金过程中主要存在4种情况:(1)颗 粒间存在较大Co池,这是由于熔池凝固速度较快,Co相 迁移不充分,常发生于低激光功率下成形的WC-25Co硬 质合金中,其中Co池中WC晶粒较粗大,如图4a所示; (2)Co池减小,其余区域Co相分布均匀,这是由于凝固 速度减慢,Co相迁移时间延长,常发生于中激光功率条 件下,其颗粒间WC晶粒尺寸与颗粒内部差距减小,如图 4b所示;(3)Co池消失,凝固时间进一步延长,从而导致 Co相迁移时间充足,常发生于高激光功率条件下,其颗 粒间WC晶粒尺寸与颗粒内部接近或相等,如图4c所 示;(4)Co池消失,形成WC粗晶粒区,表明凝固速度慢, Co相迁移充分,但由于液相存在时间长,WC晶粒存在异 常长大的现象<sup>[18]</sup>,如图4d所示。

图5为不同激光功率下激光定向能量沉积WC-25Co 硬质合金不同Co含量区域显微组织。如图所示,激光定 向能量沉积WC-25Co硬质合金中存在富Co区与贫Co 区,这归因于球形Co粉熔融形成的液相Co与WC-12Co 颗粒内部均匀分散的Co相间存在浓度差异。根据研 究<sup>[16]</sup>,在贫Co区中(低Co含量),WC晶粒的生长机制主 要为合并长大机制,而在颗粒外部的Co富区中WC晶粒 的生长机制主要为溶解-析出机制,导致晶粒异常生长, 产生晶粒差异化。相对来说,低激光功率条件下,晶粒差 异性越大,随着激光功率提高,晶粒差异化减小,这是由 于随着激光功率的提高,液相含量增多、持续时间延长, 具有低液相迁移压力的区域中的液体能够充分流入高液 相迁移压力的区域中,Co相分布更加均匀,晶粒差异化 减小<sup>[19]</sup>。但由于激光沉积过程中熔池温度分布不均,部 分区域液相含量高,存在时间过长,晶粒溶解-析出生长 严重,导致晶粒粗大。

#### 2.2 硬度与摩擦磨损性能

图 6 为不同激光功率下 WC-25Co 硬质合金的维氏 硬度(HV<sub>30</sub>)。如图所示,随着激光功率由 1200 W 提高至 1600 W,硬质合金整体维氏硬度由(7740.0±777.9) MPa 提高至(9537.4±433.7) MPa,这归因于激光功率的提高有 利于孔隙率的降低,从而促使硬度提高。



图4 不同激光功率下定向能量沉积WC-25Co硬质合金高倍SEM照片

Fig.4 High magnification of microstructure of WC-25Co cemented carbide deposited by LDED under different laser powers: (a) 1200 W, (b) 1400 W, and (c-d) 1600 W



图5 不同激光功率下定向能量沉积WC-25Co硬质合金不同Co含量区域显微组织

Fig.5 Microstructure of different Co content regions of WC-25Co cemented carbide deposited by LDED under different laser powers: (a) 1200 W, (b) 1400 W, and (c-d) 1600 W

图7为不同激光功率下WC-25Co硬质合金室温条件 下的摩擦系数曲线及磨损率,摩擦系数曲线由往复式摩擦 磨损试验机通过对磨损实验中的载荷和摩擦力实时计算得 出,试样的磨损率首先使用轮廓仪对试样的划痕截面进行 测量,随后结合划痕长度计算出试样的体积磨损量,从而得 到试样的磨损率。一般而言,在摩擦磨损实验初始阶段,施 加法向力作用下,对磨球直接与硬质合金表面接触,摩擦系 数逐渐增大,随着摩擦磨损实验的进行,接触峰点发生磨损 和塑性变形,摩擦副表面形态改善,摩擦系数随之降低,直 至达到稳定的磨损率,开始进入正常磨损阶段。如图7a所 示,3种试样在摩擦磨损实验过程中均存在磨合阶段与稳定 阶段,1200W激光功率下成形的试样磨合阶段表现出较剧 烈的上下波动,另外2种激光功率下成形的试样磨合阶段波 动较小,当时间达到12min后,所有试样都进入了稳定磨损



图6 不同激光功率下沉积WC-25Co硬质合金的维氏硬度

Fig.6 Vicker hardness of WC-25Co cemented carbide deposited by LDED under different laser powers





阶段,整体而言,随着激光功率的提高,摩擦系数呈现先减 小后增大的趋势。如图7b所示,随着激光功率的提高,磨损 率呈现先减小后增大的趋势,分别为(2.08±0.12)× 10<sup>-5</sup>、(0.81±0.11)×10<sup>-5</sup>、(1.89±0.12)×10<sup>-5</sup> mm<sup>3</sup>/(N·m)。

图8为不同激光功率下的试样磨痕的三维立体与二 维截面磨损轮廓。如图所示,试样在与摩擦副Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>球往 复摩擦作用下不断磨损,生成了划痕,而划痕侧面因摩擦 副的挤压作用而变形,高于试样正常表面。不同激光功 率下磨痕宽度相差不多,但深度具有差异,随着激光功率 由1200W提高至1600W,磨痕深度表现为先减小后增 大的趋势,因而试样的磨损率随激光功率提高先减小后 增大。

图9为不同激光功率下WC-25Co硬质合金试样进 行室温摩擦磨损实验后的磨损表面。如图9a、9d所示, 磨痕上存在WC硬质颗粒与层状脱落,可知1200W激光 功率试样在室温摩擦磨损实验中发生严重的磨料磨损。 激光功率为1200W时,该功率下试样的熔化与扩散不充 分,会出现Co的偏析,随着滑动距离增加,在压缩应力与 剪切应力的作用下,Co粘结相首先被挤出材料表面并去 除,促使WC晶粒间发生错动,导致WC晶粒间或晶粒内 部出现微裂纹,并沿WC-Co界面或Co相的不连续区域 扩展,形成偏析型裂纹,于是试样出现了垂直于划痕方向 的Co的挤出且产生了开裂倾向。随着激光功率提高至 1400 W,硬质合金表面存在小部分数量少、尺寸小的剥 落坑,表现为较轻微的磨料磨损,该功率下大部分区域 Co相分布均匀,Co中间层厚度小,耐磨性较好<sup>[20-21]</sup>,如图 9b和9e所示。当功率为1600W时,则主要表现为局部 WC颗粒的碎裂以及部分颗粒的剥落,表现为较严重的 磨粒磨损,在激光定向能量沉积过程中,颗粒快速升温与 急速冷却,导致合金内部有一定残余应力,且随着激光功 率提高而迅速增加<sup>[22]</sup>,在往复摩擦中逐渐释放,形成剥落 层,此外,存在部分粘着物,成分如下表1所示,表明磨损 表面存在局部摩擦副材料的转移,这些粘着物会在摩擦 磨损过程中成为磨屑并剥落,从而造成粘着磨损,如图 9c所示。

图 10为WC-25Co硬质合金磨损表面的 EDS 元素分 布图。如图所示,硬质合金摩擦磨损过程中存在氧化,根 据元素分布情况,O元素主要分布于 Co 韧性相区域中, 而在 WC 晶粒中分布缺乏,表明激光定向能量沉积 WC-25Co硬质合金在摩擦磨损试验过程中会发生部分 Co 的 氧化,在随后与对磨球硬质粗糙峰接触时部分氧化层断 裂、剥落,从而导致部分氧化磨损。

#### 2.3 WC-25Co硬质合金组织的形成机理

激光定向能量沉积工艺加热时间短,冷却时间快,属 于典型的非平衡凝固;而且激光能量输入呈高斯分布,熔 池内外存在较大的温度梯度,在这些影响因素下,导致熔 池内部的反应十分复杂。激光定向能量沉积 WC-25Co 硬质合金形成机理如图11 所示。

Co的熔点约为1495℃,WC的熔点约为2870℃, WC-Co的共晶温度约为1340℃,复合粉末颗粒内部的 WC质量分数约为88%,该粉末内部的固液转变温度远 高于Co单质以及复合粉末与Co粉相接触处Co含量较 高的区域。WC的导热性低于金属Co,所以复合粉末的 导热性也低于Co单质。当WC-12Co复合粉末与球形



Fig.8 Three-dimensional (a–c) and two-dimensional (a<sub>1</sub>–c<sub>1</sub>) wear profile of WC-25Co cemented carbide deposited by LDED under different laser powers: (a, a<sub>1</sub>) 1200 W, (b, b<sub>1</sub>) 1400 W, and (c, c<sub>1</sub>) 1600 W



图9 不同激光功率下沉积WC-25Co硬质合金磨损表面

Fig.9 Worn surface of WC-25Co cemented carbide deposited by LDED under different laser powers: (a, d) 1200 W, (b, e) 1400 W, and (c, f) 1600 W

Table 1 EDS analysis of spot 1 in Fig.9c (ω/%)				
Si	Ν	W	С	Co
15.24	7.13	56.93	3.56	17.14

Co粉的混合料在激光束作用下加热至熔融态沉积形成 熔池时,会优先熔化Co单质并润湿未开始熔化的复合粉 末表面,而激光功率较低时,则会出现无法沉积或是Co 难以完全熔化,依然有较高的表面张力,导致粉末在沉积 过程中产生球化现象,无法得到平整的样件。当激光功 率足够时,Co被熔化并填充粉末间隙,复合粉末与液态



图 10 WC-25Co硬质合金磨损表面及 EDS 元素面分布 Fig.10 SEM image and EDS element mappings of the wear surface of WC-25Co cemented carbide



图 11 激光定向能量沉积 WC-25Co 硬质合金形成机理 Fig.11 Formation mechanism of WC-25Co cemented carbide deposited by LDED

Co相充分接触,降低了颗粒表面的固液转变温度,随着 能量的输入,粉末开始逐渐熔化,形成了具有成分梯度的 熔池。由于在激光沉积过程中,熔池表面温度较高的区 域表面张力较低,而温度较低的区域表面张力较高, 这会导致熔融金属从高温区向低温区流动,形成对流 循环的 Marangoni 效应<sup>[23]</sup>。因此,表面能更低的液态 Co流向高表面能的熔融态复合粉末,并随着加热时间 的变化Co单质不断与WC-12Co复合粉末形成对流传 质,Co向复合粉末颗粒扩散,WC溶解于Co富集的区 域,形成了复合粉末表面Co含量由高到低的成分梯 度,打印试样组织中因此保持着球形分布,粒径略大 于原本粉末原料的直径。随着激光功率的变化,液相 含量、温度场、对流效应均会发生改变,对激光定向能 量沉积WC-25Co硬质合金而言,大致分为以下3种类 型,如图11所示:类型"I",激光功率过低以及扫描速 率过快等导致Co的表面张力过大,熔体整体的黏度较 大,阻碍了 Marangoni 效应, Co 相迁移不充分,试样中 有较多Co池产生,甚至颗粒中心组织依旧接近复合粉 末WC的晶粒尺寸;类型"Ⅱ",此时激光功率可使粉末 较为充分熔化,但扫描速率过快导致Co元素难以充分 扩散,部分颗粒处,依旧有会有少量Co池;类型"III", 当激光功率足够,扫描时间充足时,液相含量增多, Marangoni 效应更剧烈, Co扩散速率高, 形成均匀组

织,但由于激光热源能量呈高斯分布,部分区域液相 含量过多、存在时间过长,导致部分粗大 WC 晶粒 存在。

# 3 结论

1)不同激光功率条件下WC-25Co硬质合金物相组 成未发生改变,仍为WC相与Co相;随着激光功率的提高,Co相迁移更加充分,WC-25Co硬质合金孔隙率逐渐 降低、Co池尺寸逐渐减小,但由于液相存在时间较长,部 分区域WC晶粒异常长大。

2)WC-25Co硬质合金硬度随激光功率提高,呈现逐 渐增加的趋势,当激光功率由1200W提高至1600W时, 硬质合金孔隙率降低,WC-12Co复合粉末与Co相的熔化 与扩散更加充分,硬质合金整体硬度由(7740.0±777.9)MPa 提高至(9537.4±433.7)MPa;磨损率随激光功率提高呈现 先减小后增大的趋势,激光功率为1200、1400、1600W 时,磨损率分别为(2.08±0.12)×10<sup>-5</sup>、(0.81±0.11)×10<sup>-5</sup>、 (1.89±0.12)×10<sup>-5</sup> mm<sup>3</sup>/(N·m)。

3)不同激光功率条件下WC-25Co硬质合金均主要发 生磨料磨损,1200W激光功率下,试样的熔化与扩散不充 分,会出现Co的偏析,导致形成了偏析型裂纹,表现为严 重的磨料磨损,随着激光功率提高至1400W,Co相迁移更 充分,耐磨性提高,然而当激光功率进一步提升至1600W 时,Co相迁移充分,但内部残余应力增大,导致颗粒剥落, 表现为较严重的磨料磨损,并伴随一定程度的粘着磨损; 此外,摩擦磨损过程中Co相会发生氧化,导致氧化磨损。

#### 参考文献 References

- Agode K E, Wolff C, Guven M et al. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials[J], 2024, 119: 106508
- [2] Wang Boxiang, Wang Zhenhua, Yin Zengbinet al. Wear[J], 2024, 546-547: 205359
- [3] Wang Chen, Lu Hao, Liu Xuemei et al. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials[J], 2024, 121: 106690
- [4] Li Meng(李 萌), Gong Manfeng(弓满锋), Cheng Zanlin(程赞粼) et al. Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工 程)[J], 2023, 52(7): 2653
- [5] Bertalan C, Moseley S, Pereira L et al. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials[J], 2024, 118: 106439
- [6] Delanoë A, Lay S. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials[J], 2009, 27(1): 140
- [7] Zhang Lei, Hu Chaoquan, Yang Yafeng et al. Additive Manufacturing[J], 2022, 55: 102820
- [8] Suzuki A, Shiba Y, Ibe H et al. Additive Manufacturing[J], 2022, 59:103089
- [9] Chen J, Huang M J, Fang Z Z et al. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials[J], 2019, 84: 104980
- [10] Liu Zhaopeng(刘钊鹏), Gu Jun(顾 俊), Wang Jianchao(王健超) et al. Applied Laser(应用激光)[J], 2021, 41(4): 715

- [11] Erfanmanesh M, Abdollah-Pour H, Mohammadian-Semnani H et al. Ceramics International[J], 2018, 44(11): 12805
- [12] Balla V K, Bose S, Bandyopadhyay A. Materials Science and Engineering A[J], 2010, 527(24–25): 6677
- [13] Sun Ning(孙宁), Fang Yan(方艳), Zhang Jiaqi(张家奇) et al. Chinese Journal of Lasers(中国激光)[J], 2021, 48(6): 0602106
- [14] Erfanmanesh M, Shoja-Razavi R, Abdollah-Pour H et al. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials
   [J], 2019, 81: 137
- [15] Traxel K D, Bandyopadhyay A. Additive Manufacturing[J], 2021, 37: 101602
- [16] Schwanekamp T, Marginean G, Reuber M et al. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials[J], 2022, 105: 105814
- [17] Ye Nan, Ma Yunzhu, Tang Jiancheng. *Materials Research Express*[J], 2021, 8(6): 066508
- [18] Liu Jinyang, Chen Jian, Zhou Li et al. Acta Metallurgica Sinica (English Letters)[J], 2021, 34: 1245
- [19] Fan P, Fang Z G, Sohn H Y. Acta Materialia[J], 2007, 55(9): 3111
- [20] Konyashin I, Ries B. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials[J], 2014, 46: 12
- [21] He Meiling, Zheng Xiaoyu, Tian Haixia et al. Journal of Materials Research and Technology[J], 2022, 21: 2445
- [22] Deng Dewei(邓德伟), Ma Yunbo(马云波), Sun Qi(孙奇) et al. Hot Working Technology(热加工工艺)[J], 2022, 51(12): 80
- [23] Li Yanze, Gu Dongdong, Dai Donghua et al. Additive Manufacturing[J], 2024, 79: 103946

# Preparation of WC-25Co Cemented Carbide by Laser Directed Energy Deposition and Its Tribological and Wear Properties

Ye Nan<sup>1</sup>, Li Shiyu<sup>1</sup>, Wu Zichun<sup>2</sup>, Mao Jie<sup>2</sup>, Zhuo Haiou<sup>1</sup>, Tang Jiancheng<sup>1</sup>

International Institute for Materials Innovation, Nanchang University, Nanchang 330031, China)
 School of Physics and Materials Science, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

**Abstract:** WC-25Co cemented carbides were prepared by laser directed energy deposition technology using spherical WC-12Co composite powder and spherical Co powder as raw materials. The effects of laser power on the microstructure and friction and wear properties of WC-25Co cemented carbides were studied. The results show that the Co particles melt and form liquid phase, which significantly improves the deposition quality of WC-12Co. The increase in laser energy promotes the flow of Co liquid phase, and the densification degree and microstructure uniformity of the alloy are significantly increased. The alloy structure is composed of WC phase and Co phase, and no decarburization phases such as  $Co_3W_3C$ ,  $Co_6W_6C$  and  $W_2C$  are found. With the increase in laser power, the alloy hardness increases gradually, and the wear rate decreases first and then increases. At the laser power of 1400 W, the wear rate in WC-25Co cemented carbide is the lowest, which is  $(0.81\pm0.11)\times10^{-5}$  mm<sup>3</sup>/(N·m). The wear mechanism is mainly abrasive wear, and there is also a small amount of oxidation wear.

Key words: WC-25Co cemented carbide; laser directed energy deposition technique; laser power; friction and wear properties

Corresponding author: Ye Nan, Ph. D., Associate Research Fellow, International Institute for Materials Innovation, Nanchang University, Nanchang 330031, P. R. China, E-mail: yenan@ncu.edu.cn