

丝粉协同电弧增材制造机械刀具耐磨层组织及性能

刘杰^{1, 2}, 欧阳梦秋^{1, 2}, 张帅^{1, 2}, 高鉴^{1, 2}, 胡连海^{1, 2}, 桑德利^{1, 2}, 马世卿^{1, 2}

1. 石家庄铁道大学材料科学与工程学院 河北石家庄 050043

2. 河北省交通工程与环境协同发展新材料重点实验室 河北石家庄 050043

摘要: 机械刀具在农用机械、轨道交通等领域中应用广泛。基于热源和耐磨层增强相体积分数要求,建立了丝粉协同电弧增材制造系统,制备了不同送粉气体流量下的碳化钨增强铁基耐磨层,采用金相显微镜、X射线衍射仪、扫描电镜和能谱仪分析耐磨层组织及成分。结果表明:送粉气体流量为8L/min时,增强相体积分数为60%,耐磨层由 α -Fe基体、WC和 W_2C 颗粒以及 Fe_3W_3C 析出相组成,耐磨层基体显微硬度 $\geq 1000HV$,增强相最高显微硬度为2385HV,具有优良的耐磨性。

关键词: 丝粉协同电弧增材制造; 增强相; 微观组织; 显微硬度; 耐磨损性能

Microstructure and properties of mechanical cutting tool wear resistant layers prepared by wire powder synergistic arc additive manufacturing

LIU Jie^{1, 2}, OUYANG Mengqiu^{1, 2}, ZHANG Shuai^{1, 2}, GAO Jian^{1, 2}, HU Lianhai^{1, 2}, SANG Deli^{1, 2}, MA Shiqing^{1, 2}

1. School of Materials Science and Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, Hebei, China

2. Hebei Key Laboratory of Advanced Materials for Transportation Engineering and Environment, Shijiazhuang 050043, Hebei, China

Abstract: Mechanical cutting tools are widely used in fields such as agricultural machinery and rail transit. A set of wire powder synergistic arc additive manufacturing system was established based on the requirements of heat source and reinforcement phase volume fraction of the wear-resistant layer. The tungsten carbide reinforced iron-based wear-resistant layers were prepared under different powder feeding gas flow rates. The microstructure and composition of the wear-resistant layer were analyzed using metallographic microscope, X-ray diffractometer, scanning electron microscope and energy dispersive spectrometer. The results show that when the wear resistance layer with a powder feeding gas flow rate was 8L/min, the volume fraction of reinforcement phase is 60%. And the wear resistance layer is composed of α -Fe matrix, WC and W_2C particles and Fe_3W_3C precipitates. The matrix microhardness of the wear resistance layer is above 1000HV, and the maximum microhardness of the reinforcing phase is 2385HV. The wear resistance layer has excellent wear resistance.

Keywords: wire powder synergistic arc additive manufacturing; reinforcement phase; microstructure; microhardness; wear resistance

基金项目: 河北省自然科学基金资助项目(E2022210030); 河北省高等学校科学技术研究项目(CXY2024035); 大学生创新创业训练计划项目(202310107008); 石家庄铁道大学高等教育教学研究重点项目(Z2022-12)。

第一作者: 刘杰, 本科, 主要从事金属材料表面改性研究, E-mail: 562175956@qq.com。

通信作者: 胡连海, 副教授, 博士, 主要从事高性能金属材料制备及异种金属连接研究, E-mail: lianhai_hu@stdu.edu.cn。

1 序言

近年来,机械刀具在农用机械、轨道交通等领域应用广泛。然而,目前机械刀具存在耐磨性与稳定性较差,生产技术复杂,以及使用寿命短等缺点,造成了巨大损失。国内外学者在刀具的表面改性方法及机理、熔覆材料、熔覆层基体和增强相特征、熔覆层性能等方面开展了广泛和深入的研究^[1-4]。激光熔覆、等离子熔覆及TIG电弧堆焊等传统方法制备的耐磨层存在着WC等增强相体积分数不足和增强相分解导致耐磨性能下降的问题^[5-7],线材氧炔火焰堆焊及氧乙炔焰喷焊等方法存在热源能量分散、劳动环境差及生产效率低等问题^[8, 9]。

基于以上问题,如何选择合适的热源来减少碳化物等增强相的分解,如何采用合适的材料形态实现具有高体积分数增强相刀具的制备,如何高效率地制备机械刀具以降低成本和改善生产环境等是亟需解决的关键产业问题。本文建立了一套丝粉协同电弧增材制造系统,开展了机械刀具耐磨层增材制造工艺、微观组织、成分及性能的研究。

2 试验材料、设备与方法

若提高机械刀具的耐磨性和使用寿命,则要求WC等增强相体积分数>50%,为了达到该效果,一方面要求热源温度适中,使添加的WC等增强相在热源的作用下分解较少,同时具有较高的熔覆效率;另一方面要求添加的熔覆材料中的WC等增强相含量高。由于火焰类热源温度<电弧类热源温度<等离子弧热源或激光热源温度,其中电弧类热源中的MIG电弧温度又小于TIG电弧温度,因此,选用MIG电弧作为热源比较合适,既能避免碳化物等增强相分解过多,又能保证较高的熔覆效率。然而,该MIG电弧堆焊方法采用药芯焊丝进行熔覆,由于MIG电弧堆焊用药芯焊丝直径一般不超过2mm,使得WC等增强相填充率有限,不能满足熔覆层的高体积分数增强相要求,因此本研究在采用药芯焊丝作为熔覆材料的基础上,在焊枪上增加同轴送粉管路输送增强相粉末,从而提高了WC等增强相加入耐磨层的数量,实现了具有高体积分数增强相的耐磨层制备。

基体材料选用16Mn钢,药芯焊丝合金带采用Q235钢带,药芯焊丝内部药芯为WC和W₂C双相粉

末,粒径为80~150目,形状为球形,粉末填充率为25%,焊丝直径为1.6mm。同轴送粉的粉末也为WC和W₂C双相粉末,形状为非规则形状,粒径为150~300目。

采用北京时代NBM-500焊机,设计并制造复合焊枪,使得能够同时送丝和同轴送粉,将焊机、送丝系统、送粉系统、保护气体瓶、送粉气瓶与复合焊枪等集成,建立了丝粉协同电弧增材制造系统,如图1所示。在增材制造过程中,焊机选择直流反接,焊丝前倾角为80°,复合焊枪送粉通路指向焊丝延伸线与工件交点,焊接保护气体为纯氩气,气体流量为15L/min,焊接电流为190A,电弧电压为22V,熔覆速度0.3m/min,送粉气体为纯氩气,送粉气体流量分别为4L/min、6L/min和8L/min,启动焊接设备和送粉设备后,焊丝和母材在电弧热作用下熔化形成熔池,送粉氩气推动WC粉末顺利进入熔池,凝固后形成耐磨层,如图2所示。

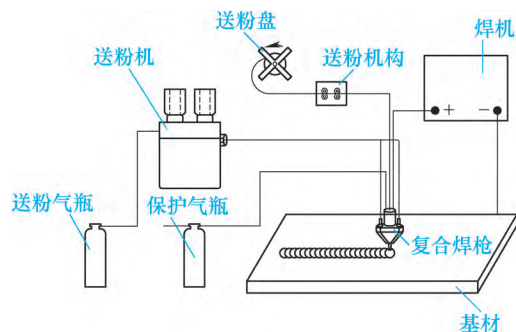


图1 丝粉协同电弧增材制造系统



图2 机械刀具耐磨层实物

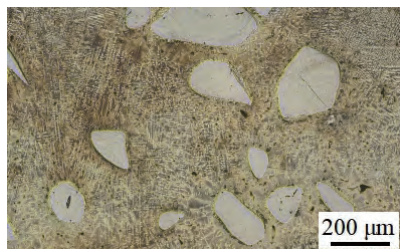
对增材制造的刀具耐磨层用线切割设备切成试样,采用砂纸对试样进行磨制,然后进行抛光,采用王水进行腐蚀,获得金相试样。采用LEICADMi8型金相显微镜观察金相组织,采用SU8010型场发射扫描电子显微镜和EDS分析仪观察微观组织和元素分布,采用D8 Advance型X射线衍射仪分析耐磨层物相组成,并用HVS-1000显微硬度计检测耐磨层硬度。根据刀具的工作环境,自制摩擦磨损设备并对

耐磨层进行耐磨性能测试, 磨粒为砂砾。

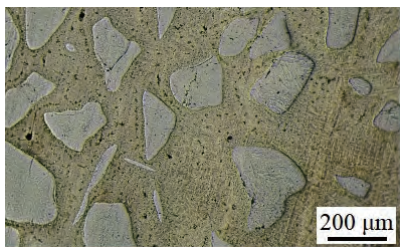
3 试验结果与分析

3.1 耐磨层微观组织分析

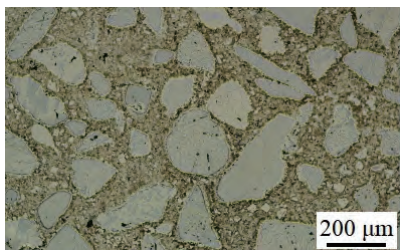
图3所示为3种WC增强铁基耐磨层的金相组织。从图3可看出, 基体上分布着未熔的灰白色颗粒, 根据药芯焊丝的药芯部分和送粉通路加入的粉末的成分, 可以推测灰色颗粒为WC和 W_2C 增强相。一方面, 部分增强相粉末存在于药芯焊丝的芯部, 在电弧热源和各种力的作用下, 伴随着熔滴过渡进入熔池; 另一方面, 部分增强相粉末在送粉气体推动下, 通过送粉通路进入熔池, 熔池凝固后形成颗粒增强铁基耐磨层。当送粉气体流量为4L/min、6L/min和8L/min时, 增强相体积分数分别约为25%、40%和60%。



a) 4L/min (200×)



b) 6L/min (200×)

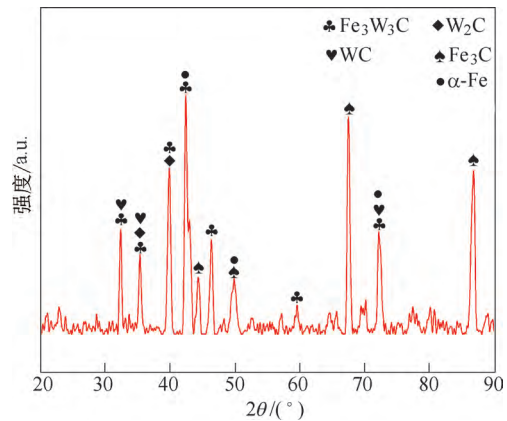


c) 8L/min (200×)

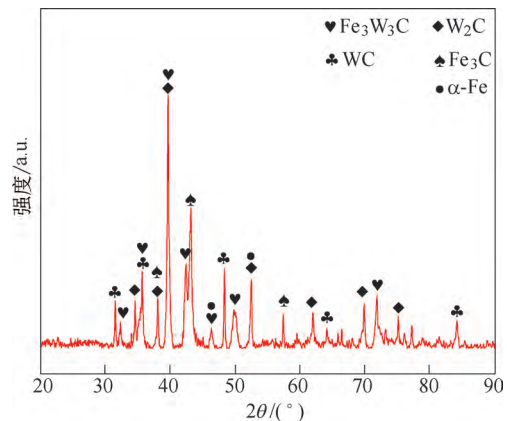
图3 不同送粉气体流量的耐磨层金相组织

图4所示为不同送粉气体流量的耐磨层X射线衍射图。送粉气体流量为4 L/min的耐磨层中 α -Fe基体占比最大, 增强相中 Fe_3W_3C 和 Fe_3C 的含量最多; 当送粉气体流量为6L/min时, α -Fe基体和 Fe_3C 的含量明显减少, W_2C 明显增加, 由于WC和 W_2C 的硬度高于 α -Fe基体、 Fe_3W_3C 和 Fe_3C , 因此耐磨层的耐磨

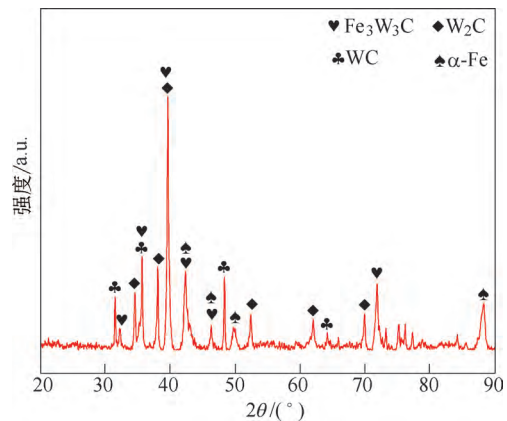
性得到提高; 当送粉气体流量为8L/min时, 耐磨层存在的主要相依次为 W_2C 、WC、 Fe_3W_3C 和 α -Fe, 不含 Fe_3C 。在丝粉协同电弧增材制造过程中, WC颗粒少量分解为 W_2C 、W、C, W_2C 少量分解为W、C, 分解产生的W、C元素与基体元素Fe反应形成 Fe_3W_3C , 耐磨层的增强相 W_2C 和WC对于提高耐磨层的硬度和耐磨性起了决定作用。



a) 4L/min



b) 6L/min

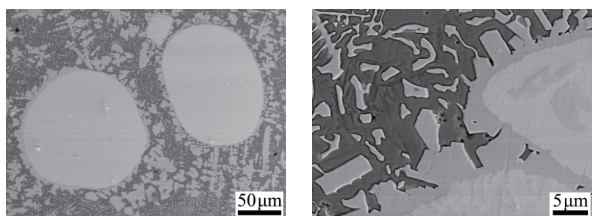


c) 8 L/min

图4 不同送粉气体流量的耐磨层X射线衍射图

由于送粉气体流量为8L/min, 所以增强相体

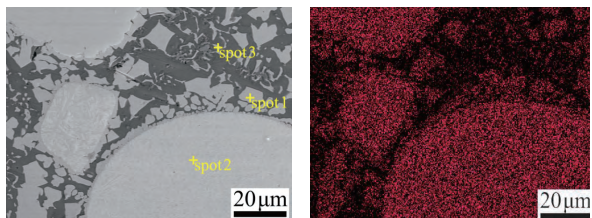
积分数最高,为此,对该耐磨层进一步进行深入分析。图5所示为送粉气体流量为8L/min的耐磨层的SEM组织。从图5可观察到,基体上分布着灰白色的球状颗粒,直径约为135 μm ,在颗粒外围,形成了一定厚度的过渡层,在颗粒周围稍远处析出了一定数量的灰白色不规则块状小颗粒。图6所示为EDS点扫描位置及面扫描元素分布图。其中,图6a为EDS面扫描并对标记位置进行点分析,结果如图6b、c所示,具体数据见表1,从图6可看出,灰白色大颗粒由W和C元素组成,从表1的spot 2位置的测试结果看出,C与W原子含量比约为2:3,结合图4cXRD的分析结果,灰白色颗粒由WC和 W_2C 组成。从图6b和表1的spot 1位置的测试结果可以看出,颗粒外围的不规则的灰白色颗粒的W含量下降。根据图4c的XRD的分析结果及W、Fe、C元素比例,推断灰白色颗粒为 $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$ 析出物, $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$ 析出物由送粉粉末和药芯焊丝中的芯部WC和 W_2C 颗粒在过渡和溶解过程中分解产生的W、C元素与基体元素Fe结合形成。



a) 低倍SEM

b) 高倍SEM

图5 送粉气体流量为8L/min的耐磨层微观组织



a) 扫描位置

b) W元素分布



c) C元素分布

图6 耐磨层EDS分析

表1 耐磨层EDS点分析(体积分数) (%)

位置	Fe	W	C
Spot1	35.47	50.15	14.38
Spot2	—	59.17	40.83
Spot3	36.02	48.61	15.37

3.2 耐磨层显微硬度测试

对送粉气体流量为8L/min时制备的耐磨层进行显微硬度检测,从耐磨层上表面开始,间隔0.15mm检测一个点,绘制的显微硬度曲线如图7所示。从图7可看出,耐磨层基体硬度 $\geq 1000\text{HV}$,在WC和 W_2C 颗粒增强相位置处,硬度较高,最高硬度为2385HV。

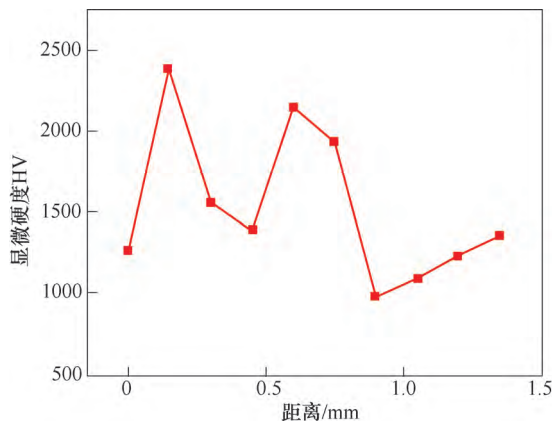


图7 送粉气体流量为8L/min的耐磨层显微硬度

3.3 耐磨层磨损性能测试

对制备的3种耐磨层进行耐磨损性能测试,每天磨损12h,连续磨损7天,每磨损12h更换一次磨粒,试验结束后测试所述3种耐磨层的质量损失,见表2。从表2可看到,随着送粉气体流量的增加,耐磨层中增强相体积分数增加,耐磨层质量损失逐渐减小,送粉气体流量为8L/min时,质量损失最小,为194mg。

表2 耐磨层磨损损失重量

送粉气体流量/(L/min)	质量损失/mg
4	514
6	303
8	194

4 结束语

1) 建立了一套丝粉协同电弧增材制造系统,该丝粉协同电弧增材制造方法具有热源温度适中、熔覆效率高和材料利用率高的特点,能够实现高体积

分数增强相的耐磨层制备。

2) 当送粉气体流量分别为4L/min、6L/min和8L/min时,耐磨层的增强相的体积分数分别为25%、40%和60%,耐磨损性能逐渐增加。

3) 送粉气体流量为8L/min的耐磨层由 α -Fe基体、 W_2C 和WC颗粒以及 Fe_3W_3C 析出相组成,具有较高的显微硬度,基体硬度 $\geq 1000HV$,增强相最高硬度达到了2385HV。

参考文献:

- [1] 郝建军, 占志国, 侯俊英, 等. 旋耕刀Fe/WC/CeO₂等离子堆焊层制备及其组织性能[J]. 农业工程学报, 2021, 37 (24): 1-8.
- [2] 赵建杰. 热喷涂硬质涂层旋耕刀具磨损性能研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2018.
- [3] XU L, SONG Z, LI M., et al. Self-grinding silage knife strengthened with Ni-WC alloy prepared by laser cladding[J]. Applied Sciences, 2021, 11 (21): 10236-10236.
- [4] 黄光灿, 郭纯, 李云, 等. 农机零部件表面修复及强化技术现状与展望[J]. 金属加工 (热加工), 2023 (5): 17-131.
- [5] XIA J, FENG Y, LING Z, et al. Influence of WC particle content of Fe-based powder-cored wire on microstructure and properties of plasma cladding reinforced layers[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2022, 922: 166148.
- [6] WANG Y, HUANG Y, YANG L, et al. Microstructure and property of tungsten carbide particulate reinforced wear resistant coating by TIG cladding[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2021, 100: 105598.
- [7] 王开明, 雷永平, 魏世忠, 等. WC含量对激光熔覆Ni基WC复合涂层组织和性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2016, 37 (7): 172-179.
- [8] IDIR A, DELLORO F, YOUNES R, et al. Microstructure analysis and mechanical characterisation of NiWCrBSi coatings produced by flame spraying[J]. Metallurgical Research & Technology, 2022, 119 (4): 403.
- [9] 杜学铭, 卜智祥, 李爱农. 碳化钨条氧-乙炔火焰耐磨堆焊工艺的研究[J]. 船海工程, 2002 (2): 35-38.
- [10] 杜学铭, 卜智祥, 李爱农. 碳化钨条氧-乙炔火焰耐磨堆焊工艺的研究[J]. 船海工程, 2002 (2): 35-38.
- [11] JIANG R, MOSTAFAEI A, PAUZA J, et al. Varied heat treatments and properties of laser powder bed printed inconel 718[J]. Materials Science and Engineering: A, 2019, 755: 170-180.
- [12] HIGASHI M, OZAKI T. Selective laser melting of pure molybdenum: Evolution of defect and crystallographic texture with process parameters[J]. Materials & Design, 2020, 191: 108588.
- [13] ZHANG Z, SUN J, XIA J, et al. Anisotropic response in corrosion behavior of laser powder bed fusion Al-Mn-Mg-Sc-Zr alloy[J]. Corrosion Science, 2022, 208: 110634.
- [14] 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.
- [15] WEI H L, MAZUMDER J, DEBROY T. Evolution of solidification texture during additive manufacturing[J]. Scientific Reports, 2015, 5 (1): 16446.
- [16] BOUSSINOT G, APEL M, ZIELINSKI J, et al. Strongly out-of-equilibrium columnar solidification during laser powder-bed fusion in additive manufacturing[J]. Physical Review Applied, 2019, 11 (1): 014025.
- [17] GHAYOOR M, LEE K, HE Y, et al. Selective laser melting of 304L stainless steel: Role of volumetric energy density on the microstructure, texture and mechanical properties[J]. Additive Manufacturing, 2020, 32: 101011.

MW 20240309

MW 20240309

(上接第119页)

molybdenum and molybdenum-rhenium alloys[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2000, 18 (4-5): 205-211.

- [11] JIANG R, MOSTAFAEI A, PAUZA J, et al. Varied heat treatments and properties of laser powder bed printed inconel 718[J]. Materials Science and Engineering: A, 2019, 755: 170-180.
- [12] HIGASHI M, OZAKI T. Selective laser melting of pure molybdenum: Evolution of defect and crystallographic texture with process parameters[J]. Materials & Design, 2020, 191: 108588.
- [13] ZHANG Z, SUN J, XIA J, et al. Anisotropic response in corrosion behavior of laser powder bed fusion Al-Mn-Mg-Sc-Zr alloy[J]. Corrosion Science, 2022, 208: 110634.
- [14] 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.

- [15] WEI H L, MAZUMDER J, DEBROY T. Evolution of solidification texture during additive manufacturing[J]. Scientific Reports, 2015, 5 (1): 16446.
- [16] BOUSSINOT G, APEL M, ZIELINSKI J, et al. Strongly out-of-equilibrium columnar solidification during laser powder-bed fusion in additive manufacturing[J]. Physical Review Applied, 2019, 11 (1): 014025.
- [17] GHAYOOR M, LEE K, HE Y, et al. Selective laser melting of 304L stainless steel: Role of volumetric energy density on the microstructure, texture and mechanical properties[J]. Additive Manufacturing, 2020, 32: 101011.