



WC 的添加对激光增材制造 Fe-Mn-Si-Cr-Ni 合金 耐磨性能的影响

赵玉凤¹, 宋来东², 王宏宇², 姜银方¹, 胡展铭²

(1. 南通理工学院, 机械工程学院, 南通, 226002; 2. 江苏大学, 机械工程学院, 镇江, 212013)

摘要: 采用激光熔丝沉积增材制造技术制备了添加不同含量 WC 的 Fe-17Mn-6Si-9Cr-5Ni 合金, 考察其在油润滑条件下的摩擦磨损行为, 分析并初步讨论了 WC 的添加量对 Fe-Mn-Si-Cr-Ni 合金耐磨机制的影响。结果表明, 在 Fe-Mn-Si-Cr-Ni 合金中, 当 WC 添加量不超过 1% (质量分数) 时, 合金硬度随着 WC 添加量的增多而增大, 但其耐磨性不增反降, 此时合金的耐磨性主要受铁基记忆合金由于应力诱发马氏体相变带来的特有减摩抗磨特性的影响; 而当 WC 的添加量增大提高至 2% 和 4% 时, 合金硬度随着 WC 添加量的增多而继续增大, 其耐磨性也随之有所提高, 但仍仅与未添加时大致相当, 此时在摩擦磨损次表层中已观察不到马氏体板条, 可以认为此时合金的耐磨性主要受 WC 颗粒的弥散强化的影响。在文中研究条件下, 添加 0.25% WC 的合金耐磨性最好。

创新点: (1) 添加少量 WC 后铁基记忆合金耐磨性主要取决于其特有的减摩抗磨特性。

(2) WC 含量过高时形成的 $\text{Fe}_6\text{W}_6\text{C}$ 颗粒会抑制降温 ϵ 马氏体的形成。

(3) 阐述了不同 WC 的添加量对铁基记忆合金耐磨机制的影响。

关键词: 铁基形状记忆合金; 耐磨机制; 激光增材制造; 油润滑; WC 颗粒

中图分类号: TG 442 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.20240721001

Influence of WC addition on wear resistance of Fe-Mn-Si-Cr-Ni alloy by laser additive manufacturing

ZHAO Yufeng¹, SONG Laidong², WANG Hongyu², JIANG Yinfang¹, HU Zhanming²

(1. School of Mechanical Engineering, Nantong Institute of Technology, Nantong, 226002, China; 2. School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, 212013, China)

Abstract: Fe-17Mn-6Si-9Cr-5Ni alloy with varying WC concentrations was fabricated via laser wire deposition additive manufacturing. Their tribological performance under oil-lubricated conditions was systematically evaluated to elucidate the influence of WC addition amount on the wear resistance of Fe-Mn-Si-Cr-Ni alloy. Results demonstrate that in the Fe-Mn-Si-Cr-Ni alloy, when the WC addition amount does not exceed 1% (by mass fraction), the hardness of the alloy increases with the increase in WC addition amount, but its wear resistance actually decreases. At this point, the wear resistance of the alloy is mainly influenced by the intrinsic friction-reducing and wear-resistant properties brought about by the stress-induced martensitic phase transformation in the iron-based memory alloy. However, when the WC addition amount is increased to 2% and 4%, the hardness of the alloy continues to increase with the increase in WC addition amount, and its wear resistance improves accordingly, which is still only approximately the same as when no additives are added. At this point, martensite laths can no longer be observed in the sub-surface layer of the friction wear. It can be considered that at this point, the wear resistance of the alloy is mainly influenced by the dispersion strengthening effect of the WC particles. Under the conditions studied in this paper, the alloy with 0.25% WC added has the best wear resistance.

收稿日期: 2024-07-21

基金项目: 南通理工学院博士科研启动基金项目 (2025XKB02); 江苏省重点建设学科 (苏教研函 [2022]2 号); 南通理工学院科技创新与区域服务团队 (KCTD003)

Highlights: (1) With minor WC addition, the wear resistance of iron-based memory alloy was primarily governed by their intrinsic friction-reducing and wear-resistant properties.

(2) The $\text{Fe}_6\text{W}_6\text{C}$ particles formed at excessive WC concentrations effectively suppressed the formation of cooling-induced ϵ -martensite.

(3) The influence of the WC addition amount on the wear resistance of iron-based memory alloy was clarified.

Key words: iron-based shape memory alloy; wear resistance mechanism; laser additive manufacturing; oil lubrication; WC particle

0 序言

Fe-Mn-Si-Cr-Ni 合金是一类利用应力诱发的 Shockley 不完全位错的可逆移动, 进而诱发 γ (fcc) 奥氏体 $\rightarrow \epsilon$ (hcp) 马氏体正逆相变, 从而实现形状记忆效应的耐蚀型铁基形状记忆合金^[1-4]. Fe-Mn-Si-Cr-Ni 合金具有成本低、强度高、相变温度接近室温、耐腐蚀性好等优点, 同时其在摩擦磨损过程中还会表现出特有的减摩抗磨特性^[5-6]. 减摩方面, 摩擦磨损过程中的接触应力, 会使 Fe-Mn-Si-Cr-Ni 形状记忆合金产生应力诱发马氏体, 即一部分作用力充当了 γ (fcc) 奥氏体 $\rightarrow \epsilon$ (hcp) 马氏体相变的驱动力, 进而降低了作用在合金摩擦时的接触应力; 抗磨方面, ϵ (hcp) 马氏体较 γ (fcc) 奥氏体具有更高的硬度和更低的粘附系数^[7]. 尽管 Fe-Mn-Si-Cr-Ni 合金具备独特的减摩耐磨特性, 但其本身相对较低的硬度仍制约了其在工业领域的应用范围^[8]. 为了解决这一问题, 强化 Fe-Mn-Si-Cr-Ni 合金以期提高其硬度, 并拓宽其工业应用范围是非常具有意义的.

陶瓷颗粒因其显著提升合金硬度和耐磨性而广泛应用于合金强化^[9], 其中 WC 以其高硬度 (2 800 ~ 3 500 HV)、低热膨胀系数 ($3.84 \times 10^{-6} \sim 5.96 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$)、高熔点 (2 870 °C) 和良好的热稳定性及耐磨性, 在如合金化等应用中展现出卓越的性能^[10-13]. 例如, 在 LIU 等人^[14]的研究中, 通过在 304 不锈钢表面使用激光熔覆技术, 成功制备了含有 WC 的 Fe-Mn-Si 形状记忆合金 (SMA/WC) 涂层.

WC 的引入显著提升了涂层的性能, 涂层的显微硬度增加了两倍以上, 而其摩擦系数和磨损损失分别减少了约 25% 和 67%. 此外, 袁晓波等人^[15]通过堆焊技术研究发现, WC 可以增强相对位错运动的阻碍作用, 从而显著的提升材料的强度、硬度和耐磨性. 然而, 目前对 WC 提升铁基记忆合金耐磨性能的研究较少, 对其机制的研究也尚不清晰.

值得进一步指出的是, 铁基形状记忆合金的加工成形性较差, 难以使用传统工艺成形复杂精密部件^[16]. 增材制造在加工具有形状记忆功能的复杂形

状金属制件上具有传统工艺所不具备的优势, 可以为拓展铁基形状记忆合金的应用提供新思路^[17-19].

选取 Fe-17Mn-6Si-9Cr-5Ni 合金作为研究对象, 以 WC 作为添加材料, 采用激光熔丝沉积增材制造技术制备了添加不同含量 WC 的 Fe-17Mn-6Si-9Cr-5Ni 合金, 考察了其在油润滑条件下的摩擦磨损行为, 分析并初步讨论了 WC 的添加量对合金耐磨机制的影响, 旨在为颗粒增强铁基记忆合金的研究提供参考.

1 试验方法

按照 Fe-17Mn-6Si-9Cr-5Ni- x WC 合金 ($x = 0, 0.25, 0.5, 1, 2, 4$; WC 为微米级) 的化学成分, 选择合适管径和壁厚的 304 不锈钢管 (其主要成分为 Fe, Cr 和 Ni) 作为外皮, 并按照“同成分、等体积”原则配置填充粉末 (Fe, Mn, Si, Cr, Ni 和 WC 粉), 配好的粉末通过充分研磨后利用震动灌装装置将其填入不锈钢管中, 保证粉芯丝材成分与合金设计成分一致, 利用课题组定制的轧尖拉拔一体化装置, 采用“圆管法”制备增材制造用粉芯丝材^[20-22], 其主要工艺流程如图 1 所示. 该粉芯丝材具有典型的“皮包粉”抗损结构, 能够抑制合金中元素的不均匀烧损, 而且其便于对成分进行调控. 使用以 HWS2000 型激光焊机为主体的增材制造平台, 将粉芯丝材以 2 mm/s 的送丝速度、1 500 W 的激光功率, 在 304 不锈钢基板上逐层堆积成约 75 mm (长) $\times$ 10 mm (宽) $\times$ 10 mm (高) 的薄壁墙试样, 沉积完成后使用 NSC-M332/W6 型电火花线切割机对

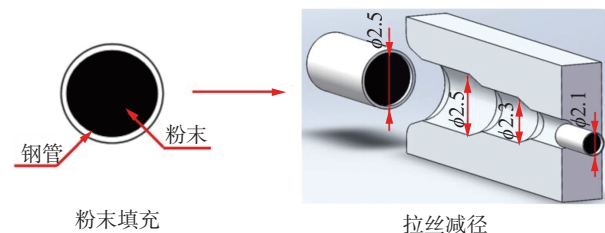


图 1 粉芯丝材制备示意图 (mm)

Fig. 1 Schematic diagram of powder core filament preparation

合金进行取样, 截取尺寸为 10 mm(长) × 10 mm(宽) × 5 mm(高) 的摩擦磨损试样和沉积态组织观察用试样。

摩擦磨损试验前, 使用 400 目砂纸将试样表面打磨至平整。随后, 在 MGW-01 往复式摩擦磨损机进行摩擦磨损试验。在试验过程中, 将试样固定在装置上, 并在试样表面添加 RHY 型润滑油, 采用直径为 2.1 mm 的 GCr15 钢球作为对磨件, 施加载荷为 7 N, 往复摩擦频率为 30 Hz, 行程为 6 mm, 试验时间为 60 min, 试验过程中自动动态采集摩擦系数。此外, 采用体积磨损率作为耐磨性指标, 体积磨损率 $W_s = V/d$, 其中, V 为磨损体积损失, d 为滑动行程距离。采用 VHX-2000 型共聚焦显微镜测量体积磨损率, 测量磨痕左侧、中间和右侧 3 个位置的磨痕深度、宽度与磨痕横切面面积, 以磨痕横切面面积的平均值作为体积磨损率。

摩擦磨损试验后, 沿磨痕中间部位截取横切面制备金相试样, 以观察磨痕次表层形貌。沉积态组织观察用试样和磨痕次表层形貌观察试样均制备成金相试样, 经过腐蚀液 (3 g $\text{CuSO}_4 + 10 \text{ mL HCl} + 30 \text{ mL H}_2\text{O}$) 浸蚀处理后, 采用 CMY210 型光学显微镜和 S-3400N 型扫描电子显微镜进行微观组织形貌观察。

采用 HXD-1000TMB 显微硬度计测量增材制造合金硬度, 载荷 0.98 N, 取 3 处不同区域硬度的平均值作为试验结果。采用弯曲变形法 (图 2) 测定

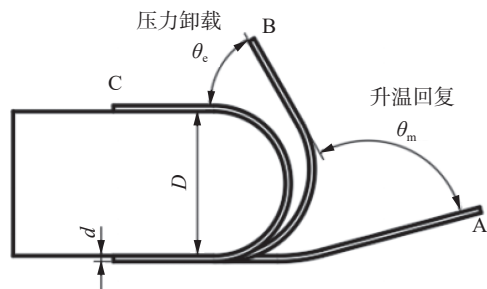


图 2 弯曲变形法测定合金形状回复特性示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the bending deformation method for measuring the shape recovery characteristics of alloy

合金的形状回复特性, 按式 (1) 计算形状回复率 η , 其中 θ_m 为记忆条的回复角度, θ_e 为压力卸载后记忆条的回弹角度。

$$\eta = \frac{\theta_m}{180^\circ - \theta_e} \times 100\% \quad (1)$$

试样的预变形量 ε 可根据公式 (2) 计算, 文中用于测定形状回复率的长条试样厚度 t 为 1 mm, 采用模具直径 D 为 25 mm, 故其预变形量 ε 为 4%。

$$\varepsilon = \frac{t}{D} \times 100\% \quad (2)$$

2 试验结果与分析

2.1 合金沉积态形貌

图 3 为增材制造 Fe-Mn-Si-Cr-Ni- x WC ($x = 0$,

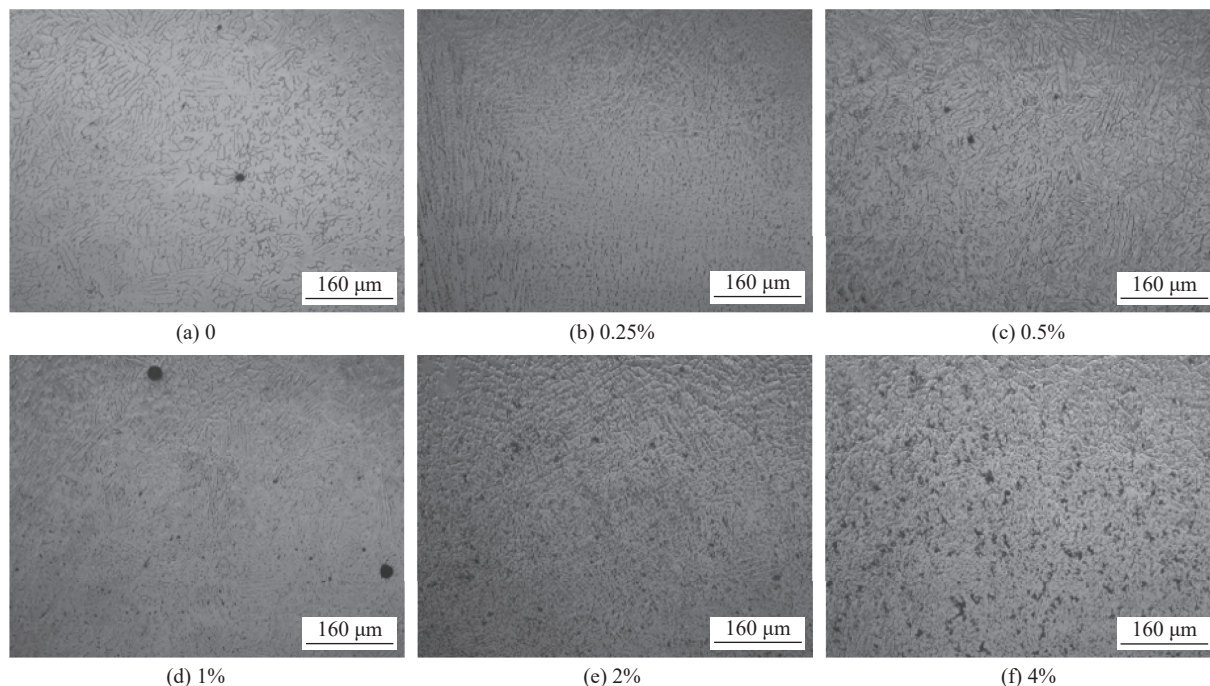


图 3 Fe-Mn-Si-Cr-Ni- x WC 合金沉积态的 OM 图像

Fig. 3 OM images of Fe-Mn-Si-Cr-Ni- x WC alloys in the as-deposited state. (a) 0; (b) 0.25%; (c) 0.5%; (d) 1%; (e) 2%; (f) 4%

0.25, 0.5, 1, 2, 4) 合金沉积态的 OM 图像, 如图 3(b) 所示, 当 WC 添加量为 0.25% 时, 在合金中未观察到明显的 WC 陶瓷颗粒, 这可能是因为 WC 在加热过程中完全分解, 其 W 和 C 元素进入晶格间隙, 从而通过固溶强化增强合金; 随着 WC 含量的提高, 由于激光参数 (如功率、扫描速度、离焦量、送粉速度) 保持不变, 导致作用于合金粉末的平均能量密度固定, 所以随着加入的 WC 硬质颗粒比例增大, 过多的 WC 硬质颗粒并没有熔化, 在合金中起到弥散强化的作用^[23]; 如图 3(c) 和图 3(d) 所示, 由于 WC 添加量较少, 合金中未熔的 WC 硬质颗粒密度变化并不明显, 导致弥散强化现象并不显著; 随着 WC 添加量的增加, 如图 3(e) 和图 3(f) 所示, 未熔化的 WC 颗粒密度随之增加, WC 颗粒的弥散强化现象开始能够显著观察并逐渐增强。

图 4 为 Fe-Mn-Si-Cr-Ni- x WC 合金 ($x = 0, 0.25, 0.5, 4$) 合金沉积态下的 XRD, 可以观察到 $\text{Fe}_6\text{W}_6\text{C}$ 相的出现 (用 $\blacklozenge$ 表示)。分析认为, WC 在熔覆过程中会分解, 释放出的 W 元素一部分固溶于合金中, 但是由于 W 元素在合金中的固溶度有限, 所以大部分的 W 元素与 Fe 和 C 元素结合, 形成 $\text{Fe}_6\text{W}_6\text{C}$ 型碳化物^[24]。而在 FeMnSi 形状记忆合金中, $\text{Fe}_6\text{W}_6\text{C}$ 颗粒能够限制堆积断层的运动, 进而抑制马氏体的形成, 导致部分奥氏体难以转变为马氏体^[14]。因此, 随着 WC 含量增加, $\text{Fe}_6\text{W}_6\text{C}$ 相的特征峰显现并增强, 同时降温马氏体的峰值开始减弱。

2.2 合金摩擦磨损后次表层形貌

图 5 展示了合金摩擦磨损后次表层的电镜

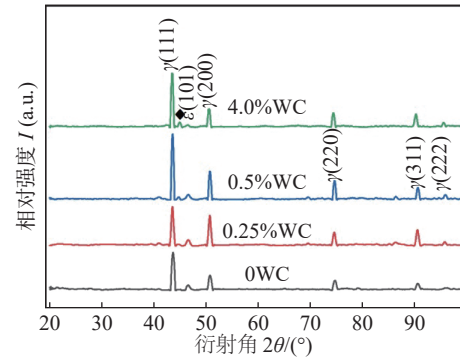


图 4 Fe-Mn-Si-Cr-Ni- x WC 合金沉积态的 XRD

Fig. 4 XRD pattern of Fe-Mn-Si-Cr-Ni- x WC alloy in as-deposited state

(SEM) 图像, 对比图 5(a) 和图 5(b), 可以看到添加 0.5% WC 的合金相较于未添加 WC 的合金, 其马氏体板条的数量减少, 且马氏体间距增加; 当 WC 含量增加为 2% 时, 如图 5(c) 所示, 马氏体板条数量急剧减少, 已无法在图 5(c) 中明显观察到马氏体板条。分析认为, 随着 WC 含量的增加, 合金中形成更多的 $\text{Fe}_6\text{W}_6\text{C}$ 颗粒, $\text{Fe}_6\text{W}_6\text{C}$ 颗粒能够限制堆积断层的运动, 导致冷却过程中合金形成的降温马氏体含量减少, 这些降温马氏体, 可以为合金在变形时提供更多的形核点。因此, 随着降温马氏体的减少, 合金的形核点数量大幅减低, 从而使得应力诱导的马氏体相变过程变得更为困难。这种现象最终导致马氏体板条数量的显著减少, 增加了塑性变形所承担的比重, 进而对合金的形状记忆性能产生了不利影响^[25-27]。此外, 在摩擦磨损过程中, $\text{Fe}_6\text{W}_6\text{C}$ 颗粒同样限制了堆积断层的运动, 进一步限制应力诱发马氏体的形成, 使得磨损时次表层中应力诱发马氏体含量进一步降低。

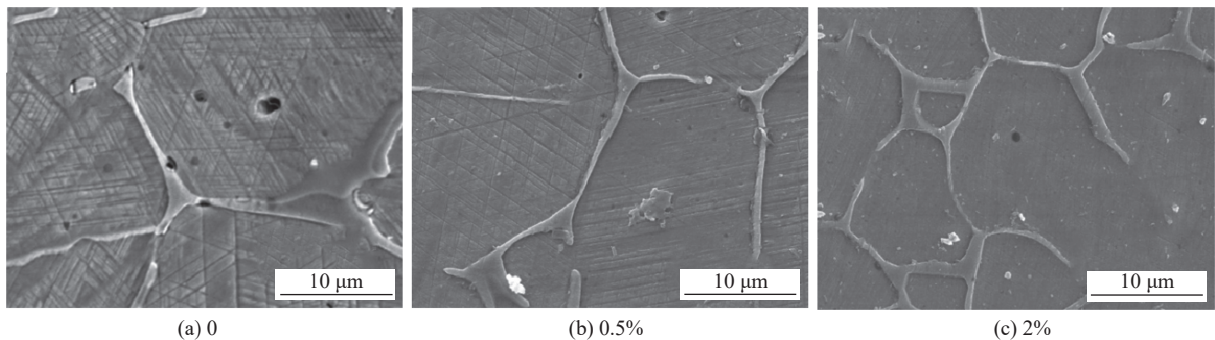


图 5 摩擦磨损后的 Fe-Mn-Si-Cr-Ni- x WC 合金次表层的 SEM 图像

Fig. 5 SEM images of subsurface layers of Fe-Mn-Si-Cr-Ni- x WC alloy after friction wear. (a) 0; (b) 0.5%; (c) 2%

2.3 合金的记忆性能

图 6 为不同 WC 添加量 Fe-Mn-Si-Cr-Ni 合金在 4% 预变形下回复率, 随着 WC 含量的增加, 合

金的记忆性能逐渐降低。

未添加 WC 的 Fe-Mn-Si-Cr-Ni 合金回复率为 68.5%; 当 WC 添加量为 0.25%, 0.5%, 1%, 2% 和

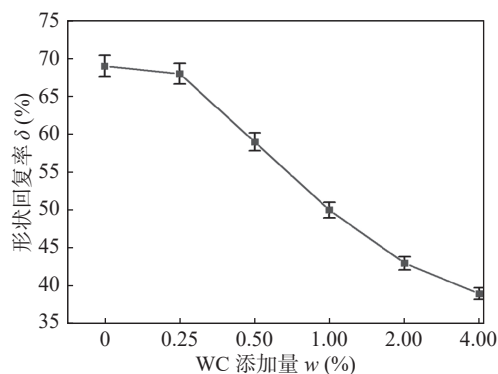


图 6 不同 WC 添加量 Fe-Mn-Si-Cr-Ni 合金在 4% 预变形下回复率

Fig. 6 Recovery rate of Fe-Mn-Si-Cr-Ni alloys with different WC additions at 4% predeformation

4% 合金, 形状回复率为 68.3%, 59.8%, 50.1%, 43.0% 和 38.8%。其中, 当 WC 添加量为 0.25% 时, 记忆性能的下降幅度相对较小, 分析认为, 当 WC 添加量为 0.25% 时, 合金中 WC 含量较少, 合金中超出固溶限度的 W 元素有限, 导致生成的 $\text{Fe}_6\text{W}_6\text{C}$ 颗粒较少, 可以看到在该条件下的 XRD 图中几乎观察不到 $\text{Fe}_6\text{W}_6\text{C}$ 相的峰。因此, 在图 6 中看到, 0.25% WC 的添加量对合金的形状回复率影响小。

2.4 硬度和体积磨损率

图 7 是增材制造 Fe-17Mn-6Si-9Cr-5Ni-xWC 合金 ($x = 0, 0.25, 0.5, 1, 2, 4$) 的体积磨损率及硬度曲线。

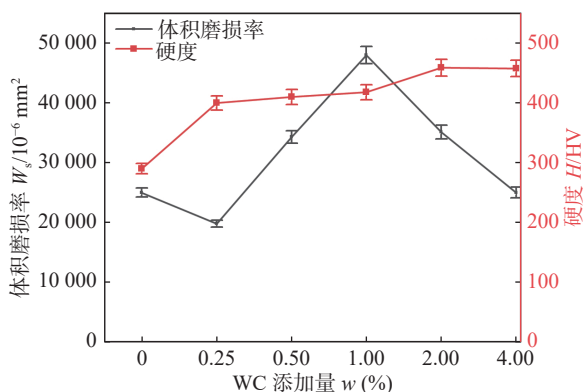


图 7 Fe-Mn-Si-Cr-Ni-xWC 合金体积磨损率及硬度曲线
Fig. 7 Volumetric wear rate curves and hardness curves of Fe-Mn-Si-Cr-Ni-xWC alloys

从图 7 可以看出, 随着 WC 硬质颗粒添加量的增加, 合金的硬度呈现出上升的趋势, 其中, 不添加 WC 的合金的硬度在 290 HV 左右; 添加量分别为 0.25%、0.5%、1%、2% 和 4% 的 WC 硬质颗粒时, 合金的平均硬度分别提升到 401 HV, 418 HV, 459 HV 和 458 HV, 相比于原始基体硬度分别增加了 1.38 倍、1.41 倍、1.44 倍、1.58 倍和

1.57 倍。此外, 当 WC 的添加量从 2% 增加为 4% 时, 合金的硬度并未继续提升, 这种现象的原因在于, 在给定的激光功率、扫描速度、离焦量和送粉速度条件下, 激光在铁基合金粉末上的平均能量密度是固定的。因此, 随着 WC 硬质颗粒添加量的进一步增加, 超出了熔化能力范围的 WC 硬质颗粒无法被有效熔化, 这些 WC 硬质颗粒容易引发应力集中增加, 增加合金的开裂可能, 使合金内部出现缺陷^[23], 最终导致合金硬度的增长受到限制。

从图 7 中可以看出, 未添加 WC 和添加 0.25%、0.5%、1%、2% 和 4% WC 试样合金的体积磨损率分别为 $24444 \times 10^{-6} \text{ mm}^2$, $19875 \times 10^{-6} \text{ mm}^2$, $34761 \times 10^{-6} \text{ mm}^2$, $48160 \times 10^{-6} \text{ mm}^2$, $35138 \times 10^{-6} \text{ mm}^2$ 和 $28710 \times 10^{-6} \text{ mm}^2$ 。根据上述体积磨损率, 相对于未添加 WC 的合金, 添加 0.25% WC 合金的耐磨性提高了 23.1%, 添加 0.5% WC 合金的耐磨性下降了 29.7%, 添加 1% WC 合金的耐磨性下降了 49.2%, 添加 2% WC 合金的耐磨性下降了 30.4%, 添加 4% WC 合金的耐磨性下降了 14.8%。可见, 合金的体积磨损率呈现先降低后升高再降低的趋势, 且在添加 0.25% WC 时达到最低点。

3 分析讨论

在外力作用时, 铁基记忆合金有两种变形方式, 一种是 $\gamma \rightarrow \epsilon$ 相变, 另一种则是普通塑性滑移, 二者呈现竞争关系。若要获得优异的形状记忆效应, 则需要让变形更多的以马氏体相变承担而非塑性变形^[16]。在相同的摩擦磨损条件下, 形状记忆效应回复率可以一定程度体现合金 $\gamma \rightarrow \epsilon$ 相变的程度。铁基记忆合金在摩擦磨损过程中具有减摩抗磨特性^[6], 减摩方面, 摩擦磨损过程中的接触应力, 会使 Fe-Mn-Si-Cr-Ni 形状记忆合金产生应力诱发马氏体, 即一部分作用力充当了 $\gamma(\text{fcc})$ 奥氏体 $\rightarrow \epsilon(\text{hcp})$ 马氏体相变的驱动力, 进而降低了作用在合金摩擦时的接触应力; 抗磨方面, $\epsilon(\text{hcp})$ 马氏体较 $\gamma(\text{fcc})$ 奥氏体具有更高的硬度和更低的粘附系数。因此, 形状记忆效应的表现在一定程度上反映了铁基形状记忆合金特有的减摩抗磨特性的效能。

一般来说, 合金的硬度越高其耐磨性越好。在文中试验条件下, 当添加 0.25%、0.5% 和 1% WC 时, 合金硬度提高其耐磨性却随之下降, 这是由于合金的磨损机制可以分为两个主要阶段, 首先, 在

添加 0.25%, 0.5% 和 1%WC 的情况下, 磨损主要由 Fe-Mn-Si-Cr-Ni 合金固有的减摩和抗磨特性主导. 在此过程中, 加入的 WC 会发生分解, 释放出的 W 元素部分固溶于合金基体中. 然而, 鉴于 W 元素在合金中的有限固溶度, 大量的 W 元素与 Fe 和 C 元素反应, 形成 $\text{Fe}_6\text{W}_6\text{C}$ 型碳化物. 在 FeMnSi 形状记忆合金中, 这些 $\text{Fe}_6\text{W}_6\text{C}$ 碳化物粒子能够阻碍滑移带的移动, 从而抑制马氏体相的形成, 使得一部分奥氏体难以转换为马氏体. 当 WC 的添加量为 0.25% 时, 由于添加的 WC 含量较少, 超出固溶度限度的 W 元素相对较少, 导致形成的 $\text{Fe}_6\text{W}_6\text{C}$ 碳化物粒子数量有限, 合金的形状记忆效应变化不显著, 但硬度得到提升, 从而增强了耐磨性. 然而, 随着 WC 含量从 0.25% 增为 1%, 形成的 $\text{Fe}_6\text{W}_6\text{C}$ 碳化物粒子数量开始增多, 合金的形状记忆效应逐渐减弱, 摩擦磨损过程中次表层马氏体含量的减少, 导致铁基形状记忆合金特有的减摩抗磨特性减弱, 耐磨性逐步降低.

在第二阶段, 随着 WC 添加量的增加为 2% 和 4% 时, 磨损机制转变, 主要由 WC 颗粒的弥散强化效应主导. 此阶段下, 已无法在次表层观察到应力诱发的马氏体. 在试验设定的激光功率、扫描速度、离焦量及送粉速度条件下, 激光在铁基合金粉末上的平均能量密度保持恒定, 这超出了 WC 硬质颗粒的熔化能力范围. 因此, 随着 WC 含量的进一步增加, 合金中未溶解的 WC 硬质颗粒密度增加, 这些 WC 颗粒的弥散强化效应变得更加明显, 从而导致耐磨性的提升.

4 结论

(1) 随着 WC 颗粒添加量的增加, Fe-Mn-Si-Cr-Ni 合金的耐磨性能呈现出先升后降再升的趋势, 且在添加 0.25% WC 时达到最高点 (其体积磨损率最小).

(2) 在添加 0.25%, 0.5% 和 1%WC 的情况下, 磨损机制主要由 Fe-Mn-Si-Cr-Ni 合金特有的减摩抗磨特性主导. 当添加 0.25% WC 时, 由于合金的记忆效应变化不大且硬度增加, 其耐磨性得以提升. 然而, 随着 WC 含量从 0.25% 增加为 1%, 合金的记忆效应逐渐降低, 摩擦磨损中次表层中应力诱发的马氏体含量减少, 铁基记忆合金特有的减摩抗磨特性发挥变弱, 导致耐磨性逐步下降.

(3) 当 WC 添加量为 2% 和 4% 时, 磨损机制转变以 WC 颗粒的弥散强化作用为主. 由于激光参数保持不变, 导致作用于合金粉末的平均能量密度固定. 因此, 随着 WC 含量的提高, 未熔化的 WC 颗粒的密度随之增加, WC 颗粒的弥散强化作用开始显著, 从而导致耐磨性的提升.

参考文献

- [1] JING Zhijie, XU Peng, WANG Ling, *et al.* High corrosion resistance of a novel armored super-hydrophobic Fe-Mn-Si-Cr-Ni coating [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2024, 480 130565.
- [2] YANG Xiao, CHENG Lijin, PENG Huabei, *et al.* Development of Fe-Mn-Si-Cr-Ni shape memory alloy with ultrahigh mechanical properties and large recovery strain by laser powder bed fusion[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2023, 150: 201 – 216.
- [3] 朱长顺, 毛计洲, 王宏宇, 等. 粉芯丝材激光增材制造 Fe-xMn-6Si-9Cr-5Ni 合金记忆性能 [J]. *焊接学报*, 2023, 44(7): 102 – 108.
ZHU Changshun, MAO Jizhou, WANG Hongyu, *et al.* Memory properties of Fe-xMn-6Si-9Cr-5Ni alloy by laser additive manufacturing with powder cored wire[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2023, 44(7): 102 – 108.
- [4] 朱建, 王宏宇, 史东辉, 等. 增材制造记忆合金的元素烧损行为及其补损分析 [J]. *焊接学报*, 2022, 43(9): 50 – 55.
ZHU Jian, WANG Hongyu, SHI Donghui, *et al.* Element loss behavior and compensation of additive manufacturing memory alloy[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2022, 43(9): 50 – 55.
- [5] TIAN Jiayu, XU Peng, CHEN Jianhua, *et al.* Microstructure and phase transformation behaviour of a Fe/Mn/Si/Cr/Ni alloy coating by laser cladding[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2019, 122: 97 – 104.
- [6] 徐鹏, 尚晓娟, 朱益志, 等. 激光熔覆 Fe17Mn5Si10Cr5Ni 记忆合金涂层的应力释放研究 [J]. *中国激光*, 2017, 44(2): 263 – 268.
XU Peng, SHANG Xiaojuan, ZHU Yizhi, *et al.* Stress release of Fe17Mn5Si10Cr5Ni shape memory alloy coating fabricated by laser cladding[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(2): 263 – 268.
- [7] DEL-RÍO L, NÓ M L, SOTA A, *et al.* Internal friction associated with ϵ martensite in shape memory steels produced by casting route and through additive manufacturing: Influence of thermal cycling on the martensitic transformation[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022. DOI: 10.1016/j.allcom.2022.165806.
- [8] LIU Xiaochen, XU Peng, YAO Like, *et al.* Nb reinforced Fe-Mn-Si shape memory alloy composite coating fabricated by laser cladding on 304 stainless steel surface[J]. *Journal of Mechanical Sci-*

- ence and Technology, 2022, 36(10): 5027 – 5033.
- [9] WANG Jianhao, YODO Shogo, TATSUMI Hiroaki, *et al.* Thermal conductivity and reliability reinforcement for sintered microscale Ag particle with AlN nanoparticles additive[J]. Materials Characterization, 2023, 203: 113150.
- [10] HUANG Jiang, ZHU Zhikai, WANG Hao, *et al.* Effect of WC content on microstructure and properties of CoCrFeNi HEA composite coating on 316L surface via laser cladding[J]. Materials (Basel), 2023, 16: 2706.
- [11] STRAUMAL Boris, KONYASHIN Igor. WC-based cemented carbides with high entropy alloyed binders: A review[J]. Metals, 2023, 13(1): 171.
- [12] ZHAO Yufeng, MIN Byungwon, JIANG Yinfang. 316L reinforced with tungsten carbide particles by laser-directed energy deposition: Interface microstructure and friction-wear performance[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2024, 33: 8285 – 8298.
- [13] 王星星, 田家豪, 武胜金, 等. WC 含量对 WC 增强镍基复合涂层界面组织的影响 [J]. 焊接学报, 2024, 45(1): 40 – 46
- WANG Xingxing, TIAN Jiahao, WU Shengjin, *et al.* Effect of WC content on the interface microstructure of nickel/tungsten carbide composite brazing coating[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2024, 45(1): 40 – 46.
- [14] LIU Changyu, XU Peng, PANG Chi, *et al.* Phase transformation in Fe–Mn–Si SMA/WC composite coating developed by laser cladding[J]. Materials Chemistry and Physics, 2021, 267: 124595.
- [15] 袁晓波, 李锋, 王娟, 等. 保护气体对碳化钨药芯焊丝堆焊层组织及性能的影响 [J]. 焊接学报, 2017, 38(11): 71 – 76.
- YUAN Xiaobo, LI Feng, WANG Juan, *et al.* Influence of shielding gas on microstructure and properties of tungsten carbide flux-cored wire surfacing layer[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2017, 38(11): 71 – 76.
- [16] ZHANG Qin, WANG Hongyu, ZHU Jian, *et al.* Effect of B on shape memory properties and microstructure of Fe14Mn6Si9-Cr5Ni alloy and its mechanism[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2025, 34: 1207 – 1214.
- [17] GERA Dennis, SANTOS Jonadabe, KIMINAMI Cláudio S, *et al.* Comparison of Cu–Al–Ni–Mn–Zr shape memory alloy prepared by selective laser melting and conventional powder metallurgy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2020, 30(12): 3322 – 3332.
- [18] MANJIAH M, NARENDRANATH S, BASAVARAJAPPA S. Review on non-conventional machining of shape memory alloys[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24(1): 12 – 21.
- [19] 董逸君, 王勇刚, 李东亚, 等. 激光熔覆碳化物增强镍基涂层组织与性能的热处理调控 [J]. 焊接学报, 2024, 45(10): 59 – 68.
- DONG Yijun, WANG Yonggang, LI Dongya, *et al.* Heat treatment tailoring of microstructure and properties of laser cladding carbide reinforced nickel based coatings[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2024, 45(10): 59 – 68.
- [20] 王宏宇, 赵磊, 陈特, 等. 圆管法制备特定填充率三元合金粉芯丝材的配材方法: 中国, 202010265172.7[P]. 2021-12-21.
- WANG Hongyu, ZHAO Lei, CHEN Te, *et al.* Method for preparing tri-element alloy powder core wire with specific filling rate by round tube method: China, 202010265172.7 [P]. 2021-12-21.
- [21] 王宏宇, 唐第东, 陈胜, 等. 通过调控粉末粒径获得成分准确合金的增材制造用粉芯丝材配材方法: 中国, 202210131857.1[P]. 2022-10-28.
- WANG Hongyu, TANG Didong, CHENG Sheng, *et al.* Powder core wire material blending method for additive manufacturing with accurate alloy composition obtained by regulating powder particle size: China, 202210131857.1[P]. 2022-10-28.
- [22] 王宏宇, 黄金雷, 陈胜, 等. 基于 Cu-Al-Fe 合金的粉芯丝材增材制造理论及其温度场分析 [J]. 焊接学报, 2023, 44(4): 111 – 119.
- WANG Hongyu, HUANG Jinlei, CHEN Sheng, *et al.* Analysis of the theory and temperature field of additive manufacturing with powder core wire based on Cu-Al-Fe alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2023, 44(4): 111 – 119.
- [23] 吴鹏飞, 魏昕, 苏建修. 碳化钨对 Fe 基合金激光熔覆层性能的影响 [J]. 热加工工艺, 2024(14): 11 – 15.
- WU Pengfei, WEI Xin, SU Jianxiu. Effect of WC on properties of Fe base alloy laser cladding layer[J]. Hot Working Technology, 2024(14): 11 – 15.
- [24] 张帆. 激光熔覆纳米 WC 颗粒增强铁基复合涂层的研究 [D]. 鞍山: 辽宁科技大学, 2022.
- ZHANG Fan. Research on laser cladding nano WC particle reinforced iron-based composite coating [D]. Anshan: Liaoning University of Technology, 2022.
- [25] JU Heng, LIN Chengxin, ZHANG Jiaqi, *et al.* Research on residual stress inside Fe-Mn-Si shape memory alloy coating by laser cladding processing[J]. Optoelectronics Letters, 2016, 12(5): 344 – 348.
- [26] ZHANG Qi, XU Peng, ZHA Gangqiang, *et al.* Numerical simulations of temperature and stress field of Fe-Mn-Si-Cr-Ni shape memory alloy coating synthesized by laser cladding[J]. Optik, 2021, 242: 167079.
- [27] XU Peng, JU Heng, LIN Chengxin, *et al.* In-situ synthesis of Fe-Mn-Si-Cr-Ni shape memory alloy functional coating by laser cladding[J]. Chinese Optics Letters, 2014, 12(4): 041403 – 041405.

作者简介: 赵玉凤, 博士; 主要研究方向为先进制造技术与装备; Email: zhaoyf@ntit.edu.cn.

王宏宇 (通信作者), 博士, 教授; 主要研究方向为先进材料与制备技术; Email: wangdoudou1974@163.com.

(编辑: 郑红)