

固溶时效对等离子堆焊 WCp/18Ni300 钢 复合涂层组织与性能的影响

胡永俊¹, 罗俊威^{1,2}, 易江龙², 易耀勇², 牛犇²

(1. 广东工业大学, 广州, 510006; 2. 广东省焊接技术研究所 (广东省中乌研究院),
广东省现代焊接技术重点实验室, 广州, 510651)

摘要: 采用等离子堆焊技术在 Cr5 钢表面制备 WC 增强 18Ni300 钢复合涂层. 研究添加质量分数为 25% 和 35% 的球形 WC 对堆焊层组织与性能的影响, 分析固溶 (900 °C × 1 h) 和时效 (490 °C × 5 h) 处理前后堆焊层的显微组织/相变过程/显微硬度和摩擦磨损性能. 结果表明, 在马氏体时效钢粉末中添加 WC 颗粒影响堆焊层组织和马氏体相变. WC/MS300 复合堆焊涂层的显微组织主要以奥氏体为主. 经固溶时效热处理后, 基体试样硬度和摩擦磨损性能下降, 而 WC/MS300 试样中 γ -F 转变为 α -Fe, 硬度和耐磨性显著改善, 添加 35%WC 试样耐磨性能最佳. 由 WC 的微观结构演变表明, 固溶时效后 WC 颗粒周围形成厚的扩散层, 显著改善了界面结合.

关键词: 固溶时效; 等离子堆焊; 复合涂层; 显微硬度; 耐磨性

中图分类号: TG 174.44 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.20190918003

0 序言

马氏体时效钢是一种以无碳 (或极少量碳) 马氏体为基本相的铁-镍合金. 经固溶时效处理后, 可形成高位错板条马氏体, 同时由于合金元素的固溶强化和金属间化合物的析出强化, 使其具有稳定的显微组织和优异力学性能, 广泛应用于汽车制造、航空航天、特种工具和模具行业^[1-2]. 然而随着工业领域制造技术的不断革新, 对马氏体时效钢的综合性要求越来越高, 特别是对其耐磨性有了更高要求^[3].

WC 增强金属基复合材料是将金属与陶瓷性能结合的复合材料, 近年来在耐磨材料领域得到广泛应用. 范丽等人^[4]制备了不同质量分数的 WC 增强铁基复合材料涂层, 研究表明 WC 涂层磨损机理与 WC 的质量分数有关. Li 等人^[5]研究表明球形 WC 与不规则 WC 增强的铁基复合材料相比, 具有更高的压缩屈服强度和硬度. 复合材料中的不规

则 WC 倾向于产生更高的应力集中, 易于引起脆性断裂. 因此, 选择合适基体, WC 形态和含量, 对提高 WC 增强金属基复合材料的磨损性能至关重要.

基于 WC 颗粒与铁基之间良好的浸润性, 采用合适工艺将其添加至马氏体时效钢基体中, 经固溶时效处理有望获得耐磨性能优异的马氏体时效钢复合材料. Chen 等人^[6]采用冷喷涂的方法制备了质量分数为 15% 的纳米 WC 增强 Fe-Ni 基耐磨复合材料, 在固溶时效处理后, 改善 WC 颗粒与 MS300 基体之间的界面结合, 摩擦系数由 0.59 降至 0.53. Kang 和 Chen 等人^[7-8]对采用选取激光熔化 SLM 技术制备 WC 增强 18Ni300 复合材料, WC 的添加有利于改善表面粗糙度, 提高试样的致密性.

等离子弧堆焊 (PTAW) 技术具有较高的熔覆效率和低稀释率^[9], 相比选区激光熔化 SLM 技术, 等离子弧堆焊层致密度高, 冶金缺陷少, 在合适工艺条件下可获得无缺陷、成形良好的熔覆涂层. 鉴于以上分析, 文中采用等离子弧堆焊技术在 Cr5 钢表面上制备 WC 增强 18Ni300 马氏体时效钢 (MS300) 复合涂层, 再通过固溶时效处理以促进界面元素扩散, 释放应力并达到沉淀强化的效果. 探究 WC/MS300 复合材料涂层时效处理前后微观结构演变, 物相组成, 硬度和摩擦磨损性能影响规律.

收稿日期: 2019 - 09 - 18

基金项目: 广东省科学院实施创新驱动发展能力建设专项资金项目 (2017GDASCX-0113); 广东省科技项目 (2014B070705007, 2017A070701026).

1 试验方法

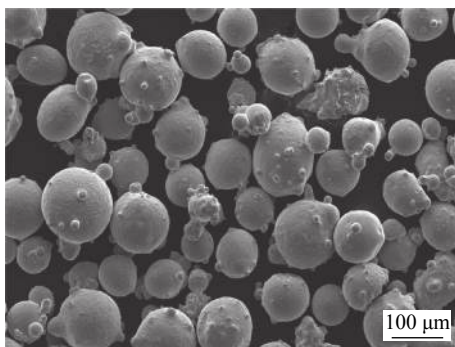
试验采用退火态 Cr5 钢板作为基板材料,尺寸为 200 mm × 100 mm × 15 mm. 以球形 18Ni300 马

氏体时效钢粉末 (50 ~ 105 μm) 作为基体材料,球形 WC(粒径 30 ~ 80 μm) 作为增强材料. 马氏体时效钢粉末化学成分如表 1 所示. MS300 和 WC 粉末的微观形貌如图 1 所示. MS300 和 WC 粉末的混合物按重量百分比为 25/75, 35/65 机械混合 2 h.

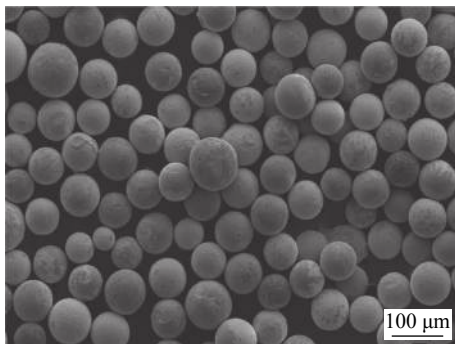
表 1 MS300 化学成分 (质量分数, %)

Table 1 Chemical composition of MS300 powder

Ni	Co	Mo	Ti	Al	C	Si	P, S	Fe
17 ~ 19	8.5 ~ 9.5	4.5 ~ 5.2	0.6 ~ 0.8	0.05 ~ 0.15	≤ 0.03	≤ 0.1	≤ 0.01	余量



(a) MS300



(b) WC

图 1 堆焊粉末的扫描电镜照片

Fig. 1 SEM image of the micrographs. (a) MS300; (b) WC

等离子堆焊前,对 Cr5 钢板堆焊面进行砂纸打磨除去锈层和氧化膜,然后使用丙酮清洗残留油污.文中采用的等离子堆焊设备为等离子转移弧堆焊机 (Castolin Eutectic, 德国). 电流为 140 A、扫描速度为 150 mm/min,离子气流量为 1.0 L/min,氩气保护气流量为 2.0 L/min. 将原 18Ni300 粉末和混合 25%, 35%WC 粉末的堆焊层试样分别标记为 S1, S2 和 S3. 为了进一步改进堆焊层的综合性能,对试样进行固溶时效热处理,其方法为将试样以 10°/min 随炉升温至 900 °C 并保温 1 h 后空冷,在 490 °C 条件下保温 5 h,将热处理后的试样分别标

记为 H1, H2 和 H3.

选取堆焊的试样,利用线切割获取涂层截面部分,尺寸为 10 mm × 10 mm,经过 SiC 砂纸逐级打磨后,用 25 mL HNO₃, 50 mL HCl, 1 g CuCl₂ 和 100 mL 蒸馏水配制的溶液,在室温下腐蚀 20 s. 采用 Nova NanoSEM430 型扫描电子显微镜观测涂层微区成分和元素分布.

采用高分辨率 X 射线衍射仪 (Smartlab 9KW) 对堆焊涂层进行物相分析. 用 Wilson-Wolpert Tukon 2100B 型维氏硬度计对试样的显微硬度进行测定,试验载荷为 3 N,加载时间为 10 s. 采用 UMT-3 型多功能摩擦磨损试验机,在室温和标准大气压下进行堆焊涂层的往复滑动进行摩擦磨损试验,研究涂层的摩擦学性能. 直径为 9 mm,硬度为 62 HRC ~ 64 HRC 的 GCr15 磨球与试样组成摩擦副. 磨损试验载荷 3 kg,振幅 5 mm,频率 6 Hz,滑动速度 60 mm/s,磨损时间为 30 min,总磨损行程 108 m. 通过扫描电镜 (SEM) 和能谱分析 (EDS) 观察观察磨损形貌,了解磨损性能. 采用 BRUKER 直读光谱仪对堆焊试样的磨损面进行扫描分析,计算磨损体积 V. 按照下式计算磨损率为

$$W_r = \frac{V}{F \cdot D} \quad (1)$$

式中: F 为摩擦磨损试验载荷, D 为磨损试验中滑动距离.

2 试验结果

2.1 微观组织

由等离子堆焊制备出的不同 WC 含量 18Ni300 马氏体时效钢堆焊涂层试样的显微组织如图 2 所示,所有试样组织均未出现明显的冶金缺陷,WC 含量增加至 35% 时,组织中也未出现裂纹. 经时效

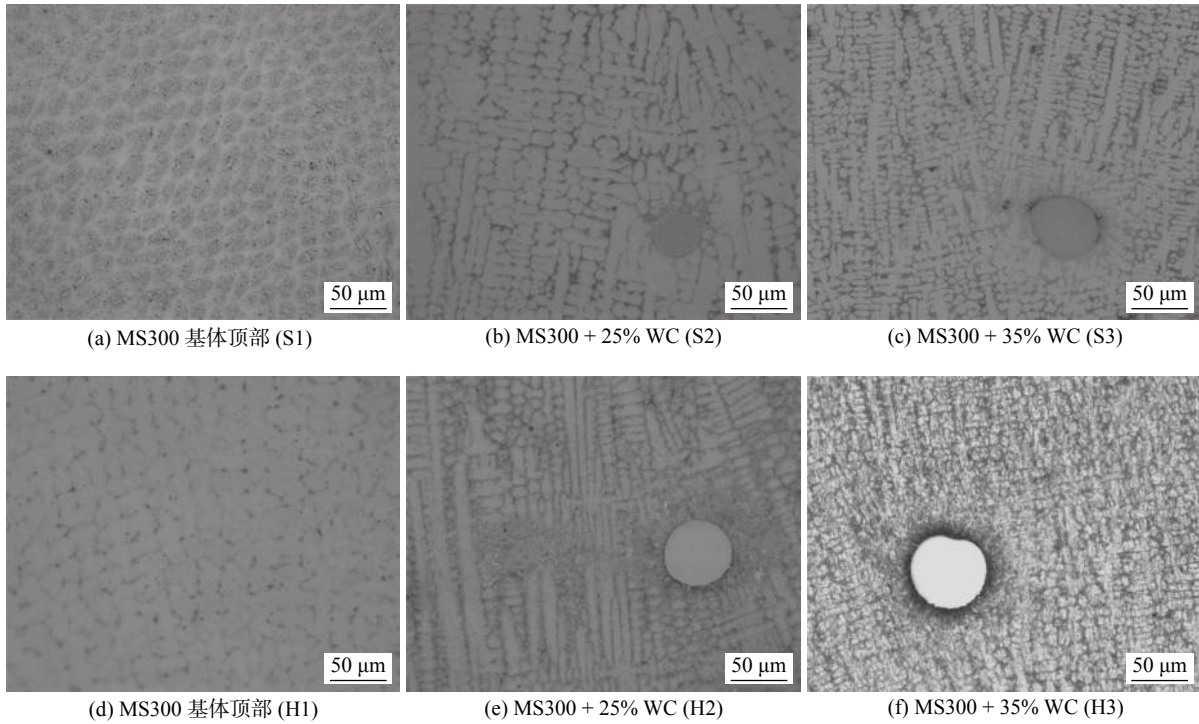


图 2 WC/MS300 堆焊层试样微观组织

Fig. 2 Microstructure of WC/MS300 coatings. (a) S1; (b) S2; (c) S3; (d) H1; (e) H2; (f) H3

处理后的试样显微组织对应于图 2d, 图 2e 和图 2f. 由于堆焊层表面至熔合线各部位的温度不同, 使得所有堆焊涂层试样的显微组织以典型的等轴晶, 树枝晶和平面晶组成^[10]. 添加 WC 的堆焊涂层 S2 和 S3 试样主要由树枝状奥氏体组织和鱼骨状共

晶体组成. S3 具有比 S2 更细小的晶粒, 这主要是因为未熔的 WC 颗粒起到异质形核作用, 随着 WC 含量的增加, 提供的相形核生长所需的非均匀形核核心数量亦增加, 促使晶粒更为细化.

图 3 为 WC/MS300 堆焊涂层试样的高倍组织

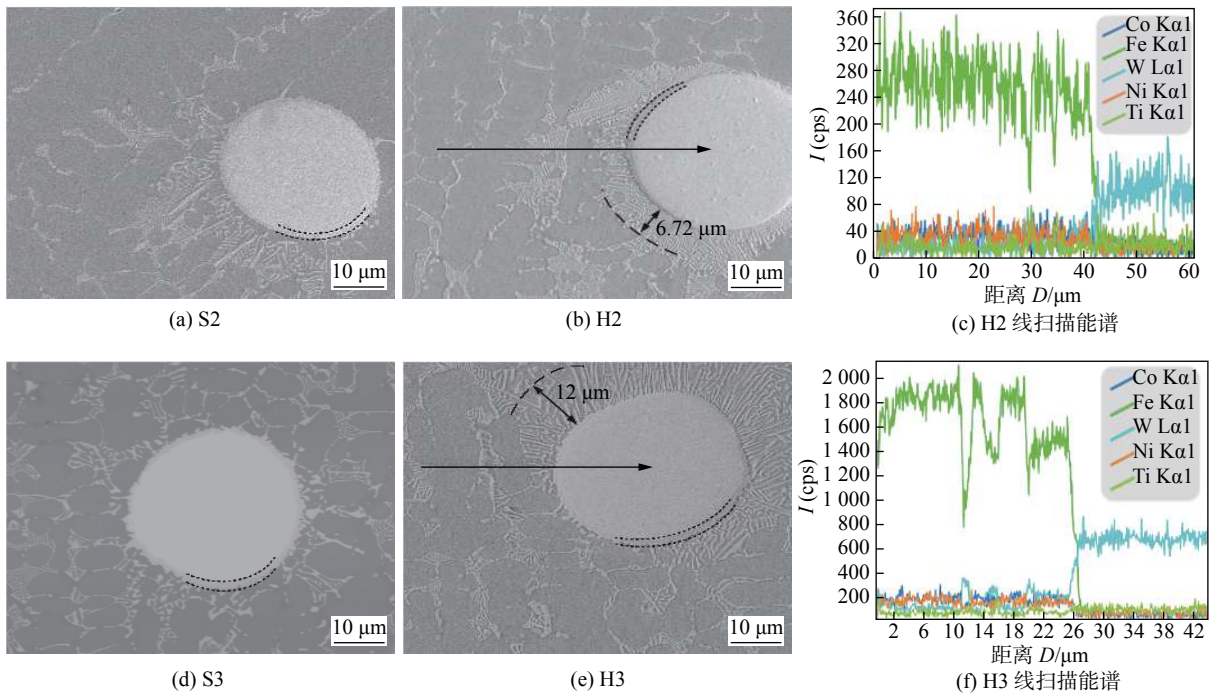


图 3 WC/MS300 堆焊涂层试样的显微组织及相应线扫描的 EDS 图谱

Fig. 3 SEM morphologies of the WC/MS300 composites and elements along the indicated line by EDS. (a) S2; (b) H2; (c) EDS of H2; (d) S3; (e) H3; (f) EDS of H3

及相应元素分析结果. 由图 3a 和图 3d 所示, S3 比 S2 的晶界更明显, 具有更多的鱼骨状组织. 在堆焊过程中, 高温环境下 WC 部分溶解, 同时发生原子间相互扩散和结合反应, 在 WC 周围形成一个较厚的黑色扩散层, 证明 WC 颗粒与基体间具有良好的冶金结合. 在快速凝固的条件下 W 元素与 Fe 形成固溶体, 以树枝状钨铁相存在于奥氏体基体中, 从而强化了奥氏体基体. 由图 3b 和图 3e 所示试样经固溶时效热处理后, 晶粒晶界变得模糊, 由于元素的相互扩散, 观察到在 WC 颗粒周围观察到明显的扩散层, 沿着 WC 颗粒的径向生长出很多细小的枝晶. H2 的枝晶扩散层大约为 $6.7 \mu\text{m}$, H3 则达到 $12 \mu\text{m}$. 由图 3c 和图 3f 从基体到 WC 颗粒中心的 EDS 线扫描表明, W 元素主要出现在马氏体时效钢的晶粒边界处. 扩散层由来自 WC 增强颗粒的 W 和来自基体中的 Fe, Ni, Ti 和 Co 的混合物组成. 元素扩散产生的这种冶金结合可以形成一系列碳化物, 从而进一步改善等离子堆焊涂层中 WC 增强颗粒与基体之间的结合强度.

2.2 物相组成

图 4 为等离子堆焊 WC/MS300 复合材料涂层的 XRD 图谱. 与 MS300 原粉末堆焊涂层不同, 观察到在等离子堆焊制备的 WC/MS300 涂层中, 主要为 $\gamma\text{-Fe}$ 相以及少量 $\alpha\text{-Fe}$ 相, WC 在高温环境发生部分熔化产生 $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$ 相. 这与 Yin 等人^[11] 选取激光熔化制备 18Ni300 试样的物相有较大差别. 这是因为添加 WC 与堆焊涂层存在稀释率, 从而导致化学成分的变化. 化学成分的变化, 残余应力的产生和冷却速度的改变均会影响 $\alpha\text{-Fe}$ 和 $\gamma\text{-Fe}$ 的转变^[12]. 固溶时效后, H2 和 H3 样品中的 $\gamma\text{-Fe}$ 转变为 $\alpha\text{-Fe}$, $\gamma\text{-Fe}$ 的衍射峰消失. 马氏体时效钢加热至保温进行固溶处理, 得到奥氏体组织, 并使合金元

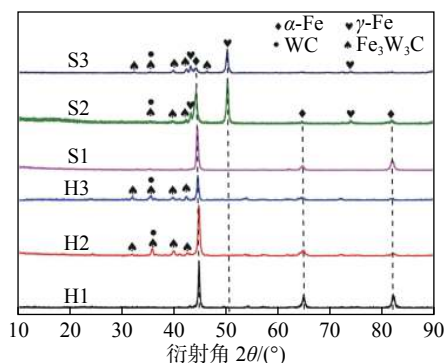


图 4 堆焊层试样的 XRD 图谱

Fig. 4 XRD patterns of the coatings

素溶入奥氏体中, 经过空冷形成了马氏体, 此马氏体组织具有高位错无孪晶, 在时效处理过程中保持稳定. 高位错密度提升了堆焊涂层基体组织的强度与硬度^[11,13]. 奥氏体转变为马氏体, 提高了涂层显微硬度. 在热处理过程中, 元素之间相互扩散, 促进了 $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$ 相的生成, 同时有析出第二相颗粒, 可以有效的提高了涂层的硬度.

2.3 显微硬度

采用 WC 作为增强颗粒提高 M300 马氏体时效钢的力学性能, 并通过固溶时效热处理使其力学性能进一步提升. 图 5 为等离子堆焊制备的 WC/MS300 复合材料堆焊涂层的显微硬度. 为了获得相对精确的显微硬度值, 定位压头避免硬质 WC 相. 样品 S1 具有 $351\text{HV}_{0.3}$ 的硬度, 添加 25%WC 的试样 S2 的硬度有所下降. 显微硬度的降低可能归因于: 堆焊层存在一定的稀释率和 WC 溶解, 引起堆焊层中化学成分的变化, 从而影响了马氏体的转变, 降低了堆焊层中马氏体的含量, 对硬度的具有一定的弱化作用, 致使涂层的硬度下降^[14]. 添加 35%WC 后复合材料堆焊层 S3 显微硬度增加至 $372\text{HV}_{0.3}$. 这主要是由于 WC 的添加导致涂层组织中马氏体含量减少, 奥氏体含量增加.

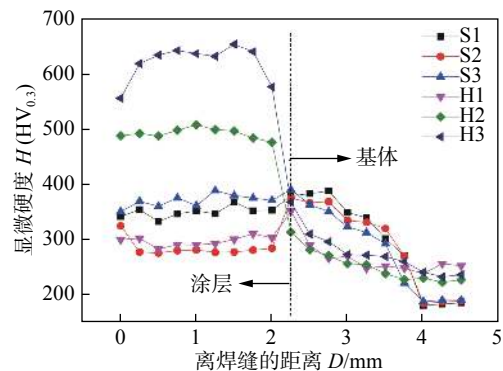


图 5 堆焊层到母材显微硬度的变化

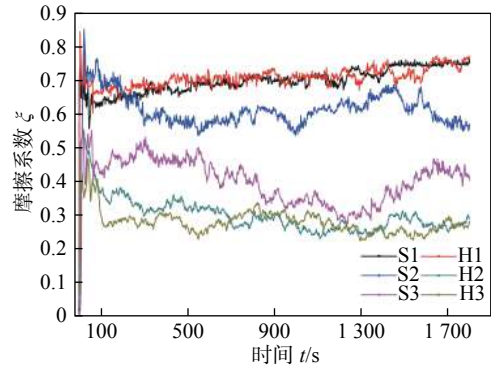
Fig. 5 Microhardness variation from the coating to base metal

固溶时效处理后, H1 样品显微硬度下降, H2 和 H3 样品显微硬度大幅度提升, 分别达到 $496\text{HV}_{0.3}$ 和 $628\text{HV}_{0.3}$. H1 样品显微硬度的下降有可能是因为堆焊涂层的稀释率造成其化学成分变化, 影响组织转变. 另外, 热处理后晶粒尺寸变大也可能引起 H1 试样显微硬度下降. H2 和 H3 样品显微硬度显著改善可归因于在固溶时效期间的奥氏体向马氏体转变. 同时, 如图 3 所示, C 和 W 元素向基体中扩散和碳化物的形成也有助于涂层的硬度提高.

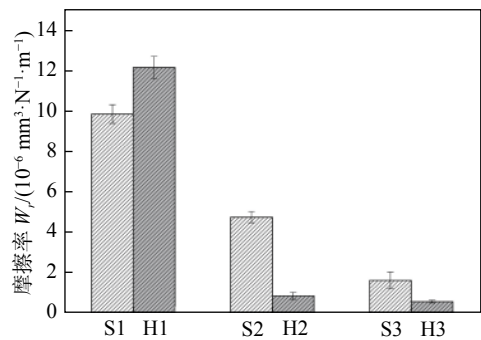
2.4 磨损性能

图 6 为试样摩擦系数随时间的变化曲线及磨损率. 图 6a 为 WC/MS300 复合涂层样品在热处理前后的摩擦系数 (COF) 随磨损时间的变化. 所有样品在摩擦试验的初期, 摩擦系数先快速上升, 上升到一定程度然后下降, 之后处于一个动态平衡变化过程. 这是因为在摩擦磨损初期, 突然施加载荷将造成涂层表面产生塑性形变, GCr15 磨球会与涂层表面发生齿合、撞击, 通过破坏微凸体克服障碍, 摩擦副两者的接触面积相对较小, 单位磨损量较大, 产生大量的磨屑并堆积在涂层表面, 从而显示典型的磨合期特征. 在约 180 s 后摩擦系数下降, 由于磨屑在涂层表面堆积所起到的自润滑效果以及摩擦接触面温度上升所导致的涂层表面出现软化^[15-16].

图 6b 为摩擦试验前后的磨损率对比图, 结合图 6a 摩擦系数大小可知, 复合涂层样品的耐磨性顺序为 H3 > H2 > S3 > S2 > S1 > H1. 表明在涂层中添加 25% 和 35% (质量分数) WC 颗粒, 能提高涂层的耐磨性能, 降低堆焊涂层的摩擦系数和磨损量. 这主要是因为, 在摩擦磨损过程中, 高硬度的 WC 会对基体具有保护作用, 减少磨球对基体组织的犁削; 同时基体与 WC 有良好的冶金结合, 使基体对 WC 有支撑作用, 使 WC 不易脱落. WC 周围的组织由于硬度较低, 将会先被磨损, 凸起的 WC 颗粒成为被磨损的主要对象, 降低基体的磨损. 经固溶时效热处理后, H1 试样的摩擦系数增大, H2



(a) 试样摩擦系数



(b) 试样磨损率

图 6 试样的摩擦系数随时间的变化曲线及磨损率

Fig. 6 Tribological performance of WC/MS300 composites coatings. (a) friction coefficient; (b) wear rate

和 H3 试样的耐磨性能有明显改善. 添加 25% 和 35% (质量分数) WC 颗粒的 H2 和 H3 试样, 热处理后表现出更优异的耐磨性能.

为更好地了解磨损机理, 利用 SEM 观察磨损试验后不同 WC/MS300 复合材料的磨损形貌. 图 7

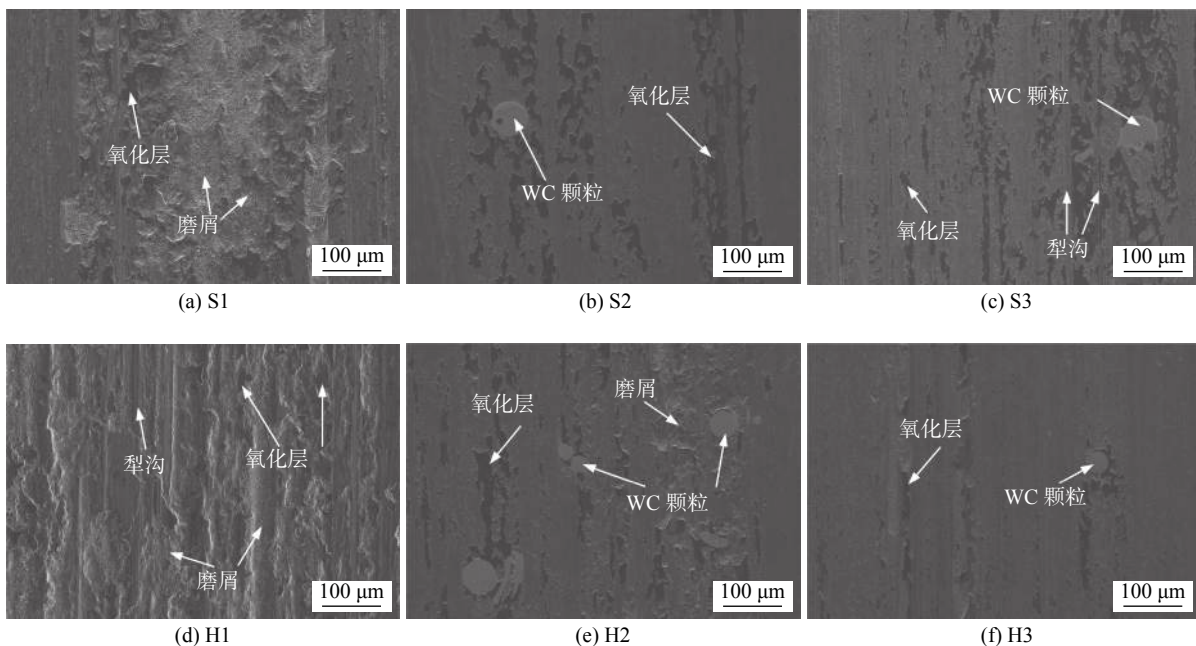


图 7 堆焊试样表面磨损形貌 SEM 照片

Fig. 7 Worn surface morphologies of WC/MS300 composites. (a) S1; (b) S2; (c) S3; (d) H1; (e) H2; (f) H3

为堆焊试样表面磨痕形貌 SEM 照片. 图 8 为堆焊试样表面磨痕形貌 SEM 照片及 EDS 分析结果. 从图 7a 和图 8c 可见, 未经时效处理的 S1 试样磨损表面有大片氧化层剥落, 脱落坑和大量粉末状磨屑, 为典型粘着磨损特征. 在磨损过程中, 摩擦副表面温度的升高, 会导致表面强烈氧化, 与空气中的 O_2 反应生成 Fe_2O_3 . 由于片状磨屑剥落, 在对磨副间受到反复碾压和研磨, 形成三体磨粒磨损, 改变了磨屑的形态, 使得磨屑形貌变成粉末状.

如图 7 所示, 固溶时效热处理有效改善了添加 WC 堆焊涂层的耐磨性能. 相比于 H3 试样, H2 试样磨损表面要粗糙, 有微层状剥离的特征. 添加 35%WC 颗粒的 H2 和 H3 试样都表现出轻微的犁沟特征. 由试样磨痕形貌推测其磨损机理为以粘着磨损为主和同时伴有磨粒磨损. S2 和 S3 试样磨损表面形貌相似, S2 试样磨损表面出现块状氧化层表

面特征, S2 试样磨损表面氧化层面积更大, 其磨损机制以粘着磨损为主. 通过在基体材料中增加球形 WC 颗粒, 磨损表面较为平滑, 这可以解释为 WC 颗粒可以减少粘着磨损^[17]. 由于 MS300 基体硬度相对 WC 低, 故摩擦磨损主要发生在铁基涂层基体上^[18]. 未添加 WC 的 H1 试样比 S1 试样磨损更为严重, 表面上出现大面积的磨损坑和明显的犁沟, 这与其低硬度相对应, 磨损机制为严重的粘着磨损和磨粒磨损的混合机制. 由图 3f 可知, 固溶时效热处理促进 WC 颗粒在基体内进行元素扩散, 合成碳化物扩散层, 改善 WC 颗粒与 MS300 基体之间的界面结合, 从而进一步提高堆焊层的耐磨性. 基体在固溶时效处理后, 奥氏体向转变为更高硬度的马氏体, 同时析出少量第二相粒子, 显著提高堆焊层硬度, 改善其耐磨性.

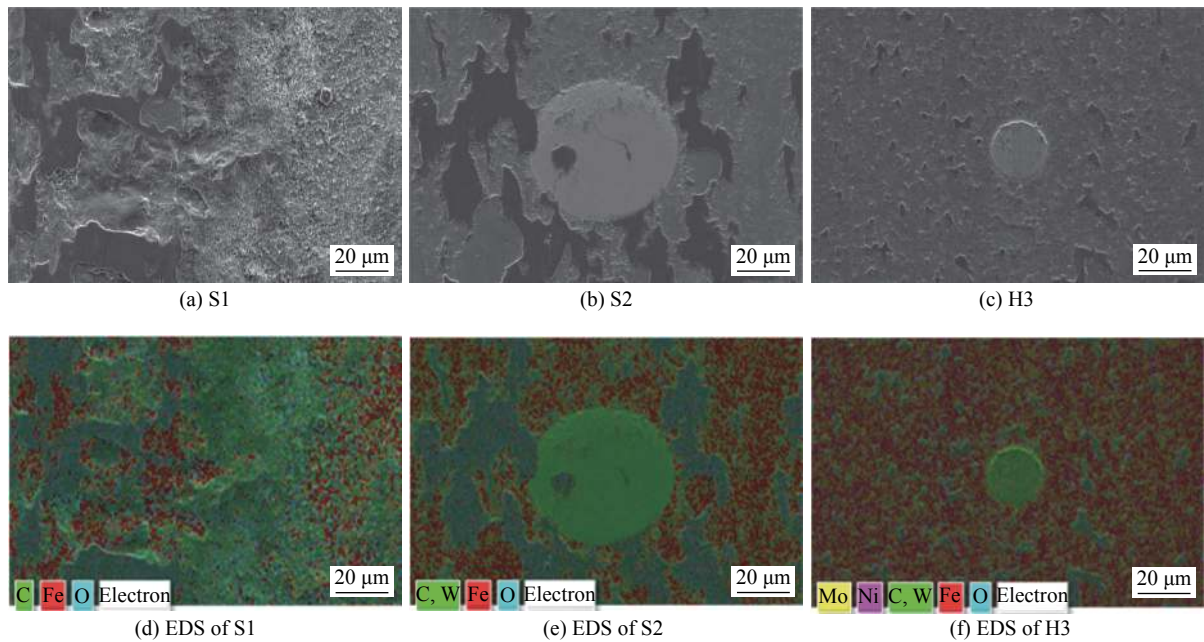


图 8 堆焊试样表面磨痕形貌 SEM 照片及 EDS 分析结果

Fig. 8 Magnified view of worn morphology of WC/MS300 composites. (a) S1; (b) S2; (c) H3; (d) EDS of S1; (e) EDS of S2; (f) EDS of H3

3 结论

(1) 采用等离子弧堆焊技术在 Cr5 钢表面制备了不同 WC 含量的 18Ni300 钢复合涂层. 固溶时效处理前后, WCp/18Ni300 钢复合涂层组织由奥氏体树枝晶, 鱼骨状共晶组织, WC 颗粒转变为马氏体, 鱼骨状共晶组织和 WC 颗粒组成, 组织中的 γ -Fe 相经固溶时效后转变为 α -Fe.

(2) 未经固溶时效处理时, 添加 35%WC 的 18Ni300 钢复合涂层试样显微硬度最高, 添加 25% WC 复合涂层摩擦系数最大. 经过固溶时效处理后, 复合涂层显微组织硬度和耐磨性显著提升, 其中添加 35%WC 颗粒试样经过固溶时效处理后, 显微硬度达到 $628HV_{0.3}$, 平均摩擦系数为 0.28, 其磨损机理为以粘着磨损为主, 同时伴有磨粒磨损.

(3) 由 WC 的微观结构演变表明, 固溶时效处

理后在 WC 颗粒周围形成更厚的扩散层, 促进复合涂层中 WC 与基体的结合, 堆焊层表现出优异的耐磨性. 在固溶时效处理过程中, γ -Fe 转化为马氏体, 降低堆焊层中残余应力, 增加基体中位错密度, 提升了堆焊层硬度. 由于 WC 颗粒扩散溶解量的增多, 大量鱼骨状共晶碳化物的析出进一步增强了 WC 颗粒与基体间结合, 同时 W, C 元素扩散至基体相组织中, 使得堆焊层硬度提升, 表现出更好的耐磨性.

参考文献

- [1] Sun L, Simm T H, Martin T L, *et al.* A novel ultra-high strength maraging steel with balanced ductility and creep resistance achieved by nanoscale β -NiAl and Laves phase precipitates[J]. *Acta Materialia*, 2018, 149: 285 – 301.
- [2] 梁冬梅, 朱远志, 刘光辉. 马氏体时效钢的研究进展 [J]. *金属热处理*, 2010, 35(12): 34 – 39.
Liang Dongmei, Zhu Yuanzhi, Liu Guanghui. Development and application of maraging steels[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2010, 35(12): 34 – 39.
- [3] Becker T H, Dimitrov D. The achievable mechanical properties of SLM produced Maraging Steel 300 components[J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2016, 22: 487 – 494.
- [4] 范丽, 陈海龔, 刘珊珊, 等. 球形 WC 增强铁基复合等离子堆焊层的组织与摩擦学性能 [J]. *摩擦学学报*, 2018, 38(1): 17 – 27.
Fan Li, Chen Haiyan, Liu Shanshan, *et al.* Microstructure and tribological properties of Fe-based composite coatings reinforced by spherical wc particles using plasma transferred arc[J]. *Tribology*, 2018, 38(1): 17 – 27.
- [5] Li Z L, Wang P F, Shan Q, *et al.* The particle shape of wc governing the fracture mechanism of particle reinforced iron matrix composites[J]. *Materials*, 2018, 11(6): 984 – 994.
- [6] Chen C, Xie Y, Yan X, *et al.* Cold sprayed WC reinforced maraging steel 300 composites: Microstructure characterization and mechanical properties[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 785: 499 – 511.
- [7] Kang N, Ma W, Li F, *et al.* Microstructure and wear properties of selective laser melted WC reinforced 18Ni-300 steel matrix composite[J]. *Vacuum*, 2018, 154: 69 – 74.
- [8] Chen Y X, Zhao R, Ma W, *et al.* Selective laser melting of WC reinforced maraging steel 300: Microstructure characterization and tribological performance[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2019, 371: 355 – 365.
- [9] 王红英, 程志国, 赵昆, 等. 新型等离子弧粉末堆焊机理 [J]. *焊接学报*, 2002, 23(2): 47 – 50.
Wang Hongying, Chen Zhiguo, Zhao Kun, *et al.* Mechanism of new plasma powder surfacing for high efficiency and high quality[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2002, 23(2): 47 – 50.
- [10] 许发红, 刘洪喜, 张晓伟, 等. 机械搅拌对 Fe-Cr-C 系明弧堆焊合金显微组织及其耐磨性的影响 [J]. *材料热处理学报*, 2015(7): 210 – 216.
Xu Fahong, Liu Hongxi, Zhang Xiaowei, *et al.* Effect of mechanical stirring on microstructure and wear behavior of Fe-Cr-C system open arc hardfacing alloys[J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2015(7): 210 – 216.
- [11] Yin S, Chen C Y, Yan X C, *et al.* The influence of aging temperature and aging time on the mechanical and tribological properties of selective laser melted maraging 18Ni-300 steel[J]. *Additive Manufacturing*, 2018, 22: 592 – 600.
- [12] Guo M X, Zhu J, Yi L, *et al.* Effects of precipitation and strain-induced martensitic transformation of Fe-C phases on the mechanical properties of Cu-Fe-C alloy[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2017, 697: 119 – 125.
- [13] Wang B, Zhang P, Duan Q Q, *et al.* Optimizing the fatigue strength of 18Ni maraging steel through ageing treatment[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2017, 707: 674 – 688.
- [14] Zhang Z, Kovacevic R. Laser cladding of iron-based erosion resistant metal matrix composites[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2019, 38: 63 – 75.
- [15] Liu X B, Meng X J, Liu H Q, *et al.* Development and characterization of laser clad high temperature self-lubricating wear resistant composite coatings on Ti-6Al-4V alloy[J]. *Materials & Design*, 2014, 55: 404 – 409.
- [16] 袁建辉, 祝迎春, 雷强, 等. 等离子喷涂制 WC-Co-Cu-BaF₂/CaF₂ 自润滑耐磨涂层及其高温摩擦性能 [J]. *中国表面工程*, 2012, 25(2): 31 – 36.
Yuan Jianhui, Zhu Yingchun, Lei Qiang, *et al.* Fabrication and high temperature tribological properties of plasma sprayed WC-Co-Cu-BaF₂/CaF₂ Self-lubricating wear resistant coatings[J]. *China Surface Engineering*, 2012, 25(2): 31 – 36.
- [17] Guo C, Chen J, Zhou J, *et al.* Effects of WC-Ni content on microstructure and wear resistance of laser cladding Ni-based alloys coating[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2012, 206(8-9): 2064 – 2071.
- [18] 李秀兵, 方亮, 高义民, 等. WC_p 增强钢基复合材料的三体磨损性能 [J]. *铸造技术*, 2006, 34(5): 482 – 485.
Li Xiubing, Fang Liang, Gao Yimin, *et al.* The two-body abrasive wear of WC particle reinforced steel matrix composites[J]. *Foundry*, 2006, 34(5): 482 – 485.

第一作者简介: 胡永俊, 1976 年出生, 教授. 主要从事材料表面处理方向的研究. Email: dahutu985@163.com.

通信作者简介: 易江龙, 高级工程师. Email: yijl@gwi.gd.cn.

structure and shear strength of the joints under high temperature-low pressure process (1 050 °C, 20 MPa) and low temperature-high pressure process (950 °C, 100 MPa) were investigated separately. The results show that the joints under high temperature-low pressure process and low temperature-high pressure process both have a W/Nb/V/steel four-layer structure and the shear strengths of the joints are 96.9 MPa and 104.2 MPa respectively. The fracture of the joints all appears at the Nb/V interfaces with no obvious chemical reaction. Compared with the joint under high temperature-low pressure process, reducing the bonding temperature and increasing the bonding pressure will benefit to form a dense joint, but will not promote the diffusion of elements at the weak interface (Nb/V) and significantly increase the shear strength of the joint.

Key words: hot isostatic pressing; diffusion bonding; steel; tungsten; composite interlayer

Analysis of different occlusal modes and bite force of mandible LI Suli^{1,2}, YANG Laixia¹, LU Bingheng²
(1. College of Mechanical Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. The State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China). pp 54-61,82

Abstract: In order to study the stress of the mandible under different occlusal methods and different bite forces, based on the existing head CT data, the mandible was extracted through the medical software Mimics and the three-dimensional model was established, and the mandible was analyzed by redrawing the mesh, constructing the contour line, constructing the curved surface, constructing the grille, and fitting the surface. Through to the normal mandible and 3 d printing titanium implant restoration of mandibular were analyzed, and the results show that: in the 3 d printing on the titanium alloy implant restoration of mandibular adult male before and after loading teeth can withstand maximum force, mandibular by stress are less than normal mandible by stress.

Key words: mandible; bite; stress; numerical analysis

Effects of solution and ageing treatment on microstructure and properties of WC reinforced 18Ni300 steel substrate

composite coatings by plasma transferred arc HU Yongjun¹, LUO Junwei^{1,2}, YI Jianglong², YI Yaoyong², NIU Ben² (1. School of Materials and Energy, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China; 2. Guangdong Welding Institute (China-Ukraine E. O. Paton Institute of Welding), Guangdong Provincial Key Laboratory of Advanced Welding Technology, Guangzhou 510651, China). pp 62-68

Abstract: WC-reinforced 18Ni300 steel composite coating was prepared on the surface of Cr5 steel by plasma transferred arc. The influence of adding 25% WC and 35% mass fraction of spherical WC on the microstructure and properties were investigated. The microstructure/phase transformation and properties of the surfacing layer before and after solution treatment (900 °C × 1 h) + aging (490 °C × 5 h) were analyzed and compared. The results show that the addition of WC particles in the maraging steel affects the martensitic transformation in the surfacing structure. The microstructure is mainly austenitic in the WC/MS300 composite surfacing coating. After solution aging heat treatment, the microhardness and wear resistance of WC/MS300 composite surfacing coating were significantly improved, and the microstructure transformed from γ -Fe to α -Fe in the sample, 35%WC coating presented best wear resistance. However, the microhardness and friction and wear properties of the substrate samples decreased. The microstructure evolution of WC indicates that a thick diffusion layer is formed around the WC particles after solution aging heat treatment, which significantly improves the interfacial bonding.

Key words: solution aging; plasma transferred arc (PTA); composite coating; microhardness; wear resistance

Preparation and characterization of structure and properties of nanoTiSiN films deposited on Mg alloys LI Haitao¹, SUN Pengfei², HUANG Yongde¹, CHEN Yi¹, DENG Lipeng¹, SUN Wenjun¹ (1. Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China; 2. Ministry of Education Research Center of Metal Wear Resistance and Surface Technology Engineering, Jiamusi University, Jiamusi 154007,