



·强激光物理与技术·

Al、Nd 对 Cr₁₂MoV 钢表面镍基熔覆层的组织及性能影响*

王泽达, 周后明, 朱宇旭, 何方佳, 向南鑫, 王宇豪

(湘潭大学 机械工程学院, 湖南 湘潭 411105)

摘要: 为了解决 Cr₁₂MoV 钢溶蚀、表面碎裂等问题, 利用 Al-Ni、Nd-Ni 粉末在 Cr₁₂MoV 钢上进行激光熔覆实验, 研究了 Al、Nd 对镍基覆层的宏微观形貌、组织及表面性能的影响。结果表明: Al 可以减少熔覆层裂纹的产生, 同时降低覆层硬度, 使熔覆层中产生具有减磨作用的硬质相 Al₂O₃ 等, 降低覆层磨损量, 14%Al 覆层磨损量比 2%Al 的覆层磨损量低 44.5%, Al 较优质量分数为 14%; Nd 的晶粒细化作用明显, 显著提升覆层显微硬度, 2.5%Nd 覆层平均硬度比基体平均硬度高 36.8%, Nd 较优质量分数为 2.5%。

关键词: 激光熔覆; 再制造; 工艺参数; 显微硬度; 稀释率

中图分类号: TG665

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.220205

Effect of Al and Nd on microstructure and properties of nickel-based cladding layer on Cr₁₂MoV steel surface

Wang Zeda, Zhou Houming, Zhu Yuxu, He Fangjia, Xiang Nanxin, Wang Yuhao

(School of Mechanical Engineering, Xiangtan University, Xiangtan, Hunan 411105, China)

Abstract: To solve the problems of dissolution and surface fragmentation of Cr₁₂MoV steel, laser cladding experiments were carried out on Cr₁₂MoV steel using Al-Ni and Nd-Ni powders. The effects of Al and Nd on the macro and micro morphology, microstructure and surface properties of nickel base cladding were studied. The results show that Al can reduce the crack generation of cladding layer and reduce the hardness of cladding layer, so that the hard phase Al₂O₃ with anti-wear effect is generated in cladding layer, and the wear amount of cladding layer is reduced. The wear amount of 14% Al cladding layer is 44.5% lower than that of 2% Al cladding layer, and the optimal Al content is 14%. The grain refinement effect of Nd is obvious, and the microhardness of the coating is significantly increased. The average hardness of the coating is 36.8% higher than that of the substrate, and the optimal content of Nd is 2.5%.

Key words: laser cladding, remanufacturing, process parameters, microhardness, dilution rate

Cr₁₂MoV 钢作为冷作模具常用材料, 具有硬度高、淬透性好、淬硬性高、热稳定性强等优点, 但因其 Cr、C 含量高, 使得组织中容易产生大量网络状共晶碳化物, 同时此类模具在生产实践过程中长期受往复冲击和摩擦磨损, 导致 Cr₁₂MoV 模具在使用过程中, 容易产生冲击损坏、溶蚀、表面碎裂等问题, 降低模具寿命、造成资源浪费^[1-2]。激光熔覆技术可进行零件表面性能强化和局部修复, 在基体表面熔覆一层组织致密、性能优异、与基体冶金结合能力强的涂层^[3-6]。将激光熔覆技术应用于 Cr₁₂MoV 钢的修复再制造不仅能有效提高零部件表面性能、缩短维修时间, 还可以节约资源、顺应绿色发展, 因此激光熔覆是解决 Cr₁₂MoV 模具在使用过程中产生碎裂等问题的有效手段。为了适应 Cr₁₂MoV 模具钢恶劣的工作环境, 熔覆粉末一般选用可制造高硬度、耐腐蚀覆层的镍基粉末。在 Cr₁₂MoV 钢表面熔覆多层镍基合金涂层, 可使其表面获得高硬度及高耐磨性等优良的性能, 但同时镍基覆层存在容易开裂、组织粗大等问题^[7]。而 Al 在抑制覆层开裂、改善表面形貌均有一定作用。Ye Hong^[8] 和 Bourahima F^[9] 等用激光熔覆技术对模具钢材料进行再制造, 分析了 Al 含量对镍基熔覆层质量的影响, 实验结果表明, 通过在熔

* 收稿日期: 2022-06-24; 修订日期: 2022-08-16

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目 (2020JJ45 85); 湖南省教育厅基金 (21A0117); 广东省科技厅 (2020B12120 600 67)

联系方式: 王泽达, 961324616@qq.com.

覆粉末中添加 Al, 可以改善熔覆层的韧性与表面平滑性, 减少镍基熔覆层的碎裂问题。同时近年来用稀土元素来改善金属材料表面性能和显微组织成为热门研究, Quazi M M^[10] 和 Zou Honghui^[11] 等研究发现稀土元素 Nd 的加入有助于改善模具钢表面性能、提高模具寿命, Nd 元素可对覆层组织起到细化作用, 显著提高覆层硬度, 同时庞铭等^[12] 研究发现 Nd 和镍基复合涂层具有良好的表面形貌和组织性能。鉴于此, 本文利用含 Al、Nd 成分的镍基熔覆粉末对 Cr₁₂MoV 钢表面进行再制造实验研究。分析 Al、Nd 元素对覆层形貌、组织和性能的影响, 探析 Al、Nd 相对最佳含量, 以期可为 Cr₁₂MoV 模具钢的再制造提供更多的参考。

1 实验材料及方法

实验材料基体选用 Cr₁₂MoV 回火钢, 平均硬度约为 600 HV_{0.2}, 化学成分见表 1。Nd 粉、Al 粉粒度大小约为 75 μm, 镍基熔覆粉末成分见表 2。在已有镍基粉末中添加 Al 粉得到 Al 质量分数分别为 2%、8%、14%、20% 的 Al-Ni 粉末。在已有镍基粉末中添加 Nd 粉得到 Nd 质量分数分别为 1.5%、2.5%、3.5% 的 Nd-Ni 粉末。

表 1 Cr₁₂MoV 钢化学成分

Table 1 Toughening chemical composition of Cr₁₂MoV

| composition | mass fraction/% |
|-------------|-----------------|
| C | 0.15 |
| V | 0.50 |
| Si | 0.25 |
| Mo | 0.30 |
| Cr | 11 |
| Mn | 0.55 |
| Fe | The rest |

表 2 NFZCr-4 镍基合金粉末化学成分 (%)

Table 2 Chemical composition of NFZCR-4 Ni-base alloy powder (%)

| composition | mass fraction/% |
|-------------|-----------------|
| Si | 3 |
| B | 3 |
| Cr | 18 |
| Fe | 4 |
| C | 0.6 |
| Ni | The rest |

将熔覆粉末置于 QM-WX04 型球磨机中球磨混合, 混合均匀后置于 70 °C 真空箱内干燥 8 h。用砂纸打磨 Cr₁₂MoV 钢基体, 然后使用超声清洗机进行无水乙醇清洗。在 TFL-H6000 同轴激光熔覆装置下进行激光熔覆, 保护气选择 Ar 气, 选用功率 4 kW、扫描速度 5 mm/s、送粉量 4 g/s 等工艺参数来分别探究 Al 和 Nd 对覆层形貌及性能的影响。选取相对最优工艺参数, 制样抛光后, 利用 SEM(JSM-6360LV) 观察分析组织形貌; 利用 X 射线衍射仪 (D/MAX-2500PC) 确定熔覆层物相; 利用 HV-1000 型硬度计测定试样硬度; 利用 UMT-2 型实验机进行摩擦磨损实验, 对磨材料为直径 9.5 mm 的 RC62 钢, 加载 10 N, 对磨 30 min, 摩擦方式为干摩擦; 利用天平对磨损失重进行测定。

2 结果与分析

2.1 Al 元素对覆层组织性能的影响

图 1 为覆层宏观形貌图, 图 2、3 为覆层 SEM 形貌图和 XRD 图, 图 4 为显微硬度图。分析实验结果: 通过观察图 1 各覆层宏观形貌发现, 随着 Al 含量的增加, 覆层表面凹坑减少并趋于饱满, Al 的质量分数为 2%~14%Al 的覆层表面无明显裂纹, 而 Al 质量分数 20% 覆层表面存在诸多裂纹。由图 2 中 (a)、(e) 图可观察到 Al 质量分数 2% 熔覆层物相组织分布不均匀, 存在物相团聚情况。同时由图 3 可知, 添加 Al 的熔覆层 (CZ 区) 硬度低于 Cr₁₂MoV 钢基体 (SUB 区) 硬度, 其原因是 Al 的软化作用降低了覆层硬度, 而结合区 (HAZ 区) 硬度大于基体硬度是因为部分激光能量进入基体, 导致部分基体与粉末熔化形成熔池, 而较高的熔池温度使得熔池周围的基体受到影响形成热

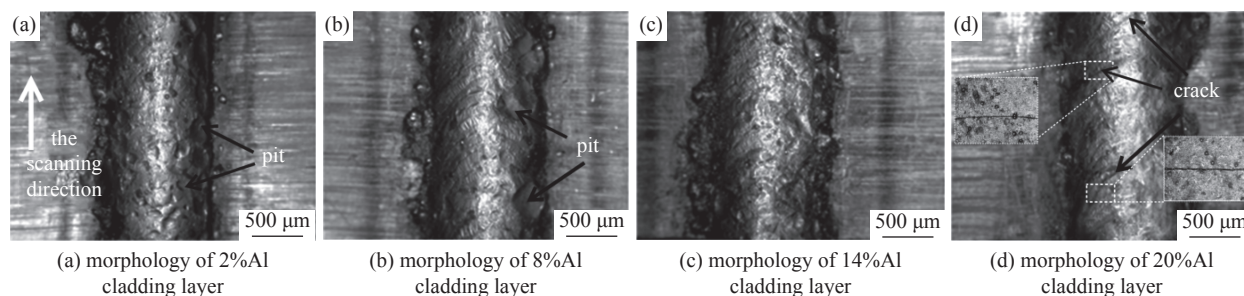


Fig. 1 Macro topography of the coatings with different Al mass fraction

图 1 不同 Al 质量分数熔覆层宏观形貌图

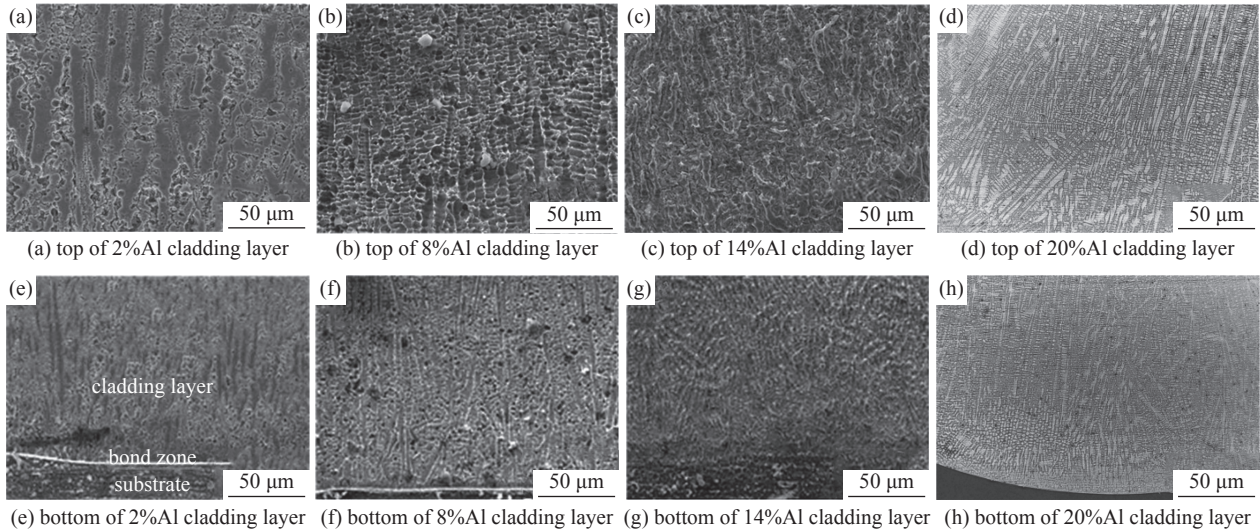


Fig. 2 SEM morphology of coatings with different amounts of Al

图2 不同 Al 含量熔覆层 SEM 形貌

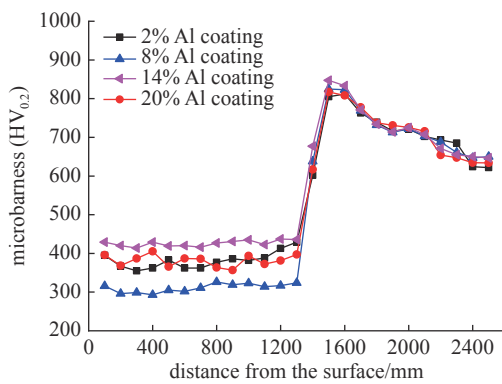


Fig. 3 Distribution curve of microhardness along the depth of the coating with different Al supplemental levels

图3 不同 Al 含量熔覆层显微硬度沿层深的分布曲线

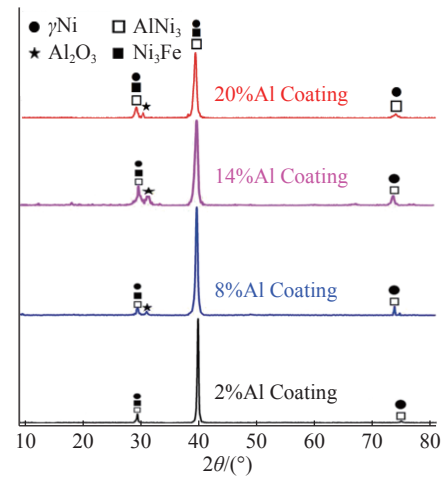


Fig. 4 XRD spectra of coatings with different amounts of Al

图4 不同 Al 含量熔覆层 XRD 谱

影响区^[13]；Al 质量分数从 2% 增至 8% 时，由图 2 中 (b)、(f) 图可知覆层中 γ -Ni 的枝晶数量增多，尺寸减小，晶界数量增多，成因是增加的 Al 与 Ni 形成 Al/Ni 的金属间化合物^[14]。同时，由图 4 可知，覆层在反应过程中产生了新的硬质相 Al_2O_3 ，根据衍射角为 28° 及 75° 左右衍射峰强度的增强可推测覆层中 AlNi_3 等物质的结晶度随着 Al 含量增加而更好，而 Al_2O_3 及 AlNi_3 在覆层组织可以起到强化作用^[14]，抵消了一部分 Al 元素因自身偏软的性质而导致覆层硬度降低的效果，但从图 3 发现添加 Al 质量分数 8% 的熔覆层 (CZ 区) 硬度低于添加 Al 质量分数 2% 的熔覆层 (CZ 区) 硬度，说明此时覆层中 Al 的软化作用依然占主导地位；当 Al 为质量分数 14% 时，覆层内晶界的间距明显减小，更多的 Al 与 Ni 生成了 Al/Ni 金属间化合物，覆层元素分布更加均匀。Al 为质量分数 14% 覆层内无孔洞，组织致密，当 Al 质量分数增加，Al、Ni 反应生成更多的 AlNi_3 ，而 AlNi_3 的生成热的绝对值为 47.5 kJ/mol 原子^[15]，因此当 Al 质量分数增加，Al-Ni 反应放出更多的热，从而降低了熔池温度的冷却速度，增加了温度场均匀性。从图 2 (g) 可看出这种均匀温度场也造成了结合处白亮带的消失。覆层内的 Al_2O_3 及 AlNi_3 持续增加，硬度的增强机理发生变化，从主要靠 γ -Ni 增强转变为 γ -Ni 与多晶、 Al_2O_3 及 AlNi_3 共同强化为主，部分 Al 元素固溶在 γ -Ni 中，产生“钉扎”效果，这些共同作用最终增加了覆层硬度^[16]。但当 Al 质量分数添加到 20% 时，熔池冷却速度持续下降，给与枝晶足够的生长的时间，导致 Al 质量分数 20% 熔覆层产生大量树枝晶及柱状晶，使得熔覆层组织粗化从而导致熔覆层硬度整体低于 14%Al 熔覆层硬度，且硬度波动相对较大，同时这也成为了覆层产生裂纹的主要原因^[16]。

图 5 为不同 Al 加入量覆层摩擦因数及磨损量。含 2%Al 的覆层摩擦因数约为 0.55，覆层损失量最大为 $13.5 \times 10^{-4} \text{ g}$ 左右，由图 2 (a)、(e) 及图 4 XRD 谱可知 2%Al 覆层组织成分单一，因此其摩擦因数主要表现为 γ -Ni 的摩擦因

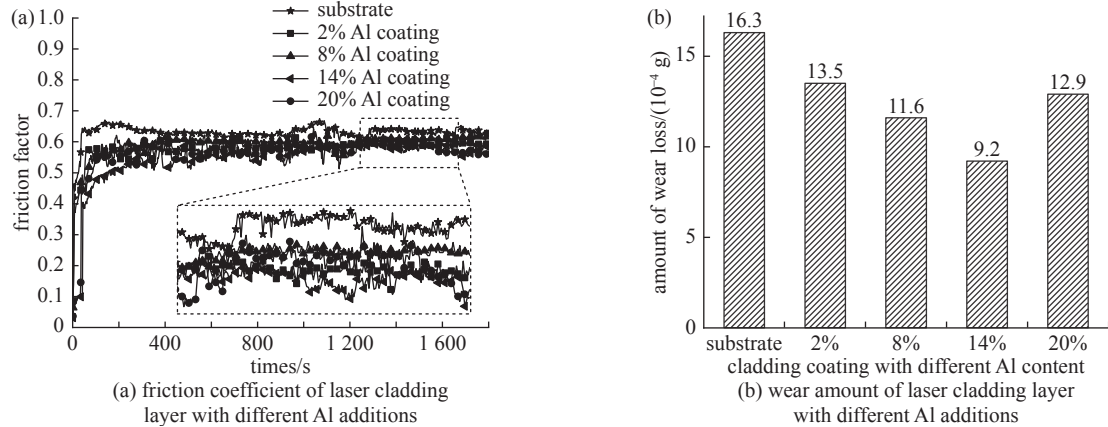


Fig. 5 Plot of friction coefficient and wear value of cladding layer

图5 不同Al含量熔覆层摩擦因数及磨损量图

数,故而摩擦因数变化幅度较小。通过图6(a)可发现2%Al覆层的表面磨损形貌中存在较多剥落坑;含8%Al覆层的摩擦因数约为0.58,损失量在 11.6×10^{-4} g,其表面的剥落坑较2%Al覆层的剥落坑有所减少,由图4可知,8%Al覆层硬度低于2%Al覆层硬度,但磨损量呈降低趋势,是因为从图3XRD图谱可看出8%Al覆层中产生了具有减磨作用的 Al_2O_3 ^[17],导致覆层在硬度降低情况下,磨损量依然能够减少;14%Al覆层的表面磨损形貌中存在剥落坑的数量最少且剥落坑的平均尺寸也最小,覆层平均摩擦因数为0.53,在900 s前变化幅度达11%,说明熔覆层内的非晶物质、金属间化合物、硬质相的量有所增加,摩擦磨损的情况更加复杂。14%Al覆层磨损量进一步降低至 9×10^{-4} g,其成因是覆层内 Al_2O_3 进一步增多,覆层硬度上升、硬质相增加,14%Al覆层磨损量较基体减少52%。而20%Al覆层的摩擦系数在1200 s之前波动范围达25%,且磨损量达到了 12.9×10^{-4} g,其中原因在于覆层中存在如图6(d)中显示的裂纹,同时,摩擦磨损过程中裂纹的存在使得其附近的物质更容易脱落而加剧覆层表面的磨损,让覆层表面的磨损痕迹更深,而组织的粗化在一定程度上也使得覆层磨损量增加。摩擦系数在1200 s后变得相对平稳是因为前期产生的微小磨损物填满了裂纹所产生的孔隙,这也导致后续测量磨损量时已测得的磨损量大于实际磨损量。适量Al元素的加入使得 Cr_{12}MoV 钢碎裂性降低、磨损量减少,但由上文可知14%Al的覆层硬度达到最大430 $\text{HV}_{0.2}$ 时,仍无法满足 Cr_{12}MoV 钢工作时的平均显微硬度(640 $\text{HV}_{0.2}$),因此下文将研究Nd元素对覆层组织性能的影响。

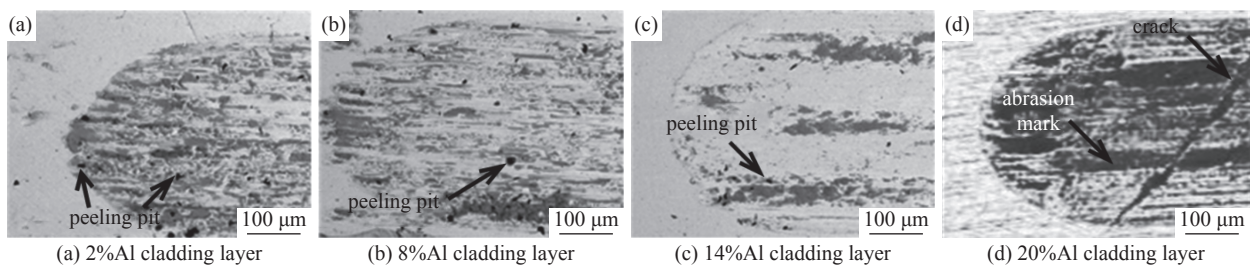


Fig. 6 Worn surface morphology of coatings with different mass fraction of Al addition

图6 不同Al含量熔覆层磨损表面形貌图

2.2 Nd元素对覆层组织性能的影响

图7为不同Nd加入量覆层宏观形貌图,图8为熔覆层的SEM形貌图和XRD图,图9为覆层硬度分布图。由图7可看出Nd添加量从1.5%增加至2.5%时,覆层表面变得相对整洁,而增加至3.5%时,覆层表面孔隙及细微颗粒增多。原因是材料所加入的Si、B是自熔合金元素,能降低涂层熔点,与氧气反应生成硼酸盐、硅酸盐并造渣,而一定量的稀土添加有利于净化熔覆层组织,细化晶粒,提高熔覆层性能的作用^[18]。如图8所示,镍基合金熔覆层组织主要沿垂直于结合界面向热扩散反方向生长,由1.5%、2.5%、及3.5%Nd覆层Btm图可看出基体与覆层之间是一条宽度约为10 μm的白亮结合带,证明基体与覆层冶金结合质量良好^[19]。通过图9可知,添加Nd的镍基合金熔覆层(CZ区)硬度明显高于 Cr_{12}MoV 钢基体(SUB区)硬度,同时镍基合金熔覆层硬度随着Nd添加量的增加而增大;Nd元素添加量为1.5%的覆层中有共晶产物生成,针状组织数量较多,平均硬度约为865 $\text{HV}_{0.2}$;2.5%Nd覆层

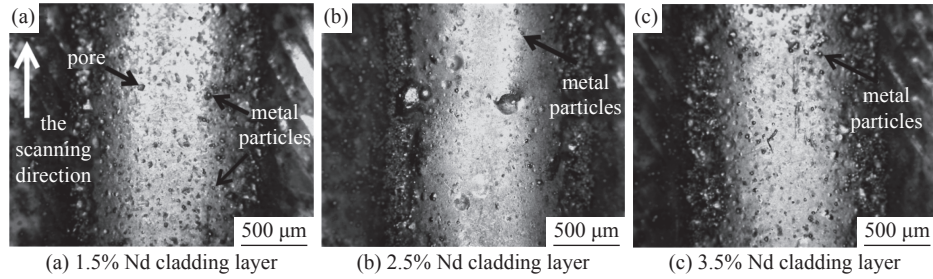


Fig. 7 Macro topography of the coatings with different Al addition

图 7 不同 Nd 含量熔覆层宏观形貌图

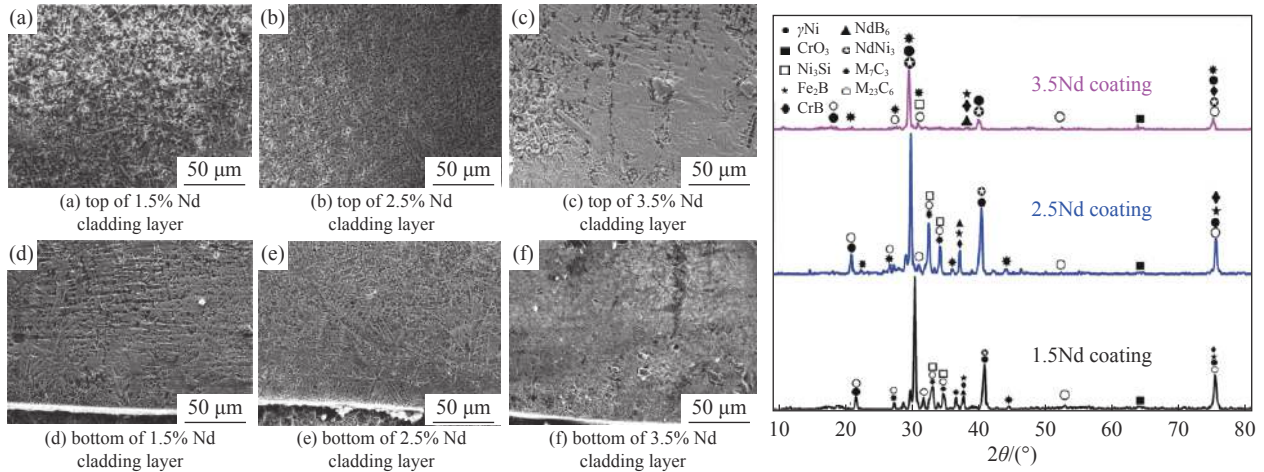


Fig. 8 SEM morphology and XRD spectra of coatings with different Nd additions

图 8 不同 Nd 含量熔覆层 SEM 形貌和 XRD 谱

中树枝晶明显增多,其长度可达 50 μm,同时 2.5%Nd 熔覆层的平均显微硬度略高于 Nd 元素添加量为 1.5% 的覆层平均显微硬度,约为 875 HV_{0.2}。对比图 4 和图 9 可发现添加 Nd 的覆层硬度较添加 Al 的覆层硬度有显著提升,而由图 8 XRD 图可知,添加 Nd 的覆层中产生了大量 NdB₆、CrO₃ 和 NdNi₃ 等硬质相物质,同时 Nd 的添加有助于加强熔融状态金属的流动性,降低组织成分析,提高覆层组织均匀化,因此硬度得到提高^[20-21];3.5%Nd 覆层的平均显微硬度最高可达到 910 HV_{0.2},但宏观裂纹初现,其原因是 Nd 的增加使得高温下气化产生气泡的 Nd 亦增加,同时冶金结合面附近有较多不规则多边形形状大颗粒硬质相生成,使得覆层裂纹敏感性增加,最终导致裂纹的产生。因此综合分析可知 Nd 添加量为 2.5% 的覆层形貌及性能达到相对最优。

由图 10 可以看出,添加 Nd 的覆层表面摩擦因数及磨损率都低于 Cr₁₂MoV 钢基体,随着稀土 Nd 添加量的增多磨损率先降低后增大。从图 11(a)黑色区域可看出,1.5%Nd 熔覆层有明显的剥落痕迹,而浅黑区域为熔覆层经磨粒磨损并产生犁削作用后遗留的痕迹;Nd 添加量从 1.5% 增至 2.5% 时,覆层摩擦因数和磨损率降低。2.5%Nd 覆层摩擦因数在 700~800 s 区区间段降低,其原因是遇到熔覆层中硬质相,硬质相被磨损后摩擦因数恢复原值并缓慢增加,通过图 11(b)可发现 2.5%Nd 熔覆层磨损情况有明显改善,熔覆层表面剥落痕迹大为减少,这是因为 2.5%Nd 熔覆层的硬度增大、组织更为致密,2.5%Nd 的加入使得覆层产生晶界强化,晶界位错移动传递性较强,晶粒之间的滑动转移变得相对容易,这有利于减轻摩擦过程中接触顶端微裂纹的应力集中,从而在一定程度上达到减轻磨损的效果,因而其耐磨性能也相应变好;图 11(c)为加入 3.5%Nd 的覆层磨损图,由于 3.5%Nd 覆层中有较多气孔,因此熔覆层以脆性剥落为主。同时,当晶界处稀土化合物富集时,晶界处滑动转移受阻力较大,晶界的脆性增加,磨

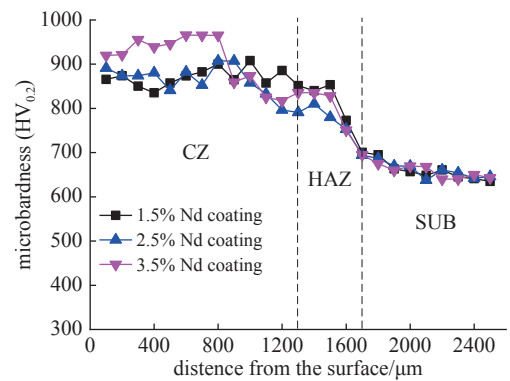


Fig. 9 Hardness distribution curve of laser cladding samples with different Nd addition levels along the layer depth

图 9 不同 Nd 含量熔覆层硬度沿层深的分布曲线

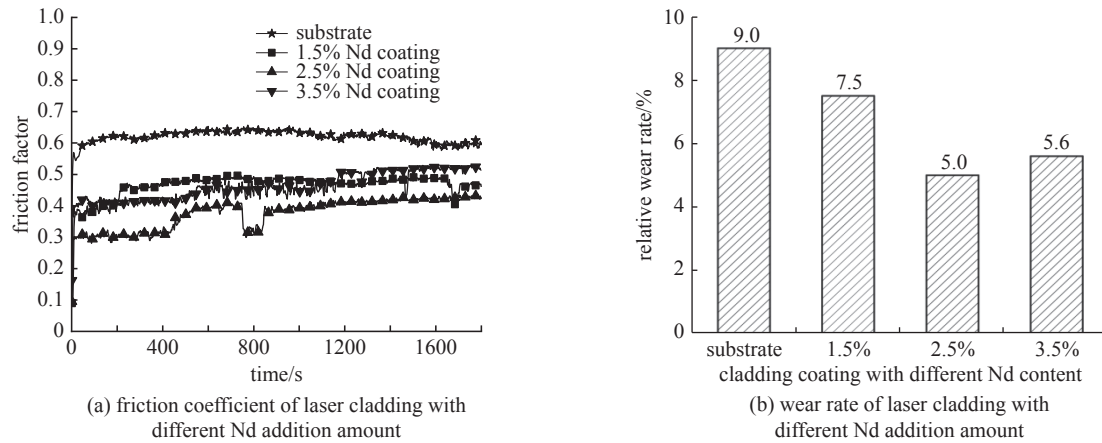


Fig. 10 Friction coefficient and wear rate of cladding layer

图 10 不同 Nd 含量熔覆层摩擦因数及磨损率

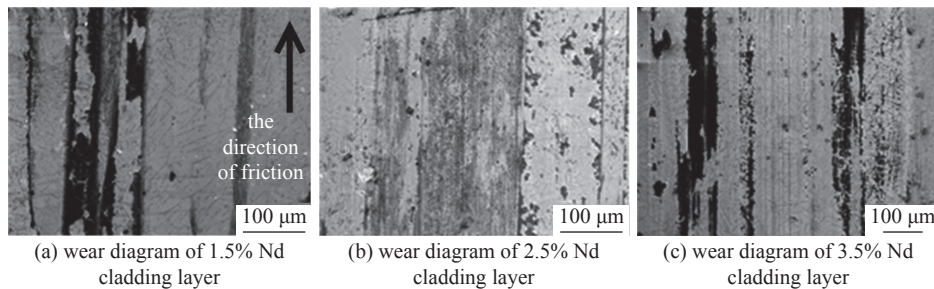


Fig. 11 Worn surface morphology of coatings with different mass fraction of Nd addition

图 11 不同 Nd 含量熔覆层磨损表面形貌图

损过程中微凸体易沿裂纹生长方向发生脆断,因而 3.5%Nd 覆层硬度虽然达到最高,但耐磨性能反而下降。可以看出,稀土含量 2.5%Nd 的磨斑尺寸相对较小,抗磨性能好,当稀土 Nd 的化合物含量较高时,反而会使熔覆层抗磨损性能降低。事实上,复合材料的耐磨性不仅与其硬度有关,而且与材料基体相的强度和韧性有关^[22]。

3 结论

本文在 Cr_{12}MoV 钢表面熔覆多种不同元素含量、不同工艺参数的复合涂层,通过样品宏观相貌、显微组织观察、硬度测量等对样品进行综合研究,得出各元素、各工艺参数对覆层组织性能之影响,可以得出以下结论:(1) Al 的加入可以提升覆层耐磨性能,增加覆层韧性,能够起到使表面平滑的作用, Al 质量分数为 14% 时,覆层的硬度最大为 $430 \text{ HV}_{0.2}$,覆层耐磨性能相对最优;为使熔覆层表面不出现裂纹, Al 添加量应低于 20%;(2) 添加一定量的 Nd 能够使得覆层组织晶粒细化、组织均匀化, 1.5%Nd、2.5%Nd 覆层组织分布都较为致密、均匀, 2.5%Nd 覆层硬度最高可达 $875 \text{ HV}_{0.2}$;当 Nd 添加量增加到 3.5% 时,宏观裂纹初现,覆层耐磨性能降低。在 Nd 添加量为 2.5% 时,覆层形貌及性能相对最佳。

参考文献:

- [1] Sun Fei, Zhang Dongqiao, Cheng Ling, et al. Microstructure evolution modeling and simulation for dynamic recrystallization of Cr_{12}MoV die steel during hot compression based on real metallographic image[J]. *Metals and Materials International*, 2019, 25(4): 966-981.
- [2] Abdulhadi H A, Aqida S N, Ishak M, et al. Thermal fatigue of die-casting dies: an overview[J]. *MATEC Web of Conferences*, 2016, 74: 00032.
- [3] Hong Sheng, Wu Yuping, Wang Bo, et al. Improvement in tribological properties of Cr_{12}MoV cold work die steel by HVOF sprayed WC-CoCr cermet coatings[J]. *Coatings*, 2019, 9: 825.
- [4] Courant B, Hantzpergue J J, Benayoun S. Surface treatment of titanium by laser irradiation to improve resistance to dry-sliding friction[J]. *Wear*, 1999, 236(1/2): 39-46.
- [5] Liu Shenglin, Zheng Xueping, Geng Gangqiang. Dry sliding wear behavior and corrosion resistance of NiCrBSi coating deposited by activated combustion-high velocity air fuel spray process[J]. *Materials & Design*, 2010, 31(2): 913-917.
- [6] Liu Yanan, Ding Ye, Yang Lijun, et al. Research and progress of laser cladding on engineering alloys: a review[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, 66: 341-363.

- [7] Huang Lei, Zhou Jianzhong, Xu Jiale, et al. Microstructure and wear resistance of electromagnetic field assisted multi-layer laser clad Fe901 coating[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2020, 395: 125876.
- [8] Ye Hong, Peng Shixin, Yan Zhonglin, et al. Microstructure and properties of laser cladding Fe-Al intermetallics[J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 659: 39-42.
- [9] Bourahima F, Helbert A L, Rege M, et al. Laser cladding of Ni based powder on a Cu-Ni-Al glassmold: Influence of the process parameters on bonding quality and coating geometry[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 771: 1018-1028.
- [10] Quazi M M, Fazal M A, Haseeb A S M A, et al. Effect of rare earth elements and their oxides on tribo-mechanical performance of laser claddings: a review[J]. *Journal of Rare Earths*, 2016, 34(6): 549-564.
- [11] Zou Honghui, Zeng Xiaoqin, Zhai Chunquan, et al. Effects of ND on the microstructure and mechanical property of ZA52 alloy[J]. *Materials Science Forum*, 2005, 488/489: 161-164.
- [12] 庞铭, 刘全秀. 超高强钢表面激光和等离子制备钕和镍基复合涂层界面的控形模拟研究[J]. *热加工工艺*, 2021, 50(2): 111-116. (Pang Ming, Liu Quanxiu. Simulation study on morphology control of interface to composite coatings of neodymium and nickel-based alloy applied by plasma spraying and laser on super-strength steel[J]. *Hot Working Technology*, 2021, 50(2): 111-116)
- [13] Feng Xiaoli, Wang Haifeng, Liu Xuechao, et al. Effect of Al content on wear and corrosion resistance of Ni-based alloy coatings by laser cladding[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2021, 412: 126976.
- [14] Jiang Hui ren, Hirohasi M, Lu Yun, et al. Effect of Nb on the high temperature oxidation of Ti-(0-50 at. %) Al[J]. *Scripta Materialia*, 2002, 46(9): 639-643.
- [15] Ansara I, Dupin N, Lukas H L, et al. Thermodynamic assessment of the Al-Ni system[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 1997, 247(1/2): 20-30.
- [16] Wang Di, Song Changhui, Yang Yongqiang, et al. Investigation of crystal growth mechanism during selective laser melting and mechanical property characterization of 316L stainless steel parts[J]. *Materials & Design*, 2016, 100: 291-299.
- [17] 袁涛, 蔡养川, 罗震, 等. Al₂O₃陶瓷颗粒对镍基合金涂层耐磨性能的影响[J]. *上海交通大学学报*, 2016, 50(10): 1635-1639. (Yuan Tao, Cai Yangchuan, Luo Zhen, et al. Effect of Al₂O₃ composite ceramic reinforcement on wear behavior of laser cladding Ni-based alloys coatings[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2016, 50(10): 1635-1639)
- [18] Singh K, Sharma S. Effect of rare earth on microstructure and wear behaviour of Ni based microwave clad[J]. *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences* 2020, 27(3): 564-572.
- [19] Yu Youjun, Zhou Jiansong, Chen Jianmin, et al. Preparation, microstructure and tribological properties of Ni₃Al intermetallic compound coating by laser cladding[J]. *Intermetallics*, 2010, 18(5): 871-876.
- [20] Jerred N D, Khanal R, Benson M T, et al. Nd, SbNd and Sb₃Nd₄ and their interactions with the cladding alloy HT9[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2020, 541: 152387.
- [21] Mirzadeh H. Quantification of the strengthening effect of rare earth elements during hot deformation of Mg-Gd-Y-Zr magnesium alloy[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2016, 5(1): 1-4.
- [22] Pagounis E, Lindroos V K, Talvitie M. Influence of matrix structure on the abrasion wear resistance and toughness of a hot isostatic pressed white iron matrix composite[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 1996, 27(12): 4183-4191.