

Q235钢表面激光熔覆CoCrNi涂层的组织与性能研究

代福来, 伍 锴, 凌宗生

兰州交通大学机电工程学院, 甘肃 兰州

收稿日期: 2026年8月29日; 录用日期: 2026年9月22日; 发布日期: 2026年9月30日

摘 要

为改善Q235钢表面硬度及摩擦性能, 采用预置粉末激光熔覆方法在Q235钢表面制备CoCrNi中熵合金涂层, 研究不同激光功率对熔覆层宏观成形、显微硬度及摩擦性能的影响。结果表明, 随着激光功率增加, 熔覆层宏观成形质量和截面平均显微硬度均呈先改善后下降的趋势。1200 W时熔覆层表面连续、平整, 成形质量较好, 截面平均显微硬度达到489.375 HV0.2, 为各组最高; CoCrNi熔覆层的摩擦系数均低于Q235钢基体, 其中1300 W时平均摩擦系数最低, 为0.5031。综合分析表明, 适宜的激光热输入能够改善熔覆层成形质量, 并提高其硬度和减摩性能, 本试验条件下较适宜的激光功率范围为1200~1300 W。

关键词

Q235钢, 激光熔覆, CoCrNi中熵合金, 显微硬度, 摩擦性能

Study on the Microstructure and Properties of CoCrNi Coatings Prepared by Laser Cladding on Q235 Steel

Fulai Dai, Kai Wu, Zongsheng Ling

College of Mechatronics Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou Gansu

Received: August 29, 2026; accepted: September 22, 2026; published: September 30, 2026

Abstract

To improve the surface hardness and friction performance of Q235 steel, CoCrNi medium-entropy alloy coatings were prepared on the surface of Q235 steel by preset-powder laser cladding. The

effects of different laser powers on the macroscopic morphology, microhardness, and friction properties of the cladded layers were investigated. The results show that, with increasing laser power, both the macroscopic forming quality and the average cross-sectional microhardness of the cladded layers first improved and then decreased. At 1200 W, the cladded layer exhibited a continuous and relatively smooth surface with good forming quality, and the average cross-sectional microhardness reached 489.375 HV0.2, the highest among all tested conditions. The friction coefficients of all CoCrNi cladded layers were lower than that of the Q235 steel substrate, with the lowest average friction coefficient of 0.5031 obtained at 1300 W. Overall, appropriate laser heat input can improve the forming quality, hardness, and friction-reducing performance of the cladded layer. Under the present experimental conditions, the suitable laser power range was 1200~1300 W.

Keywords

Q235 Steel, Laser Cladding, CoCrNi Medium-Entropy Alloy, Microhardness, Friction Performance

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

Q235 钢具有成本低、塑性和焊接性能良好、易于加工成形等优点,在机械制造、工程结构及通用装备等领域应用广泛。然而, Q235 钢表面硬度相对较低,在长期服役过程中容易出现磨损、塑性变形等问题,限制了其在复杂工况下的进一步应用。因此,在保留 Q235 钢良好综合性能的基础上,通过表面改性技术提高其表面硬度和耐磨性能具有重要的工程意义。激光熔覆技术具有能量密度高、热影响区小、冷却速度快、涂层稀释率低以及涂层与基体能够形成良好冶金结合等特点,已成为金属材料表面强化的重要手段。陈凯等[1]在 45 钢表面采用激光熔覆技术制备 CoCrNi 中熵合金涂层,结果表明,通过合理控制熔覆过程能够获得组织较为致密、与钢基体结合良好的 CoCrNi 涂层,说明 CoCrNi 中熵合金在钢铁材料表面强化方面具有较好的应用潜力。宋晨晓等[2]研究了不同激光功率条件下 CoCrNi 中熵合金的组织及性能变化,发现激光工艺参数对熔池凝固行为、晶粒形貌以及材料性能具有明显影响。

近年来,中熵合金由于具有多主元协同作用、较高的混合熵以及独特的晶格畸变等特点,在表面工程领域受到广泛关注。与传统合金相比,中熵合金通常具有较为简单的固溶体结构,并表现出良好的强度、塑性及耐磨性能。CoCrNi 作为典型的三元中熵合金体系,其组织通常以面心立方固溶体为主,兼具良好的强塑性匹配和组织稳定性。马名浩等[3]采用激光熔覆方法制备 CoCrNi 基中熵合金涂层,发现通过调节合金成分能够明显改变涂层的微观组织、硬度及磨损行为。赵燕春等[4]在钢表面制备中熵合金涂层后发现,快速凝固条件有利于获得细化组织,并可有效改善基体表面性能。于云鹤等[5]对钢基体表面 CoCrNi 基中熵合金激光沉积层的界面进行了研究,表明熔覆材料与钢基体之间的元素扩散及界面冶金结合对涂层组织形成和整体性能具有重要影响。

CoCrNi 中熵合金的性能与其微观组织密切相关。洪大军等[6]研究发现, CrCoNi 中熵合金在变形过程中会发生明显的组织演变,晶粒尺寸、位错结构等因素均会影响其力学性能。刘刚等[7]通过在 CrCoNi 体系中添加 Ti 元素,进一步证明合金元素能够通过改变物相组成、晶粒形貌及强化机制对材料性能产生显著影响。宋凌云等[8]对 CrCoNi 中熵合金的微观组织和力学行为进行了研究,结果表明,该合金具有良好的强度和塑性匹配,其性能提升与晶粒细化、位错运动及变形机制密切相关。幸定琴等[9]对 VCoNi

中熵合金的研究也表明，组织细化及第二相形成能够改变材料的硬度和磨损行为。南勇等[10]通过微合金化进一步验证了合金成分调控对中熵合金微观组织及力学性能的重要作用。程军[11]研究发现，不同变形程度会引起中熵合金晶粒形貌和内部缺陷结构发生变化，从而影响其综合力学性能。丁晨阳等[12]的研究同样表明，中熵合金优异的力学性能与其独特的组织结构和变形机制密切相关。

除合金自身成分外，基体材料和激光熔覆工艺同样是决定涂层质量的重要因素。王永东等[13]在 Q235 钢表面开展激光熔覆研究发现，激光工艺参数能够明显影响熔覆层的宏观成形、显微组织及性能。高玉龙等[14]在 Q235 钢表面制备 CoCrNi 系多主元合金涂层后发现，熔覆层组织及硬度、耐磨性能均与物相组成和晶粒特征具有密切关系。宋鹏芳等[15]采用预置粉末法进行激光熔覆试验，研究表明激光能量输入会直接影响熔池热循环、凝固速度及组织演变，进而影响熔覆层的最终性能。

综上所述，目前关于 CoCrNi 中熵合金本体材料及其激光增材制造的研究已取得一定进展，但针对 Q235 钢表面采用预置粉末法制备 CoCrNi 中熵合金激光熔覆涂层的研究仍有进一步深入的空间。因此，本文以 Q235 钢为基体，采用预置粉末法在其表面制备 CoCrNi 中熵合金涂层，对熔覆层的物相组成、显微组织及性能进行分析，探讨激光熔覆 CoCrNi 涂层的组织特征及强化效果，为 Q235 钢表面强化及 CoCrNi 中熵合金涂层的实际应用提供参考。

2. 试验方法

本研究选用 Q235 低碳结构钢作为激光熔覆基体材料。采用线切割将 Q235 钢加工成尺寸为 100 mm × 100 mm × 8 mm 的基体试样，并在试样表面加工用于预置合金粉末的条形凹槽，凹槽尺寸为 40 mm × 4mm × 0.6 mm。随后，将合金粉末均匀填充于凹槽内，经刮平和压实后进行激光熔覆。预置粉末后试样的宏观形貌如图 1 所示。Q235 钢的化学成分见表 1，其中 Fe 为余量。

Table 1. Chemical composition of Q235 steel (wt.%)
表 1. Q235 碳钢的化学成分(质量分数/%)

类型	C	Si	Mn	P	S	Fe
Q235B	0.15	0.15	0.25	0.12	0.11	99.22



Figure 1. Macroscopic morphology of alloy powder preset in grooves on the Q235 steel substrate
图 1. Q235 钢基体表面凹槽内预置合金粉末的宏观形貌

激光熔覆试验

采用预置粉末法在 Q235 钢表面制备 CoCrNi 中熵合金涂层。为研究激光功率对涂层组织与性能的影响，在扫描速度、光斑直径及其他工艺参数保持不变的条件下，分别设置 1000、1100、1200、1300 W 和 1400W 五组激光功率。

激光能量密度计算公式为：

$$E = \frac{P}{vD} \tag{1}$$

式中， E 为激光能量密度， J/mm^2 ； P 为激光功率 W； v 为扫描速度 mm/s ， D 为光斑直径 4.2 mm。随着激光功率增加，熔池热输入增大，从而影响熔覆层的成形、显微硬度及性能。具体工艺参数见表 2。

Table 2. Laser cladding process parameters
表 2. 激光熔覆试验工艺参数

序号	激光功率 (W)	扫描速度 (mm/s)	光斑直径 (mm)	能量密度 ($\text{J} \cdot \text{m}^{-2}$)
A1	1000	5	4.2	40.00
A2	1100	5	4.2	53.33
A3	1200	5	4.2	66.67
A4	1300	5	4.2	80.00
A5	1400	5	4.2	93.33

3. 熔覆制备及性能表征方法

3.1. 单道激光熔覆层宏观表面形貌分析

激光功率是影响单道熔覆层宏观成形质量的重要工艺参数。在扫描速度、光斑直径及其他工艺参数保持不变的条件下，随着激光功率增加，单位时间内输入熔池的能量逐渐增大，CoCrNi 预置粉末的熔化程度、熔池流动状态及铺展行为随之发生变化。由图 2 可知，当激光功率为 1000 W 时，熔覆层基本能够连续成形，但表面起伏较明显，局部区域成形不够均匀，说明较低功率下热输入不足，粉末熔化及熔池铺展受到一定限制。当功率提高至 1100 W 时，熔覆层宽度有所增加，表面出现较明显的波纹状凝固纹理，同时局部存在材料堆积现象，表明熔池流动性有所增强，但整体稳定性仍有不足。

当激光功率增加至 1200 W 时，CoCrNi 粉末熔化较为充分，熔覆层连续性明显改善，表面形成较规则的鱼鳞状凝固纹理，但仍存在较明显的表面起伏。当功率提高至 1300 W 时，熔覆层整体成形更加稳定，表面较为平整、连续，宽度较均匀，熔覆材料铺展较充分，未观察到明显的宏观裂纹及严重堆积现象，说明此时激光能量输入与熔池流动状态匹配较好，有利于获得良好的表面成形质量。当激光功率进一步增加至 1400 W 时，熔覆层表面粗糙程度有所增加，并出现较明显的不规则凝固纹理。这可能是由于激光功率过高，使熔池温度升高、液态金属对流加剧，导致熔池稳定性下降，从而影响熔覆层表面质量。

综合比较不同激光功率下的宏观形貌可知，激光功率过低或过高均不利于熔覆层稳定成形。在本试验参数范围内，1200 W 条件下熔覆层的连续性、平整度及整体均匀性较好，宏观表面成形质量相对最佳，因此可认为 1200 W 为较适宜的激光功率。



Figure 2. Morphology of single-track laser cladding
图 2. 单道激光熔覆形貌

3.2. 硬度分析

取不同激光功率下制备的 CoCrNi 熔覆层进行显微硬度测试,沿涂层表面至 Q235 钢基体方向依次选取多个测点,测试载荷为 0.2 kg。根据各测点的硬度测试结果绘制硬度分布曲线,并计算不同激光功率下试样的截面平均显微硬度,结果分别如图 3 和图 4 所示。

本试验采用预置式粉末激光熔覆,不同激光功率会改变熔池的热输入、粉末熔化程度以及涂层与基体之间的冶金结合状态,从而对 CoCrNi 熔覆层的显微硬度产生影响。图 3 为不同激光功率下试样沿涂层表面向 Q235 钢基体方向的显微硬度分布。由图可知,各组试样的硬度变化规律基本一致,均表现为熔覆层硬度较高,随着距涂层表面距离增加,硬度逐渐下降,并在进入基体后趋于稳定。在距表面约 100~700 μm 范围内,熔覆层硬度主要分布在 535~645 $\text{HV}_{0.2}$ 之间,明显高于 Q235 钢基体,表明 CoCrNi 熔覆层对基体具有较好的表面强化效果。其中 1200 W 试样整体硬度较高,最高硬度约为 645 $\text{HV}_{0.2}$,测量位置由熔覆层向结合区移动时,各组试样硬度均出现明显下降,在约 900~1100 μm 范围内,硬度降低至约 405~495 $\text{HV}_{0.2}$ 。这是由于该区域受到 Q235 钢基体稀释以及激光热循环作用,CoCrNi 合金元素含量降低,使强化作用减弱。当测量位置进一步进入基体后,各组试样硬度下降至约 200~230 $\text{HV}_{0.2}$,并趋于稳定。

由图 4 可以看出,随着激光功率增加,试样截面平均显微硬度呈现先升高后降低的趋势。1000、1100、1200、1300 和 1400 W 条件下平均硬度分别为 441.75、451、489.375、465.875 和 457 $\text{HV}_{0.2}$ 。其中 1200 W 时平均硬度最高。功率较低时,热输入不足,粉末熔化及熔池流动不够充分;随着功率增加,熔覆层组织更加均匀致密,硬度随之提高。当功率继续增加至 1300~1400 W 时,过高的热输入会使熔池温度升高,基体稀释作用增强,同时较慢的冷却速度可能造成晶粒粗化,使硬度有所下降。综合分析表明,1200 W 条件下 CoCrNi 熔覆层具有较好的硬度水平,与其较优的宏观成形质量相一致。

3.3. 摩擦磨损分析

采用 UMT 摩擦磨损试验机对 Q235 钢基体及不同激光功率下制备的 CoCrNi 熔覆层进行摩擦性能测试。在相同试验参数条件下,连续测试 30 min,并实时记录摩擦系数随时间的变化规律。根据测试结果绘制摩擦系数-时间曲线,同时计算各试样的平均摩擦系数,以评价不同激光功率下 CoCrNi 熔覆层的减摩性能。

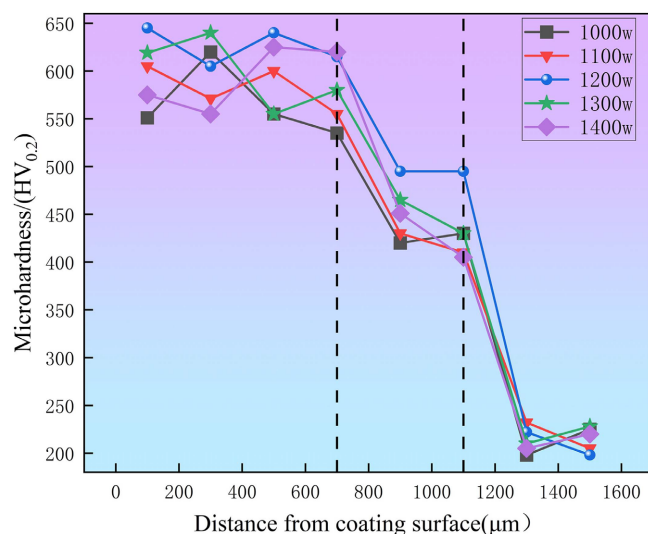


Figure 3. Microhardness variation

图 3. 硬度变化图

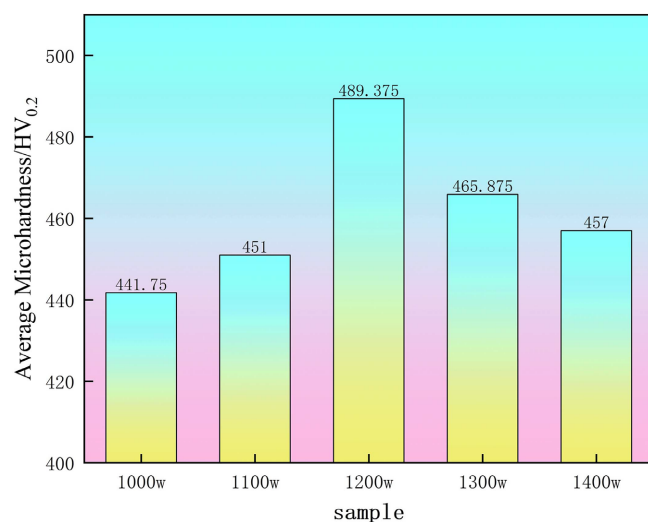


Figure 4. Average microhardness

图 4. 平均显微硬度图

由图 5 可知, 各试样在摩擦初始阶段均经历了明显的磨合过程, 随后逐渐进入相对稳定的摩擦阶段。Q235 钢基体的摩擦系数整体最高, 稳定阶段主要维持在 0.9~1.1 之间, 且波动较为明显; 相比之下, 各 CoCrNi 熔覆层的摩擦系数均有所降低, 表明激光熔覆能够有效改善 Q235 钢表面的摩擦性能。随着激光功率增加, 熔覆层摩擦系数总体呈先降低后升高的变化趋势, 其中 1300 W 试样在稳定阶段的摩擦系数最低, 且波动幅度相对较小, 表现出较好的摩擦稳定性。

由图 6 可知, 1000、1200、1300 和 1400 W 试样的平均摩擦系数分别为 0.7698、0.7017、0.5031 和 0.6636。其中, 1300 W 试样的平均摩擦系数最低, 相较 1000 W 降低约 34.6%, 说明该功率下熔覆层具有较好的减摩性能。这可能是由于适宜的激光热输入有利于 CoCrNi 粉末充分熔化, 并形成相对致密、均匀的熔覆组织。当功率进一步提高至 1400 W 时, 平均摩擦系数再次升高, 可能与过高热输入引起的组织粗化及基体稀释作用增强有关。综合来看, 1300 W 条件下 CoCrNi 熔覆层的减摩性能最佳。

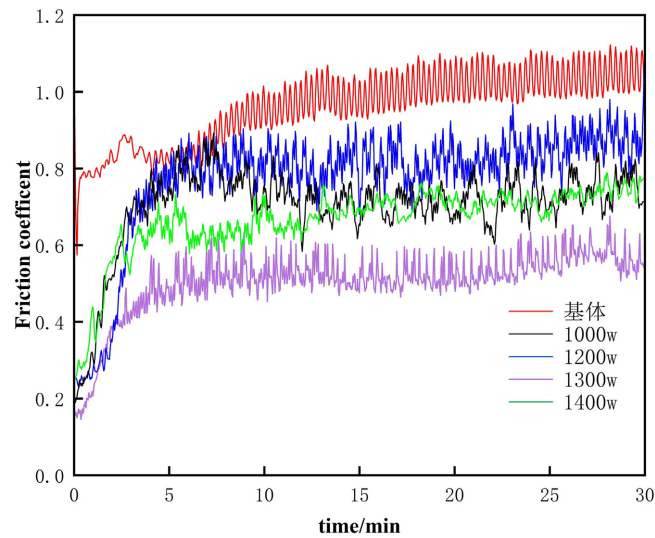


Figure 5. Friction coefficient-time curves

图 5. 摩擦系数曲线图

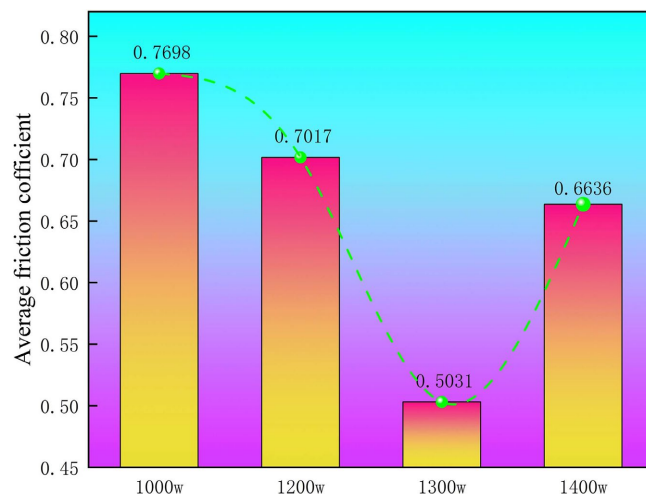


Figure 6. Average friction coefficient

图 6. 平均摩擦系数图

4. 结论

本文采用预置粉末激光熔覆方法，在 Q235 钢表面制备了 CoCrNi 中熵合金涂层，研究了不同激光功率对熔覆层宏观形貌、显微硬度及摩擦性能的影响，获得以下结论：

(1) 不同激光功率对 CoCrNi 熔覆层的宏观成形质量具有明显影响。随着激光功率增加，熔覆层成形质量整体呈先改善后下降的趋势。其中，1200 W 时熔覆层表面较为平整、连续，宽度较均匀，宏观成形质量较好；功率过高时，熔池热输入增加，表面粗糙程度有所增大。

(2) CoCrNi 熔覆层的显微硬度明显高于 Q235 钢基体，沿涂层表面向基体方向总体呈逐渐下降趋势。不同功率下试样截面平均显微硬度呈先升高后降低的变化规律，其中 1200 W 时截面平均显微硬度最高，为 489.375 HV_{0.2}，表明适宜的激光功率有利于提高熔覆层的硬度。

(3) 激光熔覆后试样的摩擦系数均低于 Q235 钢基体，说明 CoCrNi 涂层能够有效改善基体表面的减

摩性能。1000、1200、1300 和 1400 W 试样的平均摩擦系数分别为 0.7698、0.7017、0.5031 和 0.6636，其中 1300 W 时平均摩擦系数最低，为 0.5031，减摩性能最佳。综合宏观形貌、硬度及摩擦性能可知，1200~1300 W 为本试验条件下较为适宜的激光功率范围。

本试验主要研究了激光功率对 CoCrNi 熔覆层组织与性能的影响，后续可进一步研究扫描速度等工艺参数对涂层综合性能的影响。

参考文献

- [1] 陈凯, 崔承云, 赵恺, 等. 45 钢表面激光熔覆 CoCrNi 中熵合金涂层组织与性能[J]. 材料科学与工艺, 2023, 31(3): 48-55.
- [2] 宋晨晓, 赵伟, 马琦, 等. 激光功率对激光熔化沉积 CoCrNi 中熵合金组织及性能的影响[J]. 齐鲁工业大学学报, 2023, 37(6): 1-5.
- [3] 马名浩, 马兴华, 王永喆, 等. 激光熔覆 CoCrNiNb_x 中熵合金涂层微观结构演变及其对耐磨-抗空蚀性能的影响[J]. 表面技术, 2026, 55(8): 95-108.
- [4] 赵燕春, 张林浩, 师自强, 等. 304 不锈钢表面激光熔覆铁基中熵合金涂层组织性能研究[J]. 材料导报, 2023, 37(19): 205-211.
- [5] 于云鹤, 谢勇, 陈鹏, 等. 316L 不锈钢表面激光熔化沉积 CoCrNiCu 中熵合金的界面相容性[J]. 金属学报, 2024, 60(9): 1213-1228.
- [6] 洪大军, 万东海, 曹俊生, 等. 轧制变形对 CrCoNi 中熵合金组织及性能的影响[J]. 金属热处理, 2021, 46(6): 92-95.
- [7] 刘刚, 杨倩, 樊谦璐, 等. Ti 对 CrCoNi 中熵合金微观组织和力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2019, 39(3): 322-326.
- [8] 宋凌云, 王艳飞, 王明赛, 等. 1000 MPa 级 CrCoNi 中熵合金的微观组织和力学行为[J]. 航空材料学报, 2020, 40(4): 62-70.
- [9] 幸定琴, 涂坚, 罗森, 等. C 含量对 VCoNi 中熵合金微观组织和性能的影响[J]. 材料研究学报, 2023, 37(9): 685-696.
- [10] 南勇, 关旭, 闫海乐, 等. B 微合金化对 CoNiV 中熵合金微观组织和力学性能的影响及其机理[J]. 金属学报, 2024, 60(12): 1647-1655.
- [11] 程军. 变形量对(CoNiV)₉₇Al₃ 中熵合金组织和力学性能的影响[J]. 有色金属材料与工程, 2024, 45(3): 1-8.
- [12] 丁晨阳, 施洋, 张长军, 等. VCoNi 中熵合金力学性能的温度依赖性研究[J]. 功能材料, 2020, 51(12): 12020-12023.
- [13] 王永东, 宫书林, 汤明日, 等. 激光熔覆工艺对高熵合金组织与性能影响[J]. 焊接学报, 2023, 44(8): 116-122.
- [14] 高玉龙, 马国梁, 高晓华, 等. 激光熔覆 CoCrNiMnTi_x 高熵合金涂层组织及耐磨性能研究[J]. 表面技术, 2022, 51(9): 351-358, 370.
- [15] 宋鹏芳, 姜芙林, 王玉玲, 等. 激光能量密度对 CrFeCoNiNb 熔覆层组织演变和性能影响的试验研究[J]. 机械工程学报, 2023, 59(2): 127-137.