

NbC 添加量对风电部件用 316L 熔覆层组织及耐磨性的影响^①

赵群¹, 赵晋芳², 朱爽¹, 王琳¹

(1.沈阳工程学院 机械学院, 沈阳 辽宁 110136; 2.沈阳航空航天大学 民航学院, 沈阳 辽宁 110136)

摘要: 采用激光熔覆技术在 304 不锈钢表面制备了 316L+x%NbC ($x=0, 5, 10, 15$) 熔覆层, 研究了 NbC 含量对熔覆层相组成、微观形貌、显微硬度及磨损行为的影响。结果表明, NbC 含量为 5%~15% 时, 熔覆层相组成为 NbC、Cr₇C₃ 和 γ -Fe; 添加 NbC 后, 316L 基体组织显著细化; 少量 Nb 元素固溶在 γ -Fe 相中, 形成间隙固溶体。添加 NbC, 熔覆层显微硬度、耐磨性大幅提升, 摩擦因数、磨损率显著下降, 其中 316L+15%NbC 熔覆层显微硬度高达 381HV_{0.3}, 平均摩擦因数为 0.437 (比 316L 熔覆层降低了 41%), 磨损率为 $2.95 \times 10^6 \mu\text{m}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ (约为 316L 熔覆层的 50%)。

关键词: 激光熔覆; NbC; 316L 不锈钢; 显微硬度; 耐磨性; 表面处理; 表面硬化

中图分类号: O436

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2023.02.029

文章编号: 0253-6099(2023)02-0130-05

Effect of NbC Content on Microstructure and Wear Resistance of 316L Coating for Wind Power Components

ZHAO Qun¹, ZHAO Jinfang², ZHU Shuang¹, WANG Lin¹

(1. School of Mechanical Engineering, Shenyang Institute of Engineering, Shenyang 110136, Liaoning, China; 2. School of Civil Aviation, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, Liaoning, China)

Abstract: A coating of 316L+x%NbC ($x=0, 5, 10, 15$) was prepared on the surface of 304 stainless steel by laser cladding, and the effect of NbC content on the phase composition, microstructure, micro-hardness and wear behavior of the prepared coating was then investigated. The results show that with NbC content at 5%–15%, the phase composition of coating consists of NbC, Cr₇C₃ and γ -Fe; while the prepared 316L coating by adding NbC has its matrix structure significantly refined, and traces of Nb element are dissolved in the phase of γ -Fe, forming a gap solid solution. By adding NbC, the micro-hardness and wear resistance of coating are substantially improved, but the friction coefficient and wear rate are remarkably decreased. It is shown that the coating of 316L+15%NbC has micro-hardness as high as 381HV_{0.3}, friction coefficient of 0.437 by average (41% lower than the coating 316L), and wear rate of $2.95 \times 10^6 \mu\text{m}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$, (around 50% compared to 316L coating).

Key words: laser cladding; NbC; 316L stainless steel; micro-hardness; wear resistance; surface treatment; surface hardening

316L 不锈钢因其优异的耐蚀性和机械性能, 被广泛应用于风电设备关键部件^[1]。但 316L 不锈钢的硬度较低, 耐磨性较差, 极大限制了其应用领域^[2-4]。因此, 提升 316L 不锈钢的硬度和耐磨性对扩大其应用领域起到至关重要的作用。表面强化是解决不锈钢硬度

及耐磨性的重要方法之一^[5-8]。激光熔覆技术具有热输入小、稀释率低、急冷急热等优点, 是一种先进而绿色的表面强化技术^[9-12]。文献[13]在 420 不锈钢中添加 VC 陶瓷颗粒, 发现 VC 可显著增强 420 不锈钢的耐磨性, 当 VC 含量为 30% 时耐磨性最好。文献[14]通过

① 收稿日期: 2022-10-23

基金项目: 国家自然科学基金(62001312); 辽宁省教育厅科学研究经费项目(LJKZ21093, JYT2020122)

作者简介: 赵群(1980—), 男, 辽宁沈阳人, 博士, 副教授, 主要研究方向为机电一体化、激光增材制造。

通信作者: 赵晋芳(1981—), 女, 辽宁沈阳人, 博士, 副教授, 主要研究方向为疲劳强度与可靠性设计、激光增材制造。

激光熔覆在不锈钢表面制备了 VC-Cr₇C₃ 陶瓷涂层,结果表明,陶瓷涂层的显微硬度可达 1 000HV 以上,耐磨性约为不锈钢基体的 4 倍。

NbC 具有较高的熔点、极高的显微硬度、良好的热稳定性和耐蚀性,在制备金属基复合材料方面受到广泛关注^[15-16]。本文选用 316L 不锈钢为基体粉末、NbC 陶瓷颗粒为增强相,通过激光熔覆技术,在 304 不锈钢基体表面上制备熔覆层,探究了 NbC 加入量对 316L 熔覆层显微组织、元素分布、显微硬度及耐磨性的影响,为制备风电关键部件用 316L+NbC 耐磨涂层提供理论支撑。

1 实验材料及方法

1.1 实验材料

采用尺寸 100 mm × 100 mm × 12 mm 的 304 不锈钢作为基体材料,激光熔覆前对基体进行打磨抛光处理,随后用无水乙醇清洗表面,去除基体表面残留杂质、氧化皮。选用 316L 不锈钢粉末为熔覆层基体粉末,粉末粒度为 45~140 μm,其化学成分如表 1 所示。增强相选用粒度 10~30 μm 的 NbC 陶瓷颗粒,NbC 纯度为 99.9%。

表 1 316L 不锈钢粉末化学成分(质量分数) %

C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	Fe
0.03	1.45	0.03	0.02	0.55	12.56	16.82	2.25	余量

316L 粉末与 NbC 粉末分别按质量比 95:5,90:10,85:15 配比,装入不锈钢球磨罐中,球磨介质为碳化硅陶瓷磨球,磨球与粉末的质量比为 10:1。球磨在 QM-2SP 型高能球磨机中进行,球磨机转速为 200 r/min,为防止球磨过程中粉末发生冷焊作用,在球磨前倒入 30 mL 无水乙醇。球磨 1 h 后,将合金粉末在真空干燥箱中 75 °C 下烘干 6 h,以去除粉末中的无水乙醇和残留水分。

1.2 激光加工系统及参数

通过 FL-Dlight02-3000W 光纤激光器和配套熔覆设备进行激光熔覆实验。激光熔覆过程采用氩气作为保护气,气体流量为 20 L/min。为保证熔覆层在熔覆过程中不产生裂纹、气孔等缺陷,采用以下经过优化的激光工艺参数:激光功率 2 600 W、扫描速度 1 000 mm/min、搭接率 50%、熔覆层单层厚度约为 1.2 mm。

1.3 表征

采用线切割机对熔覆试样进行切割制备金相样品,金相样品尺寸为 10 mm × 10 mm × 10 mm,采用砂

纸对试样截面依次打磨,直至打磨面划痕方向一致,随后用 3.5 μm 水溶性金相研磨抛光膏进行抛光,直至试样表面无划痕。用无水乙醇清洗试样,吹干。采用 20 g Cu₂SO₄+5 g HCl+100 mL H₂O 腐蚀剂对金相试样进行腐蚀,腐蚀时间为 15 s。采用 X 射线衍射仪对熔覆层相组成进行表征;采用扫描电镜及能谱仪对熔覆层组织及元素分布进行表征。

1.4 显微硬度及摩擦磨损试验

采用维氏硬度试验机测定熔覆层表面显微硬度,测试前对样品待测表面进行打磨抛光至镜面,测试载荷为 300 g,加载时间为 15 s,测试间距为 500 μm,每个样品测量 10 次后取平均值。熔覆层摩擦磨损实验在布鲁克往复摩擦磨损试验机上进行。磨损实验前将待测试样表面打磨抛光至镜面,以消除表面粗糙度对摩擦因数的影响;摩擦副为 GCr15 钢球,磨损实验参数为:加载载荷 5 N、磨痕长度 7 mm、频率 120 Hz、磨损时间 30 min。摩擦磨损试验后,通过扫描电镜观察磨痕形貌。

2 实验结果与讨论

2.1 熔覆层物相组成

不同 NbC 含量的 316L 熔覆层 XRD 图谱如图 1 所示。由图 1 可知,316L 熔覆层的相组成主要为 γ-Fe 相。加入 NbC 陶瓷相后,NbC 的衍射峰分别在 35.32°、41.06°、59.20°和 70.68°处出现,并且随着 NbC 含量升高,衍射峰强度逐渐增强。此外,在添加 NbC 的复合涂层中均发现了 Cr₇C₃ 析出相,这是由于 NbC 在熔覆过程中发生分解,部分 Nb 元素固溶在 γ-Fe 相中,剩余的 C 原子与熔覆层中的 Cr 反应生成 Cr₇C₃ 共晶碳化物^[17]。

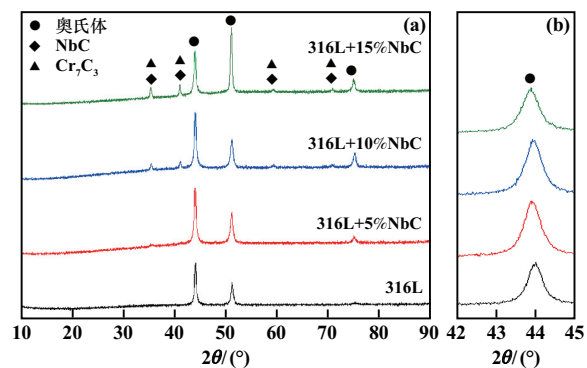


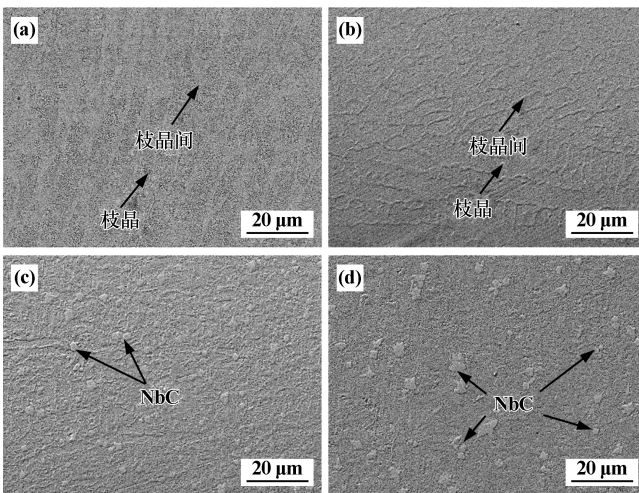
图 1 不同 NbC 含量的 316L 熔覆层 XRD 图谱

图 1(b)为 γ-Fe 相衍射主峰,NbC 的添加导致 44° 处 γ-Fe 衍射峰发生偏移,表明 γ-Fe 固溶体在凝固过程中发生晶格畸变^[18]。这是由于 NbC 溶解后部分 Nb

元素并未形成 NbC,而是固溶在 γ -Fe 相中,而 Nb 元素的原子半径大于 Ni、Cr 等元素,从而导致 γ -Fe 发生更为严重的晶格畸变,导致衍射峰发生偏移^[19]。

2.2 熔覆层显微组织形貌

图 2 为不同 NbC 含量的 316L 熔覆层显微组织形貌。由图 2(a)可以看出,不含 NbC 的 316L 熔覆层由粗大的枝晶、枝晶间组织构成。随着 NbC 含量逐渐升高,熔覆层组织显著细化。当熔覆层中 NbC 含量达到 10%后,熔覆层组织进一步细化,并且在熔覆层中发现均匀而细小的白色颗粒和骨架状 Cr_7C_3 共晶碳化物。结果表明,在熔覆层中加入适量 NbC 陶瓷相可显著细化熔覆层的显微组织^[20]。这是由于 NbC 陶瓷相具有极高的熔点,NbC 在溶解过程中增大了熔池的过冷度,熔覆层组织得到细化。此外,在熔池凝固过程中,NbC 陶瓷相优先析出,导致分散的 NbC 颗粒在 γ -Fe 相中形成非均质形核的核心,从而进一步细化熔覆层组织。当熔覆层中 NbC 含量达到 15%时,NbC 颗粒尺寸显著增加,这是由于含量较多的 NbC 需要更大的热量才能够完全熔化,而较快的扫描速度使得 NbC 颗粒无法完全熔化,NbC 颗粒发生聚集,以大颗粒形式存在^[21]。



(a) 316L 熔覆层; (b) 316L+5%NbC;
(c) 316L+10%NbC; (d) 316L+15%NbC

图 2 不同 NbC 含量的 316L 熔覆层显微组织形貌

图 3 为 316L+15%NbC 熔覆层的高倍显微组织形貌及元素分布图。结合元素分布图及 XRD 衍射结果可以判断花瓣状碳化物为含有少量 Mo 元素的 NbC 共晶碳化物,这是由于 Mo 元素和 Nb 元素均可与 C 元素形成碳化物,且 Mo 元素与 Nb 元素的原子半径相近,形成共晶碳化物。此外,部分 NbC 在熔覆过程中发生分解,导致 Nb 元素固溶在 γ -Fe 固溶体中,使得少量 Nb 元素分布在熔覆层中。

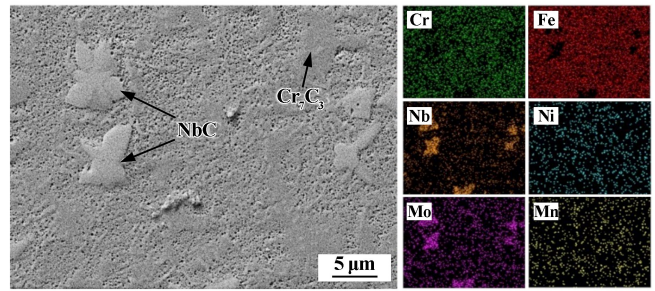


图 3 316L+15%NbC 熔覆层微观组织形貌及元素分布

2.3 熔覆层表面显微硬度

图 4 为不同 NbC 含量的 316L 熔覆层的表面显微硬度柱状图。结果表明,随着 NbC 含量升高,熔覆层显微硬度明显提高。这是由于 NbC 在熔覆层中起到了第二相析出强化作用,显著提升了熔覆层的抗变形能力,从而提升了熔覆层的显微硬度^[22]。并且,析出的 NbC 碳化物在熔覆层中起非均质形核作用,导致熔覆层内组织细化,起到细晶强化作用^[23]。此外,少量的 Nb 元素固溶在 γ -Fe 相中,使 γ -Fe 产生更为严重的晶格畸变,从而起到固溶强化作用^[24]。含 NbC 的熔覆层显微硬度的提升可归因于第二相析出强化、细晶强化和固溶强化三者的协同作用。

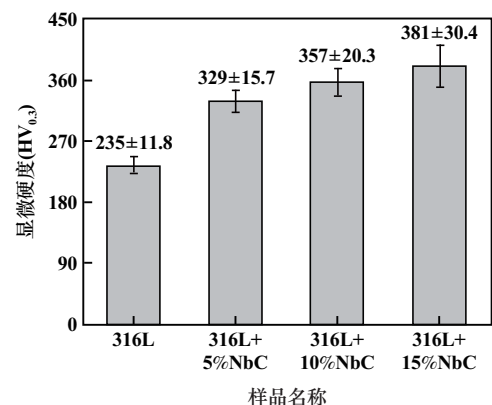


图 4 不同 NbC 含量的熔覆层表面平均显微硬度

2.4 熔覆层摩擦磨损性能

在干滑动磨损试验条件下,不同 NbC 含量的 316L 熔覆层摩擦因数随摩擦时间变化曲线如图 5 所示。由图 5 可知,316L、316L+5%NbC、316L+10%NbC 和 316L+15%NbC 熔覆层的平均摩擦因数分别为 0.739、0.519、0.526 和 0.437。添加 NbC 陶瓷颗粒可显著降低熔覆层表面的摩擦因数,熔覆层摩擦因数分别降低了 30%、29%、41%,磨损性能均有所改善。这可归因于硬度较高的 NbC 陶瓷相嵌入到 316L 基体中,减少了基体与磨球的直接接触。此外,在磨损初期熔覆层的摩擦因数波动较大,这是由于熔覆层在受到竖向载荷

和摩擦力后磨损表面发生变形,增加了熔覆层的表面粗糙度,导致摩擦因数发生剧烈波动。由于 316L 熔覆层硬度较低,磨损面变形更为剧烈,其摩擦因数波动更为明显。而含 NbC 的 316L 熔覆层具有较高的硬度,熔覆层变形较小,摩擦因数波动显著降低。

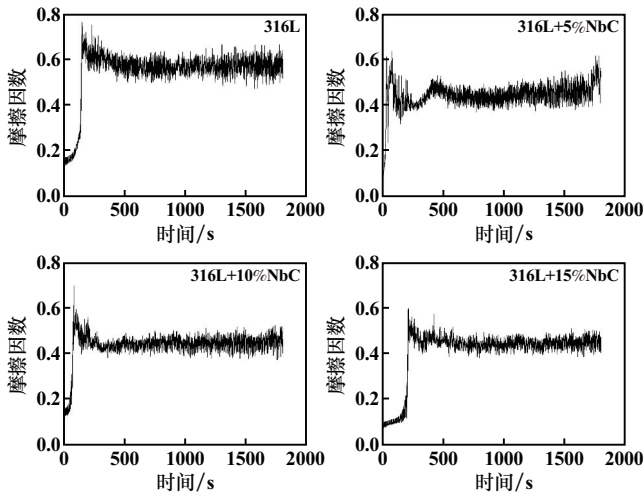


图5 不同 NbC 含量的 316L 熔覆层摩擦因数随摩擦时间变化曲线

图 6 为不同 NbC 含量的 316L 熔覆层磨损体积和磨损率柱状图。由图 6 可见,添加 NbC 陶瓷颗粒可显著提高 316L 熔覆层的耐磨性,这归因于 NbC 陶瓷相增强了 316L 基体,减少了基体的磨损。316L+15%NbC 熔覆层磨损率约为 316L 熔覆层磨损率的 50%。

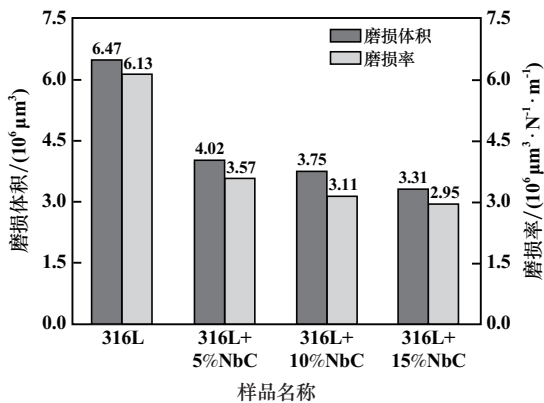
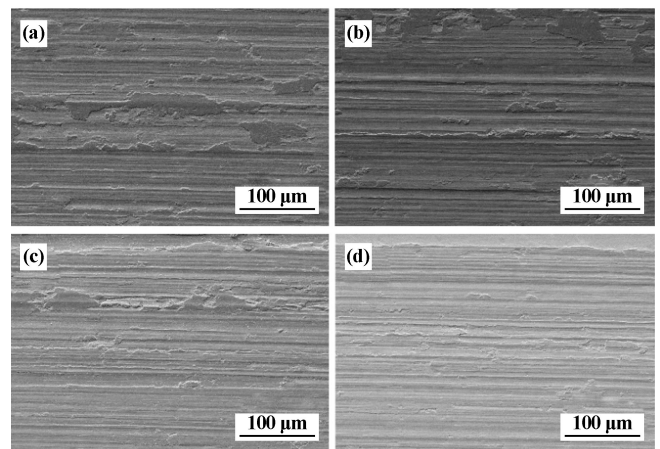


图6 不同 NbC 含量的 316L 熔覆层磨损体积及磨损率

为研究不同 NbC 含量的 316L 熔覆层的磨损机理,利用扫描电镜对熔覆层磨损表面进行观察,结果如图 7 所示。316L 熔覆层的磨损表面存在大量较深的犁沟和黏着磨损导致的黏结区,表明 316L 熔覆层的磨损机理为黏着磨损和磨粒磨损。添加 5%NbC 或 10%NbC 后 316L 复合熔覆层的磨损表面相较于 316L 熔覆层磨损表面更为光滑,黏着磨损导致的黏结区随着 NbC 含

量增加而减少,这是由于 NbC 在熔覆层中起钉扎作用,减少了 316L 基体的磨损,此外,Nb 元素固溶在 γ -Fe 中,起到固溶强化作用,增加了 γ -Fe 的强度和抗变形能力,减少了 γ -Fe 的脱落,从而减少了黏着磨损的发生。316L+5%NbC 和 316L+10%NbC 熔覆层的磨损机理为黏着磨损和磨粒磨损。316L+15%NbC 熔覆层的磨痕表面塑性变形降低,犁沟浅而稀疏,并且没有观察到明显的黏结现象,熔覆层的磨损机理为单一的磨粒磨损。这是由于 NbC 陶瓷相在熔覆层中尺寸更大,分布更为均匀,而 NbC 在磨损过程中有更高的抗变形能力,减少了基体材料的剥落,避免了黏着磨损的发生,进而提高了熔覆层的耐磨性能^[25]。



(a) 316L 熔覆层; (b) 316L+5%NbC 熔覆层;
(c) 316L+10%NbC 熔覆层; (d) 316L+15%NbC 熔覆层

图7 熔覆层磨痕形貌

3 结 论

1) 添加 NbC 的 316L 复合熔覆层的相组成为 γ -Fe、NbC 和 Cr_7C_3 析出相。添加 NbC 可以显著细化 316L 熔覆层的晶粒,NbC 颗粒在凝固过程中充当非均质形核点位,提高非均质形核速率。

2) 熔覆层的显微硬度随 NbC 添加量增加而升高,当 NbC 添加量为 15% 时熔覆层显微硬度达 381HV_{0.3}。显微硬度的提升归因于 NbC 和 Cr_7C_3 的第二相析出强化、Nb 元素的固溶强化和 NbC 的细晶强化的协同强化效应。

3) 添加 NbC 颗粒可显著降低熔覆层的摩擦因数和磨损率,其中 316L+15%NbC 的摩擦因数和磨损率最低,分别为 0.437 和 $2.95 \times 10^6 \mu\text{m}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$ 。NbC 在熔覆层中起钉扎作用,显著提高了熔覆层的硬度和抗变形能力。316L+15%NbC 熔覆层的磨损机理为单一的磨粒磨损。

参考文献:

- [1] 谭米雪,王 臻,赵凤君,等. 激光熔覆工艺参数对高速钢涂层性能的影响[J]. 矿冶工程, 2021,41(6):202-206.
- [2] HUANG W B, ZHANG Y M, DAI W B, et al. Mechanical properties of 304 austenite stainless steel manufactured by laser metal deposition[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2019,758:60-70.
- [3] 陈伟栋,汪冰峰,朱协彬,等. 选区激光熔化成形 316L 不锈钢组织控制研究[J]. 矿冶工程, 2022,42(3):153-157.
- [4] 宗学文,闫 丹,刘文杰,等. 退火对 SLM 成形 316L 不锈钢磨损特性及硬度的影响[J]. 应用激光, 2022,42(1):31-35.
- [5] Morks M F, Fahim N F, Kobayashi A. Microstructure, corrosion behavior, and microhardness of plasma-sprayed W-Ni composite coatings[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2008,10(1):6-11.
- [6] AN L C, WANG D Y, ZHU D. Improvement on surface quality of 316L stainless steel fabricated by laser powder bed fusion via electrochemical polishing in NaNO_3 solution[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2022,83:325-338.
- [7] WU Z H. Empirical modeling for processing parameters effects on coating properties in plasma spraying process[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2018,19:1-13.
- [8] Vayena O, Doumanidis C, Ranganathan R, et al. Welding methods for production of MMC coatings using particulate-cored wire precursors[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2005,7(2):130-139.
- [9] QIAN S X, DAI Y B, GUO Y H, et al. Microstructure and wear resistance of multi-layer Ni-based alloy cladding coating on 316LSS under different laser power[J]. *Materials*, 2021,14(4):781.
- [10] GAO Y, LIU Y, WANG L, et al. Microstructure evolution and wear resistance of laser clad 316L stainless steel reinforced with in-situ VC-Cr₇C₃[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2022,435:128264.
- [11] WEN J H, ZHANG L J, NING J, et al. Laser additively manufactured intensive dual-phase steels and their microstructures, properties and corrosion resistance[J]. *Materials and Design*, 2020,192:108710.
- [12] CHEN H, LU Y Y, SUN Y S, et al. Coarse TiC particles reinforced H13 steel matrix composites produced by laser cladding[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2020,395:125867.
- [13] ZHANG Z, YU T, Kovacevic R. Erosion and corrosion resistance of laser clad AISI 420 stainless steel reinforced with VC[J]. *Applied Surface Science*, 2017,410:225-240.
- [14] WU Q L, LI W G, ZHONG N, et al. Microstructure and wear behavior of laser cladding VC-Cr₇C₃ ceramic coating on steel substrate[J]. *Materials & Design*, 2013,49:10-18.
- [15] CAO Y B, ZHI S X, QI H B, et al. Evolution behavior of ex-situ NbC and properties of Fe-based laser clad coating[J]. *Optics and laser technology*, 2020,124:105999.
- [16] LI X F, YANG X H, YI D H, et al. Effects of NbC content on microstructural evolution and mechanical properties of laser clad Fe₅₀Mn₃₀Co₁₀Cr_{10-x}NbC composite coatings[J]. *Intermetallics*, 2021,138:107309.
- [17] ZHANG Z, Kovacevic R. Laser cladding of iron-based erosion resistant metal matrix composites[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2019,38:63-75.
- [18] Khvan A V, Hallstedt B, Broeckman C. A thermodynamic evaluation of the Fe-Cr-C system[J]. *Calphad*, 2014,46:24-33.
- [19] CAO H T, DONG X P, PAN Z, et al. Surface alloying of high-vanadium high-speed steel on ductile iron using plasma transferred arc technique: microstructure and wear properties[J]. *Materials and Design*, 2016,100:223-234.
- [20] Gulyaev I P, Kovalev O B, Pinaev P A, et al. Optical diagnostics of radiation interaction with the powder stream laterally transported during laser cladding[J]. *Optics and Lasers Engineering*, 2020,126:105877.
- [21] WANG Q, LI Q, ZHANG L, et al. Microstructure and properties of Ni-WC gradient composite coating prepared by laser cladding[J]. *Ceramics International*, 2022,48:7905-7917.
- [22] WANG X Z, JIANG Y H, WANG Y F, et al. Probing the tribo-corrosion behaviors of three nickel-based superalloys in sodium chloride solution[J]. *Tribology International*, 2022,172:107581.
- [23] LI X. Design, preparation, microstructure and properties of novel wear-resistant stainless steel-base composites using laser melting deposition[J]. *Vacuum*, 2019,165:139-147.
- [24] ZHOU S F, DAI X Q, ZHENG H Z. Microstructure and wear resistance of Fe-based WC coating by multi-track overlapping laser induction hybrid rapid cladding[J]. *Optics & Laser Technology*, 2011,44(1):190-197.
- [25] TONG X, LI F H, KUANG M, et al. Effects of WC particle size on the wear resistance of laser surface alloyed medium carbon steel[J]. *Applied Surface Science*, 2012,258:3214-3220.

引用本文: 赵 群,赵晋芳,朱 爽,等. NbC 添加量对风电部件用 316L 熔覆层组织及耐磨性的影响[J]. 矿冶工程, 2023,43(2):130-134.