doi: 10.3969/j.issn.1005-7854.2026.01.011
引用格式：陈放，皮自强，马尧，杜开平，陈星，章德铭. TiC含量对激光熔覆Fe基复合涂层组织和性能的影响[J]. 矿冶，2026，35(1)：75-80.
CHEN Fang, PI Ziqiang, MA Yao, DU Kaiping, CHEN Xing, ZHANG Deming. Effect of TiC content on the microstructure and properties of laser cladding Fe-based composite coatings[J]. Mining and Metallurgy, 2026, 35(1): 75-80.

TiC含量对激光熔覆Fe基复合涂层组织和性能的影响

陈 放[1,2] 皮自强[1,2] 马 尧[1,2] 杜开平[1,2] 陈 星[1,2] 章德铭[1]
（1. 矿冶科技集团有限公司，北京 100160；
2. 特种涂层材料与技术北京市重点实验室，北京 102206）

摘 要：采用激光熔覆技术在Mn18Cr2高锰钢基材上制备了不同TiC含量的430铁基复合涂层，研究了TiC含量对熔覆层组织和性能的影响。试验结果表明，涂层中TiC颗粒在激光熔覆过程中发生了溶解再析出，再析出的TiC颗粒呈现出多种形貌，具有不同的形成机制。随着TiC含量的增加，熔覆层的表面硬度逐步升高，TiC含量为30%时涂层磨损体积最小，耐磨性能最好。

关键词：激光熔覆；Fe基复合涂层；显微组织；耐磨性能
中图分类号：TG174.4 **文献标志码：**A **文章编号：**1005-7854（2026）01-0075-06

Effect of TiC content on the microstructure and properties of laser cladding Fe-based composite coatings

CHEN Fang[1,2] PI Ziqiang[1,2] MA Yao [1,2] DU Kaiping[1,2] CHEN Xing[1,2] ZHANG Deming[1]
(1. BGRIMM Technology Group, Beijing 100160, China;
2. Beijing Key Laboratory of Special Coating Materials and Technology, Beijing 102206, China)

Abstract: TiC-reinforced 430 Fe-based composite coatings were fabricated on Mn18Cr2 high manganese steel using laser cladding, with varying TiC contents to evaluate their influence on microstructural evolution and performance. The experimental results reveal that TiC particles experienced dissolution and re-precipitation during the cladding process, resulting in diverse morphologies governed by distinct formation mechanisms. As the TiC content increased, the surface hardness of the coatings progressively improved. Notably, the coating with 30% TiC achieved the lowest wear volume, demonstrating superior wear resistance.

Key words: laser cladding; Fe-based composite coating; microstructure; wear resistance performance

近年来，随着欧7标准的提出和实施，对制动系统颗粒物排放的管控逐步加强，要求刹车盘具备更出色的耐磨性能。通过表面强化技术对刹车盘进行表面处理，可以有效提升其耐磨性能，减少刹车系统的颗粒物排放。

激光熔覆技术是一项利用高功率激光将基材熔化形成熔池，再借助载气将熔覆粉末喷入熔池中，熔化快速凝固形成熔覆涂层的表面强化工艺。该工艺具有熔覆层结构致密、界面结合强度高、微观组织晶粒尺寸小、构件变形小等优点[1]。激光熔覆陶瓷颗粒增强合金复合涂层是一种将合金粉末作为基体，加入碳化物等陶瓷颗粒作为增强相的复合涂层。其中，铁基合金的低成本、良好的延展性以及与基材的优良结合强度，加上陶瓷相较高的硬度和耐磨性能，实现了“1+1>2”的效果，是提升材料耐磨性能的常用材料，也是许多研究人员的研究方向[2,3]。目前多种陶瓷颗

收稿日期：2024-12-19
基金项目：国家自然科学基金资助项目(52301001)
第一作者：陈放，硕士研究生，研究方向为激光增材。E-mail：cf858385974cf@163.com
通信作者：皮自强，博士，高级工程师；E-mail：pzqustb@163.com

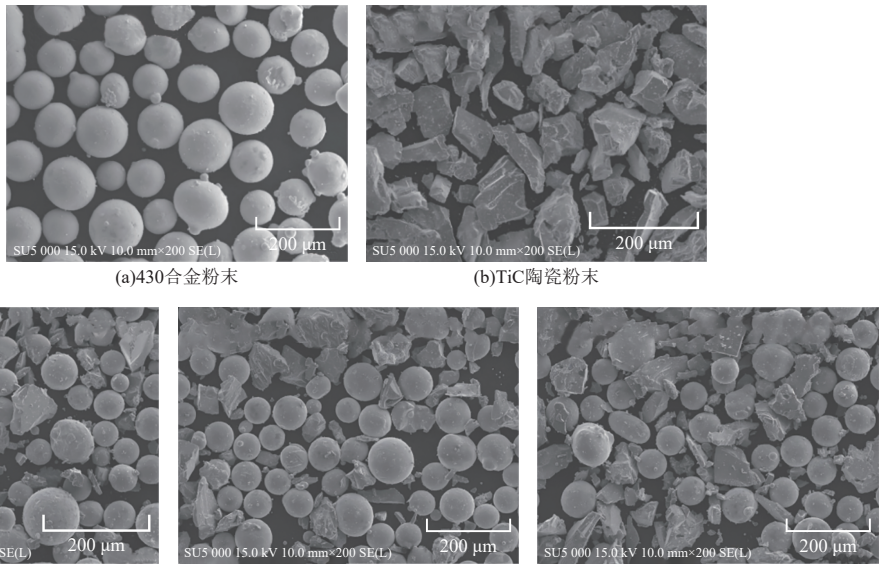
粒相已被证实能强化铁合金，其中，TiC陶瓷颗粒因其稳定性高、密度低、熔点高、硬度大、耐磨性好、耐腐蚀性高及与不锈钢化学相容性好等优点，被认为是铁基复合材料首选的颗粒增强体之一[4,5]。ZHU等[6]研究采用激光熔覆技术制备了不同含量的TiC陶瓷颗粒增强的410涂层。由于组织细化、纳米析出强化和第二相强化的耦合作用，涂层的显微硬度和耐磨性均得到提高。余红艳等[7]采用激光熔覆技术在45钢表面熔覆TiB2/TiC铁基合金粉末，结果显示铁基涂层的磨损机制由黏着磨损转变为轻微的磨粒磨损，耐磨性能提高了2.67倍。陈星等[8]研究了TiC含量对铁基复合涂层组分及性能的影响。试验结果表明，熔覆层化学组分包含奥氏体、M7C3碳化物、TiC析出相和未溶TiC颗粒。30% TiC时，熔覆层显微硬度最高，为423 $HV_{0.2}$；20% TiC时，熔覆层磨损体积最小，摩擦系数最稳定。

目前针对熔覆层性能的研究较为充分，但对熔覆层微观组织结构及不同形貌的TiC形成机制的研究则相对欠缺。本研究采用激光熔覆技术制备了含有不同TiC含量的颗粒增强430不锈钢复合涂层，并通过分析熔覆涂层的物相、微观组织、表面硬度及磨损机制，揭示了TiC颗粒在激光熔覆涂层中的生长机制，阐明了TiC含量对熔覆层组织和性能的影响规律。

1 试验材料及方法

基体材料选择Mn18Cr2高锰钢，尺寸120 mm × 120 mm × 10 mm，基材表面采用喷砂处理。所用的430基体粉末是粒径为53~106 μm的球形颗粒，形貌如图1(a)。TiC颗粒为机械破碎的不规则形状，粒径53~106 μm，如图1(b)。基体和原料的化学成分见表1。将粉末按照不同陶瓷相占比混合，1#粉末为430+10% TiC，2#粉末为430+20% TiC，3#粉末为430+30% TiC，三种粉末形貌分别如图1(c)、图1(d)、图1(e)。设备采用6通道激光轴内送粉的激光熔覆快速试验机GTV COL6000，激光工艺参数如表2。

熔覆试验完成后，采用日立SU 5000扫描电镜（SEM）对熔覆层的微观组织进行观察；采用德国



(a)430合金粉末 (b)TiC陶瓷粉末

(c)1#粉末：430+10% TiC (d)2#粉末：430+20% TiC (e)3#粉末：430+30% TiC

图1 原料粉末的扫描电镜形貌

Fig. 1 Morphology of laser cladding powder

表1 基体和粉末的化学成分

Table 1 Chemical composition of the substrate and powders /%

样品	化学成分							
	C	Ti	Si	Mn	P	S	Cr	Fe
Mn18Cr2高锰钢	1.21	–	0.45	16.48	0.05	0.03	1.94	余
430	0.12	–	0.95	1.03	0.04	0.03	16.00	余
TiC	49.80	50.20	–	–	–	–	–	–

表2 激光工艺参数

Table 2 Laser process parameter

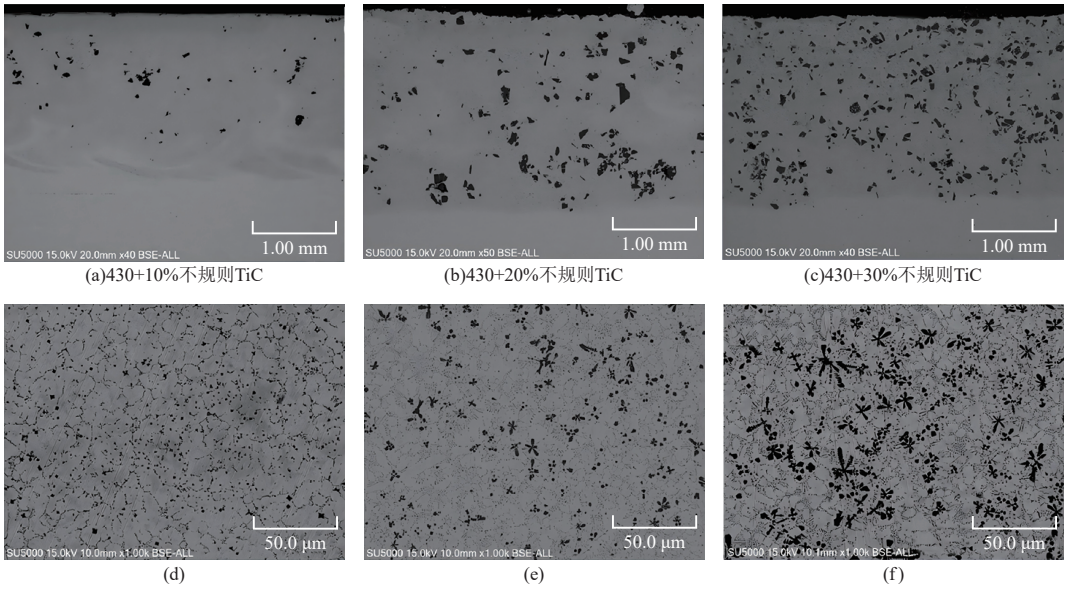
激光功率/W	扫描速率/(m·s^{-1})	送粉速率/(r·min^{-1})	气体流量/(L·min^{-1})	搭接率/%
1 500	0.008	3.0	4.2	50

BRUKER公司的D8 ADVANCE型X射线衍射仪（XRD）对所制备的熔覆层进行物相检测分析；采用VERZUS 710RS洛氏硬度计对熔覆层表面硬度进行测量（压头柄直径Φ6.35 mm，测试标尺HR15Y，加载时间5 s）；采用德国BRUKER公司的UMT摩擦磨损试验机对熔覆层表面进行滑动干摩擦磨损试验（往复式摩擦磨损，磨球为Φ9.525 mm的SiN球，载荷为100 N，摩擦时间为30 min，往复频率为5 Hz）。

2 结果与讨论

2.1 显微组织形貌与结构分析

不同TiC含量的430复合涂层的熔覆层的扫描电镜形貌如图2所示。所有激光熔覆涂层均与基体之间形成良好冶金结合，涂层结构致密，无明显的裂纹、气孔等缺陷。陶瓷相大体分布均匀，部分出现聚集现象，如图2(a)、图2(b)、图2(c)。



(a)430+10%不规则TiC (b)430+20%不规则TiC (c)430+30%不规则TiC

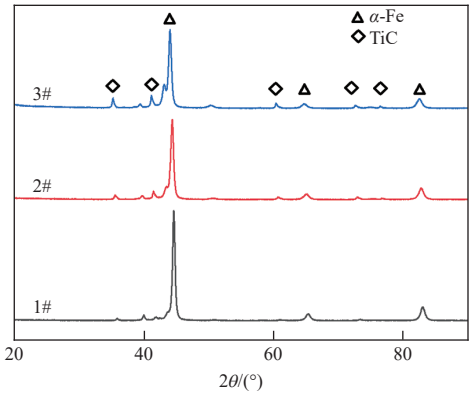
(d) (e) (f)

图2 不同TiC含量熔覆层的SEM图像

Fig. 2 SEM images of cladding coatings with different TiC contents

如图2(d)所示，TiC含量为10%时存在少量粒径为数十微米的TiC颗粒，相比于未溶解的TiC颗粒（图1(b)），其形貌无明显的棱角且尺寸较小，表明这些TiC出现部分溶解现象[8]。这是由于原始的TiC颗粒形貌不规则，表面能较高，易于溶解在液态基体中，但激光熔覆的快速凝固又使熔池具有较高的冷却速度，使得部分TiC未能完全溶解[9]。除了少量粒径为数十微米的TiC，熔覆层还存在较多粒径为几微米的TiC颗粒，这是由原始TiC通过溶解—析出机制产生的[6]。同样因为激光熔覆的快速凝固特征，TiC没有足够的时间长大，最终形成较小的颗粒。同时由于晶界处结构缺陷较多，具有更高的自由能，是形核的有利位置，图中还有大量纳米级TiC颗粒呈长条状的沿晶界连续分布。当TiC含量为20%时，涂层形貌如图2(e)。除了与10% TiC涂层相同的陶瓷相形貌外，还存在一些长条状的TiC颗粒。它的生长机制可归因于几个原始或部分熔化的TiC陶瓷颗粒在相互移动过程中的初始碰撞，以及随后这些TiC颗粒在熔池中的对流作用下的融合[6]。这些长条状的TiC颗粒部分聚集在一起，形成较大的放射状形貌。随着TiC含量的进一步增加，30% TiC涂层出现了更多复杂的陶瓷相形貌。这可能是由于随着TiC颗粒含量的增加，更多的溶解后析出的TiC受到熔池中对流的影响，相互碰撞形成花瓣状的形貌，抑或未来得及碰撞形成放射状的形貌[10]。

从样品的XRD图谱（图3）可以看出，涂层试样中的体心立方的α相衍射峰宽化，应为铁素体和马氏体的衍射峰叠加的结果。铁素体为体心立方晶体结



备注：图中1#、2#、3#样品对应TiC含量分别为10%、20%、30%，下同。

图3 不同TiC含量熔覆层的XRD图谱

Fig. 3 XRD patterns of cladding coatings with different TiC content

构，马氏体也为体心立方晶体结构[11]。随着TiC含量的增加，α-Fe峰逐渐降低。

2.2 硬度分析

图4为不同TiC含量熔覆层的表面硬度。可以看出，随着TiC含量的增加，熔覆层的表面硬度逐渐升高。10% TiC的涂层的平均表面硬度为94.79 HR15Y。加入20%的TiC后，平均表面硬度有所提升，为97.12 HR15Y，继续增加TiC颗粒的含量，熔覆层硬度缓慢提升，当加入30%的TiC时，平均表面硬度提升为100.09 HR15Y。表面硬度的增加主要有三方面的原因：一是Ti元素固溶于铁素体中起到固溶强化的效果；二是熔覆层中C含量的增加导致碳化物析出数量增多，熔覆层硬度增大；三是未溶的TiC颗粒弥散分布起到弥散强化的效果[12]。

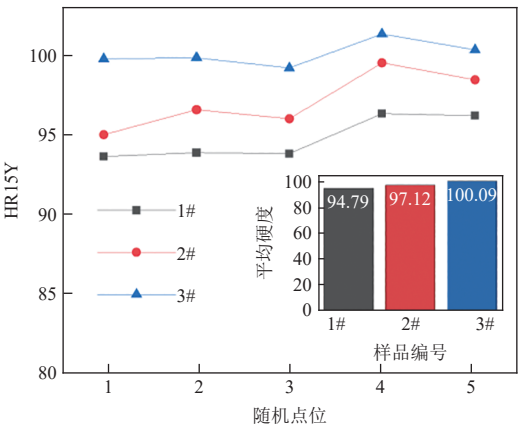


图4 不同TiC含量熔覆层的表面硬度

Fig. 4 The surface hardness of different TiC contents cladding layers

2.3 摩擦磨损分析

图5为不同TiC含量熔覆涂层的摩擦曲线，图6为不同TiC含量熔覆涂层的摩擦形貌。分析摩擦曲线图可知，在初始磨合阶段，由于涂层表面粗糙，摩擦副接触点较少，摩擦阻力较小。随着磨损的加剧实际接触面积增大导致黏着节点的增多，摩擦迅速加剧，摩擦系数直线升高。而摩擦副表面的微凸体迁移、剪断而逐渐产生微抛光效果时，二者的对磨行为进入动态平衡状态，即达到稳定磨损阶段，此时曲线波动幅度较小且摩擦系数较为稳定[13]。观察稳定磨合阶段的10% TiC涂层的摩擦系数起伏较大，这表明该涂层在此阶段的磨损相对剧烈，20% TiC涂层次之，30% TiC涂层最稳定。

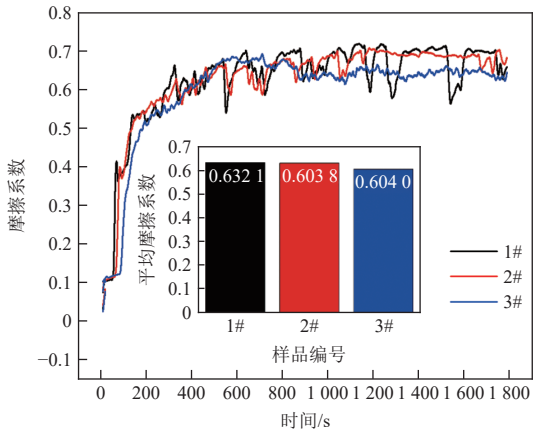
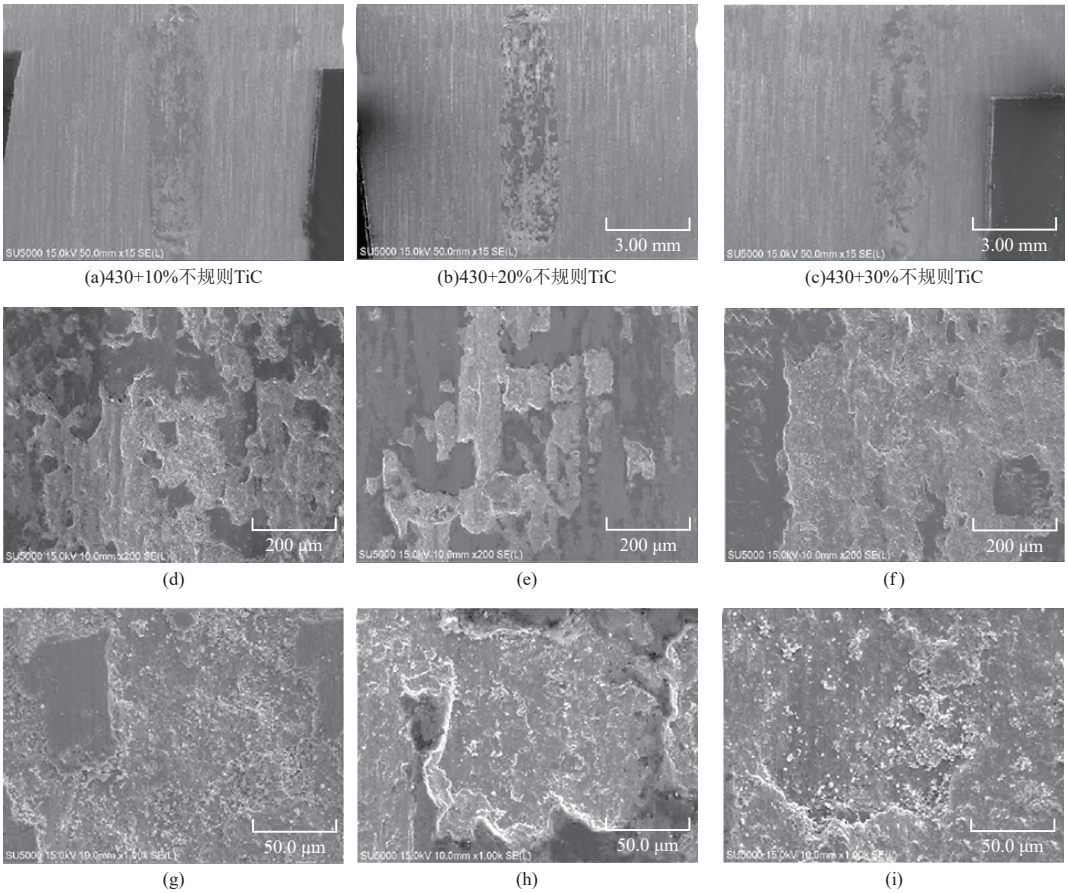


图5 不同TiC含量熔覆涂层的摩擦曲线

Fig. 5 Friction curves of cladding coating with different TiC contents

由于摩擦系数的大小与摩擦行为即摩擦力的来源有直接关系，而摩擦力取决于摩擦表面的黏着、微凸体的变形量以及摩擦力的犁削分量。对于同一种对磨副而言，涂层表面性能的差异造成了耐磨性的不同[13]。在第一种涂层中部分溶解的TiC含量较少。随着磨损的加剧，这些陶瓷颗粒逐渐脱离涂层，在摩擦中起着磨粒的作用加剧对涂层的磨损，图6(a)中存在的少量犁沟也证明了这一点。除此之外，部分犁沟会随着进一步的磨损发生硬化脱落而形成磨屑，附着于涂层表面形成黏着磨损。随着TiC含量的增加，TiC含量为20%时，涂层中未溶解的TiC含量也有所增加，致使在摩擦时剥落的硬质相颗粒增多，进一步加剧磨粒磨损。图6(b)显示该涂层的犁沟较第一种涂层明显增加。此时以磨粒磨损和黏着磨损为主要磨损机制。而随着TiC含量提升到30%，磨粒磨损表面更多的未溶陶瓷颗粒可以分担摩擦时的机械负载，形成相互支撑的网络结构。同时更多的硬质相使涂层整体的硬度得以提升，有效抑制硬质陶瓷颗粒的剥落，从而削弱磨粒磨损。此时磨损机制以黏着磨损



(a)430+10%不规则TiC (b)430+20%不规则TiC (c)430+30%不规则TiC

(d) (e) (f)

(g) (h) (i)

图6 不同TiC含量熔覆涂层的磨损形貌

Fig. 6 Wear morphologies of cladding coatings with different TiC contents

为主。观察涂层的宏观磨损形貌，3#涂层轻微磨损，2#涂层磨损最为严重。

图7给出了不同TiC含量熔覆涂层的磨损体积。可以看出，2#涂层的磨损体积最大（0.167 mm^3），原因可能是陶瓷相的偏聚导致颗粒与基体的界面结合不良，在摩擦时更容易脱落形成磨粒加剧磨损。3#涂层耐磨性能最好，磨损体积最小，为0.110 mm^3。

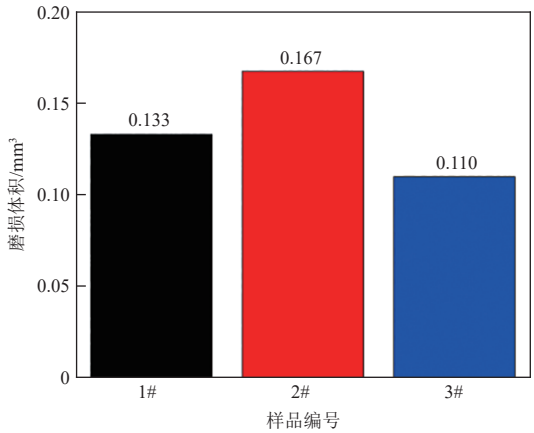


图7 不同TiC含量熔覆涂层的磨损体积

Fig. 7 Loss of weight of different TiC content cladding layers

3 结论

1）采用激光熔覆技术可成功在基材上制备TiC质量分数分别为10%、20%、30%的430不锈钢复合涂层。涂层与基体结合良好，呈冶金结合特征，内部致密且无明显宏观缺陷。

2）熔覆层中TiC主要以两种形态存在：部分溶解的原始微米级颗粒，以及在快速凝固过程中原位析出的微纳米级颗粒。受熔池流动及颗粒碰撞作用，再析出的TiC多呈放射状或花瓣状复杂形貌分布。

3）随着TiC含量增加，熔覆层的表面硬度逐步提高，摩擦系数趋于稳定。当TiC含量为30%时，涂层表现出最优的综合性能：平均表面硬度最高，达100.09 HR15Y；耐磨性最佳，磨损体积最小，仅为0.110 mm^3。

参考文献

[1] WANG L F, YU K, CHENG X, et al. Effect of laser shock peening on microstructure and mechanical properties of laser cladding 30CrMnSiNi$_2$A high-strength steel[J/OL]. Scientic Reports, 2023, 13: 9971.https://www.nature.com/srep/.

[2] 王成，王伟，丁士杰，等. 激光熔覆铁基耐磨涂层的制备及摩擦学性能研究[J]. 中国激光, 2022, 49(22): 137-147.
WANG C, WANG W, DING S J, et al. Preparation and tribological properties of Fe-based wear-resistant coating by laser cladding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(22): 137-147.

[3] 王强，杨驹，牛文娟，等. La_2O_3对激光熔覆铁基JG-8合金组织与性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程，2021，50(6): 2125-2133.
WANG Q, YANG J, NIU W J, et al. Effect of La_2O_3 on the microstructure and properties of laser cladding Fe-based JG-8 alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2021, 50(6): 2125-2133.

[4] ZHU H, DONG K, WANG H, et al. Reaction mechanisms of the TiC/Fe composite fabricated by exothermic dispersion from Fe－Ti－C element system[J]. Powder Technology, 2013, 246: 456-461.

[5] WANG D Y, WANG H H, SUN S C, et al. Fabrication and characterization of TiB_2/TiC composites[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2014, 45: 95-101.

[6] ZHU H, OUYANG M, HU J, et al. Design and development of TiC-reinforced 410 martensitic stainless steel coatings fabricated by laser cladding[J]. Ceramics International, 2021, 47(9): 12505-12513.

[7] 佘红艳, 屈威, 杨柳, 等. 激光熔覆原位生长TiB_2/TiC增强铁基涂层组织及性能[J]. 表面技术, 2023, 52(7): 397-405.
SHE H Y, QU W, YANG L, et al. Microstructure and properties of TiB_2/TiC reinforced Fe-based coating grown in situ by laser cladding[J]. Surface Technology, 2023, 52(7): 397-405.

[8] 陈星, 尹健, 皮自强, 等. TiC含量对激光熔覆Fe基复合涂层组分和性能的影响[J]. 热喷涂技术, 2021, 13(4): 35-41.
CHEN X, YIN J, PI Z Q, et al. Effects of TiC content on chemical composition and properties of laser cladding Fe-based composite coatings[J]. Thermal Spray Technology, 2021, 13(4): 35-41.

[9] WANG Z, LIN T, HE X, et al. Fabrication and properties of the TiC reinforced high-strength steel matrix composite[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2016, 58: 14-21.

[10] CAI Y, AO S, MANLADAN M S, et al. Evolution mechanisms of TiC ceramic particles in FeCoCrNiAl high-entropy alloy laser cladding layers[J]. Materials Research Express, 2019, 6(10): 1065d2-1065d2.

[11] 陈兴润. 430铁素体不锈钢板坯组织分析[J]. 冶金分析, 2015, 35(4): 49-53.
CHEN X R. Structure analysis of 430 ferrite stainless steel slab[J]. Metallurgical Analysis, 2015, 35(4): 49-53.

[12] EMIAMIAN A, CORBIN S F, KHAJEPOUR A. Effect of laser cladding process parameters on clad quality and in-situ formed microstructure of Fe-TiC composite coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2010, 205(7): 2007-2015.

[13] 罗西希. 激光熔覆铁铝基涂层的制备及其增韧和抗磨机理研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
LUO X X. Preparation of Fe-Al based laser cladding coating and its toughening and anti-wearing mechanism[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018.