

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2023.03.009

## 轻轨建筑钢结构的表面防护与性能研究

石圆圆<sup>1\*</sup>, 罗玉凤<sup>2</sup>

(1. 长春建筑学院 建筑与规划学院, 吉林 长春 130607; 2. 吉林大学 材料科学与工程学院, 吉林 长春 130012)

**摘要:** 对轻轨钢结构用 Q345 钢进行了表面激光熔覆, 对比分析了 GH 625 熔覆层和添加不同含量 WC 和 TiN 熔覆层的显微形貌、物相组成、拉伸性能、电化学性能和耐磨性能。结果表明, GH625 熔覆层的物相主要为  $\gamma$ -Ni、FeNi<sub>3</sub>、M<sub>23</sub>C<sub>6</sub> 和 NbC; 熔覆层中 WC 含量增加至 10% 及以上时, 熔覆层中还出现了 WC、W<sub>2</sub>C、M<sub>6</sub>C 相; 5%TiN 和 10%TiN 熔覆层的物相为  $\gamma$ -Ni、FeNi<sub>3</sub>、TiN、NbC 和 M<sub>23</sub>C<sub>6</sub> 相。在 GH625 中添加一定含量的 WC 或者 TiN 后可以抑制晶粒长大和熔覆层中 Laves 相的形成。WC 熔覆层和 TiN 熔覆层的耐腐蚀性能都优于 Q345 钢和 GH625 熔覆层, 且 15%WC 熔覆层的耐腐蚀性能最好; Q345 和熔覆层的磨损失重从小至大顺序为: 15%WC < 5%TiN < 20%WC < 10%WC < 10%TiN < 5%WC < GH625 < Q345, 熔覆层的耐磨性能都优于 Q345 钢, 且 15%WC 熔覆层耐磨性能最佳, 磨损机制为黏着磨损和轻微磨粒磨损。

**关键词:** 激光熔覆; WC; TiN; 微观结构; 摩擦磨损; 腐蚀

**中图分类号:** TG174.4      **文献标识码:** A

## Study on surface protection and properties of light rail building steel structure

Shi Yuanyuan<sup>1\*</sup>, Luo Yufeng<sup>2</sup>

(1. School of Architecture and Planning, Changchun University of Architecture and Civil Engineering, Changchun 130607, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China)

**Abstract:** The surface laser cladding of Q345 steel for light rail steel structure was carried out. The microstructure, phase composition, tensile properties, electrochemical properties and wear resistance of GH 625 cladding layer and cladding layers with different content of WC and TiN were compared and analyzed. The results show that the main phase of the GH625 cladding layer is  $\gamma$ -Ni, FeNi<sub>3</sub>, M<sub>23</sub>C<sub>6</sub> and NbC; when the WC content in the cladding layers increases to 10% or more, WC, W<sub>2</sub>C and M<sub>6</sub>C phases also appear in the cladding layers; the phase of 5%TiN and 10%TiN cladding layers is  $\gamma$ -Ni, FeNi<sub>3</sub>, TiN, NbC and M<sub>23</sub>C<sub>6</sub>. Adding a certain amount of WC or TiN to GH625 can inhibit the grain growth and the formation of Laves phase in the cladding layers. The corrosion resistance of WC cladding layers and TiN cladding layers is better than those of Q345 steel and GH625 cladding layer, and the corrosion resistance of 15%WC cladding layer is the best; the order of wear losses of Q345 and cladding layers from small to large are: 15%WC < 5%TiN < 20%WC < 10%WC < 10%TiN < 5%WC < GH625 < Q345, so the wear resistance of cladding layers is better than that of Q345 steel, and 15%WC

收稿日期: 2021-02-10

修回日期: 2022-03-22

作者简介: 石圆圆(1987—), 女, 副教授, email: 18704409366@139.com

基金项目: 2022 年度吉林省教育厅社会科学研究规划项目(JJKH20221322SK)

cladding layer has the best wear resistance. The wear mechanism is adhesive wear and slight abrasive wear.

**Keywords:** laser cladding; WC; TiN; microstructure; friction and wear; corrosion

作为城镇化和城市化轨道交通的重要组成部分,轻轨在近些年来得到了飞速发展,其中,具有节能环保、循环使用等特性的钢结构建筑体系在轻轨建筑中应用较为广泛,同时也给轻轨建筑钢结构用材提出了更高要求<sup>[1]</sup>,比如除需满足足够的强度和塑性外,还要求钢结构在服役环境下具有良好的使用寿命,而采用传统的成分设计、工艺优化等方法难以同时满足材料性能和服役要求<sup>[2]</sup>,因此需要对轻轨建筑用钢进行表面改性处理,以在不改变钢材固有力学性能等的前提下,增强钢材表面抵抗腐蚀和摩擦磨损的能力<sup>[3-4]</sup>。虽然科研工作者已尝试采用等离子喷涂、电镀等表面改性技术对钢材进行表面改性处理,且 GH625 涂层已被证实具有良好的机械性能、耐腐蚀性等,但是同时存在现有改性技术对基体影响较大、制备 GH625 防护层时容易在成形过程中产生有害 Laves 相劣化材料综合性能等问题<sup>[5-7]</sup>。本文尝试在 GH625 粉末中加入 WC 和 TiN 的方法,

采用对基体影响较小的激光熔覆方法在轻轨钢结构用 Q345 钢表面制备了不同组分的熔覆层,对比分析了 GH 625 熔覆层和添加不同含量 WC 和 TiN 熔覆层的显微形貌和性能。本研究将有助于良好服役性能的 Q345 钢表面防护层的开发,推动其在轻轨建筑钢结构等领域的工业化应用。

1 实验方法

实验原料为轻轨建筑钢结构用 Q345 钢,线切割加工块状试样,采用电感耦合等离子发射光谱法测得主要元素化学组成见表 1。激光熔覆原料包括市售 GH625 镍基高温合金粉末(化学组成如表 2)、WC 粉末(99.99 wt.%)和 TiN 粉末(99.97 wt.%);采用机械球磨的方法在 KM22-PMB2A 型行星式球磨机制备混合粉末 625-xWC(x=5 wt.%, 10 wt.%, 15 wt.% 和 20 wt.%)和 625-yTiN(y=5 wt.%, 10 wt.%),球料比为 10:1,球磨机转速为 350 r/min、时间为 1 h。

表 1 轻轨建筑钢结构用 Q345 钢的化学组成

Tab. 1 Chemical composition of Q345 steel for light rail building steel structure

元素	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	V	Nb	Fe
含量/(wt.%)	0.180	0.480	1.520	0.009	0.003	0.160	0.360	0.120	0.110	0.050	余量

表 2 GH625 镍基合金粉末的化学组成

Tab. 2 Chemical composition of GH625 nickel base alloy powder

元素	Cr	Mo	Fe	Si	Nb	Mn	Ni
含量/(wt.%)	20.32	9.19	2.18	0.55	3.16	0.59	余量

采用激光熔覆的方法对 Q345 钢(100 mm×80 mm×20 mm)进行了表面改性处理,预先将 Q345 钢进行表面清洗并烘干(120 ℃下 1 h)备用;将 Cu 板上放置用于激光熔覆处理的 Q345 试样,采用 LDF4000 型激光器在 Q345 钢表面制备熔覆层,光斑直径为 0.5 mm,扫描速度为 5.5 mm·s<sup>-1</sup>,送粉速度为 80 g·min<sup>-1</sup>,送粉角度为 70°,道次搭接率为 40%,保护气为高纯氩气(99.92%)。

熔覆粉末和熔覆层显微形貌和磨损形貌采用日立 S-4800 型高分辨场发射扫描电镜进行观察,并用附带能谱仪测试微区成分;线切割加工熔覆层中部

块状试样,依次进行机械打磨、抛光和氯化铁+盐酸水溶液腐蚀后,在奥林巴斯 GX71 型光学显微镜上观察;熔覆层物相分析采用德国 D8 ADVANCE 型 X 射线衍射仪进行,铜靶 K $\alpha$  辐射,扫描速度为 0.2°/s;电化学性能测试在 CHI660 星电化学工作站中进行,标准三电极体系(铂片为辅助电极、Ag/AgCl 为参比电极、工作面 1 cm<sup>2</sup>被测试样为工作电极),腐蚀介质为 3.5% NaCl 溶液,测试温度为室温;销盘式摩擦磨损试验在 HT-1000 型摩擦磨损试验机上进行,载荷 10 N、磨损时间 40 min、绕动半径和速度分别为 5 mm 和 350 r/min,熔覆层试样尺寸为 4 mm×4 mm×15 mm,摩擦副为 45#钢,摩擦磨损试验结束后计算磨损失重<sup>[8]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 显微组织

图1为熔覆原料的扫描电镜显微形貌。可见, GH625 镍基合金粉末呈类球形, 尺寸主要分布在

50  $\mu\text{m}$ ~140  $\mu\text{m}$ , 且约有 48% 的球形粉末粒径  $\geq 100 \mu\text{m}$ ; TiN 粉末呈不规则多边形, 尺寸较为细小, 主要分布在 1  $\mu\text{m}$ ~6  $\mu\text{m}$ ; WC 粉末也呈现出规则多边形, 尺寸主要分布在 12  $\mu\text{m}$ ~60  $\mu\text{m}$ 。

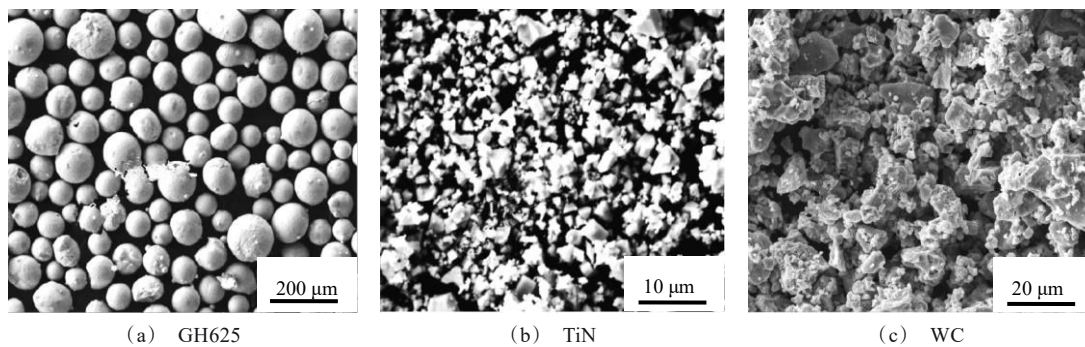


图1 熔覆原料的SEM形貌

Fig. 1 SEM morphology of cladding raw materials

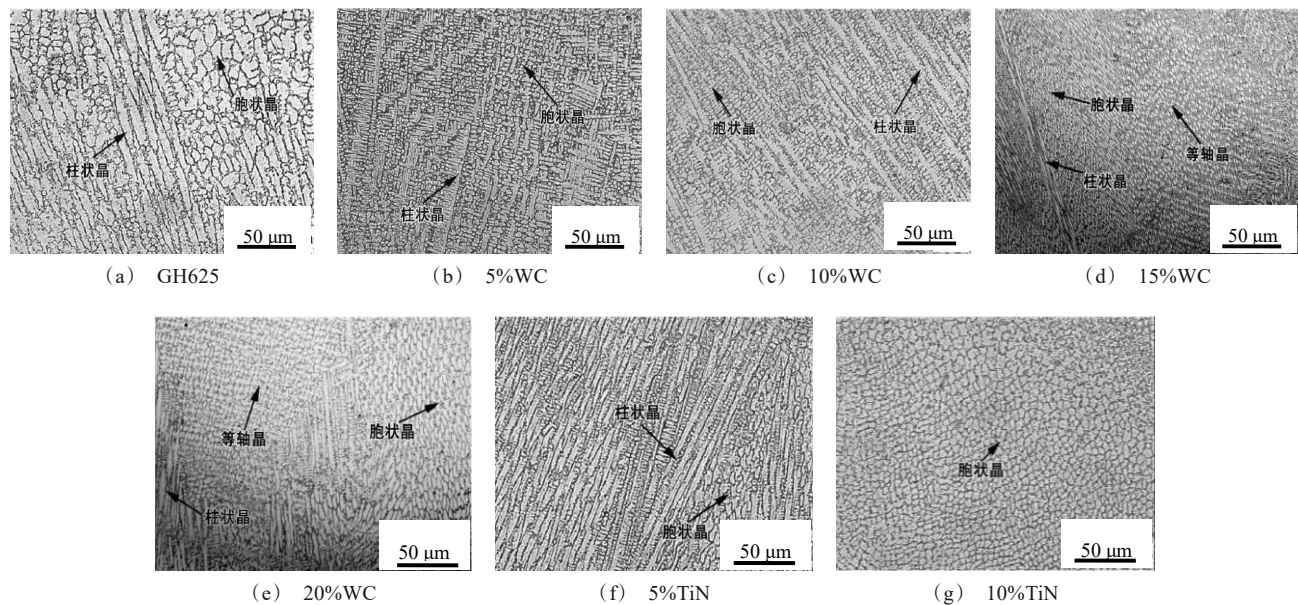


图2 Q345钢表面熔覆层中部的光学显微组织

Fig. 2 Optical microstructure of the middle part of the cladding layers on Q345 steel surface

图2为Q345钢表面熔覆层中部的光学显微组织。对于GH625、5%WC和10%WC熔覆层,显微组织都为柱状晶和胞状晶,且WC的添加会使得熔覆层晶粒尺寸更加细小;对于1%WC和20%WC熔覆层,显微组织中可见柱状晶、胞状晶和等轴晶,15%WC熔覆层试样的晶粒最为细小。5%TiN熔覆层的显微组织为柱状晶和胞状晶,10%TiN熔覆层的显

微组织主要以胞状晶为主。在GH625中添加一定含量的WC或者TiN后,激光熔覆过程中未溶的WC或者TiN会在激光熔池中作为形核质点,抑制晶粒长大,且5%WC熔覆层的晶粒尺寸与5%TiN熔覆层相当;当WC添加量达到15%及以上时,激光熔池中WC相互接触几率增大,影响枝晶形貌的凝固过程中的温度梯度( $G$ )和长大速率( $R$ )<sup>[9]</sup>,进而在熔覆层



中形成等轴晶;当 TiN 添加量达到 10% 时,激光熔池中未溶的 TiN 会降低影响枝晶形貌的  $G/R$  系数,抑制了柱状晶和等轴晶的产生,使得熔覆层中形成胞状晶。

图 3 为 Q345 钢表面熔覆层的 X 射线衍射图谱。GH625 熔覆层的物相主要为  $\gamma$ -Ni、 $\text{FeNi}_3$ 、 $\text{M}_{23}\text{C}_6$  和 NbC;5%WC 熔覆层中除有 GH625 熔覆层中的主要物相外,还出现了少量  $\text{W}_2\text{C}$  相,这主要与 WC 在高能量激光热输入作用下发生了反应有关( $2\text{WC}=\text{W}_2\text{C}+\text{C}$ );增加 WC 含量至 10% 及以上时,熔覆层中还出现了 WC 和  $\text{M}_6\text{C}$  相,且 15%WC 和 20%WC 熔覆层的 WC、 $\text{M}_6\text{C}$  和 NbC 衍射峰强度有所增强。5%TiN 和 10%TiN 熔覆层的物相组成相同,都主要为  $\gamma$ -Ni、 $\text{FeNi}_3$ 、TiN、NbC 和  $\text{M}_{23}\text{C}_6$  相,且未见其他含 Ti 的物相形成,表面 TiN 不会在激光热输入作用下发生反应而形成新的物相。

图 4 为 Q345 钢表面熔覆层的扫描电镜显微形貌,表 3 中列出了相应区域的能谱分析结果。根据能谱分析并结合文献可知<sup>[10]</sup>,GH625 熔覆层中的长条状亮白色相(位置 A)为 Laves 相-(Ni, Cr, Fe)<sub>2</sub>(Mn, Mo, Nb),颗粒状相(位置 B)为 MC、 $\text{M}_{23}\text{C}_6$  等碳化物;在 GH625 中加入不同含量 WC 后,除长条状 Laves 相和颗粒状碳化物外,还出现了块状 WC/ $\text{W}_2\text{C}$  相(位置 C);随着 WC 含量增加至 20%,熔覆层中块

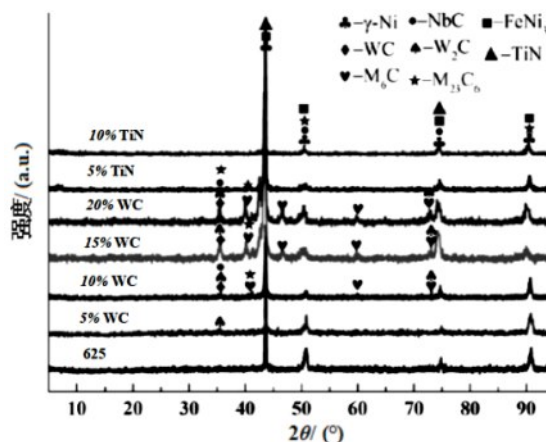


图 3 Q345 钢表面熔覆层的 XRD 图谱

Fig. 3 XRD patterns of cladding layers on Q345 steel surface

状 WC/ $\text{W}_2\text{C}$  相不断长大, Laves 相含量减少,这主要与  $\text{W}_2\text{C}$  的形成使激光熔池中游离 C 增加而影响了 Laves 相形成有关<sup>[11]</sup>,而当 WC 含量增加至 15% 以上时,WC 在激光熔池中的接触几率增大,容易聚集长大而不会分解成更多的游离 C,相应地 Laves 相含量并不会发生明显改变。5%TiN 熔覆层中可见 TiN 和碳化物,而 Laves 相较少,这主要与 TiN 的加入有助于抑制 Laves 相形成有关,进一步增加 TiN 含量至 10%,熔覆层中主要以 TiN 和碳化物为主, Laves 相更少。采用二值化处理的方法对熔覆层中的第二相

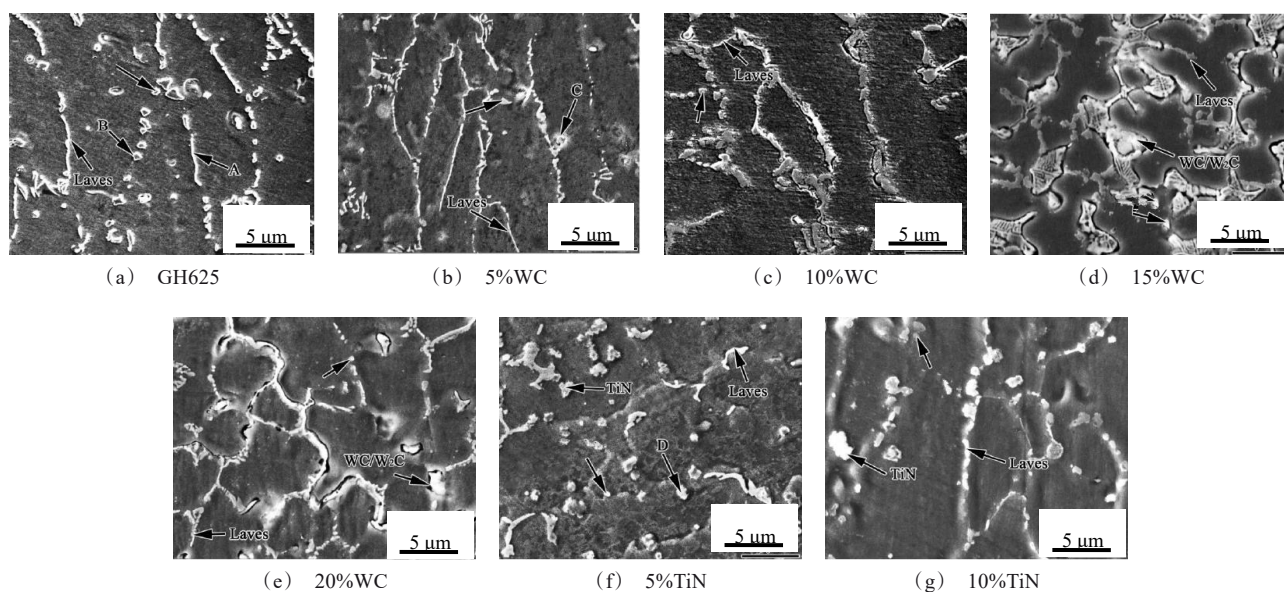


图 4 Q345 钢表面熔覆层的 SEM 形貌

Fig. 4 SEM morphology of cladding layers on Q345 steel surface

进行统计分析(20个视场平均值)<sup>[12]</sup>,GH625中第二相面积分数约为4.59%;5%WC、10%WC、15%WC和15%WC熔覆层中第二相面积分数分别为3.69%、3.87%、2.03%和2.82%,5%Ti和10%TiN熔覆层中

第二相面积分数分别为1.79%和1.54%;可见在GH625中加入WC或TiN后可以抑制熔覆层中第二相的形成。

表3 图4中对应位置的能谱分析结果

Tab. 3 Energy spectrum analysis of corresponding position in Fig.4

区域	元素质量分数/%									
	C	Mn	Cr	Mo	Ni	Nb	Fe	N	W	Ti
位置A	1.37	2.10	18.38	10.61	40.43	22.57	4.54	—	—	—
位置B	18.63	1.04	34.59	4.27	15.24	24.99	1.24	—	—	—
位置C	22.32	0.42	2.26	0.63	3.53	1.48	0.95	—	68.41	—
位置D	0.95	0.33	0.81	0.05	2.42	1.34	0.58	44.46	—	49.06

## 2.2 腐蚀和耐磨性能

图5为Q345钢与表面熔覆层的阳极极化曲线,表4为极化曲线拟合得到的电化学参数。Q345钢的腐蚀电位和腐蚀电流密度分别为 $-1.056\text{V}$ 和 $25.32\times 10^{-5}\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$ ,GH625熔覆层的腐蚀电位和腐蚀电流密度分别为 $-0.983\text{V}$ 和 $5.559\times 10^{-5}\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$ ;在熔覆层中加入WC或TiN后,熔覆层的腐蚀电位都发生了正向移动,腐蚀电流密度减小,腐蚀电位从大至小顺序为:15%WC>10%WC>20%WC>5%WC>5%TiN>10%TiN>GH625>Q345,腐蚀电流密度从小至大顺序为15%WC<10%WC<20%WC<5%WC<5%TiN<10%TiN>GH625<Q345。腐蚀电位和腐蚀电

流密度分别是热力学参数和动力学参数,可分别表征材料的腐蚀倾向和腐蚀速率,腐蚀电位越正腐蚀倾向越小、腐蚀电流密度越大腐蚀速率越快<sup>[13-14]</sup>,由此可见,Wc熔覆层和TiN熔覆层的耐腐蚀性能都优于Q345钢和GH625熔覆层,且15%WC熔覆层的耐腐蚀性能最好。究其原因,这主要与WC或者TiN的加入可以抑制熔覆层中有害Laves相的析出有关<sup>[15]</sup>,但是过多的WC(20%WC)或者TiN(10%TiN)的加入会在熔覆层中产生尺寸较大的块状WC/W<sub>2</sub>C相或更多的与GH625润湿性较差的TiN<sup>[16]</sup>,熔覆层的耐腐蚀性能会有所降低。

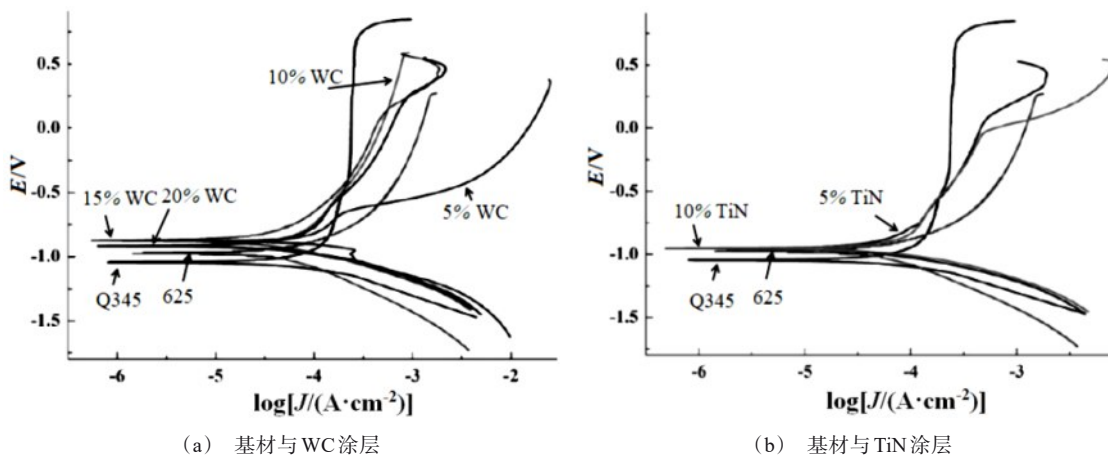


图5 Q345钢与表面熔覆层的阳极极化曲线

Fig.5 Anodic polarization curves of Q345 steel and surface cladding layers

图6为Q345钢与表面熔覆层的摩擦系数曲线。在磨合阶段,Q345钢和熔覆层试样的摩擦数曲线都存在不同程度的波动,而在磨损时间达到15 min以

上时,各试样才逐渐进入稳定磨损阶段;Q345钢和GH625熔覆层试样的摩擦系数分别稳定在0.52和0.63,Wc熔覆层试样的摩擦系数均值都相对Q345

表 4 Q345 钢与表面熔覆层的电化学参数

Tab.4 Electrochemical parameters of Q345 steel and surface cladding layers

试样	Q345	GH625	5%WC	10%WC	15%WC	20%WC	5%TiN	10%TiN
$E_{\text{corr}}/\text{V}$	-1.056	-0.983	-0.938	-0.925	-0.869	-0.927	-0.951	-0.963
$J/(10^{-5} \text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$	25.322	5.559	4.857	4.028	2.945	4.624	4.920	5.372

钢较高且更为稳定, WC 含量为 5%、10%、15% 和 20% 时对应熔覆层试样的摩擦系数均值分别为 0.69、0.79、0.53 和 0.74。从 TiN 熔覆层摩擦系数曲

线可见, 5%TiN 和 10%TiN 熔覆层的摩擦系数均值分别为 0.50 和 0.64, 且摩擦系数曲线相对 Q345 钢和 GH625 熔覆层更加稳定。

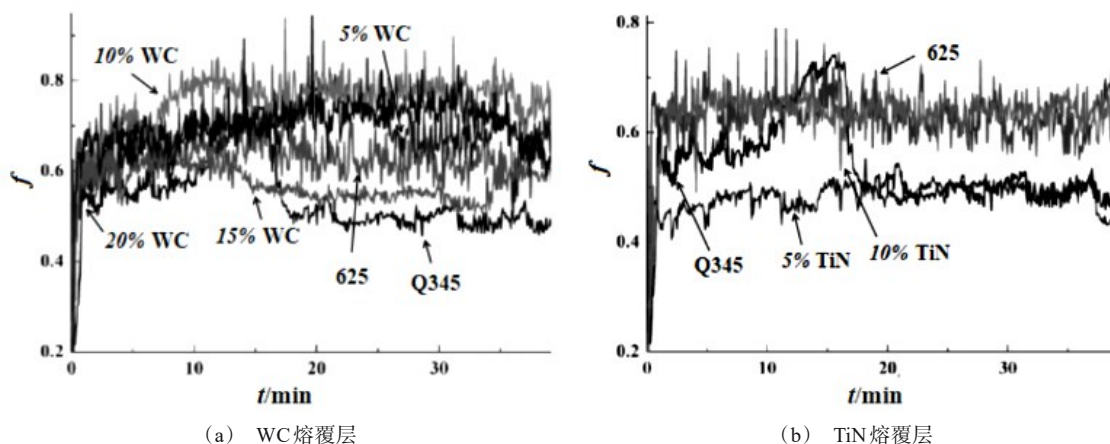


图 6 Q345 钢与表面熔覆层的摩擦系数曲线

Fig. 6 Friction coefficient curves of Q345 steel and surface cladding layers

图 7 为 Q345 钢与表面熔覆层的磨损失重。Q345 钢和 GH625 熔覆层的磨损失重分别为 58.9 mg 和 31.8 mg, 可见, GH625 熔覆层的耐磨性能相对 Q345 钢有明显提高; 添加不同含量 WC 后, 熔覆层的磨损失重相较 Q345 钢和 GH625 熔覆层都有明显减小, 磨损失重从小至大顺序为: 15%WC < 20%WC < 10%WC < 5%WC < GH625 < Q345, 这主要是因为添加 WC 的熔覆层中有更多的硬质相, 可以更好地抵抗磨损<sup>[17-18]</sup>, 但是如果 WC 添加量过大, 熔覆层中未溶 WC 的增多以及尺寸更大的块状 WC/W<sub>2</sub>C 相的存在会增加第二相脱落几率, 相应地磨损失重反而增大; 5%TiN 和 10%TiN 熔覆层的磨损失重也明显小于 Q345 钢和 GH625 熔覆层, 且磨损失重从小至大顺序为: 5%TiN < 10%TiN < GH625 < Q345, 熔覆层中 TiN 和碳化物的存在以及更少的 Laves 相, 会使得熔覆层耐磨性优于 Q345 钢和 GH625 熔覆层, 但是过多的 TiN 会增加熔覆层中第二相脱落几率<sup>[19]</sup>, 相应地磨损失重会有所增大。

图 8 为 Q345 钢与表面熔覆层的磨损形貌。

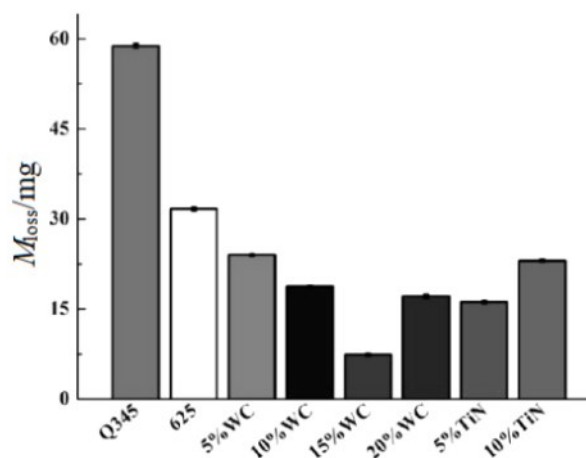


图 7 Q345 钢与表面熔覆层的磨损失重

Fig. 7 Wear weight losses of Q345 steel and surface cladding layers

Q345 钢表面可见较深的犁沟, GH625 熔覆层表面可见颗粒犁削产生的犁沟、局部磨损变形产生的剥落碎片和边缘处裂纹, 磨损机制为黏着磨损+少量磨粒磨损; 5%WC 和 10%WC 熔覆层的磨损形貌中仍然可见犁沟和剥落碎片, 且犁沟相对 Q345 钢和



GH625 熔覆层表面更浅,局部存在堆积现象,磨损机制为黏着磨损+轻微磨粒磨损;15%WC 熔覆层表面仅可见较浅犁沟和剥落碎片,磨损程度相较其他熔覆层较轻,磨损机制为黏着磨损+轻微磨粒磨损;20%WC 熔覆层表面除可见较浅犁沟和剥落碎片外,还可见磨粒磨损产生的局部裂纹,磨损机制为黏

着磨损+严重磨粒磨损。5%TiN 熔覆层表面可见较浅的犁沟和剥落碎片(磨粒磨损为主),10%TiN 熔覆层中还可可见塑性变形产生的堆积现象(黏着磨损为主),耐磨性能相对 5%TiN 熔覆层较差<sup>[20]</sup>。Q345 钢与表面熔覆层的磨损形貌观察结果与图 7 的磨损失重测试结果相吻合。

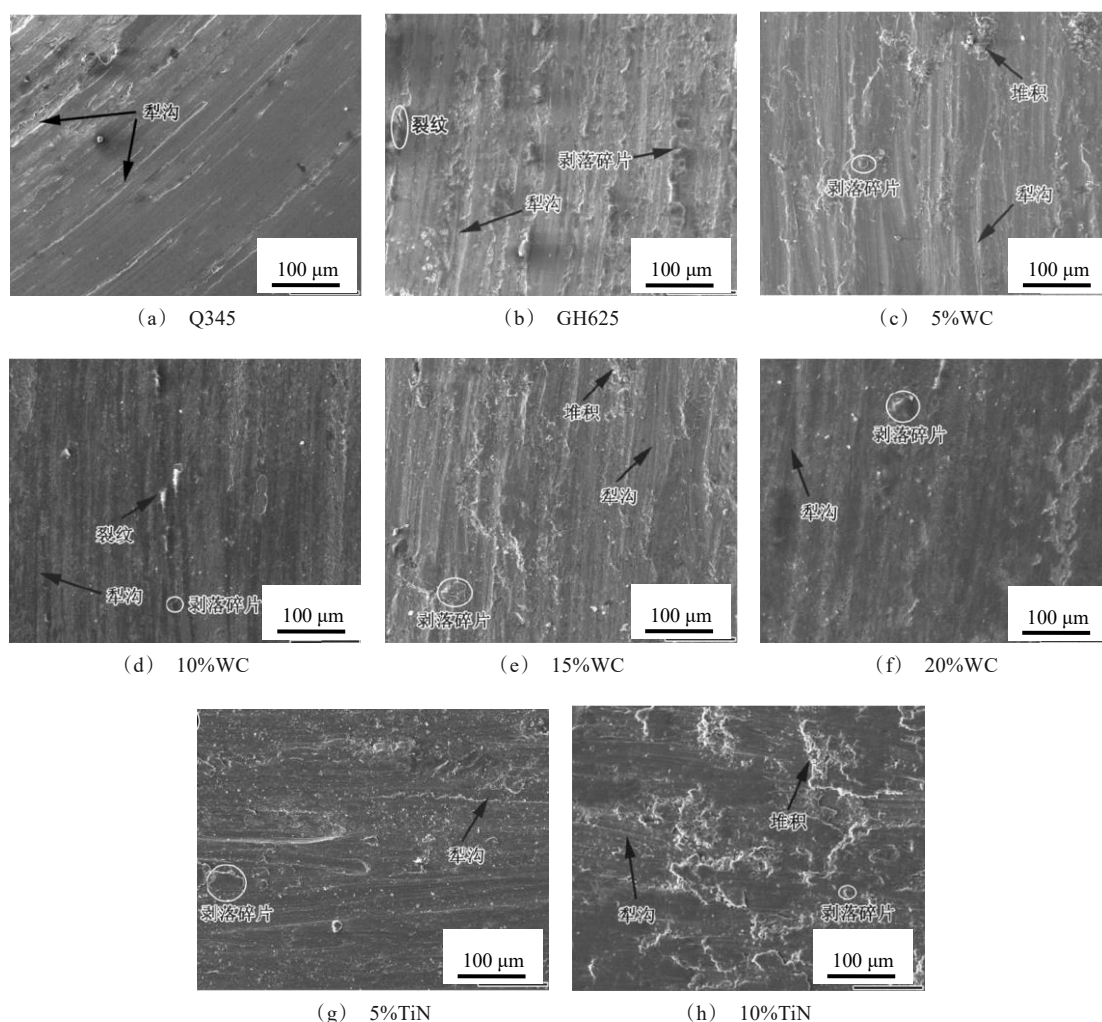


图8 Q345钢与表面熔覆层的磨损形貌

Fig. 8 Wear morphologies of Q345 steel and surface cladding layers

### 3 结论

(1) GH625 熔覆层的物相主要为  $\gamma$ -Ni、FeNi<sub>3</sub>、M<sub>23</sub>C<sub>6</sub> 和 NbC; 添加 10%WC 和 15%WC 熔覆层中还出现了 WC、W<sub>2</sub>C 和 M<sub>6</sub>C 相; 添加 5%TiN 和 10%TiN 熔覆层新出现了 TiN 相。

(2) GH625 中第二相面积分数约为 4.59%, 加入

WC 或 TiN 后可以抑制熔覆层中第二相的形成, 长条状 Laves 相明显减少; 5%WC、10%WC、15%WC、15%WC、5%Ti 和 10%TiN 熔覆层中第二相面积分数分别为 3.69%、3.87%、2.03%、2.82%、1.79% 和 1.54%。

(3) 熔覆层试样的腐蚀电位修相较 Q345 钢发生正向移动, 腐蚀电流密度减小; WC 熔覆层和 TiN 熔

覆层的耐腐蚀性能都优于 Q345 钢和 GH625 熔覆层,且 15%WC 熔覆层的耐腐蚀性能最好。WC 熔覆层的磨损失重较 Q345 钢和 GH625 熔覆层都有明显减小,磨损失重从小至大顺序为:15%WC<5%TiN<20%WC<10%WC<10%TiN<5%WC<GH625<Q345。

### 参考文献

- [1] 刘雨. 西安曲江新区观光轻轨工程防腐涂装质量控制[J]. 现代涂料与涂装, 2015, 18(2): 45-46.
- [2] 井培尧, 王海军, 陈文刚, 等. 激光熔覆镍基碳化钨涂层的研究进展[J]. 功能材料, 2021, 52(4): 4083-4089.
- [3] 平学龙, 符寒光, 孙淑婷. 激光熔覆制备硬质颗粒增强镍基合金复合涂层的研究进展[J]. 材料导报, 2019, 33(9): 1535-1540.
- [4] 李艳鹏, 温海骏. In625 镍基合金粉末激光熔覆参数研究[J]. 粉末冶金技术, 2021, 39(2): 153-158.
- [5] 曹青, 蔡志海, 秦航, 等. WC 增强镍基合金激光熔覆层性能及其在刮板输送机中部槽上的应用[J]. 应用激光, 2018, 38(4): 522-526.
- [6] 孔琳, 刘品潇, 孔斌. A3 钢表面化学镀 Ni-P/Ni-Mo-P 双层镀层[J]. 电镀与精饰, 2021, 43(1): 25-30.
- [7] Zhao Y C, Du H H. Effect of laser scanning speed on the wear behavior of nano-SiC- modified Fe/WC composite coatings by laser remelting[J]. Coatings, 2018, 8(7): 241-241.
- [8] 陈子豪, 孙文磊, 黄勇, 等. 镍基高温合金激光熔覆涂层组织及性能研究[J]. 激光技术, 2021, 45(4): 441-447.
- [9] Gao Y B, Ding Y T, Meng B, et al. Influence of  $\delta$  phase on the microstructure and properties of Inconel625 superalloy tubes[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2019, 48(4): 1079-1086.
- [10] 朱艳青. 车轴钢表面激光熔覆铁基合金涂层研究[J]. 电镀与精饰, 2019, 41(2): 17-22.
- [11] Song X L, Lei J B, Xie J C, et al. Microstructure and electrochemical corrosion properties of nickel-plated carbon nanotubes composite Inconel718 alloy coatings by laser melting deposition[J]. Optics & Laser Technology, 2019, 119: 105593-105601.
- [12] Hu Y, Lin X, Li Y, et al. Influence of heat treatments on the microstructure and mechanical properties of Inconel625 fabricated by directed energy deposition[J]. Materials Science and Engineering A, 2021, 817(3): 141309-141316.
- [13] Iha B, Du B, Vas B, et al. Effect of Ti addition on microstructure and corrosion properties of laser cladded WC-Co/NiCrBSi(Ti) coatings[J]. Applied Surface Science, 2020, 504(10): 144349-144349.
- [14] 韩成府, 许培鑫, 马伟伟, 等. H13 钢激光熔覆 Ni60A/WC 复合涂层的硬度及耐磨性研究[J]. 材料保护, 2021, 54(12): 90-96.
- [15] 江吉彬, 程圆, 黄旭, 等. 45 钢表面激光熔覆 WC 增强 Ni 基涂层性能[J]. 应用激光, 2019, 39(1): 24-34.
- [16] Guo L, Zheng H, Liu S, Li Y, et al. Formation quality optimization and corrosion performance of Inconel625 weld overlay using hot wire pulsed TIG[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2016, 45(9): 2219-2226.
- [17] 姚知深, 牛宗伟, 刘斌, 等. 超声振动对 65 钢电解磷化膜表面形貌与耐蚀性的影响[J]. 电镀与精饰, 2019, 41(9): 24-28.
- [18] 曹四龙, 王凌倩, 周健松. 激光熔覆 NiCrMo 和 NiCrBSi 涂层的微观组织及摩擦学性能研究[J]. 材料保护, 2021, 54(3): 1-8, 33.
- [19] 疏达, 崔祥祥, 李铸国, 等. 纳米 WC 增强 Ni 基涂层组织及摩擦磨损性能[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(21): 179-187.
- [20] Lee H J, Kim H K, Hong H U, et al. Influence of the focus offset on the defects, microstructure, and mechanical properties of an Inconel 718 superalloy fabricated by electron beam additive manufacturing[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 781: 842-856.