

# 等离子弧堆焊镍基球形碳化钨涂层摩擦磨损研究

李淑涛<sup>1</sup>, 刘珊珊<sup>2</sup>, 陈海燕<sup>3</sup>, 董丽华<sup>3</sup>, 尹衍升<sup>3</sup>

(1.中海油能源发展装备技术有限公司, 天津 300452; 2.上海应用技术大学, 上海 201418;  
3.上海海事大学, 上海 201306)

**摘要:** 目的 采用等离子转移弧堆焊技术制备镍基球形碳化钨复合涂层, 研究碳化钨含量对复合涂层摩擦磨损性能的影响, 以用于实际生产开发。方法 碳化钨质量分数分别为 20%、30%、50%、60%的镍基混合粉末通过等离子堆焊方法制备成复合涂层, 并采用 Bruker 公司生产的万能摩擦磨损试验机对镍基碳化钨复合涂层的侧面进行摩擦磨损性能测试。对各组涂层的表面形貌、摩擦系数、划痕横截面积及磨损面的微观形貌进行对比分析, 探究碳化钨的含量对复合涂层摩擦磨损性能的影响。结果 等离子转移弧堆焊镍基球形碳化钨复合涂层的耐磨性能随着碳化钨含量的增大而增大, 同时近熔合区基体的耐磨性能也不断提高。当碳化钨质量分数小于 50%时, 主要发生的是粘着磨损和氧化磨损; 当碳化钨质量分数大于 50%时, 主要发生的是粘着磨损和磨料磨损。结论 由于碳化钨的存在以及增强相的不断生成, 随着碳化钨含量的增大, 复合涂层的磨损性能不断提高。出于性能和成本考虑, 当碳化钨质量分数为 50%时更适合实际应用。

**关键词:** 等离子转移弧堆焊; 镍基; 球形碳化钨; 摩擦磨损

**中图分类号:** TG174.44 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)02-0103-08

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.02.017

## Wear Resistance of PTAW Deposited Ni-based WC Composite Coating

LI Shu-tao<sup>1</sup>, LIU Shan-shan<sup>2</sup>, CHEN Hai-yan<sup>3</sup>, DONG Li-hua<sup>3</sup>, YIN Yan-sheng<sup>3</sup>

(1.Energy Development Equipment Technology Co. Ltd, CNOOC, Tianjin 300452, China;  
2.Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China; 3.Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

**ABSTRACT:** The work aims to study the influence of different WC contents on the wear resistance of Ni-based WC composite coatings deposited by the plasma transfer arc, so as to expand the use in practice. Ni-based composite coatings were sintered by plasma transferred arc welding with 20%, 30%, 50% and 60% content. Cross-sectional friction wear tests were conducted with multifunctional friction and wear tester made by Bruker corporation. By observing morphology, friction coefficient, cross-sectional area and microstructure of wear track, the influence of WC content on the wear resistance of composite coating was investigated. The results indicated that the wear resistance of Ni-based WC composite coatings deposited by the plasma transfer arc welding rose while the content of WC increased; meanwhile the wear resistance of the base near the fusion zone was also improved. When the content of WC was less than 50%, adhesive wear and oxidative wear mainly existed. When it exceeded

收稿日期: 2017-08-02; 修訂日期: 2017-09-20

Received: 2017-08-02; Revised: 2017-09-20

基金项目: 海洋公益性行业科研专项经费项目 (No. 201405013-3)

Fund: The Ocean Public Science and Technology Research Fun Projects of China (No.201405013-3)

作者简介: 李淑涛 (1980—), 男, 机械工程师, 主要研究方向为工业钻井工具的设计。

Biography: LI Shu-tao (1980—), Male, Mechanical engineer, Research focus: the design of the drilling tools.

通讯作者: 陈海燕 (1968—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为金属材料的腐蚀与防护。

Corresponding author: CHEN Hai-yan (1968—), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: metal material corrosion and protection.

50%， adhesive wear and abrasive wear mainly happened. Due to the existence of WC and the continuous generation of wild phase, the wear resistance of composite coating will be continuously improved with the enhancement of the WC content. For the sake of performance and cost, WC of 50wt.% is more suitable for practical applications.

**KEY WORDS:** PTAW; Ni-based; spherical tungsten carbide; frictional wear

21世纪，人类向海洋的探索更深了一步，特别是一些高H<sub>2</sub>S和CO<sub>2</sub>含量的区域已经成为油气勘探的重点。钢材广泛地应用于制造海洋开采的大型机械设备和工程结构，然而在这些极端环境下，传统钢铁材料不具备良好的耐损蚀性能，较低的使用寿命和频繁的更换消耗了大量的人力和物力，制约了深海开发。表面处理可以改变材料的微观形貌、成分以及物相组成，提高材料的耐损蚀性能<sup>[1-3]</sup>。等离子转移弧堆焊技术作为表面强化技术的一个分支，具有稀释率低、熔深浅、冶金结合性能良好和熔覆率高等特点，广泛应用于耐磨堆焊领域<sup>[4,5]</sup>。

镍基球形碳化钨涂层(Ni-WC)的组织结构均匀、致密性好、综合力学性能优异，目前已经广泛应用于海洋石油工程、机械加工制造等高强度磨损环境中<sup>[6-8]</sup>。尤其近年来，Ni-WC复合涂层越来越得到人们的重视。以Ni、Cr为主的Ni基自熔性合金，具有耐磨损、耐腐蚀、耐高温氧化、与基体润湿性好和结合强度高等特性，广泛应用在机械的表面防护和制造与再修复等领域<sup>[9,10]</sup>。碳化钨(WC)作为提高基体耐磨损性能的增强相，其含量会对Ni-WC涂层的硬度、断裂韧性、耐磨性等力学性能产生一定的影响<sup>[10]</sup>。因此，找到合适的WC引入量，能够降低生产成本，提高材料性能和服役寿命，这对于海洋工程领域具有重要的研究价值和经济价值<sup>[12-14]</sup>。

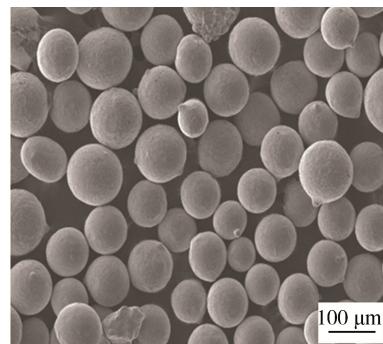
鉴于此，本文以由等离子转移弧堆焊工艺制成的镍基球形碳化钨复合涂层为研究对象，考虑到碳化钨沉底现象，采用一种新的测试方法，对样品的侧面进行摩擦磨损性能测试，即对不同WC含量的复合涂层的侧面摩擦系数变化、磨损轨迹截面变化、磨损面的微观形貌进行对比研究，并分析探讨了不同区域的摩擦磨损机理。

## 1 试验

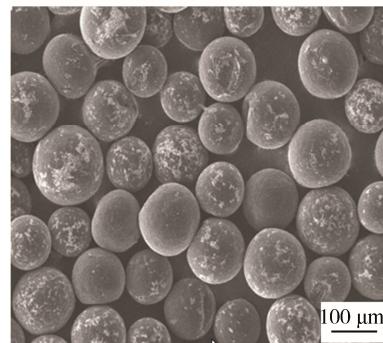
### 1.1 试验材料和工艺参数

本试验采用等离子转移弧堆焊工艺(PTAW)在304L不锈钢(100 mm×100 mm×15 mm)上堆焊镍基球形碳化钨粉。试验粉末选取了赫格纳斯公司生产的镍粉(约111 μm)和球形碳化钨(约150 μm)，其成分如表1所示，粉末形貌如图1。原始粉末的命名及成分见表2，按表2称取原始粉末并充分混合。按

照表3中的堆焊工艺参数，制成4组镍基球形碳化钨堆焊层。



a 镍基合金粉末



b 球形碳化钨

图1 堆焊粉末的扫描电镜图

Fig.1 SEM morphologies of powders: a) Ni-based alloy powders, b) spherical WC

表1 实验材料的化学成分

Tab.1 Chemical composition of the materials used

Materials	Chemical composition wt.%
Ni powders	Fe 12.3, Cr 15.85, C 0.46, B 3.11, Si 4.45, Ni Balance
304LStainless steel	C≤0.03, Si≤1.0, Mn≤2.0, Cr 18.0~20.0, Ni 8.0~12.0, S≤0.03, P≤0.035
WC powders	C 3.9~4.1, W Balance

表2 复合粉末成分及其命名方式

Tab.2 Composition and nomenclature of composite powder

Sample	WC	Ni	wt.%
Ni-20WC	20	80	
Ni-30WC	30	70	
Ni-50WC	50	50	
Ni-60WC	60	40	

表 3 等离子转移弧堆焊工艺参数  
Tab.3 Technological parameters for PTAW

Names	Parameters
Speed/(mm·min <sup>-1</sup> )	120
Feed rate/(g·min <sup>-1</sup> )	25
Vibration extent/mm	20
Voltage/V	30
Current/A	150

使用王水 (HCl:HNO<sub>3</sub>=3:1) 作为腐蚀剂, 对堆焊层金相试样进行腐蚀, 腐蚀时间 30 s, 腐蚀后的金相试样用去离子水洗净后, 烘干。使用 X'Pert-Pro MPD 多功能 X 射线衍射仪 (XRD)、JSM 7500F 型扫描电镜 (SEM) 以及能谱分析仪 (EDS) 对堆焊层的组织和物相进行测试和分析。

## 1.2 摩擦磨损试验

将 4 组涂覆镍基球形碳化钨涂层的样品切成 15 mm×15 mm×5 mm 的样品, 以 15 mm×5 mm 的侧面作为摩擦面。试验前先将 4 组实验样品的摩擦面用砂纸打磨光滑, 随后在磨抛机上用红丝绒布进行抛光。采用 Bruker 公司生产的摩擦磨损综合试验机, 对 4 组不同 WC 含量的镍基球形碳化钨复合涂层进行线性

往复摩擦试验。由于球形碳化钨的硬度很高, 所以选用 WC 磨球与试样组成摩擦副, WC 磨球的直径为 8 mm。该试验在室温、标准大气压下进行, 载荷 2 kg, 时间 12 min, 频率 4 Hz。试验结束后, 将样品表面进行超声波清洗, 采用 Bruker 公司生产的轮廓仪对样品磨损后的表面进行分析, 计算其磨损轨迹横截面面积。采用 JSM 7500F 型扫描电子显微镜对样品磨损后的表面形貌进行观测, 使用能谱仪分析其表面的元素组成。

## 2 结果与分析

### 2.1 显微组织和物相分析

图 2 为等离子弧堆焊涂层的横截面组织形貌图。可以看出, 由于增强颗粒的密度 (W<sub>2</sub>C 为 17.2 g/cm<sup>3</sup>, WC 为 15.7 g/cm<sup>3</sup>) 远大于镍基合金的密度 (约为 8.4 g/cm<sup>3</sup>), 所以球形碳化钨在堆焊涂层底部, 造成了涂层中颗粒分布不均匀, 出现了镍基层和碳化钨的富集层。当碳化钨的质量分数超过 50% 时, 即在样品 Ni-50WC、Ni-60WC 涂层中, WC 的分布较为均匀, 涂层的顶部和底部碳化钨分布差别不大, 这意味着此种情况下, 堆焊涂层不需要除去顶层镍基层区就可以拥有稳定并优良的耐摩擦磨损性能。

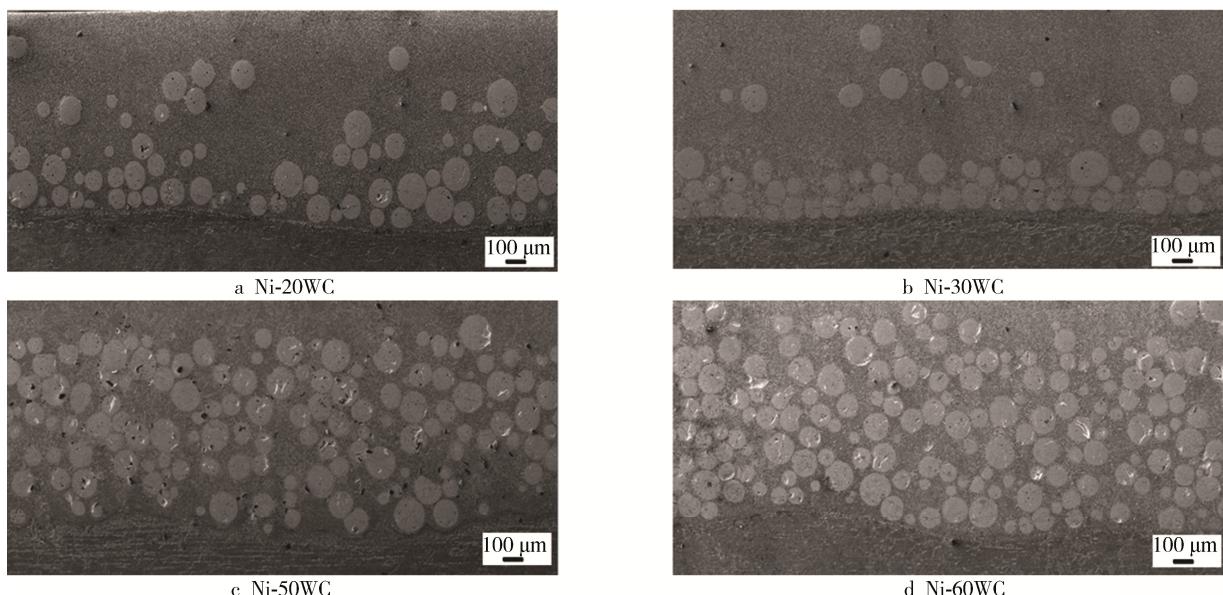


图 2 等离子弧堆焊涂层的横截面组织形貌  
Fig.2 Cross-section microstructure and morphology of PTAW coating

对涂层进行物相分析, 由图 3 可以看出, Ni-30WC 表面生成了  $\gamma$ -(Ni,Fe) 共晶相、Fe<sub>2</sub>Si、Cr<sub>1.12</sub>Ni<sub>2.88</sub> 固溶体以及硼化物 Ni<sub>2</sub>B<sub>3</sub>; 随着 WC 含量的增大, Ni-60WC 表面生成了碳化物 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>、Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub>, 这些碳化物具有较高的硬度<sup>[15]</sup>。实际生产中, 少量的 304L 钢熔化后与粉末形成熔池, 一些元素 (如 Fe、Cr、C) 会与粉末

发生结合, 生成碳化物和硼化物。这些新生成的增强相和化合物均匀分布在等离子堆焊涂层中, 有助于优化涂层的耐磨损性能和耐腐蚀能力<sup>[16]</sup>。当碳化钨含量增大时 (如 Ni-50WC、Ni-60WC), 等离子堆焊涂层中的碳化钨引入量明显增多, 硬质相的峰的面积变大, 如 WC、W<sub>2</sub>C。另外, 由于碳化钨会微熔于镍基

合金，随着碳化钨引入量的增大，熔化的碳化钨量越来越大，与镍基生成如 $\gamma$ -(Ni,Fe)/W等硬质相<sup>[15,16]</sup>。由以上分析可知，样品中相的种类大致一样，但随着球形碳化钨引入量的增大，各个相的空间分布、质量分数有很大区别。

对碳化钨的富集层和镍基层的组织成分进行分

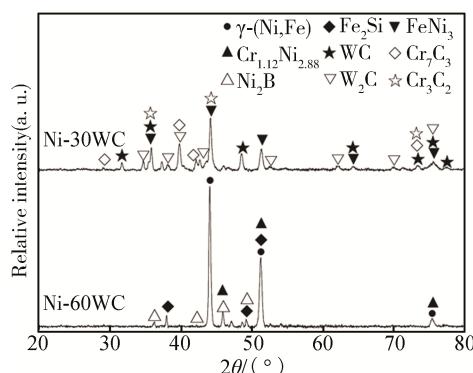


图3 堆焊涂层的XRD图谱  
Fig.3 XRD spectra of PTAW coatings

析，结果如图4。可以看出，随着碳化钨含量的增加，出现树枝状组织（图4b中1），进一步对该组织进行EDS分析发现（图4g），其主要由W、Fe、Ni、C、Cr等元素构成，结合XRD分析结果可以确认这种组织为 $\gamma$ -(Ni,Fe)/W共晶相和 $\gamma$ -(Ni,Fe)/Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub>共晶相。这种枝晶间组织随着碳化钨的增加逐渐减少，较多含量碳化钨堆焊层中出现了大块状和长条状硬质相（图4c中3），通过分析发现，这些块状组织主要为含碳量较多的碳化物，根据XRD分析推断为Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>、W<sub>2</sub>C、WC、Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub>。碳含量的增加使得这些金属元素有条件在等离子高温下重新组合成碳化物，在快速冷却的过程中沉积在堆焊层中。这些碳化物的硬度一般都超过1000HV，硬质相明显地提高了涂层的硬度。同样地，在镍基涂层的堆焊层中发现，亮白色区域（图4e中2）为富含W、Ni的碳化物，枝状组织主要为富含W、Ni、Cr的共晶固溶体<sup>[17]</sup>。随着碳化钨含量的增多，碳化物的硬质相逐渐增多，其他新析出的增强相共晶组织也增多，大大提高了涂层的硬度和耐磨损性能。

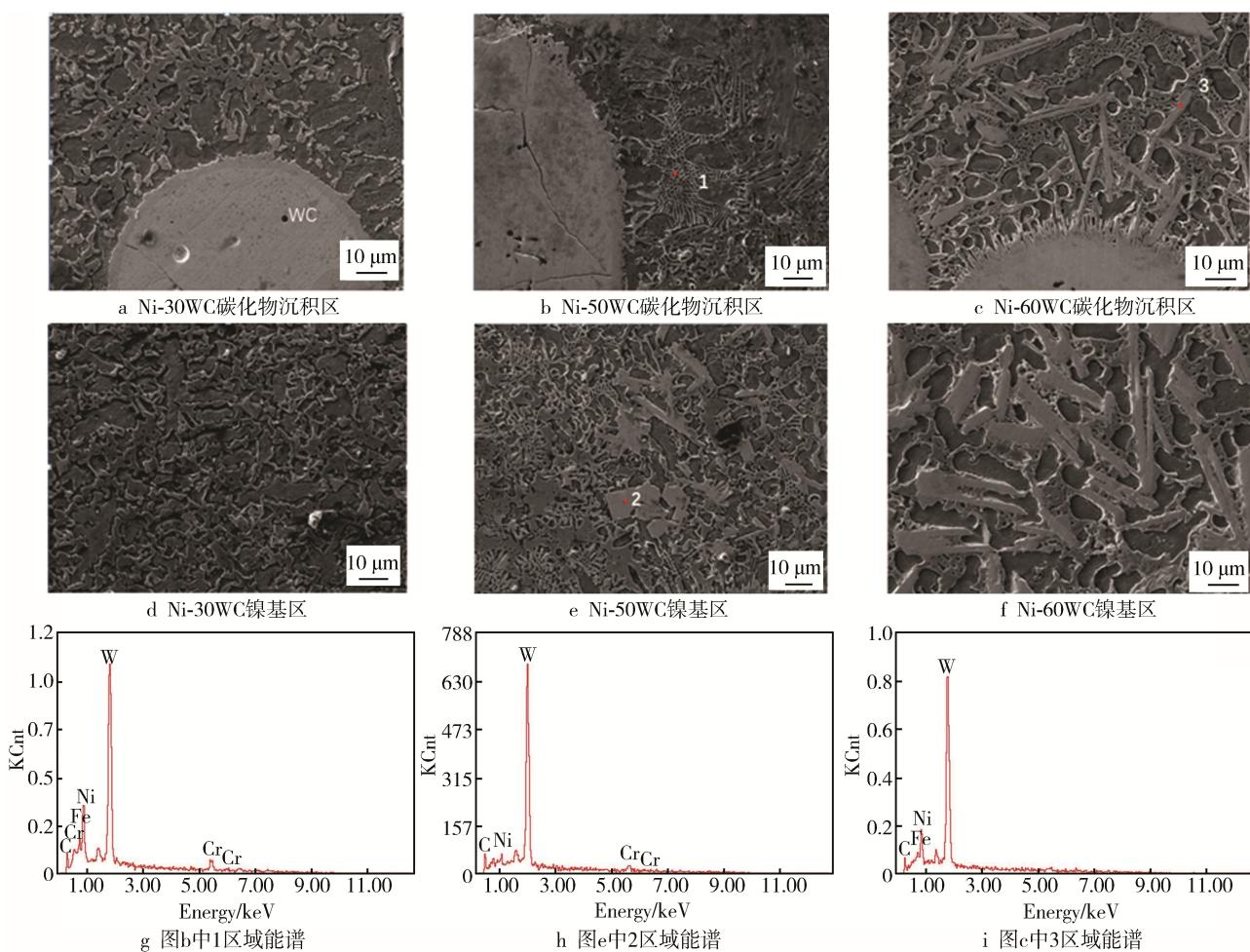


图4 碳化钨增镍基堆焊组织的碳化钨沉积区和镍基区的SEM显微组织及EDS分析  
Fig.4 Microstructure of coatings WC-rich area (a, b, c), Ni-rich area (d, e, f) and EDS spectrum of composite coating (g, h, i)

## 2.2 摩擦系数

图 5 为 4 组不同 WC 含量的镍基球形碳化钨复合涂层的摩擦系数曲线, 为了减少初期磨合阶段的影响, 选取了 4000 s 以后的曲线。从图中可以看出, 摩擦系数的值随着碳化钨引入量的上升而增大, 这是因为在本实验中, 摩擦面为侧面, 摩擦情况较为复杂。由于侧面的组成是基体和涂层, 镍基和铁基的互溶性很好, 当碳化钨较少时, 摩擦发生在铁基、镍基和磨球之间, 表面相对光滑, 摩擦系数较低。随着碳化钨含量的上升, 由于镍基的耐磨损性能弱于碳化钨, 处在表层的镍基剥落, 表面变得粗糙, 摩擦发生在磨球和碳化钨表面之间, 导致了摩擦系数增大。

由于侧面包括基底、碳化钨较多的区域和碳化钨较少的镍基区域, 单条摩擦系数曲线变化明显, 所以将这几条曲线进行比较, 结果发现, Ni-50WC 和 Ni-60WC 堆焊层的摩擦系数曲线均呈水纹波动状。这是因为当碳化钨含量较多时, 表面的镍基含量较少并且镍基体相对较软、易于脱落, 摩擦主要发生在磨球与碳化钨之间, 裸露在外的碳化钨会碎裂和脱离。随着摩擦实验的进行, 磨球会接触新的磨损面, 然后又发生裸露在外的碳化钨的碎裂和脱离, 进入下一个循环<sup>[18]</sup>。这种现象反应在摩擦系数曲线上就形成了这种水纹一样的波动。

当碳化钨含量较少时 (Ni-20WC 和 Ni-30WC), 摩擦主要发生在镍基涂层和磨球之间, 摩擦过程中会产生塑性变形, 并且硬质相在剪切应力的作用下可以移动, 这种变形和移动造成的影响并没有 Ni-50WC 和 Ni-60WC 那么明显, 摩擦系数处于一个相对较稳定的值。

结合以上分析可知, 随着碳化钨含量的增多, 侧面摩擦系数呈增大趋势。磨损机理与堆焊体的侧面组成、涂层中增加的碳化钨、固溶体以及其他硬质相的形成等有明显的关系。

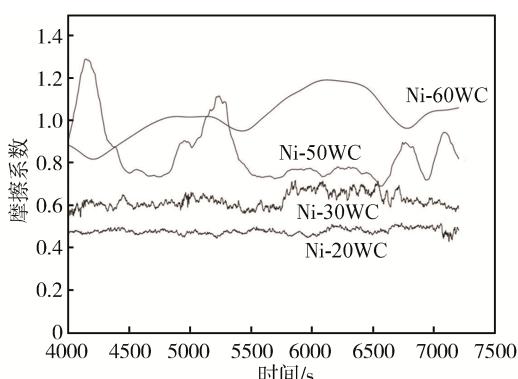


图 5 样品摩擦系数与时间的关系曲线

Fig.5 The relationship curve of frictional coefficient and time with each group of specimens

## 2.3 划痕横截面积分析

图 6 是各组样品磨损后划痕横截面积与距离 (位置 0 位于基体, 距离计算方向为: 沿着基体垂直指向涂层) 的关系曲线图, 从图中可以看出, Ni-20WC 和 Ni-30WC 的划痕横截面积先缓慢减小, 至 WC 富集区时急剧下降, 在 WC 富集区变化不大; 到达镍基层后, 划痕横截面积又急剧变大, 并且 Ni-30WC 划痕面积小于铁基层区。Ni-50WC 和 Ni-60WC 的划痕横截面积从铁基层区至 WC 富集区变化均较缓慢, 至镍基层后急剧增大。造成这种现象的原因是: 碳化钨沉底后, 游离的 W 会与基体中的铁镍结合生成  $\gamma$ -(Ni, Fe)/W 共晶相, 其硬度较大<sup>[19,20]</sup>, 为增强相; 随着碳化钨含量的增大, 生成的增强相变多, 导致涂层耐磨损性能提高, 这也影响到了近熔合区铁基的耐磨性能。

同时, 从图中可以近似得出碳化钨富集区的分布长度, 分别为: Ni-20WC, 80  $\mu\text{m}$ ; Ni-30WC, 466  $\mu\text{m}$ ; Ni-50WC, 1006  $\mu\text{m}$ ; Ni-60WC, 1332  $\mu\text{m}$ 。可以发现, 当碳化钨含量较低时, 熔解掉的碳化钨含量较多; 碳化钨的质量分数从 30% 提高到 50% 时, 耐磨性能变化较大; 而碳化物质量分数在 50%~60% 时则差别不大。有学者研究发现<sup>[21]</sup>, 当碳化钨含量过大时, 可能会造成裂纹和缺陷, 从图中也可以发现, Ni-60WC 的耐磨损性能在碳化钨富集区略小于 Ni-50WC, 但有效的耐磨损层长度最大。

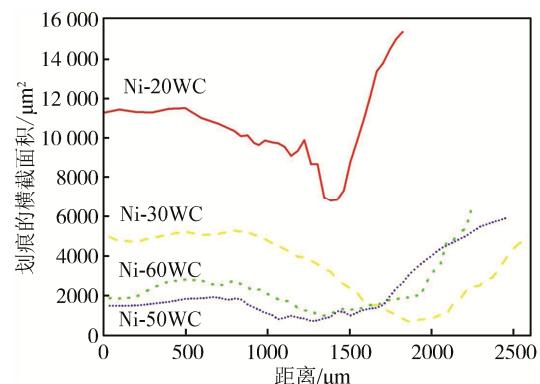


图 6 各组样品划痕横截面积随距离变化关系曲线  
Fig.6 The relationship curve of cross-sectional area of the wear track and distance with each group of specimens

## 2.4 磨损面的微观形貌

图 7 是各组样品在 2 kg 载荷和 4 Hz 频率下, 经 120 min 磨损后磨损表面的微观形貌图。从图中可以看出, 各组样品经摩擦后, 表面均有明显的磨损情况, 且划痕越来越明显, 这表明了摩擦磨损机理发生了转变。其中 Ni-20WC 样品在镍基区和基体区 (含较少 WC 区域) 剥落均较严重, 出现很多较大的剥离区域; Ni-30WC 样品在基体区剥落现象不明显; Ni-50WC 和 Ni-60WC 在基体区则几乎不发生剥落。另外, Ni-20WC 和 Ni-30WC 的划痕两头宽、中间窄, Ni-50WC

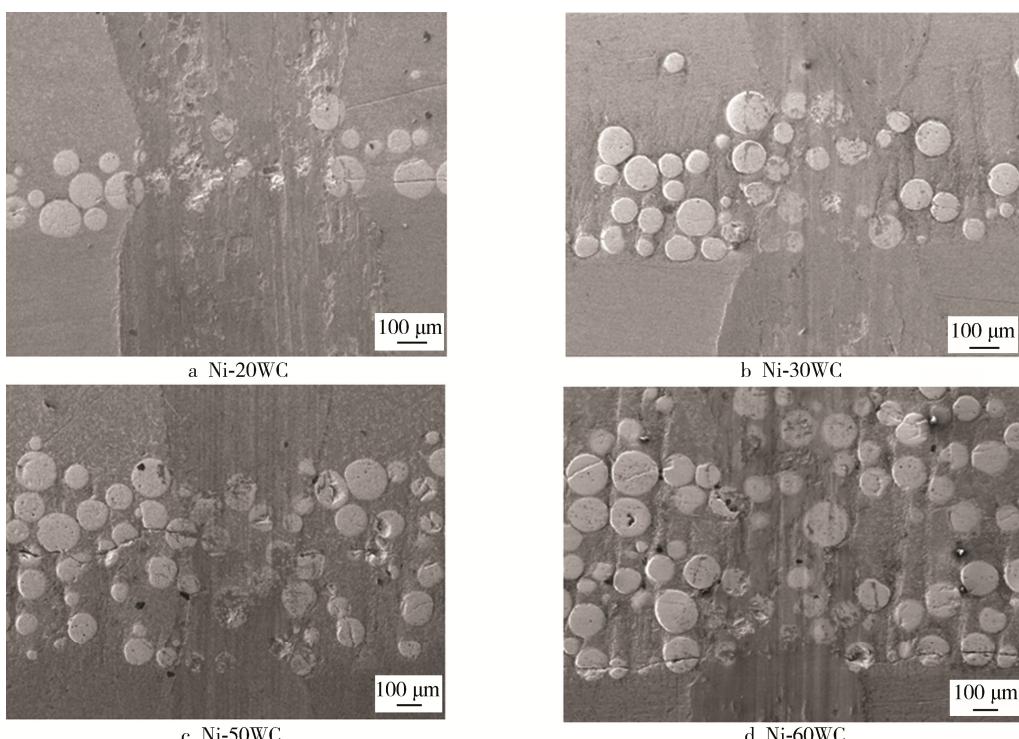


图7 样品磨损面的微观形貌  
Fig.7 The microscopy of abrasive surface

和 Ni-60WC 的划痕则是上端较中部和底部宽，这和划痕横截面积分析结果一致。

## 2.5 磨损机理分析

图8是各组样品中碳化钨富集区的微观形貌图。从图中可以看出，Ni-20WC 和 Ni-30WC 样品中碳化钨表面存在附着物，并有明显的片状剥落坑。等离子

堆焊涂层为层状结构，层间缺陷使得层间结合力减小，微裂纹在摩擦过程中沿层间扩散，造成涂层的片状剥离。由 EDS 能谱分析附着物，其元素组成为 W、C、Fe、Ni、O，可以推测其主要由镍和铁的氧化物构成。Ni-20WC 和 Ni-30WC 样品在此实验条件下发生的摩擦行为包括了氧化磨损和粘着磨损，磨损主要发生在磨球和镍基之间。

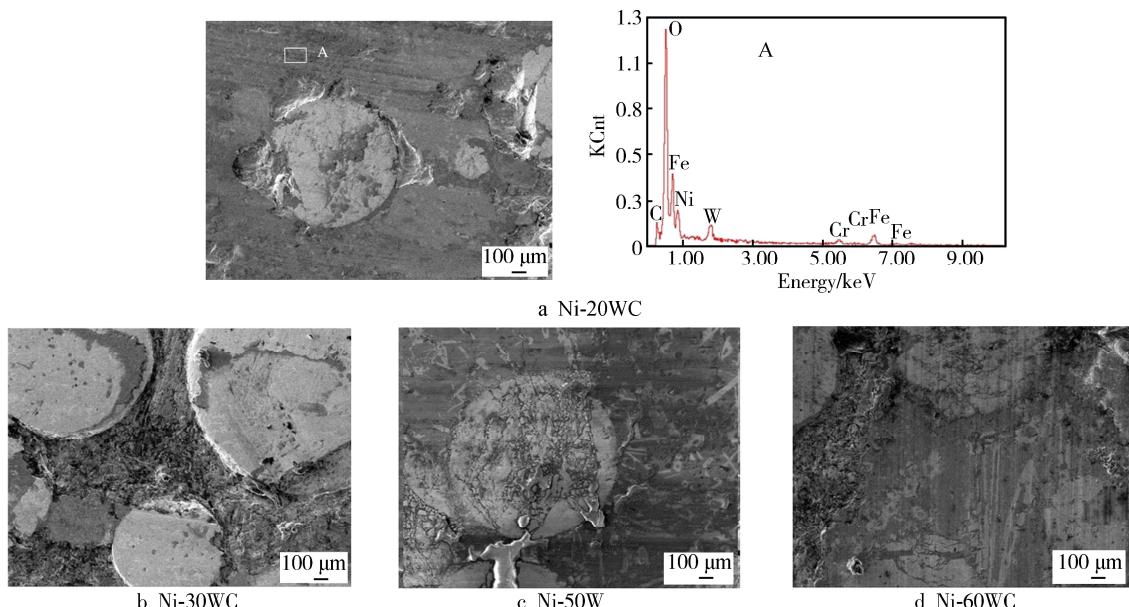


图8 各组样品的碳化钨富集区的 SEM 扫描电镜图和 A 区域能谱分析  
Fig.8 The scanning electronic microscopy of WC particles and the EDS of A area

Ni-50WC 和 Ni-60WC 样品中表面形貌相对完整，但也有明显的划痕（微切削）和犁沟，并且存在树枝状结构（硬质相），这些树枝状结构的主要成分为 W、C、Fe、Ni、Cr，是由  $\gamma$ -(Ni,Fe)/W 和  $\gamma$ -(Ni,Fe)/Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub> 的共晶相组成。固溶强化的树枝晶能够提高涂层的硬度，另外，随着 WC 含量的增加，增强相越来越多，不仅使得镍基碳化钨涂层的摩擦磨损性能得到提高，磨损机理也发生了变化。长时间的摩擦使得增强相碎裂、脱落，脱落的增强相又参与到摩擦过程中，摩擦主要发生在磨球、增强相颗粒与基体之间，形成了三体磨粒磨损。因此，在 WC 含量较高时（质量分数 50% 以上），主要存在磨料磨损和粘着磨损。

### 3 结论

由侧面的摩擦系数的研究可得，随着碳化钨含量的增大，越来越多的碳化钨沉底导致了侧面的不均匀性，摩擦系数呈增大趋势。

2) 由磨损后的划痕横截面积研究可得，等离子转移弧堆焊得到的镍基球形碳化钨涂层，随着碳化钨含量的增大，生成的增强硬质相变多，涂层耐磨性能提高。

3) 由磨损表面的微观形貌图可以得出，镍基球形碳化钨涂层经摩擦磨损后，Ni-20WC 和 Ni-30WC 表面均形成了剥落坑，Ni-50WC 和 Ni-60WC 不存在明显的剥落坑，耐摩擦性能得到提升。

4) 分析各组涂层的摩擦磨损机理可得，当碳化钨质量分数小于 50% 时，主要发生粘着磨损和氧化磨损；当碳化钨质量分数大于 50% 时，主要发生粘着磨损和磨料磨损。产生这一变化的主要原因是随着碳化钨含量的增大，增强相不断生成。

### 参考文献：

- [1] 黄雨舟, 刘伯洋, 董丽华, 等. 镍基球形碳化钨复合涂层在高温高压饱和 H<sub>2</sub>S 溶液中腐蚀行为[J]. 腐蚀与防护, 2014, 35(9): 861.  
HUANG Yu-zhou, LIU Bo-yang, DONG Li-hua, et al. High Temperature and High Pressure Corrosion Behavior of Nickel Based Tungsten Carbide Coating in Saturated H<sub>2</sub>S Aqueous Solution[J]. Corrosion & Protection, 2014, 35(9): 861.
- [2] 陈长风, 姜瑞景, 张国安, 等. 镍基合金管材高温高压 H<sub>2</sub>S/CO<sub>2</sub> 环境中局部腐蚀研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2010, 39(3): 427-432.  
CHEN Chang-feng, JIANG Rui-jing, ZHANG Guo-an, et al. Study on Local Corrosion of Nickel-base Alloy Tube in the Environment of High Temperature and High Pressure H<sub>2</sub>S/CO<sub>2</sub>[J]. Rare Materials and Engineering, 2010, 39(3): 427-432.
- [3] 艾志久, 范钰玮, 赵乾坤. H<sub>2</sub>S 对油气管材的腐蚀及防护研究综述[J]. 表面技术, 2015, 44(9): 108-115.  
AI Zhi-jiu, FAN Yu-wei, ZHAO Qian-kun. Review on H<sub>2</sub>S Corrosion of Oil Gas Tubing and Its Protection[J]. Surface Technology, 2015, 44(9): 108-115.
- [4] 李连颖, 杜晓东, 宋自力, 等. 等离子弧喷焊颗粒增强铁基合金涂层组织的分析[J]. 焊接学报, 2012, 33(9): 41-44.  
LI Lian-ying, DU Xiao-dong, SONG Zi-li, et al. Analysis on Microstructure of Particles Reinforced Fe-based Layers by Plasma Spray Welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2012, 33(9): 41-44.
- [5] 葛言柳, 邓德伟, 鲁俊, 等. 两种 Ni-Cr-B-Si 系合金等离子堆焊层组织结构和显微硬度的研究[J]. 表面技术, 2012, 41(1): 5-8.  
GE Yan-liu, DENG De-wei, LU Jun, et al. Study on Microstructure and Microhardness in PTA Weld Hardfacings of Two Types of Ni-Cr-B-Si Alloys[J]. Surface Technology, 2012, 41(1): 5-8.
- [6] LEUNDA J, SANZ C, SORIANO C. Laser Cladding Strategies for Producing WC Reinforced NiCr Coatings Inside Twin Barrels[J]. Surface and Coatings Technology, 2016, 307: 720-727.
- [7] 邓德伟, 葛言柳, 田鑫, 等. 等离子堆焊球形碳化钨颗粒增强镍基合金堆焊层的组织与性能[J]. 金属热处理, 2012(11): 64-68.  
DENG De-wei, GE Yan-liu, TIAN Xin, et al. Microstructure and Mechanical Properties of Nickel-based Hardfaced Coating Reinforced by Spherical Tungsten Carbides by PTAW[J]. Heat Treatment of Metals, 2012(11): 64-68.
- [8] 张松, 韩维娜, 李杰勋, 等. 等离子堆焊原位合成 WC 增强 Ni 基合金改性层[J]. 沈阳工业大学学报, 2015(3): 268-272.  
ZHANG Song, HAN Wei-na, LI Jie-xun, et al. In-situ Synthesis of WC Reinforced Ni-based Alloy Modified Layer with PTAW[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2015(3): 268-272.
- [9] LIYANAGE T, FISHER G, GERLICH A P. Microstructures and Abrasive Wear Performance of PTAW Deposited Ni-WC Overlays Using Different Ni-alloy Chemistries[J]. Wear, 2012, 274: 345-354.
- [10] 徐海峰, 肖金坤, 张嘎, 等. 热喷涂 NiCrBSi 基耐磨涂层的研究进展[J]. 表面技术, 2016, 45(2): 109-117.  
XU Hai-feng, XIAO Jin-kun, ZHANG Ga, et al. Progress of Thermal Sprayed NiCrBSi Based Wear-resistant Coatings[J]. Surface Technology, 2016, 45(2): 109-117.
- [11] 严凯, 陈长军, 张敏, 等. 增材制造 H13 钢表面熔覆 Ni/WC 涂层组织及性能研究[J]. 应用激光, 2017(2): 175-180.  
YAN Kai, CHEN Chang-jun, ZHANG Min, et al. Laser Cladding Ni/WC Composite on H13 Steel Fabricated by Additive Manufacturing[J]. Applied Laser, 2017(2): 175-180.

- 175-180.
- [12] 陈文, 龙安平, 向锦涛, 等. 超音速火焰喷涂 WC-10Co4Cr 涂层在 NaCl 溶液中的耐腐蚀性能[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014(10): 3373-3378.  
CHEN Wen, LONG An-ping, XIANG Jin-tao, et al. Corrosion-resistance of WC-10Co4Cr HVOF Coating in NaCl Solution[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2014(10): 3373-3378.
- [13] 张红霞, 赵红利, 夏建元, 等. 感应重熔 Ni60/WC 涂层的界面组织与耐磨性研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2011(2): 107-109.  
ZHANG Hong-xia, ZHAO Hong-li, XIA Jian-yuan, et al. Microstructure and Interface Morphology as Well as Wear Behavior of Induction Remelting Ni60/WC Composite Coating[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2011(2): 107-109.
- [14] 吴萍, 姜恩永, 周昌炽, 等. 激光熔覆 Ni/WC 复合涂层的组织和性能[J]. 中国激光, 2003(4): 357-360.  
WU Ping, JIANG En-yong, ZHOU Chang-chi, et al. Microstructure and Properties of Ni/WC Composite Coating Prepared by Laser Cladding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2003(4): 357-360.
- [15] WOLFE T B B. Homogeneity of Metal Matrix Composites Deposited by Plasma Transferred Arc Welding [M] Canada: University of Alberta, 2010: 364-368.
- [16] 李闪, 胡建军, 陈国清, 等. 镍基合金等离子堆焊层的显微组织及摩擦磨损性能 [J]. 机械工程材料, 2013, 37(6): 72-77.
- LI Shan, HU Jian-jun, CHEN Guo-qing, et al. Microstructure and Friction and Wear Properties of Plasma Surfacing Layer of Ni-based Alloy[J]. Material for Mechanical Engineering, 2013, 37(6): 72-77.
- [17] FARAHMAND P, KOVACEVIC R. Corrosion and Wear Behavior of Laser Cladded Ni-WC Coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2015, 276: 121-135.
- [18] BONNY K, BAETS D P, VLEUGELS J, et al. Dry Reciprocating Sliding Friction and Wear Response of WC-Ni Cemented Carbides[J]. Tribology Letters, 2008, 31(3): 199.
- [19] 顾正彬, 李玮, 李延祥. Ni 基 WC 复合喷涂层的超塑性扩散焊接及耐磨性[J]. 金属热处理, 1999(4): 26-29.  
GU Zheng-bin, LI Wei, LI Yan-xiang. Super plastic Diffusion Welding of Ni Based WC Sprayed Coatings and Its Wear Resistance[J]. Heat Treatment of Metals, 1999(4): 26-29.
- [20] MA Qun-shuang, LI Ya-jiang, WANG Juan, et al. Investigation on Cored-eutectic Structure in Ni60/WC Composite Coatings Fabricated by Wide-band Laser Cladding[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 645: 151-157.
- [21] ACKER K V, VANHOYWEGHEN D, PERSOOONS R, et al. Influence of Tungsten Carbide Particle Size and Distribution on the Wear Resistance of Laser Clad WC/Ni Coatings[J]. Wear, 2005, 258(1): 194-202.