

DOI: 10.3901/JME.2014.20.070

# 打壳锤头等离子堆焊镍基涂层组织和性能\*

张国栋<sup>1</sup> 李莉<sup>1</sup> 刘念<sup>1</sup> 曹红美<sup>2</sup> 毛艳<sup>3</sup>

(1. 武汉大学动力与机械学院 武汉 430072;

2. 上海飞机制造有限公司 上海 200436;

3. 上海交通大学材料科学与工程学院 上海 200240)

**摘要:** 采用等离子堆焊技术在打壳锤头基体 Q235 钢表面进行堆焊, 堆焊材料选用分别含有 50%WC、40%WC 和 30%WC+TiC 的复合镍基粉末。借助金相显微镜、扫描电子显微镜、显微硬度仪、摩擦磨损试验仪等仪器对所得各堆焊层的显微组织、化学成分、显微硬度、耐磨性和耐蚀性进行分析。试验结果表明, 三种合金堆焊层显微组织均为  $\gamma$ -Ni 固溶体和弥散分布的不同形态的硬质化合物相, 如 WC, (Ti,V)C 等。三种合金堆焊层与基体界面处冶金结合良好, 堆焊层稀释率低, 且与基体 Q235 钢相比, 耐电解腐蚀性显著提高。含有 30%WC+TiC 的镍基合金堆焊层与含有 50%WC 和 40%WC 的镍基合金堆焊层相比, 具有更高的耐磨性和抗热腐蚀性。因而含有 30%WC+TiC 的镍基合金堆焊层综合性能最优, 能够大幅度延长打壳锤头使用寿命, 具有广泛的应用前景。

**关键词:** 等离子堆焊; 打壳锤头; 镍基粉末; 碳化钛

**中图分类号:** TG174

## Structure and Properties of Nickel-based Surfacing on Crust Breaker Deposited by Plasma Arc Welding

ZHANG Guodong<sup>1</sup> LI Li<sup>1</sup> LIU Nian<sup>1</sup> CAO Hongmei<sup>2</sup> MAO Yan<sup>3</sup>

(1. School of Power and Mechanical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072;

2. Shanghai Aircraft Manufacturing Co., Ltd., Shanghai 200436;

3. School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240)

**Abstract:** Nickel-based alloy coatings are deposited on the surface of crust breaker made of Q235 steel through plasma arc welding with the nickel-based powders containing 50% WC, 40% WC and 30% WC+TiC, respectively. And the microstructure, chemical composition, micro-hardness, abrasive resistance and corrosion resistance are examined on the samples investigated by using optical microscope(OM), scanning electron microscope(SEM), Vickers hardness tester and friction and wear testing machine. The microstructures of the coatings are  $\gamma$ -Ni solid solution and hard dispersed compound particles, such as WC, (Ti, V) C, etc. The coatings with low dilution rate possess a better metallurgical bonding with the matrix metal, and better electrolytic corrosion resistance compared with the Q235 matrix. The Nickel-based alloy coating containing 30% WC+TiC has the highest wear resistance and hot corrosion resistance in comparison with the coatings containing 50%WC and 40%WC. Therefore, the Nickel-based alloy coating layer containing 30% WC+TiC has the optimum comprehensive properties and extensive application prospect.

**Key words:** plasma arc welding; crust breaker; Ni based powder; titanium carbide

## 0 前言

铝电解的过程中, 打壳锤头作为预焙阳极铝电解槽下料系统的重要部件, 受到高温冰晶石-氧化铝电解质熔盐和铝液的腐蚀以及硬质电解质结壳的磨

损。而打壳锤头材料一般使用低碳钢铸造或锻造, 材料硬度低, 耐蚀性能差, 组织不均匀等, 这些都会加速锤头失效, 同时影响铝液纯度<sup>[1]</sup>。打壳锤头的损耗是从锤头表面开始, 再逐渐向内侵蚀延伸, 故获得具有特殊性能的合金化涂层可有效提高打壳锤头的强度和耐蚀性<sup>[2-3]</sup>。

等离子粉末堆焊技术作为材料表面强化手段之一, 具有熔敷率高、稀释率低、堆焊层在服役过程中剥落倾向小等突出优点<sup>[4]</sup>。特别是采用粉末做

\*湖北省自然科学基金(2009CDB300)、中央高校基本科研业务费专项资金(2012208020201)和教育部博士研究生学术新人奖(5052012208001)资助项目。20131216收到初稿, 20140613收到修改稿

堆焊材料可提高合金设计的自由度,使堆焊难熔材料成为可能,从而大幅度提高工件耐磨、耐高温、耐腐蚀性<sup>[5-6]</sup>。镍基合金具有良好的高温性能和耐磨耐蚀性,克服了普通铁基合金具有的淬硬性缺点,是国内外高质量的等离子堆焊所普遍采用的合金粉末<sup>[7-8]</sup>。而陶瓷硬质相 WC 和 TiC 颗粒的存在以及析出的针状碳化物对涂层的弥散硬化,改变了涂层的磨损特性,使涂层的耐磨性明显提高<sup>[9]</sup>。与 WC 相比, TiC 的硬度及耐磨性更高,热稳定性更好,具有更良好的抗氧化性能<sup>[10]</sup>,如利用激光表面熔覆技术合成 TiC/FeCrBSi 涂层抗磨损性能显著提高<sup>[11]</sup>。近年来,随着等离子粉末堆焊技术的不断发展和完善,采用等离子堆焊技术来获得含 WC 的复合耐磨堆焊层的研究取得了一定成果<sup>[12-14]</sup>,研究人员采用的多种不同措施使得碳化钨的熔化、沉底和烧损得到一定程度的解决<sup>[15]</sup>,然而,并未对涂层的耐蚀性进行研究,也未有人采用等离子堆焊方法引入 TiC

硬质相,因而本文采用等离子堆焊在 Q235 表面分别堆焊不同质量分数的 WC 复合镍基粉末和 WC+TiC 复合镍基粉末,对堆焊层组织、耐磨性、耐蚀性进行分析,为进一步提高镍基堆焊层的耐磨耐蚀性能以及延长打壳锤头使用寿命提供理论基础参考和指导。

## 1 试验材料及方法

试验采用大型龙门式数控等离子堆焊机 LU-F630-B2500/3500LM-CNC 在 20 mm 厚的 Q235 钢板上分别堆焊三种粉末,分别得到三种镍基合金堆焊层。三种镍基合金粉末化学成分如表 1 所示。工艺参数如下:离子气流量为 5.0~6.5 L/min,送粉气流量为 5.0~6.5 L/min,送粉率为 50~80 g/min,堆焊电流为 150~180 A,堆焊速度为 400~600 mm/min。

表 1 镍基堆焊合金化学成分(质量分数)

编号	C	B	Si	Cr	Fe	WC	TiC	Ni
1	0.15~0.5	1.0~2.5	1.0~2.5	3~10	≤5	50	0	余量
2	0.15~0.5	1.0~2.5	1.0~2.5	3~10	≤5	40	0	余量
3	0.15~0.5	1.0~2.5	1.0~2.5	3~10	≤5	30-a(<10TiC)	a	余量

注:表中 a 为 TiC 的质量分数,具体数值涉及知识产权保护,故而在此用 a 替代。

采用 DK7745 电火花线切割机床,从堆焊试样沿堆焊条带径向截取规则试样并编号 1、2、3,经过金相砂纸打磨、三氧化二铬抛光,并采用 4%硝酸酒精溶液腐蚀,采用 OLYMPUS-PMG3 型金相显微镜(Optical microscope, OM)进行显微组织观察;采用扫描电子显微镜(Scanning electron microscope, SEM)(FEI SIRION, Netherlands)对各堆焊层进行了显微形貌观察,并利用其所配附件能谱仪(Energy dispersive spectrum, EDS)(GENESIS 7000)对各堆焊层进行了微区成分测量;采用 HXS-1000A 显微硬度仪对堆焊试样显微硬度进行测试。采用 MS-T3000 型摩擦磨损试验仪测量堆焊层的耐磨性能;采用恒电位法进行模拟腐蚀速度的测定以及热腐蚀试验进行耐蚀性评估。

## 2 试验结果及分析

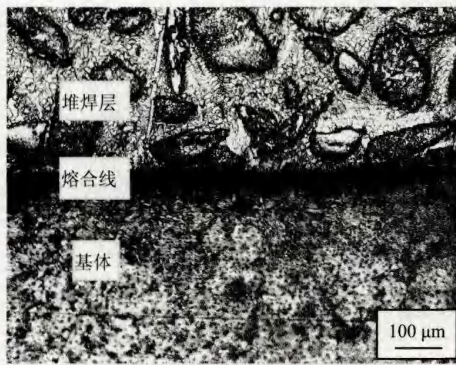
### 2.1 显微组织及成分分析

1 号堆焊层侧剖面的金相组织和电子显微组织形貌如图 1 所示。1 号试样堆焊层的组织从紧邻熔合线到远离熔合线的区域内,都较为均匀。堆焊层中,块状的 A 相和麻点状的 B 相均匀地分布在基体

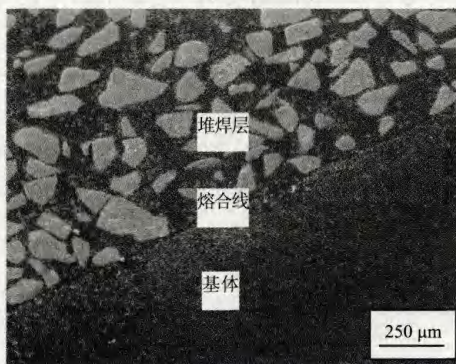
C 中。元素定量分析的结果如表 2 所示,基体 C 为  $\gamma$ -(Ni,Fe)固溶体;块状的 A 相为 WC 颗粒,直径从几十微米到上百微米不等。这可能是原始堆焊粉末中 WC 颗粒过大,在堆焊过程中来不及完全熔化成细小的颗粒,即在基体中直接冷却造成的;而麻点状的 B 相为弥散细小的 WC 颗粒,因其组织较细小,成分分析的结果中带有部分基体元素 Ni、Cr 和 Fe。

2 号堆焊层侧剖面的金相组织和电子显微组织形貌如图 2 所示。2 号试样堆焊层的组织细小而均匀。在高倍下可以看到大量白色细小的碎花状颗粒 D 弥散分布在黑色基体 E 中。元素定量分析的结果如表 3 所示,其中基体 E 为固溶 Cr、Fe 原子的  $\gamma$ -Ni 固溶体;碎花状颗粒 D 为 WC,其中带有部分基体元素 Fe、Ni 和 Cr。

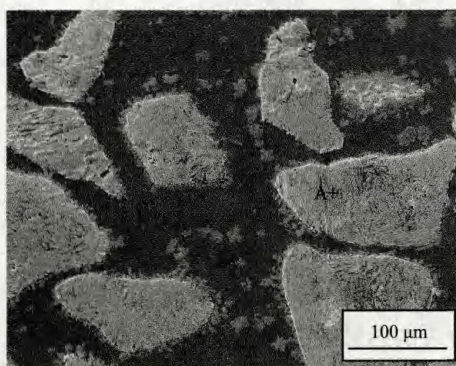
3 号堆焊层侧剖面的金相组织和电子显微组织形貌如图 3 所示。3 号试样母材与堆焊层之间的分界线为较薄的明显的白亮层,即熔合线。此白亮层实际上是平面晶,是母材表面的微熔区生长而形成的,表明堆焊熔池中的液态合金与母材发生熔合,最终凝固后形成良好的冶金结合。堆焊层紧靠白亮层熔合线的组织为柱状枝晶,枝晶主干基本沿着垂直于熔合线的方向即凝固过程中散热最快的方向生



(a) 熔合线附近组织(OM)



(b) 熔合线附近组织(SEM)



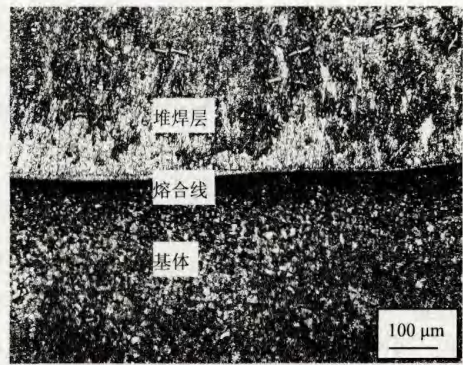
(c) 堆焊层组织(SEM)

图 1 1 号试样熔合区及等离子堆焊层显微组织形貌

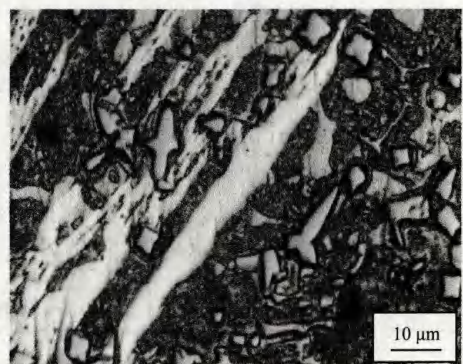
表 2 1 号试样微区组织成分(质量分数) %

相	Cr	Fe	W	Ni	C	Si
A 相	—	—	88.05	—	11.95	—
B 相	4.91	2.55	50.87	11.97	29.71	—
C 相	—	22.79	—	71.36	—	5.85

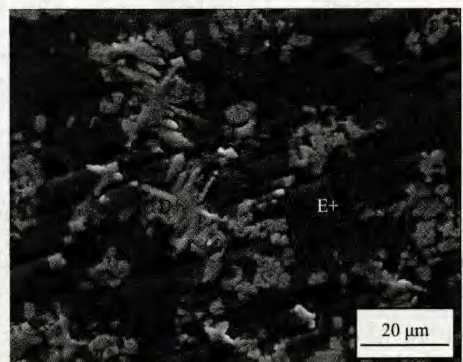
长;随着距熔合线距离的增加,到了焊层中心处,堆焊层组织转变为基体 G 上弥散分布着大量的细小颗粒 F,呈块状、粒状和杆状等。由元素定量分析的结果(表 4)可知,基体 G 为固溶 Cr、Fe 原子的  $\gamma$ -Ni 固溶体;弥散颗粒 F 为钢结硬质合金,主要成分为硬质相-(Ti,V)C 碳化物。



(a) 熔合线附近组织(OM)



(b) 熔合线堆焊层组织(OM)



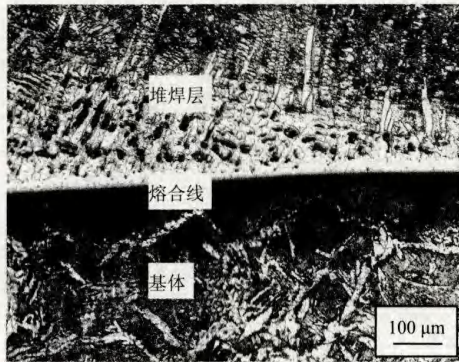
(c) 堆焊层组织(SEM)

图 2 2 号试样熔合区及等离子堆焊层显微组织形貌

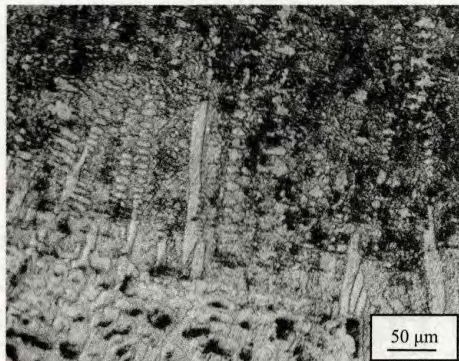
表 3 2 号试样微区组织成分(质量分数) %

相	Cr	Fe	Ni	W	Si
D 相	16.68	10.03	23.93	49.36	—
E 相	8.01	28.01	57.17	—	6.81

图 4 为 1、2、3 号试样线扫描距离约为 200  $\mu\text{m}$  的熔合线附近各元素线扫描图。1、2、3 号试样中,Fe、Ni 和 Cr 在熔合线附近均发生了相互扩散,同时相互扩散的程度较小,这说明 3 种样品界面处的冶金结合都良好且堆焊层受到母材 Fe 原子的稀释较少,最大限度地保持了堆焊层各项性能的完整性。1、2 号试样紧挨堆焊层一侧除 Cr 以外的其他元素质量分数均出现一处明显的凹坑和凸起,是由于扫描线刚好经过一粒含 WC 的硬质相所致。



(a) 熔合线附近组织(OM)



(b) 焊层近熔合区组织(SEM)



(c) 堆焊近表面区组织(SEM)

图3 3号试样熔合区及等离子堆焊层显微组织形貌

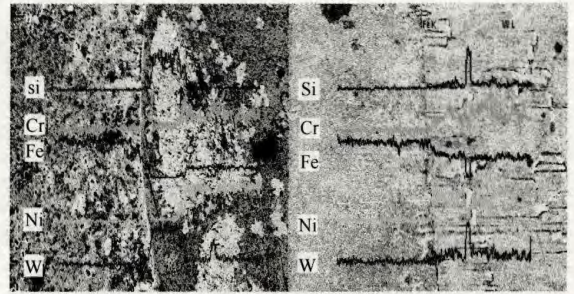
表4 3号试样微区组织成分(质量分数) %

相	Cr	Fe	Ni	Ti	Mo	V	Si	C
F相	4.41	9.91	3.42	24.80	8.17	22.02	—	27.27
G相	7.23	58.20	31.70	—	—	—	2.87	—

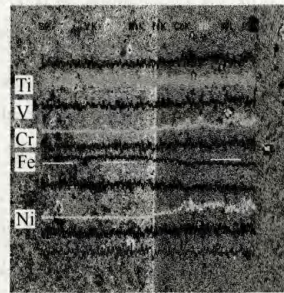
2.2 显微硬度和耐磨性

如图5所示,以熔合线为界,堆焊层每隔200 μm测一个点,共10个点(包括熔合线上的点),母材金属每隔300 μm测一个点,共5个点。

1、2、3号样堆焊层截面显微硬度分布图如图6所示,可以看到,从堆焊层表层到接近熔合线处,硬度总体上呈下降趋势,而在熔合线处硬度值发生陡降。从堆焊层到母材硬度值的非均匀过渡-陡降,



(a) 1号试样 (b) 2号试样



(c) 3号试样

图4 熔合区线扫描图

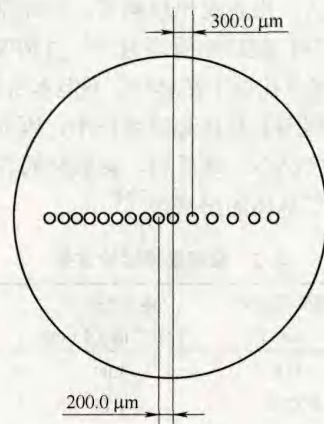


图5 显微硬度打点分布示意图

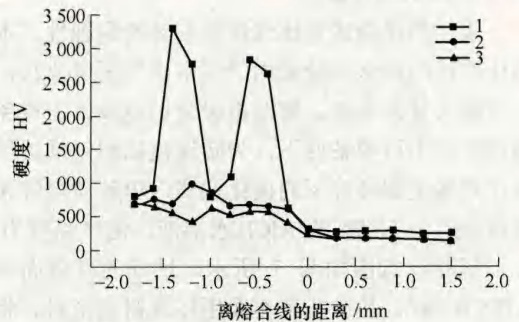


图6 1、2、3号试样显微硬度

正说明了堆焊层的稀释率低,硬度低的母材元素对堆焊层的冲淡很小,使得堆焊层合金强化层的性能保持最大程度的完整性。熔合线处的硬度值与堆焊

层相比较低,接近于母材,这与熔合线处 Fe 元素的质量分数较高有关,这些 Fe 元素是从母材扩散而来。2、3 号堆焊层部分的硬度分布相对平稳,这是因为 2、3 号堆焊层的组织较为细小均一。而 1 号堆焊层部分硬度出现明显凸起的“双峰”,是因为 1 号堆焊层均匀分布未熔的块状 WC,其显微硬度高达 3 000 HV 左右,显微硬度计容易打在块状 WC 上。

堆焊层摩擦磨损试验在 MS-T3000 型摩擦磨损试验仪上进行,采用球-盘摩擦模式,对磨材料为 GCr15 钢球,直径为 3 mm,表面硬度为 61~64 HRC;测量环境温度为 25 °C,相对湿度为 80%;载荷为 9.8 N,转速为 200 r/min,测试时间为 300 min。摩擦磨损试验结果如表 5 所示。3 号的硬度比 1 号小,但 3 号的摩擦因数和体积磨损率小,比 1 号更耐磨。1 号的 WC 硬质相数量较少,且呈多边形,在磨损初期,WC 颗粒与基体处于同一平面上,由于基体硬度相对较低,所以磨损比较严重,而颗粒硬度较高,磨损小,随着磨损的进行,基体相对于颗粒下凹,因而 WC 颗粒一部分裸露出来,由于 WC 颗粒较大,很容易出现剥落,因而基体磨损继续进行。当 WC 颗粒小而均匀时,虽然部分裸露在外,但是大部分扎根于基体中,不但本身抵抗磨损,而且能够对周围的基体起屏蔽作用,因而 3 号大量细小颗粒状(Ti,W)C 硬质相,弥散分布在基体上,极大地增强了基体的耐磨性<sup>[16]</sup>。

表 5 摩擦磨损试验结果

试样 编号	沟槽横截面积/ $\mu\text{m}^2$	体积磨损率/ [ $\times 10^{-15}\text{m}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$ ]	摩擦因数
1	643.0	1.09	0.267
2	1 025.3	1.74	0.268
3	37.7	0.06	0.255

### 2.3 电解腐蚀速度

采用极化曲线对比渗层和基体的耐蚀性,本文极化曲线的测试试验采用“三电极”恒电位法,参比电极为甘汞电极,辅助电极为铂电极。在避免高温熔融的不可控条件下,为实现模拟测量堆焊层材料在真实电解环境下的极化曲线,电解质溶液采用质量分数为 28.9%的  $\text{AlCl}_3$  水溶液,测试温度为 20 °C,试验示意图如图 7 所示。试样的有效面积为  $0.7854\text{cm}^2$ ,其余非工作面用环氧树脂密封。将试样用丙酮、酒精和蒸馏水冲洗干净,然后将试样浸入腐蚀液中稳定 10 min 检测其自腐蚀电位。进行阴极和阳极极化,电位扫描速度为 0.5 mV/s。

极化曲线图如图 8 所示,腐蚀电流密度、自腐蚀电位和腐蚀速度结果见表 6。从表 6 可知,1、2

和 3 号的腐蚀速度介于 0.015~0.028,耐蚀性均比较好。从图 8 可明显看到,1、2、3 号试样的耐蚀性与基体相比均有大幅度提高,这是因为 Ni 能大幅提高钢基体的电极电位,减少腐蚀微电池数目,可有效提高钢的耐蚀性。

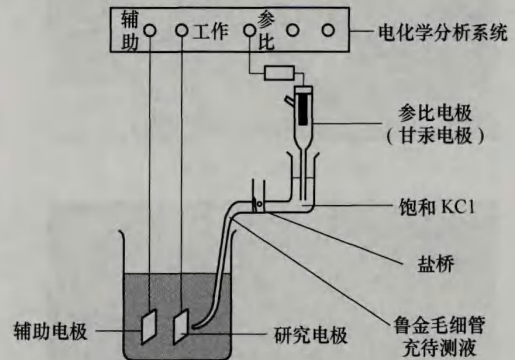


图 7 三电极法示意图

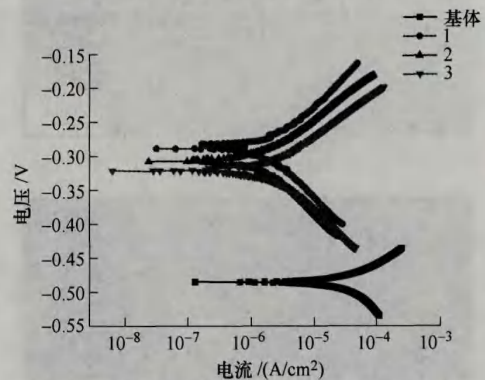


图 8 1、2 和 3 号试样与基体极化曲线对比图

表 6 电解腐蚀试验结果

试样编号	腐蚀电流密度/ ( $\text{A}/\text{cm}^2$ )	自腐蚀电位/V	腐蚀速度/(mm/a)
1	$1.8508 \times 10^{-6}$	-0.289 00	0.021 769
2	$1.4413 \times 10^{-6}$	-0.305 19	0.016 953
3	$2.2390 \times 10^{-6}$	-0.321 13	0.026 335

### 2.4 热腐蚀速度

将堆焊层圆片试样置于盛装在特制石墨容器中的冰晶石-氧化铝电解质熔盐中,温度为铝电解槽的电解温度 960 °C,腐蚀时间  $t=15\text{h}$ ,试验示意图如图 9 所示。用砂纸将腐蚀结束后的试样表面粘连的电解质清除干净,再在丙酮介质中用超声波清洗,烘干后用精度为 1/10 000 g 的分析天平称重。按式(1)计算热腐蚀速度

$$K = \frac{\Delta W}{St} \quad (1)$$

式中  $\Delta W$ ——腐蚀后的质量减小量;

$S$ ——试样腐蚀前后平均表面积,此试验

中试样腐蚀前后表面积可认为没有变化, 故取腐蚀前已测的试样表面积;

$t$ ——腐蚀时间。

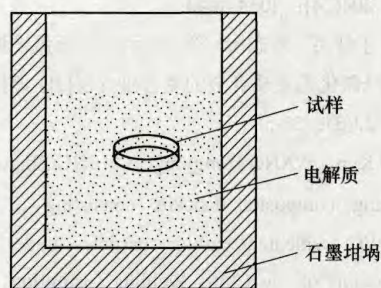


图9 热腐蚀试验简图

试验结果如表7和图10所示。由图10可知, 1号的抗腐蚀性能相对而言较差, 这主要是因为2、3号的显微组织相比于1号更加细小均匀, 因而更耐腐蚀。

表7 热腐蚀试验结果

试样编号	失重/g	表面积/( $\times 10^{-4} \text{m}^2$ )	热腐蚀速度/[ $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ]
1	0.094 4	2.261	27.834
2	0.050 4	2.355	14.268
3	0.042 7	2.355	12.088

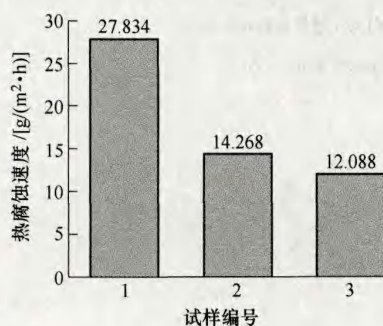


图10 热腐蚀试验结果

### 3 结论

(1) 含 50%WC 的镍基合金堆焊层组织为  $\gamma$ -Ni 固溶体基体上分布着块状 WC 颗粒; 含 40%WC 的镍基合金堆焊层组织为细小碎花状 WC 弥散分布在  $\gamma$ -Ni 固溶体基体上; 含 30%WC+TiC 镍基合金堆焊层组织为  $\gamma$ -Ni 固溶体基体上弥散分布着大量细小硬质相(Ti,V)C 碳化物, 呈块状、粒状和杆状等。

(2) 堆焊层与基体界面处的冶金结合良好, 同时堆焊层稀释率低, 最大限度地保持了堆焊层各项性能的完整性。

(3) 当堆焊材料为含 50%WC 和 40%WC 的镍基合金时堆焊层耐磨性较差, 而当镍基合金含 30%WC+TiC 时, 堆焊层耐磨性较好。三种堆焊层耐电解腐蚀性都较优异, 但含 30%WC+TiC 的镍基合金堆焊层抗热腐蚀性相对于含 40%WC 和含 50%WC 的镍基合金堆焊层较好。

(4) 含有 30%WC+TiC 的镍基合金堆焊层综合性能最优, 能够大幅度延长打壳锤头使用寿命, 具有广泛的应用前景。打壳锤头等离子堆焊材料最佳配比(质量分数)为 0.15%~0.5%C, 1.0%~2.5%B, 1.0%~2.5%Si, 3%~10%Cr,  $\leq 5\%$ Fe, 30%WC+TiC, 余量为 Ni。

### 参 考 文 献

- [1] 张国伟, 侯华, 毛红奎. 不锈钢电极材料在高温动态铝液中腐蚀机理研究[J]. 热加工工艺, 2008, 37(7): 15-19. ZHANG Guowei, HOU Hua, MAO Hongkui. Study on corrosion mechanism of stainless steel electrode in dynamic aluminum melt[J]. Hot Working Technology, 2008, 37(7): 15-19.
- [2] MING Q, LIM L C, CHEN Z D. Laser cladding of nickel-based hardfacing alloys[J]. Surface and Coatings Technology, 1998, 106(2): 174-182.
- [3] MISSORI S, MURDOLO F, SILI A. Single-pass laser beam welding of clad steel plate[J]. Welding Journal, 2004, 83(2): 65.
- [4] 董丽虹, 徐滨士, 朱胜, 等. 等离子弧堆焊镍基复合粉末涂层材料[J]. 焊接学报, 2005, 26(1): 37-40. DONG Lihong, XU Binshi, ZHU Sheng, et al. Study on nickel-based composite powders by plasma-arc surfacing[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2005, 26(1): 37-40.
- [5] PALANI P K, MURUGAN N. Development of mathematical models for prediction of weld bead geometry in cladding by flux cored arc welding[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2006, 30(7-8): 669-676.
- [6] 邓德伟, 陈蕊, 张洪潮. 等离子堆焊技术的现状及发展趋势[J]. 机械工程学报, 2013, 49(7): 106-112. DENG Dewei, CHEN Rui, ZHANG Hongchao. Present status and development tendency of plasma transferred arc welding[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(7): 106-112.
- [7] WINKELMANN D I R, BURG. Investigations into the abrasive wear of powder plasma-arc surface welds[J]. Schweißen & Schneident, 2001(10): 43-47.

- [8] TAKESHI S, SHIN-HEUNG K, YOSHIHISA K, et al. Improvement of wear resistance of aluminum alloy by PTA surfacing process[C/CD]//6th International Conference on Aluminum Alloys. Toyohashi, Japan, 1998.
- [9] 吴萍, 周昌炽, 唐西南. 激光熔覆镍基合金和 Ni/WC 涂层的磨损特性[J]. 金属学报, 2002, 38(12): 1257-1260.  
WU Ping, ZHOU Changchi, TANG Xinan. Wear characteristics of Ni-base alloy and Ni/WC coatings by laser cladding[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2002, 38(12): 1257-1260.
- [10] 张端锋, 江焱, 吝楠, 等. WC-TiC-Ni 硬质合金的制备与性能[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2011, 16(2): 303-308.  
ZHANG Duanfeng, JIANG Yao, LIN Nan, et al. Preparation and properties of WC-TiC-Ni cemented carbide[J]. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy, 2011, 16(2): 303-308.
- [11] WANG X H, ZHANG M, LIU X M, et al. Microstructure and wear properties of TiC/FeCrBSi surface composite coating prepared by laser cladding[J]. Surface and Coatings Technology, 2008, 202(15): 3600-3606.
- [12] 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, 274-275: 345-354.
- [13] KESAVAN D, KAMARAJ M. The microstructure and high temperature wear performance of a nickel base hardfaced coating[J]. Surface and Coatings Technology, 2010, 204(24): 4034-4043.
- [14] 赵昆, 王红英, 程志国, 等. 利用等离子弧堆焊获得铁基合金+碳化钨硬质合金的复合堆焊层[J]. 焊接学报, 2002, 23(3): 56-58.  
ZHAO Kun, WANG Hongying, CHENG Zhiguo, et al. Obtaining composite deposits consisting of Fe-base alloy+WC cemented carbide particles under PTA[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2002, 23(3): 56-58.
- [15] 赵昆, 程志国. 优质高耐磨性堆焊技术——复合材料等离子弧堆焊及其现状[J]. 焊接, 1999(2): 5-8.  
ZHAO Kun, CHENG Zhiguo. Review of composite metal plasma arc sureacting[J]. Welding & Joining, 1999(2): 5-8.
- [16] KIM H, YOON B, LEE C. Wear performance of the Fe-based alloy coatings produced by plasma transferred arc weld-surfacing process[J]. Wear, 2001, 249(10-11): 846-852.

---

作者简介: 张国栋, 男, 1975 年出生, 博士后, 副教授, 珞珈青年学者。主要研究方向为先进焊接技术和表面工程。

E-mail: gdzhang@whu.edu.cn