表面失效及防护

Ni 基合金喷熔层在 NaCl 溶液中的抗空蚀性能研究

刘海涛，丁彰雄，黄宝祥，袁成清

（高性能船舶技术教育部重点实验室（武汉理工大学），武汉 430063）

摘　要：目的 比较不同系列 Ni 基合金喷熔层在 NaCl 溶液中的抗空蚀性能，并探讨其空蚀机理。**方法** 采用 XRD 方法分析了氧乙炔火焰喷熔工艺制备的 NiCrBSi、WC 增强 Ni 基、NiCrBSiCuMo 合金喷熔层的组织结构，采用洛氏硬度计测量了喷熔层的硬度，通过 CorrTest 电化学测试系统分析了喷熔层在 3.5%NaCl 溶液中的电化学腐蚀性能，使用超声波振动空蚀仪对喷熔层在 NaCl 溶液中的抗空蚀性能进行了研究。**结果** NiCrBSiCuMo 合金喷熔层在 NaCl 溶液中具有优异的抗腐蚀性能。该喷熔层中除含有 $Cr_{23}C_6$、Cr_7C_3、Cr_3C_2、Cr_2B 硬质相外，还存在细化涂层组织、改善涂层韧性的 Mo_2C 与 $MoSi_2$ 相，其硬度与 NiCrBSi 合金喷熔层相近（约 58HRC），在 3.5%NaCl 溶液中空蚀 16 h 的累积体积损失分别为 NiCrBSi 和 WC 增强 Ni 基合金喷熔层的 65%与 51%。WC 增强 Ni 基合金喷熔层在含有 NiCrBSi 喷熔层中 Cr 的碳化物、硼化物硬质相的基础上，还含有 WC 与 W_2C 硬质相，虽然喷熔层具有较高的硬度（59.3HRC），但在 NaCl 溶液中的腐蚀电位较低，腐蚀电流密度最大，抗空蚀性能较差。**结论** NiCrBSiCuMo 合金喷熔层在 NaCl 溶液中具有最优异的抗空蚀性能，WC 的加入使 Ni 基合金喷熔层在 NaCl 溶液中的抗空蚀性能减弱。

关键词：氧乙炔火焰喷熔；镍基合金；组织结构；NaCl 溶液；抗腐蚀性能；空蚀

中图分类号：TG172　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1001-3660(2018)08-0175-07

DOI：10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.08.025

Cavitation Erosion Resistance of Ni-based Alloy Sprayed and Fused Coatings in NaCl Solution

LIU Hai-tao, DING Zhang-xiong, HUANG Bao-xiang, YUAN Cheng-qing

(Key Laboratory of High Performance Ship Technology (Wuhan University of Technology), Ministry of Education, Wuhan 430063, China)

ABSTRACT: The work aims to compare the cavitation erosion resistance of different series of Ni-based alloy sprayed and fused coatings in NaCl solution and explore the coatings' cavitation mechanism. The sprayed and fused coatings of NiCrBSi, WC-reinforced Ni-based and NiCrBSiCuMo alloy were prepared by oxy-acetylene flame spraying and fusing. The structure, hardness and electrochemical corrosion performance of the coatings in 3.5% NaCl solution were analyzed by XRD, Rockwell hardness tester and electrochemical test system (CorrTest), respectively. Furthermore, resistance of cavitation erosion of the coatings in NaCl solution was studied by ultrasonic vibration cavitation equipment. From the results, NiCrBSiCuMo alloy sprayed and fused coating had excellent corrosion resistance in NaCl solution. It contained not only $Cr_{23}C_6$, Cr_7C_3, Cr_3C_2 and

收稿日期：2018-03-22；**修订日期：**2018-06-12
Received: 2018-03-22; **Revised:** 2018-06-12
基金项目：国家自然科学基金资助项目（51422507）
Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51422507)
作者简介：刘海涛（1991—），男，硕士研究生，研究方向为表面工程与再制造。
Biography: LIU Hai-tao (1991—), Male, Master graduate student, Research focus: surface engineering and remanufacturing.
通讯作者：丁彰雄（1961—），男，教授，研究方向为表面工程与再制造。
Corresponding author: DING Zhang-xiong (1961—), Male, Professor, Research focus: surface engineering and remanufacturing.

Cr_2B hardness phases, but also Mo_2C and $MoSi_2$ phases which could refine structure and improve toughness of the coating. The coating's hardness was close to NiCrBSi coating (about 58HRC) and its cumulative volume loss was 65% of NiCrBSi and 51% of WC-reinforced Ni-based alloy coating, respectively. The WC-reinforced Ni-based alloy coating also contained Cr carbide and boride hardness phases in NiCrBSi coating besides WC and W_2C hardness phases. Although its hardness was pretty high (59.3HRC), it had relatively low corrosion potential, the highest corrosion current density and the worse erosion resistance in NaCl solution. Thus, NiCrBSiCuMo alloy coating has the best cavitation erosion resistance in NaCl solution and the addition of WC weakens the cavitation erosion resistance of Ni-based alloy coating.

KEY WORDS: oxy-acetylene flame spraying and fusing; Ni-based alloy; structure; NaCl solution; corrosion resistance; cavitation erosion

空蚀也叫空泡腐蚀，是指在高速多相流条件下，液体介质中局部压力的变化致使空泡形成和溃灭，材料连续受到高压、高速微射流冲击作用而产生表面破坏。空蚀一般发生在流体机械高速相对运动的部件中，如船舶、海洋钻井平台等能源与动力装备中的螺旋桨、柴油机气缸套、阀门及各类泵等设备[1]。当前我国制定的《中国制造 2025》规划中，将海洋工程装置及高技术船舶作为高端创新引领的重点领域之一，而国家海洋与极地开发战略的实施使得高端海洋装备的研发势在必行。海水主要盐分为 NaCl，有较强的腐蚀性，其中 Cl^-能诱发、活化并促进钢件表面发生点蚀[2]。海洋装备的空蚀是气泡破灭的冲击波和腐蚀对零件表面联合作用造成的，二者相互促进，具有更强的破坏性[3]。由于空蚀只发生在零件表面，采用涂层技术提高过流部件表面性能是解决海洋工程装备关键件空蚀问题的重要技术手段。

Ni 基合金由于具有良好的抗空蚀性能和优异的工艺性而被广泛用作抗空蚀涂层材料[4-5]。Ni 基自熔性合金是应用最广泛的一种 Ni 基合金，包括 NiCrBSi 系列、NiCrBSiCuMo 系列、WC 增强 Ni 基系列等[6]。目前国内外针对镍基合金涂层抗空蚀性能的研究主要集中在清水介质。K Sang 等人[7]发现镍基合金涂层在清水介质中的抗空蚀性能优于奥氏体不锈钢。王群等人[8]研究发现加入 WC 的镍基合金涂层的硬度提高了 7%，导致其在清水介质中的抗空蚀性能提高了 30%。康进兴等人[9]研究发现，在 NiCrBSi 中加入 Mo 元素形成 NiCrBSiMo 覆层，其在清水介质中的抗空蚀性能有所提高。目前，对镍基合金涂层在 NaCl 溶液中的抗空蚀性能研究较少，特别是不同系列镍基合金涂层。氧乙炔火焰喷熔法由于具有设备简单、施工方便、经济性好、喷熔层冲淡率低及与基体结合强度高等一系列优点，是 Ni 基合金涂层制备的主要方法之一[8]。

本研究采用氧乙炔火焰喷熔工艺制备了 NiCrBSi、WC 增强 Ni 基与 NiCrBSiCuMo 合金喷熔层，研究了 3 种不同系列 Ni 基合金喷熔层在 3.5%NaCl 溶液中的抗空蚀性能，探讨了不同 Ni 基合金喷熔层的组织结构、力学性能、电化学性能与抗空蚀性能之间的关系，分析了 WC 颗粒和 Mo、Cu 元素的加入对镍基合金抗空蚀性能和空蚀机理的影响，为海洋 s 环境下抗空蚀镍基合金涂层的设计提供参考。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

采用的 NiCrBSi、WC 增强 Ni 基、NiCrBSiCuMo 自熔性合金粉末分别为 Ni60A、NiWC35、Ni60CuMo，粉末粒度为−300~+400 目，其中 NiWC35 由 65%的 Ni60A 和 35%的普通 WC 组成。各粉末的化学成分见表 1。

表 1 三种镍基合金粉末的化学成分

Tab.1 Chemical composition of three kinds of Ni-based alloy powders

wt.%

Powder	C	B	Si	Cr	Fe	Mo	Cu	Ni
Ni60A	0.7~1.0	3.0~4.5	3.5~5.5	15.0~18.0	≤5	0	0	Bal.
Ni60CuMo	0.5~1.0	3.0~4.5	3.5~5.0	14.0~19.0	≤8.0	2~4	2.0~4.0	Bal.
NiWC35	65%Ni60A+35%WC							

1.2 涂层制备

空蚀试样的基体材料为 304 不锈钢，按照 GB/T 8363—2009 加工，试样喷涂前首先在表面用 0.3 mm 的棕刚玉进行喷砂处理，再用丙酮清洗干净。喷熔层采用氧乙炔火焰喷熔一步法制备，喷枪型号为 QX-2/h，喷熔工艺参数如表 2 所示。喷焊层厚度为 1.2 mm 左右，加工后 Ra≤0.8 μm。

表 2　氧乙炔火焰喷熔的工艺参数
Tab.2　Process parameters of oxy-acetylene flame spraying and fusing

Oxygen pressure/ MPa	Acetylene pressure/ MPa	Powder spraying distance/mm	Remelting distance /mm	Moving speed of spray gun /(mm·s^{-1})
0.48	0.11	20~25	5~10	10

1.3　涂层性能表征

采用 D-max/2550 衍射仪和 MDI-Jade5.0 分析软件，对 Ni 基合金喷熔层进行物相检测与分析。采用 HRS-150 型华银数显洛氏硬度计测量涂层硬度，通过选取不同区域 10 个测量点的硬度值计算硬度的平均值和标准偏差。采用 CorrTest 电化学测试系统（主要包括 CS300 电化学工作站和 CorrTest 数据分析软件）测量 3 种 Ni 基喷熔层和 304 不锈钢的腐蚀电位（E_{corr}）与腐蚀电流密度（J_{corr}），参比电极为饱和甘汞电极，辅助电极为铂电极，研究电极为涂层与 304 不锈钢基体。

1.4　空蚀试验

采用超声波振动空蚀仪研究涂层抗空蚀性能，空蚀实验根据 GB/T 6383—2009《振动空蚀试验方法》进行。试验容器为 1000 mL 平底烧杯，试验介质为 3.5%NaCl 溶液，烧杯外用水冷却， 试验溶液温度控制在(25±1) ℃，试样浸没深度约为 3 mm，如图 1 所示。试验过程中，每隔一段时间取下试样并用无水乙醇清洗、干燥，后用精度为 0.1 mg 的 TG328 天平称量，每个试样的空蚀试验时间为 16 h。

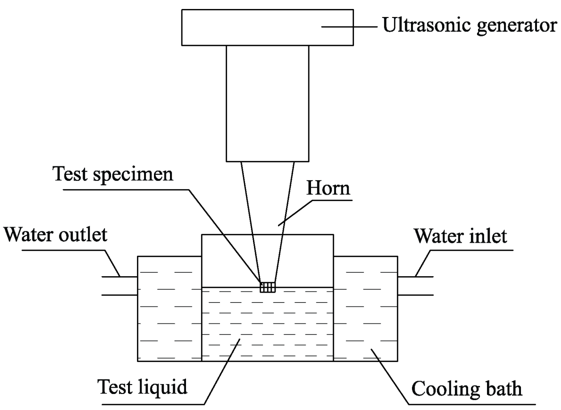


图 1　超声波振动空蚀试验装置示意图
Fig.1 Schematic diagram of ultrasonic vibration cavitation test equipment

2　结果及分析

2.1　Ni 基合金喷熔层的组织结构

图 2 为 Ni60A、NiWC35 和 Ni60CuMo 喷熔层的 X 射线衍射图谱。由图 2a 可知，Ni60A 喷熔层的基体组织主要是含有 Ni、Cr 的 γ 相固溶体，晶间是由 $(Fe,Ni)_{23}C_6$ 及 Cr_7C_3、Cr_3C_2、Cr_2B、CrB_2 等硬质相组成的共晶组织[10]。NiWC35 喷熔层在含 γ-(Ni,Cr)固溶体及 Cr_7C_3、$Cr_{23}C_6$ 等硬质相的基础上，还含有 WC 与 W_2C 相，如图 2b 所示。这是由于加入的 WC 颗粒熔点较高，在氧乙炔火焰喷熔过程中难以熔化，因此保持原有形状[11]。同时，少量 WC 在高温下分解形成硬度较高的 W_2C。Ni60CuMo 喷熔层主要由富 Ni 的 γ-(Ni,Fe)、$Cr_{23}C_6$、Cr_7C_3、Cr_3C_2、Cr_2B、Mo_2C、$MoSi_2$ 组成，如图 2c 所示。基体组织主要由 Ni、Fe 元素构成，其中 Mo_2C 与 $MoSi_2$ 相可增加非均质形核的形核率，具有细化涂层组织和改善涂层韧性的作用[12]。

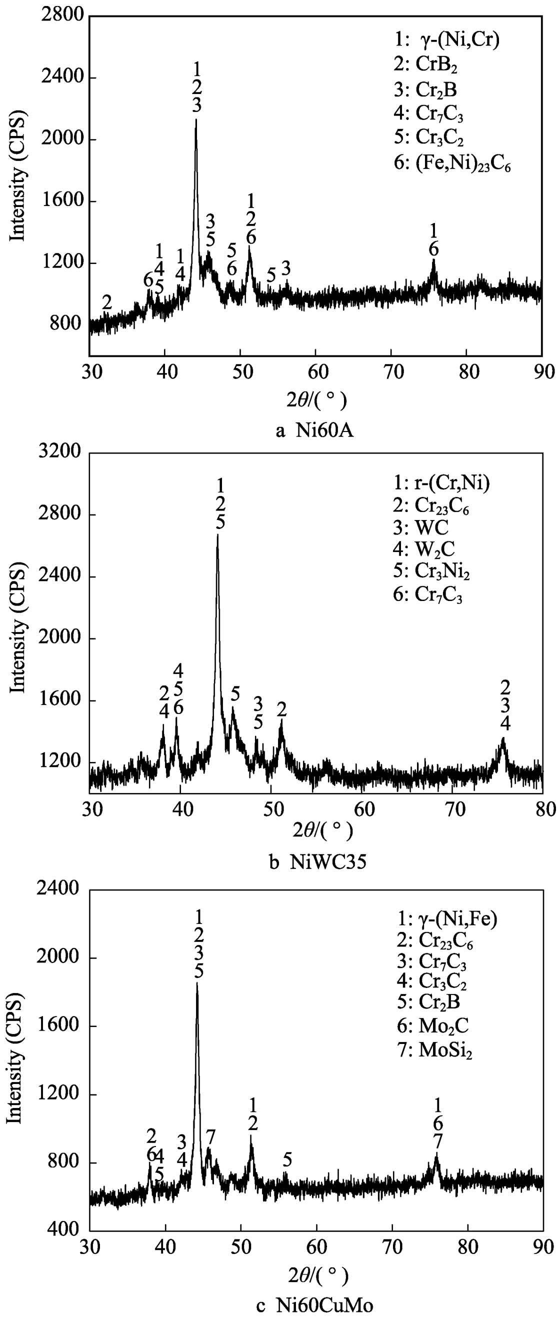


图 2　Ni 基合金喷熔层 XRD 图谱
Fig.2 XRD patterns of nickel-based alloy sprayed and fused coatings

2.2 Ni 基合金喷熔层硬度

3 种 Ni 基合金喷熔层的洛氏硬度及相应的标准偏差如图 3 所示。由图 3 可知，3 种 Ni 基合金喷熔层都具有较高的硬度。其中，WC 增强 Ni 基合金喷熔层的硬度最高（59.3HRC），这是因为该喷熔层除含普通镍基合金喷熔层的硬质相外，还含有高硬度的 WC 与 W_2C 相，它们的存在提高了镍基合金喷熔层的硬度。由于 WC 与 W_2C 相的硬度与周围 Ni 基合金基体的硬度存在较大差异，因此喷熔层硬度值的标准偏差较大。同时从图 3 还可以看出，Ni60CuMo 喷熔层的硬度与 Ni60A 喷熔层相近（约 58HRC）。

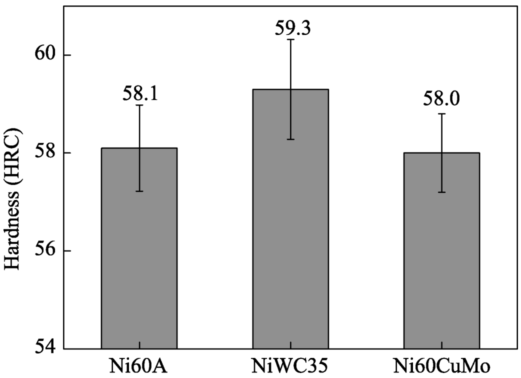


图 3 Ni 基合金喷熔层硬度
Fig.3 Hardness of nickel-based alloy sprayed and fused coatings

2.3 电化学特性

金属与电解质溶液发生电化学反应而导致金属材料的腐蚀破坏称为电化学腐蚀，材料在电解质溶液中的腐蚀电位可表征其相对活泼程度[13]，金属发生电化学腐蚀的腐蚀速率常用电流密度来表示[14]。本文通过测量 Ni 基合金喷熔层的腐蚀电位与腐蚀电流密度，探讨不同喷熔层在给定介质中的抗腐蚀性能。不同材料间的电位差越大，腐蚀初始驱动力越大；腐蚀电流密度越大，腐蚀速率越高。图 4 和表 3 分别为 3 种镍基合金喷熔层材料与 304 不锈钢在 3.5%NaCl 溶液中的 Tafel 曲线与电化学参数。

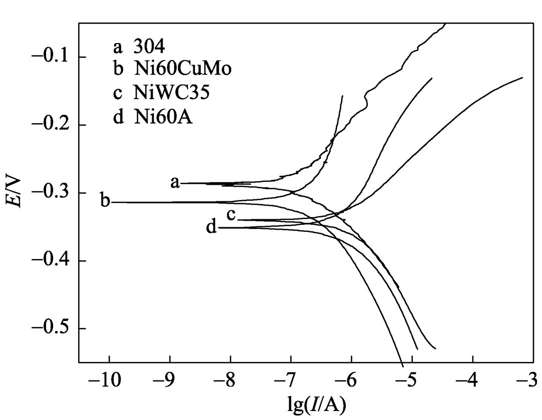


图 4 镍基合金喷熔层与 304 不锈钢的 Tafel 曲线
Fig.4 Tafel curve of nickel-based alloy sprayed and fused coatings and 304 stainless steel

表 3 304 不锈钢和 Ni 基合金喷熔层电化学参数
Tab.3 Electrochemical parameters of nickel-based alloy coatings and 304 stainless steel

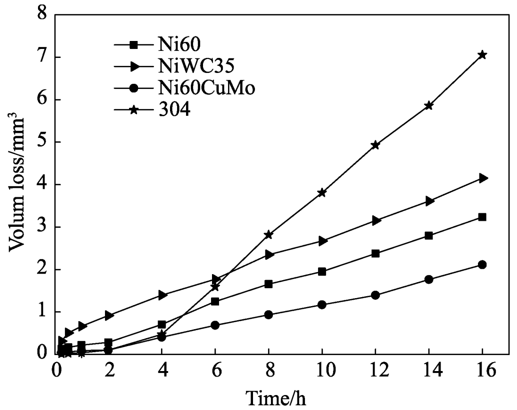
Materials	E_{corr}/V	J_{corr}/($\times10^{-6}$ A·cm^{-2})
304	−0.286	0.83
Ni60A	−0.351	1.20
NiWC35	−0.340	1.32
Ni60CuMo	−0.314	1.05

由表 3 可看出，基体材料 304 不锈钢的腐蚀电位最高（−0.286 V），Ni60CuMo 喷熔层的腐蚀电位为 −0.314 V，且与 304 不锈钢的电位差最小，腐蚀驱动力最小。同时，Ni60CuMo 喷熔层的电流密度也明显小于另外两种喷熔层材料，腐蚀速率最低，表明 Ni60CuMo 喷熔层具有最优良的耐腐蚀性能。这是因为 Ni60CuMo 中加入 Mo 等元素，显著提高了合金的耐氯离子点蚀能力。NiWC35 喷熔层的腐蚀电位较低（−0.340 V），与基体材料 304 不锈钢的电位差较大，腐蚀驱动力较大，而腐蚀电流密度最高，这说明 NiWC35 喷熔层的耐腐蚀性能较差。这是因为 NiWC35 喷熔层中加入的 WC 颗粒对于涂层而言为阴极相，与涂层基体形成大量微小腐蚀原电池，同时 WC 的加入会形成许多新界面，这些界面将成为腐蚀通道，使涂层耐蚀性降低[15]。Ni60A 喷熔层与 304 不锈钢的电位差最大，但腐蚀电流密度低于 NiWC35 喷熔层。

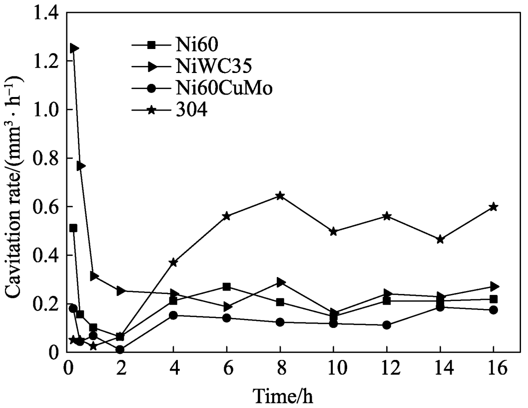
2.4 材料抗空蚀性能

Ni60A、NiWC35、Ni60CuMo 喷熔层和 304 不锈钢在 NaCl 溶液中振动空蚀 16 h 的空蚀体积损失和空蚀率曲线如图 5 所示。从图 5a 可以看出，3 种镍基合金喷熔层在 NaCl 溶液中的抗空蚀性能明显优于 304 不锈钢，其中 Ni60CuMo 喷熔层具有最优良的抗空蚀性能，其 16 h 的空蚀体积损失分别为 Ni60A、NiWC35 喷熔层及 304 不锈钢的 65%、51%和 30%。同时从图 5a 可以观察到，304 不锈钢的累计体积损失在初始阶段较小，大约 4 h 后开始迅速增加，并且增加速度明显高于镍基合金喷熔层。从图 5a 中还可以看出，加入 WC 硬质颗粒后，NiCrBSi 喷熔层在 NaCl 溶液中的抗空蚀性能不仅没有提高，反而有一定程度的降低。

从图 5b 可以观察到，在空蚀开始阶段，304 不锈钢的空蚀率明显低于镍基合金喷熔层，0~2 h 为空蚀孕育期，空蚀率基本保持不变；2 h 后进入空蚀发展期，空蚀率逐步上升；空蚀 8 h 后为稳定空蚀阶段，空蚀率在 0.50~0.64 mm^3/h 之间变化。3 种镍基合金喷熔层的空蚀率在空蚀开始阶段存在明显差异，Ni60CuMo 喷熔层的空蚀率最小，NiWC35 喷熔层的



a 空蚀体积损失



b 空蚀率

图 5　材料的空蚀体积损失和空蚀率

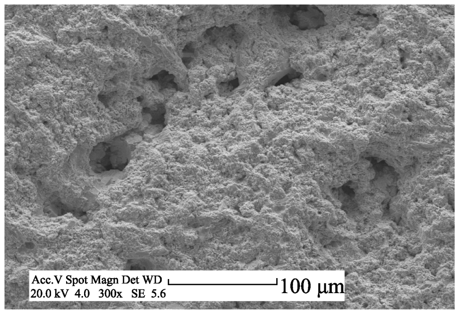
Fig.5 Volume loss (a) and cavitation rate (b) of materials

空蚀率最大，大约 4 h 后，进入稳定空蚀阶段。3 种喷熔层的稳定空蚀率在 0.15~0.3 mm^3/h 之间，NiWC35 的空蚀率虽有一定起伏，但总体高于另外两种喷熔层。Ni60CuMo 喷熔层的稳定空蚀率不仅最小，并且变化范围也最小，这表明其抗空蚀性能优异且稳定。在稳定空蚀阶段，加入 WC 硬质颗粒后的 NiCrBSi 喷熔层在 NaCl 溶液中的空蚀率反而比 NiCrBSi 喷熔层增加了大约 20%。

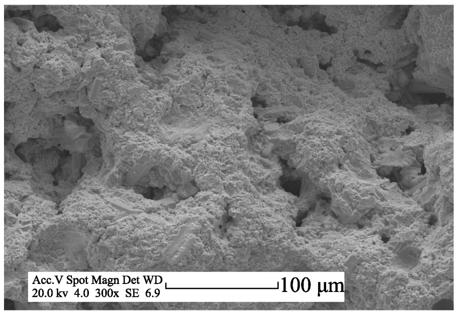
2.5　Ni 基合金喷熔层的空蚀行为与机理

图 6 为不同 Ni 基合金喷熔层空蚀 16 h 后的表面形貌，可见 3 种镍基合金喷熔层空蚀后的表面形貌有明显差异，NiCrBSiCuMo 合金喷熔层的表面蚀坑最小且最浅，WC 增强 Ni 基合金喷熔层的表面蚀坑最大且最深，NiCrBSi 合金喷熔层则处于二者之间。

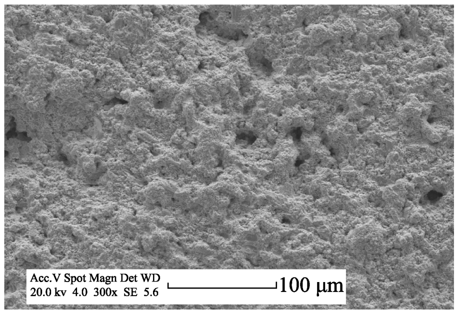
NiCrBSi 合金喷熔层在空蚀初期，相邻两物相在空蚀微射流的冲击作用下，因变形不协调导致相界处形成高应力场。当应力累积到一定程度时，裂纹沿相界萌生，裂纹作为空蚀源在微射流的作用下不断扩展交叉，最终导致材料空蚀剥落。Ni 基固溶体相的硬度低，首先剥落，剩余硬质相失去基体的保护，在空蚀微射流的作用下，以脆性断裂形式流失[8]。NiCrBSi 合金喷熔层的腐蚀电位较低，空蚀过程中发生电化学腐蚀而产生阳极溶解，对裂纹扩展有一定的促进作用。



a　Ni60A



b　NiWC35



c　Ni60CuMo

图 6　Ni 基合金喷熔层空蚀 16 h 后表面形貌

Fig.6 Surface micrographs of nickel-based alloy sprayed and fused coatings after 16 h cavitation erosion

WC 增强 Ni 基合金喷熔层中未熔的 WC 相分布在 Ni 基固溶体中，起弥散强化作用，使涂层硬度提高，抵抗微射流冲击的能力增强，但 WC 的加入也导致许多新相界的形成，WC 与周围 Ni 基固溶体的相结构差异较大，在空蚀过程中产生的变形不一致，相界处容易形成高应力场，累积到一定程度后沿 WC 相界也会出现裂纹，这些裂纹作为空蚀源而不断扩展。在清水介质中，裂纹扩展速度较慢，但在 NaCl 溶液中，Cl^-会渗入这些裂纹，由于 WC 与 Ni-Cr 固溶体存在较大的电位差而产生较强的电化学腐蚀。WC 电位较高，为+0.2 V[16]，作为阴极，Ni、Cr 的电位较低（分别为−0.25、−0.74 V），作为阳极，产生阳极溶解，导致喷熔层的腐蚀电流密度较大，腐蚀速率较高，如表 3 所示。WC 相界处 Ni 基固溶体不断溶解，裂纹扩展速度大大加快，当裂纹沿不同方向贯通时，体积较大的 WC 颗粒失去固定而悬空，在空蚀微射流的冲

击下容易脱落，形成较大空蚀坑。WC 颗粒的耐空蚀侵蚀能力较好，对周围基体有一定的保护作用[7]。当失去 WC 颗粒保护后，基体材料容易产生空蚀破坏，形成局部剥落而使更多的 WC 颗粒直接与 NaCl 溶液接触，在微射流冲击和电化学腐蚀的共同作用下继续脱落，其示意图如图 7 所示。其中阳极反应在产生 Cr^{3+}与 Ni^{2+}的同时释放电子，电子传导到涂层表面，与进入溶液的 O_2 参与阴极反应生成 OH^-，Cr^{3+}与 Ni^{2+}在微射流的带动下也到达涂层表面，与 OH^-结合生成难溶的腐蚀产物 $Ni(OH)_2$ 与 $Cr(OH)_3$。以上过程反复进行，蚀坑逐步向周围与深处扩展，形成较深的空蚀坑与凹凸不平的涂层表面，如图 6b 所示。

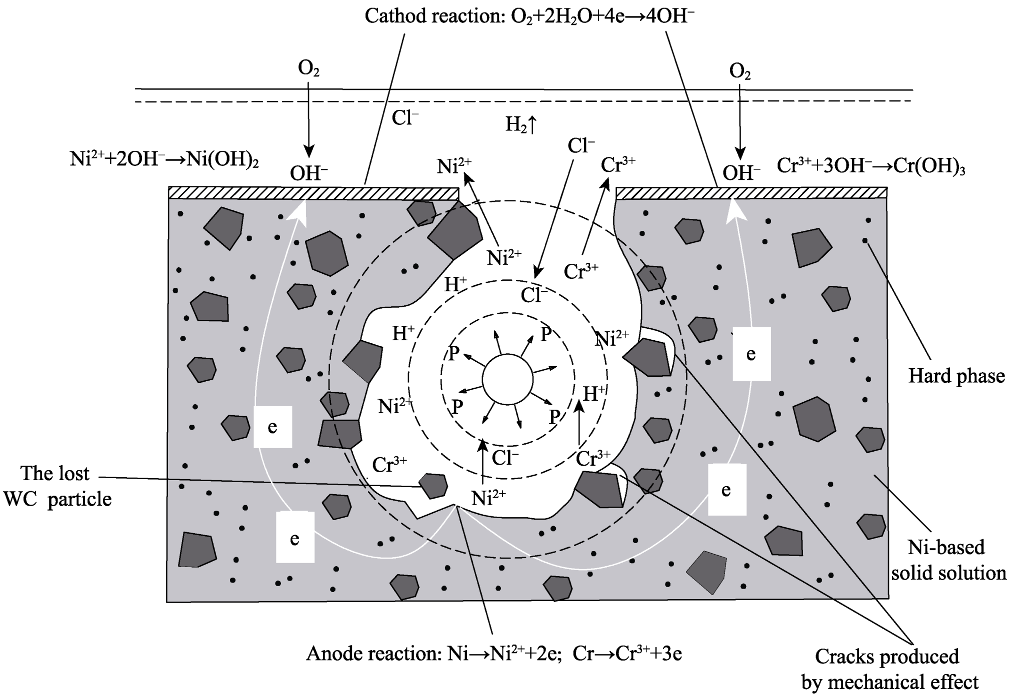


图 7　WC 增强 Ni 基合金喷熔层空蚀蚀坑扩展示意图
Fig.7 Schematic diagram of expanding cavitation pit of WC-reinforced Ni-based alloy sprayed and fused coating

NiCrBSiCuMo 喷熔层因为 Mo 元素与 C、Si 的亲合力较大，形成 Mo_2C、$MoSi_2$ 等硬质相。这些硬质相一方面难溶于奥氏体，对喷熔层中 Ni 基固溶体的生长有明显的抑制作用；另一方面可作为非自发形核的核心，从而增加非均质形核的形核率[12]，这些都对 Ni 基固溶体起到了细化晶粒和强化喷熔层的作用，使其硬度和韧性都得到提高。Mo、Cu 元素的加入，导致喷熔层中 C、B、Si 及 Cr 的质量分数较 NiCrBSi 喷熔层小，因此形成的 Cr 的碳化物和硼化物等在 Ni 基固溶体中起第二相强化作用的硬质颗粒也较少，最终喷熔层的硬度与 NiCrBSi 喷熔层基本相同。但由于硬质颗粒细化了喷熔层组织，从而改善了喷熔层的韧性。由于喷熔层晶粒细小，晶界增多，空蚀微射流的冲击引起的应力集中减小，空蚀过程中裂纹扩展所需的能量增加，扩展阻力增大，Ni 基固溶体不易剥落，由 Ni 基固溶体剥落而导致其他硬质相脱落也大大减少。此外，NiCrBSiCuMo 喷熔层的腐蚀电位明显高于另外 2 种 Ni 基合金的喷熔层，构成的原电池较弱，由此降低了喷熔层的腐蚀电流密度和腐蚀速率，NaCl 溶液对空蚀疲劳裂纹扩展的促进作用较小。因此，NiCrBSiCuMo 合金喷熔层在 NaCl 溶液中具有最优异的抗空蚀性能。

3　结论

1）3 种镍基合金喷熔层中，NiCrBSiCuMo 喷熔层在 3.5%NaCl 溶液中的腐蚀电位最高，腐蚀电流密度最小，抗腐蚀能力最强；在 NiCrBSi 中加入 WC 硬质颗粒，虽然能有效提高喷熔层硬度，但其在 3.5%NaCl 溶液中的抗腐蚀性能较差。

2）WC 颗粒的加入并没有改善 NiCrBSi 喷熔层在 NaCl 溶液中的抗空蚀性能，反而使其抗空蚀性能降低约 28%，Cu、Mo 元素的加入使 NiCrBSi 合金喷熔层在 NaCl 溶液中的抗空蚀性能提高了约 35%。

3）NiCrBSiCuMo 喷熔层在 NaCl 溶液中具有优异的抗空蚀性能，这是因为喷熔层不仅具有较高的硬度，同时还存在着细化涂层组织与改善涂层韧性的 Mo_2C 与 $MoSi_2$ 相，并且喷熔层在 NaCl 溶液中具有优异的抗腐蚀性能，这些特性都有效阻碍了空蚀裂纹的扩展。

参考文献：

[1]　陈卫. 几种海洋工程常用金属的空泡腐蚀性能[J]. 热加工工艺, 2015(8): 17-20.

CHEN W. Cavitation corrosion performance of several oceaneering metals[J]. Hot working technology, 2015(8): 17-20.

[2] 周文, 兰伟, 赵帅, 等. 42CrMo 钢在氯离子溶液中的腐蚀行为研究[J]. 表面技术, 2017, 46(8): 216-220.
ZHOU W, LAN W, ZHAO S, et al. Corrosion behavior of 42CrMo steel in chloride solution[J]. Surface technology, 2017, 46(8): 216-220.

[3] BASUMATARY J, NIE M, WOOD R J K. The synergistic effects of cavitation erosion-corrosion in ship propeller materials[J]. Journal of bio- and tribo-corrosion, 2015, 1(2): 12.

[4] DING Z X, WANG Q, CHEN Z H, et al. Research on cavitation erosion resistance of spraying and fusing Co-based and Ni-based coatings[J]. Journal of Hunan University, 2008, 35(1): 66-70.

[5] BORDEASU I, MITELEA I. Cavitation erosion behaviour of stainless steels with constant nickel and variable chromium content[J]. Materials testing, 2013, 54(1): 53-58.

[6] 王海军. 热喷涂材料及应用[M]. 北京：国防工业出版社, 2008.
WANG H J. Thermal spraying materials and their applications[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008.

[7] 赵刚, 丁彰雄, 王群. WC 颗粒对 Ni 基喷熔层抗汽蚀性能的影响[J]. 华电技术, 2007, 29(4): 48-51.
ZHAO G, DING Z X, WANG Q. Effect of WC on cavitation erosion resistance of nickel-based coatings[J]. Huadian technology, 2007, 29(4): 48-51.

[8] SANG K, LI Y. Cavitation erosion of flame spray weld coating of nickel-base alloy powder[J]. Wear, 1996, 189(189): 20-24.

[9] 康进兴, 徐英鸽, 赵文轸, 等. 镍基、铜基喷焊覆层的耐气蚀性研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2002, 25(4): 33-35.
KANG J X, XU Y G, ZHAO W Z, et al. Study on cavitation erosion resistance of flame spray welding nickel-based and copper-based coatings[J]. Ordnance material science and engineering, 2002, 25(4): 33-35.

[10] CHEN M F, SUN J S, YOU C, et al. Effect of chromium and silicon on microstructure and corrosion resistance of Ni-based superalloy[J]. Journal of Tianjin Institute of Technology, 2000(1): 006.

[11] 唐康康, 丁彰雄, 李超. 纳米WC增强Ni基合金喷熔层组织结构与抗磨粒磨损特性[J]. 表面技术, 2017, 46(8): 27-32.
TANG K K, DING Z X, LI C. Microstructure and abrasive wear resistance of nano-WC reinforced Ni-based alloy spray-melted coatings [J]. Surface technology, 2017, 46(8): 27-32.

[12] 张野, 王文权, 徐红勇. Mo 对等离子喷焊 Ni60A 涂层组织与性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2016, 37(7): 185-190.
ZHANG Y, WANG W Q, XU H Y. Effect of molybdenum on microstructure and properties of Ni60A coatings produced by plasma spaying welding[J]. Transactions of materials and heat treatment, 2016, 37(7): 185-190.

[13] SHRESTHA S, HODGKIESS T, NEVILLE A. Erosion-corrosion behaviour of high-velocity oxy-fuel Ni-Cr-Mo-Si-B coatings under high-velocity seawater jet impingement[J]. Wear, 2005, 259(1): 208-218.

[14] 王凤平, 敬和民, 辛春梅. 腐蚀电化学[M]. 北京：化学工业出版社, 2017.
WANG F P, JING H M, XIN C M. Corrosion electrochemistry[M]. Beijing: Chemical industry press, 2017.

[15] 周嵩然. WC/La_2O_3 对镍基自熔性合金涂层组织和性能影响的研究[D]. 阜新：辽宁工程技术大学, 2014.
ZHOU S R. Effects of WC/La_2O_3 on the microstructure and properties of nickel-based fluxed alloy[D]. Fuxin : Liaoning Technology University, 2014.

[16] MONTICELLI C, FRIGNANI A, ZUCCHI F. Investigation on the corrosion process of carbon steel coated by HVOF WC/Co cermets in neutral solution[J]. Corrosion science, 2004, 46(5): 1225-1237.