

WC 对铜基和镍基喷焊覆层材料耐气蚀性能的影响

Effect of WC on Cavitation Erosion Resistance of Copper-based and Nickel-based Coatings

康进兴 (空军工程大学工程学院, 西安 710038)

赵文轸 (西安交通大学金属材料强度国家重点实验室, 西安 710049)

KANG Jin-xing

(The Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi an 710038, China)

ZHAO Wen-zhen (State Key Laboratory for Mechanical Behavior of Material,

Xi an Jiaotong University, Xi an 710049, China)

摘要: 在 CuNiSiB、NiCrSiB 自熔合金粉末中添加 WC 陶瓷颗粒, 利用氧乙炔焰粉末喷焊工艺制备覆层材料。用超声波振动气蚀仪对覆层材料进行耐气蚀性能研究, 用扫描电子显微镜对覆层材料表面气蚀破坏形貌进行观察。结果表明: 复合覆层材料的耐气蚀能力比基体强; 提高 CuNiSiB 覆层材料耐气蚀能力的途径是强化晶界。还探讨了覆层材料的气蚀破坏机理。

关键词: 气蚀; WC; 喷焊; 复合材料; 表面防护

中图分类号: TK730.5+2 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381 (2002) 03-0003-04

Abstract: WC particle was added in CuNiSiB and NiCrSiB self-fluxing alloy powder. The coating were made with flame spray welding. The cavitation erosion were investigated by ultrasonic vibration cavitation instrument. The cavitation erosion morphology was observed by SEM. Results show that the cavitation erosion resistance of composite coating is better than based alloy. That raising the cavitation erosion resistance of CuNiSiB coating method is to reinforce grain boundary. Cavitation erosion mechanisms of the test coatings was also discussed in the paper.

Key words: cavitation erosion; WC; spray welding; composite; surface protection

由于泥砂的存在, 水轮机等水力机械过流部件遭受浆体冲蚀和气蚀的联合破坏, 严重制约着水利水电事业的发展^[1-3]。采用复合材料是使部件既抗冲蚀又耐气蚀材料的途径之一。即选择塑性韧性好、耐气蚀性能优的基体, 加入 WC 陶瓷颗粒。这样 WC 颗粒能有效地阻止砂粒的冲蚀, 基体又能抵抗气蚀破坏, 使复合覆层材料达到既抗冲蚀又耐气蚀的目的^[4-8]。氧乙炔焰粉末喷焊工艺是适合水轮机等水力机械过流部件现场施工的简便、经济、有效的覆层法之一^[8,9]。在 NiCrSiB 中加入 35% 的 WC 形成的复合覆层材料, 可以使其抗浆体冲蚀能力提高 5.4 ~ 7 倍^[8]。但加入 WC 颗粒后对气蚀性能的影响还未见报道^[4-11]。

本文通过对比试验, 研究了加入 WC 陶瓷颗粒对气蚀性能的影响, 分析了喷焊覆层材料的气蚀剥落机理。

1 实验方法

1.1 覆层材料的制备

喷焊基体选用 A3 钢, 其形状尺寸按振动空蚀试验方法要求^[12]。覆层材料选用耐腐蚀、塑韧性好的 CuNiSiB 和 NiCrSiB 合金作为复合材料的基体^[13-16], 加入比 SiO₂ 硬度更高的 WC 陶瓷颗粒以达到抗浆体冲蚀的目的。喷焊用粉末的化学成分、粒度及覆层材料的名义硬度如表 1 所示。

采用氧乙炔焰粉末喷焊工艺制备覆层材料。制备覆层时, 先将 A3 钢按尺寸要求加工成气蚀试样基体, 其次对喷焊表面进行预处理, 然后按喷焊第二步法要求对试样进行喷焊^[17], 喷焊厚度 1.5mm, 自然冷却后, 将喷焊表面依次在砂纸及绒布上进行打磨、抛光。

1.2 实验过程

气蚀实验设备为无锡超声电子设备有限公司产的 H66025 磁致伸缩超声波振动气蚀仪。实验溶液为自来水, 水温控制在 11 ~ 15℃, 振幅 60μm, 其余参数按振动空蚀试验方法^[12]。气蚀实验过程中, 用

表 1 合金粉末的化学成份、粒度及喷焊覆层的名义硬度

Table 1 Chemical composition and particle size of alloy powder and coatings hardness

合金粉末	编号	化学成分/ 质量分数 (%)						粒度/目	覆层硬度
		Ni	Cr	Si	B	Fe	C		
NiCrSiB	1	余	16	4.5	3.5	15	0.8	150 ~ + 300	HRC 60
NiCrSiB+ 35% WC	2	NiCrSiB+ 35WC						150 ~ + 300	HRC 63
CuNiSiB	3	13		2	1	Cu	余	150 ~ + 300	HB200
CuNiSiB+ 30% WC	4	CuNiSiB+ 30WC						150 ~ + 300	WC 70

TG328A 光电分析天平 (精确度 0.1mg)，每 2h 测量一次试样失重量，并用扫描电子显微镜观察覆层材料表面气蚀破坏形貌，直至瞬间失重率达到稳态为止。

2 结果与讨论

2.1 覆层材料的相对耐气蚀性

覆层材料的耐气蚀能力用相对耐气蚀性来表示。根据覆层材料的气蚀破坏失重量，计算出覆层材料的瞬间失重率和累计失重率。按稳态时的累计失重率，计算出其相对耐气蚀性^[18—20]，公式为：
相对耐气蚀性 (ϵ) = 标准试样累计失重率/ 试样累计失重率

其中以 NiCrSiB 覆层材料作为对比标准材料，经计算，几种覆层材料的相对耐气蚀性如表 2 所示。

表 2 几种覆层材料的相对耐气蚀性

Table 2 The relative cavitation resistance of the coatings

覆层材料	CuNiSiB	CuNiSiB+ 30% WC	NiCrSiB	NiCrSiB+ 35% WC
ϵ	1.18	1.27	1	1.23

2.2 CuNiSiB 覆层材料的气蚀机理

气蚀初期，沿相界出现裂纹，即裂纹起源于相界处。覆层表面在微射流冲击作用下^[21, 22]，发生弹性和塑性变形，由于相邻两相的晶体结构不同，造成塑性变形不协调。相界附近造成位错塞积，在相界局部形成高应力场，随着微射流的不断冲击，当位错塞积达到一定程度，在相界上萌生裂纹。裂纹产生后，又成为气蚀源，若微射流冲击在已形成的裂纹中，则成为一“水楔”，将裂纹“劈”开；若微射流的冲击点在裂纹的一侧，会产生一错开力，使裂纹沿受力方向错开。在三角相界处尤为明显，若微射流冲击在已经形成的小孔处，冲击波被小坑的壁反射，形成一更高能量的微射流，向小孔的深度方向推进，因而出现在小而深的孔洞。随着时间的推移，由于 CuNiSiB 覆层材料硬度低，塑性好，在微射流冲击作用下，发生塑性变形。同

时出现大的气蚀凹坑，并逐渐加深，最终使两相邻凹坑的凸边出现挤压性断裂而流失。气蚀凹坑本身又是气蚀源，若微射流正好冲击到气蚀凹坑处，冲击波被凹坑壁反射，形成一更高能量的微射流，向凹坑的深度方向推进，多次冲击后，凹坑加深或形成深孔。晶粒在微射流的冲击下，滑移面上的领先位错在晶界上受阻，形成位错塞积，造成应力集中，当应力峰值达到某临界值时，引起晶界开裂。发生沿晶断裂，如图 1 所示。由于出现沿晶断裂，气蚀凹坑的凸起在晶界边沿容易断裂而流失，进而出现严重流失，加剧了覆层材料的气蚀破坏速度。试验结果表明，强化晶界可使其耐气蚀能力得到提高。

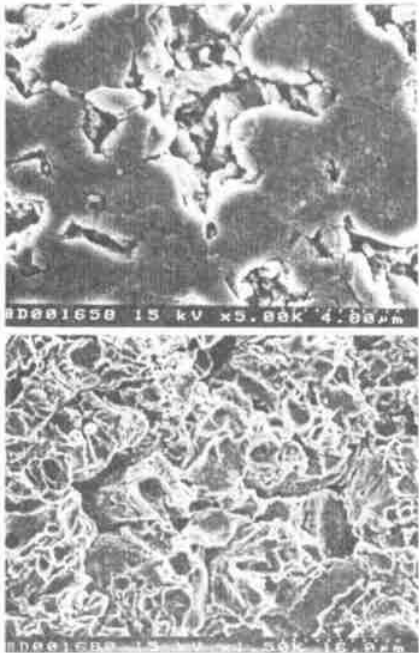


图 1 CuNiSiB 覆层材料的气蚀形貌

Fig. 1 Morphology of CuNiSiB coating after cavitation erosion

2.3 NiCrSiB 覆层材料的气蚀机理

气蚀初期，沿相界出现裂纹，即裂纹同样起源于相界处。其机理也与 CuNiSiB 覆层材料相同。随着时

间的推移, 各相出现不均匀气蚀剥落, 富镍的固溶体基体塑韧性好, 硬度低, 在微射流冲击作用下, 发生塑性变形, 出现气蚀凹坑, 产生加工硬化, 经反复塑性变形发生断裂而流失。硬质相硬度高, 对微射流冲击抗力大。但由于固溶体基体相优先被气蚀而剥落, 粗大的硬质相对基体起不到较好的保护作用, 剩余硬质相失去基体的固定和保护, 在微射流冲击作用下, 以脆性断裂形式流失, 如图 2 所示。由于基体与硬质相之间不能起到相互保护作用, 分别被气蚀而剥落, 加剧了材料的流失, 所以 NiCrSiB 覆层材料的耐气蚀能力较低。

2.4 复合覆层材料的气蚀机理

加入 WC 陶瓷颗粒的目的是提高复合覆层材料的抗浆体冲蚀能力。但在水力机械过流部件中, 覆层材料除受到浆体冲蚀作用外, 同时还存在着气蚀浸蚀的微射流冲击作用。对于塑性韧性好 CuNiSiB 基体, 在气蚀微射流的冲击作用下, 能够产生较大的塑性变形, 多次冲击后出现加工硬化以致断裂, 其机理同前所述。对于 NiCrSiB 基体, 首先是其硬度低的富镍的固溶体基体相优先被气蚀而流失, 其次是硬质强化相发生脆性断裂而流失, 其机理同前所述。在两种基体中分别加入的 WC 陶瓷颗粒, 为体积大, 硬度高、

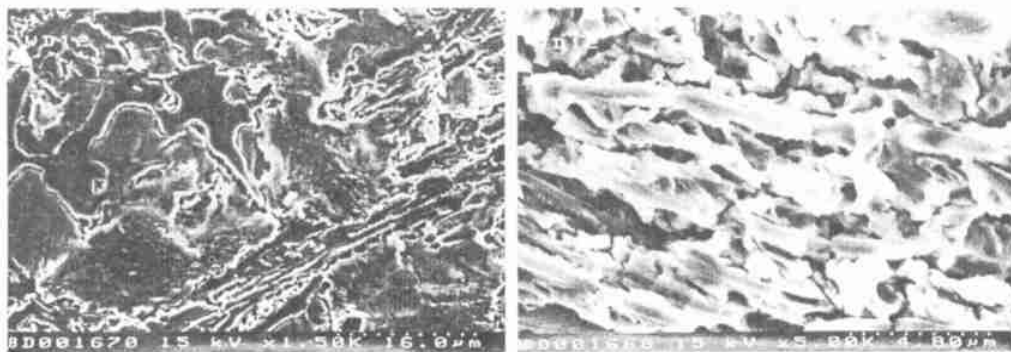


图2 NiCrSiB 覆层材料的气蚀形貌

Fig.2 Morphology of NiCrSiB coating after cavitation erosion

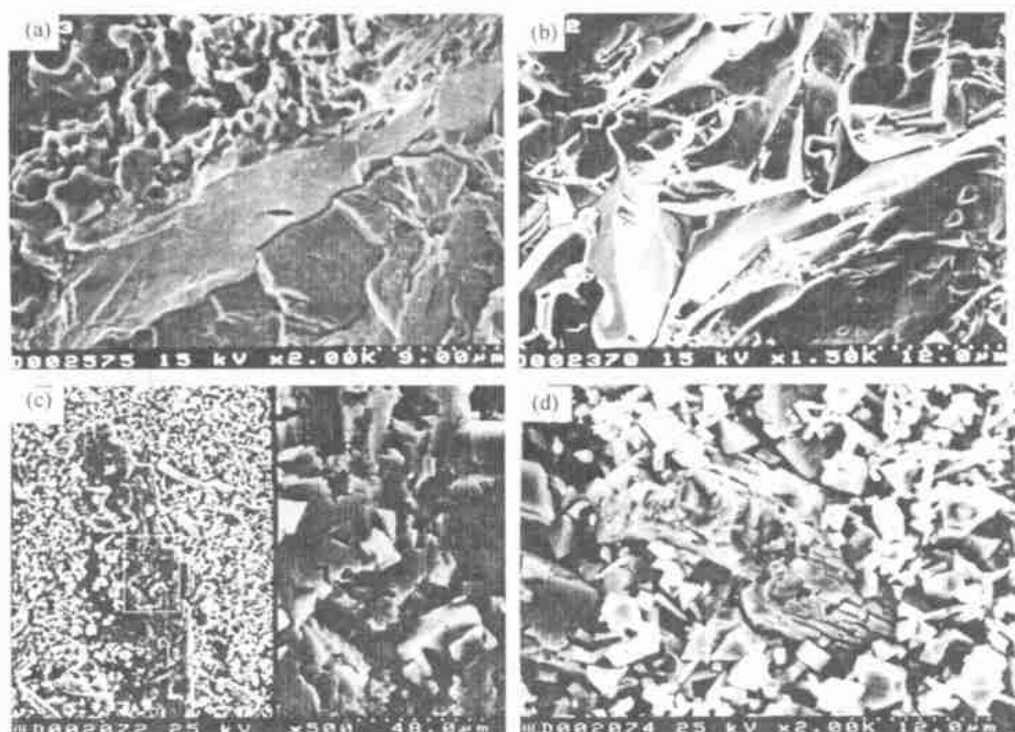


图3 复合覆层材料的气蚀形貌 (a, b) CuNiSiB+ 30% WC; (c, d) NiCrSiB+ 35% WC

Fig.3 Morphology of composite coating after cavitation erosion (a, b) CuNiSiB+ 30% WC; (c, d) NiCrSiB+ 35% WC

脆性大、弹性模量高的金属间化合物。WC 颗粒的气蚀破坏为在微射流多次冲击作用下,沿解理面断裂方式的流失。由于微射流冲击到 WC 颗粒时,部分力还可传到基体中,使 WC 的受力得到部分缓解,同时 WC 颗粒本身有较好的耐气蚀浸蚀性能,WC 陶瓷颗粒与基体有着良好的结合,在抵抗气蚀微射流冲击时,WC 颗粒和基体之间起到了一定的保护作用。达到稳态时,出现两种性能完全不同的破坏过程同时进行的现象。如图 3 所示。因此复合覆层材料的耐气蚀能力得到一定的提高。

3 结论

(1) CuNiSiB 覆层材料气蚀破坏为塑性变形产生加工硬化以致断裂,并且沿晶界出现裂纹,因此,强化晶界是提高其耐气蚀破坏能力的一条重要途经。

(2) NiCrSiB 覆层材料气蚀破坏为富镍固溶体基体优先剥落,剩下硬质相骨架,失去基体的固定与保护,发生脆断而流失,固溶体基体与硬质强化相先后被气蚀而剥落,不能起到相互保护作用,因此耐气蚀破坏能力较低。

(3) 在 CuNiSiB、NiCrSiB 中加入 WC 陶瓷颗粒形成的 CuNiSiB+30% WC 和 NiCrSiB+35% WC 复合覆层材料,其耐气蚀能力与基体相比得到了一定的提高,相对耐气蚀性分别为 1.08 和 1.23。

参考文献

- [1] 段昌国. 水轮机沙粒磨损 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1981, 10: 1—8.
- [2] 李诗卓, 董祥林. 材料的冲蚀磨损与微动磨损 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1987, 10: 13—325.
- [3] 常近时, 寿梅花, 于希哲. 水轮机运行 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1983.
- [4] 许斌, 冯承明, 杨胶溪. 碳化钨-高铬铸铁表面复合材料耐磨粒磨损性能的研究 [J]. 摩擦学报, 1998, 18 (4): 322—326.
- [5] 梁作俭, 邢建东等. 碳化钨/铁基铸造复合材料的抗冲蚀磨损性能 [J]. 铸造, 2000, 49 (5): 265—267.
- [6] 王长生, 杨蕴林. WC 加入量对 Ni60 自熔合金喷焊层磨粒磨损性能影响 [J]. 热加工工艺, 1997, 1: 28—30.
- [7] [苏] 裴拉也夫. 华中工学院水力机械教研室译校. 水轮机汽蚀 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1981, 3: 237—280.
- [8] 康进兴. 用表面覆层法提高材料耐冲蚀腐蚀性 [D]. 西安: 西安交通大学, 2001: 1—12.
- [9] Kezheng Sang, Yugang Li. Cavitation Erosion of Flame Spray Weld Coating of Nickel-Base Alloy Powder [J]. Wear, 1995, 189: 20—24.
- [10] 门志慧, 陈学定. 水轮机抗磨蚀用喷焊粉末及其工艺研究 [C]. 水机磨蚀, 1997 年论文集: 15—21.
- [11] Kwok C T, Cheng F T, Man H C. Laser surface Modification of UNS S31603 Stainless Steel Using NiCrSiB Alloy for En-

hancing Cavitation Erosion Resistance [J]. Surface and Coatings Technology, 1998, 107: 31—40.

- [12] GB6383-86 振动空蚀试验方法 [S].
- [13] Marek Szkodo, Boleslaw G. Giren, Janusz Steller. Cavitation Resistance of New Chromium-manganese and Chromium-Cobalt Electrodes and Their Metallographic Structures [J]. Wear, 1999, 233-235: 111—119.
- [14] Pugsley V A, Allen C. Microstructure/property Relationships in the Cavitation Erosion of Tungsten Carbide-Cobalt [J]. Wear, 1999, 233-235: 93—103.
- [15] Jiang G B, Zheng Y K, Yang Y Y, et al. Cavitation Erosion of Bainitic Steel [J]. Wear, 1998, 215: 46—53.
- [16] Marcio Gustavo Di Vernieri Cuppari, Frank Wischnowski, Deniol K. Tanaka, et al. Correlation between Microstructure and Cavitation Erosion Resistance of High-chromium Cast Steel—preliminary Results [J]. Wear, 1999, 225-229: 517—522.
- [17] 徐滨士. 表面工程与维修 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1996, 6: 284—302.
- [18] 许洪元, 罗先武. 磨料固液泵 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2000, 3: 165—1804.
- [19] 刘家俊. 材料磨损原理及其耐磨性 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1993, 11: 180—1874.
- [20] 钟群鹏, 田永江. 失效分析基础知识 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1990, 4: 446—464.
- [21] 孙寿. 水泵汽蚀及其防治 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1989: 1—6.
- [22] 孙寿. 水泵汽蚀研究的现状 [J]. 水泵技术, 1995, 3: 39—47.

基金项目: 国家自然科学基金资助 (59831030)

收稿日期: 2001-10-18; 修订日期: 2002-01-31

作者简介: 康进兴 (1964—), 男, 讲师, 硕士, 从事表面工程、失效分析研究, 联系地址: 西安市空军工程大学工程学院机械教研室 (710038)。

* * * * *

中国航空学会材料工程专业分会 2002 年学术活动安排

1. 第四届航空铸造高温合金学术会议
2002 年 5 月 10~15 日 广西北海
联系人: 沈阳金属所 郭建亭
电 话: (024) 23843531-5449
2. 航空非金属材料及表征技术学术研讨会
2002 年 3 季度 地点待定
联系人: 北京航空材料研究院 张世斌
电 话: (010) 62456622-2411
3. 第六届先进材料技术研讨会
2002 年 11 月上旬 广东珠海
联系人: 北京航空材料研究院 郑运荣 阮中慈
电 话: (010) 62458039