

水轮机抗磨蚀金属材料的优化设计

王 飏, 张自华, 王宇栋

(云南工业大学, 昆明 650051)

[摘要] 对抗磨蚀金属材料的基础研究表明, 在 10 种常用结构材料的金属中, 以钨、钴、铬的抗气蚀性最佳; 生产应用研究结果表明, 钨系材料中的火焰喷焊 WC-M 硬面陶瓷材料, 铬系材料中的电镀稀土铬硬面材料, 钴系材料中的等离子喷焊 CoCrWC 硬面材料, 都是抗磨蚀性能较优, 成本较低, 并可进入工业应用的水轮机抗磨蚀结构材料。

[关键词] 水轮机; 磨蚀材料; 设计

在含泥沙水中工作的水轮机, 受到严重磨蚀而快速损坏, 需经常停机检修, 甚至在汛期也要被迫放水, 造成经济和能源巨大损失。因此, 解决水轮机快速磨蚀损坏问题, 是发展水电事业的一项重要任务。磨蚀是气蚀与泥沙冲刷磨蚀联合作用的结果^[1]。据现场观察, 磨蚀损坏比单独的气蚀或单独的泥沙磨损要严重得多。因目前对金属磨蚀损坏机理尚未充分了解^[2], 加之抗磨蚀金属材料研究又缺乏全面和系统的报道, 抗磨蚀材料研究至今仍多用试探和经验方法进行费时的试验摸索。为使抗磨蚀材料的研制、设计和应用少走弯路, 必须把握抗磨蚀材料设计的规律和体系。本文论述了在抗磨蚀材料方面的研究成果, 揭示了抗磨蚀材料设计的内在规律和体系。

1 试验材料与方法

在抗磨蚀材料设计基础研究中, 选取常用结构材料铝、镁、锌、铜、铁、镍、钼、铬、钴、钨等 10 种工业纯金属作试验材料, 加工成 $\phi 30 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ 的试片, 在电磁共振式高速气泡发生器中用工业水作介质接受气蚀试验, 以单位时间试片减薄作为气蚀损耗的测量依据。在抗磨蚀材料生产应用设

计研究中, 取 WC-M 硬面陶瓷和电镀稀土铬硬面复合材料(母材均为不锈钢)作主要研究对象, 做成 $40 \text{ mm} \times 25 \text{ mm} \times 7 \text{ mm}$ 的试验叶片, 安装于转轮轴上, 在水沙比为 6:4 (质量) 的介质中高速旋转, 接受快速磨蚀, 以叶片的单位面积失重或者以叶片的相对失重作为磨蚀损坏速度的测量依据。此外, 还采用把被考核的材料直接安装在水轮机上, 连续运行发电 1 到 3 年后, 停机观察材料变化的方法, 进行工业试验。

2 结果与讨论

2.1 抗磨蚀金属材料基础研究

图 1 绘出了 10 种金属被气蚀破坏的速率(单位时间内厚度的减薄)与气蚀作用时间的关系, 图中横坐标为作用时间, 纵坐标为单位时间内材料厚度变化。图 1 表明, 第一, 在气泡群环境作用下, 各种金属的气蚀损坏速度都是不均匀的, 是在一个特定时间间隔内暴发式地产生, 即出现气蚀峰。气蚀作用开始时到气蚀峰出现的中间间隔为气蚀孕育期。气蚀峰越低, 孕育期越长的金属是抗气蚀性能较优的金属。第二, 10 种金属中, 钨、钴、铬具有较好的抗气蚀性能; 铝、镁、锌的抗气蚀性能则

[收稿日期] 1999-07-27

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目(59461002)

[作者简介] 王飏(1939-), 男, 云南昆明市人, 云南工业大学机械学院教授

较差。为了寻求金属的抗气蚀性能与金属宏观性能之间的相依关系，表 1 给出 10 种参试金属的有关数据。

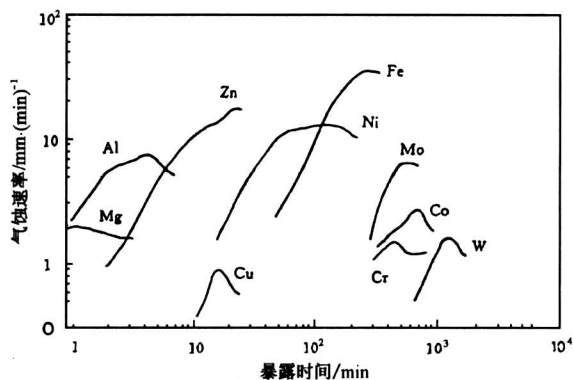


图 1 10 种金属的气蚀速率与暴露时间的关系

Fig.1 Cavitation erosion rate as function of exposure time for ten tested metals

表 1 10 种金属的孕育期与某些机械性能的关系^[2~4]

Table 1 Some mechanical properties and incubation times of ten tested metals

金属	Al	Mg	Zn	Cu	Ni	Fe	Mo	Co	Cr	W
显微硬度/HV	160	300	320	540	720	580	1 560	1 620	1 500	4 868
孕育期/min	1.2	1.0	4.5	8.1	36.0	120	380	360	340	738
屈服强度/ $N \cdot (mm)^{-2}$	1.04	2.90	0.95	2.50	18.0	84	154	138	429	380

状态，在泥沙颗粒的冲击下，最容易脱离材料本体，而以微碎片形式脱落。随着磨蚀过程的进行，被冲刷磨损的周边面积不断扩大。综合上述两点，可以认为，具有优良抗气蚀性能和有足够高硬度（HRC58 以上）的材料，才可能是优良的抗磨蚀材料。根据上述论点和本文图 1 和表 1 的结果，便可提出抗磨蚀金属材料生产应用设计的三点基本思想：第一，抗磨蚀金属材料必须以抗气蚀性能优良的钨、钴、铬为基本成分；第二，为获得更优的抗磨蚀性能，在材料成分设计中，需在上述基本成分中添加能提高硬度和改善工艺性能的合金元素；第三，由于钨、钴、铬的价格高，资源少和成型加工困难等原因，在抗磨蚀材料制备工艺设计中，不宜独立用钨、钴、铬作基本材料，只宜通过表面处理，在钢件基材上制成钨、钴、铬表层合金。据上述设计思想，目前已设计和研制出如下三个系列的抗磨蚀金属材料。

2.2.1 钨系抗磨蚀材料 据上述三点设计基本思想，在钨系材料成分设计中，常选取碳化钨粉末作

由图 1 和表 1 的结果可看出，金属的气蚀峰高度，孕育期长短与其显微硬度和屈服强度有着密切关系，具有较高硬度和较高屈服强度的金属，将具有较长的孕育期和较低的气蚀峰，即具有较优的抗气蚀性能。这一结论也是抗气蚀、抗磨蚀金属材料设计的基本依据之一。

2.2 抗磨蚀金属材料设计

笔者的研究表明^[5]，具有较高硬度（大于 HRC45）和较优抗腐蚀性（超过 2Cr13 马氏体不锈钢的抗腐蚀能力）的金属材料，必然具有较优的抗气蚀性能。同时，笔者从气蚀和磨蚀金属试样的电镜图片分析结果看出，在含泥沙水流中，金属材料的磨蚀是两种损坏形式相互影响的结果，只要气蚀坑一出现，就为泥沙冲刷磨损创造了有利条件。气蚀坑周边的材料，因结合力处于不对称（不稳定）

基本原料，在钢母材上制取 WC 硬面陶瓷材料。这不仅节省了钨的用量，降低了熔点，而且还使材料硬度和抗磨蚀性有更大提高。制取硬面陶瓷，可用火焰喷焊，激光熔涂和堆焊法，但下述的试验表明，这三种方法中，只有火焰喷焊所获得的 WC 硬面陶瓷材料表面较平整，成分和硬度较均匀，因此，工艺设计中，应选择火焰喷焊。但因 WC 的线膨胀系数（ $6.9 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ）与母材钢的线膨胀系数（ $11.3 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ）差异很大，在喷焊冷却过程中，WC 硬面陶瓷层会与母材分离。因此，在成分设计中，还应加入合金成分 M（M 代表 Ni、Fe、Cr、Si、Mn、B 等）。M 的线膨胀系数应与母材钢较接近，M 的熔点比 WC 低。而且 M 与母材和 WC 之间均具有良好的互溶性，M 加入后，在喷焊的烧熔阶段，WC 粉末在母材上产生液相烧结作用，M 不仅在硬面陶瓷与母材之间，也在 WC 颗粒之间起粘附和协调作用。此外还起到使硬面陶瓷致密化的作用。有关 WC-M 的喷焊工艺，材料成分和显微组织等问题，笔者已在文献[6]中报道过。

为证实上述设计思想的正确性,选取 WC-M 硬面陶瓷复材(母材为 18-8 不锈钢, WC-M 层厚约 0.7 mm, 表层硬度为 HRC65-68)为主要考核对象,其余 4 种(见图 2)为参比材料,仿轴流式水轮机工况,以 300 r/min 的转速在泥沙水介质中旋转,经过 448 h 快速磨蚀后,叶片的单位面积失重即代表材料的抗磨蚀性优劣,所得结果如图 2。从图 2 可见,5 种参试材料中,氧乙炔火焰喷焊的 WC-M 硬面陶瓷材料抗磨蚀性最好,其抗磨蚀性约为 18-8 不锈钢的 2.5 倍,比进口的 Stallite 合金(CoCrWC 合金)抗磨蚀性约高 40%。从图 2 还可看出,WC 堆焊层或 WC-M 激光熔涂层,虽其成分与火焰喷焊的 WC-M 接近,但因其表层陶瓷硬度波动较大,WC 颗粒分布不均等原因使其抗磨蚀性不如火焰喷焊优良。由笔者做成的火焰喷焊 WC-M 硬面陶瓷,已于 1994 年就投入多泥沙河流大中型电站应用,并表现出优良的抗磨蚀性。如三门峡电站,汛期泥沙含量约为 330 kg/m³,原全不锈钢水轮机过不了一个洪水期就严重损坏,使用 WC-M 硬面陶瓷后,连续运行三个汛期,表面尚完好。

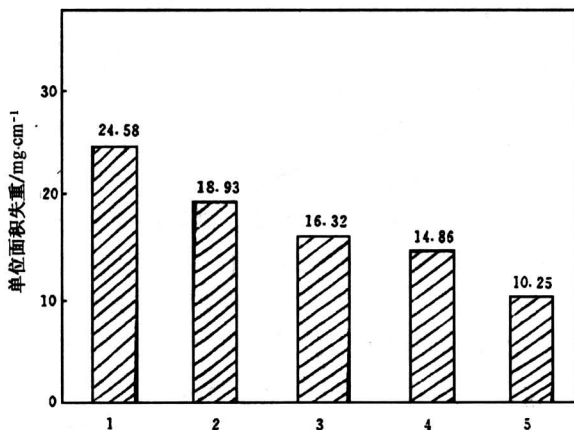


图 2 不同材料磨蚀 448 h 后的单位面积失重

1—18-8 不锈钢; 2—WC 堆焊; 3—斯泰兰合金; 4—激光熔涂 WC-M; 5—氧乙炔火焰喷焊 WC-M

Fig.2 Unit area mass loss of different materials after 448 hours abrasive erosion

2.2.2 铬系抗磨蚀材料 根据上述设计思想,铬不能独立作为水轮机的基材,只能在钢基材上制取铬基表层合金。因此,在工艺设计中,可用电镀法。但常规电镀硬铬层的硬度仍不够高(约为 HV800~850),且因镀液分散能力差,所需电流密

度高等原因,当镀层超过 0.2 mm 时,便容易产生“毛刺”或“胞瘤”,并容易产生厚薄不均的“边缘效应”。为克服这些缺点,在成分设计时,需在镀液中加入稀土化合物,形成稀土铬合金镀层。稀土加入后,不仅使镀层硬度提高到 HV1000 左右,还改善了镀液的分散能力,降低了电流密度,可使镀层增加到 0.4 mm 以上,也不易产生镀层质量缺陷。有关电镀稀土铬的工艺、镀液成分和镀层的组织结构等问题,笔者已在文献[7]中作过报道。

图 3 为含电镀稀土铬在内的 7 种不同材料,在泥沙水流中经 300 h 磨蚀作用后的相对失重测量结果(其他试验条件和试验方法同上),主要考查材料为 410 不锈钢上电镀 0.4 mm 厚的稀土铬(基材硬度为 HV300~350),其余 6 种为参比材料。

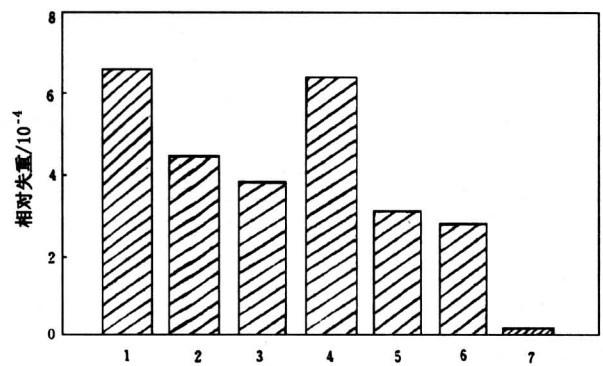


图 3 不同材料在磨蚀 300 h 后的相对质量损失

1—17-4PH 沉淀硬化不锈钢; 2—17-4PH+570℃ 离子氮化; 3—17-4PH+570℃ 离子氮化; 4—410 不锈钢; 5—410+570℃ 离子氮化; 6—410+520℃ 离子氮化; 7—电镀稀土铬

Fig.3 Relative mass loss of various materials after 300 hours abrasive erosion

从图 3 可见,电镀稀土铬不锈钢,其抗磨蚀性能比原不锈钢约高 28 倍,与不锈钢加离子氮化相比,约高 12~18 倍。电镀稀土铬后抗磨蚀性提高的原因,不仅因镀层硬度高,还与镀层有镜面般的光洁度和较好的耐腐蚀性有密切关系^[7]。冲击式水轮机的喷针头和护环,混流式水轮机转轮经电镀后,抗磨蚀寿命显著提高,如云南以礼河水电站的针头和护环,汛期泥沙含量高,原不锈钢喷针头和护环,使用半年后已严重损坏;经电镀后,三个汛期后还可继续用。又如云南天生坝水电站 60 型混流式转轮,经整体电镀后,连续运行 3 年还完好,而原不锈钢转轮一个汛期后就必须大修。

与电镀稀土铬相比, WC-M 的抗磨蚀性更高一些, 但这两种材料是互补的, 对加工和安装精度要求较高的冲击式水轮机针头、护环, 混流式水轮机的抗磨板和导叶, 只宜采用整体电镀稀土铬(若采用 WC-M, 精度将不能满足使用要求)。而尺寸大的各型水轮机转轮和其他过流件, 则难以实施整体电镀, 加之安装精度有所放宽, 适宜采用喷焊 WC-M 硬面陶瓷。

2.2.3 钴系抗磨蚀材料设计 在钴系抗磨蚀材料的成分设计中, 常加入 Cr、W、C 等合金元素, 这不仅减少了昂贵的钴用量, 而且还使材料的硬度和抗磨蚀性进一步提高。为减少昂贵材料的用量, 在抗磨蚀材料工艺设计中, 仍把上述 CoCrWC 合金做成粉末, 然后用等离子火焰喷焊于不锈钢基材上, 形成钴基硬面材料^[8]。日本已研制出质量分数分别为 Co 20%~60%, Cr 10%~40%, WC 5%~10% 的合金粉末, 并以等离子火焰喷焊于水轮机或水泵上, 形成抗磨蚀硬面层^[9]。因钴合金粉末售价依然很高, 在我国的水电站难以推广应用, 在国内亦较少研究。

3 结论

在适合做工业构件的 10 种金属中, 以钨、钴、铬的抗气蚀性能最佳, 在抗磨蚀材料成分设计中, 应以钨、钴、铬作基本成分。

钨系抗磨蚀材料的设计, 应以 WC 粉末作基本成分, 并添加熔点较低, 互溶性好的合金成分 M, 用火焰喷焊在钢母材上, 制成 WC-M 硬面陶瓷材料, M 起协调, 粘结和增加致密度等作用。

铬系抗磨蚀材料的设计, 应采用在钢母材上镀铬, 但为增加镀层厚度和硬度, 改进镀层质量, 需采取电镀稀土铬。

钴系抗磨蚀材料的设计, 多半制成 CoCrWC 合金粉末, 以等离子喷焊在钢母材上制得钴基硬面材料。但因这类材料价格昂贵, 在我国较少研究和应用。

参考文献

- [1] 杜同. 摩擦磨损, 1980, (1): 16
- [2] Karimi A. Inter. Material Rev, 1986, 31 (1)
- [3] Vijn A K. Electrochemistry of Metal and Semiconductors [M], Dekker; New York, 1973
- [4] Feller H G. Wear, 1984, (93): 249~260
- [5] 王飏, 张自华. 金属材料的抗磨蚀性判据研究 [C]. 北京: 化工出版社, 1996
- [6] 王飏, 张自华. WC-M 硬面陶瓷材料及其在水轮机中的应用 [C]. 北京: 化工出版社, 1998
- [7] Wang Biao, Bell T. Proc. of 1st Inter. Conf. on Surface Engineering Practice [C]. London: 1989, 676~686
- [8] Karimi A. Wear, 1995, 186~187, 480~486
- [9] Mazshuwakay. JP 特开平 3-146297

General Optimization Design Research of Metallic Materials to Resist Cavitation Erosion and Abrasion

Wang Biao, Zhang Zihua, Wang Yudong

(Polytechnical University of Yunnan, Kunming 650051, China)

[Abstract] For the design optimization of erosion and abrasion resisting metallic materials basic study and productively applied research were conducted. Basic study indicates that W, Co and Cr have better erosion and abrasion resisting property than other ones among ten useful constructive metals. Productively applied research indicates that thermal sprayed WC-M hard faced ceramics in the tungsten parental materials, rare earth plating chromium in the chromium parental materials, and CoCrWC hard faced ceramic in the cobalt parental materials are better erosion and abrasion resisting materials with high performance and low cost.

[Key words] hydraulic turbine; cavitation erosion and abrasion materials; design