

水机材料的抗磨蚀性判据研究

王 飏, 王宇栋, 张自华, 叶献国

(昆明理工大学机电学院, 昆明 650051)

[摘要] 为了证实水机材料的抗磨蚀和抗空蚀性能与材料的常规宏观性能之间的相依关系, 选取4种具代表性的材料(碳化钨涂层、NiCr合金涂层、硼不锈钢涂层和钛), 进行空蚀和磨蚀试验, 并测试了它们的硬度和抗腐蚀性。试验结果表明, 材料的空蚀和磨蚀抗力与硬度和抗腐蚀性有着紧密的相依关系: 高硬度是抗磨蚀性优的第一判据, 较强的抗腐蚀性是第二判据; 高抗腐蚀性是抗空蚀性优的第一判据, 较高的硬度是第二判据。

[关键词] 水机材料; 磨蚀; 判据

[中图分类号] TG172.85 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2003)07-0058-04

1 引言

材料的抗空蚀(流体空化浸蚀)和抗磨蚀(空蚀加泥沙磨损的联合作用)是决定水力机械工作寿命的关键。材料的抗空蚀和抗磨蚀性的优劣, 至今仍无一致的认识和可靠的评判依据。近年来, 国外学者曾对金属材料的抗空蚀性与金属的堆垛层错能、结合能和屈服极限等性能的相依关系进行过初步研究。C.J.Heathcock在对空蚀钴基合金微观结构研究的基础上, 认为具有较低堆垛层错能的合金, 一般会有较优的抗空蚀性^[1]。德国学者H.G.Feller在对常见10种单金属空蚀孕育期研究的基础上, 提出金属的抗空蚀性随金属的共价结合能的升高而增大的观点^[2,3]。D.G.Rickerby等人在对多种钴基合金和不锈钢的抗空蚀性研究的基础上, 提出了金属的抗空蚀性随金属的屈服强度的升高而增大的看法^[4,5]。

国内的研究者提出, 金属材料的抗空蚀性能与材料的 $\sqrt{\sigma_b}$, $\sqrt{E_i}$, $\sqrt{E_p}$ (σ_b 为断裂强度, E_i 和 E_p 为冲击断裂的裂纹形成功和扩展功)成正比, 而与 $\sqrt{\epsilon_p}$ 和 \sqrt{S} 成反比(其中 ϵ_p 为断裂应变, S 为冲击断裂的挠度)^[6]。

关于水机用金属材料的抗磨蚀性与材料的其他宏观性能之间的相依关系, 在国外文献中, 致今未见报道。陈文革等人曾提出: 在水力学条件相同的情况下, 金属材料的抗磨蚀性同材料的硬度和 \sqrt{N} (N 为材料的冲击破断功)成正比的看法。然而, 根据目前国内外水机抗磨蚀材料的发展概况, 较优的水机抗磨蚀材料多为用喷焊、堆焊和电镀等方法制得的硬面复合材料。这类材料的基材为不锈钢或碳钢, 表层为抗磨蚀性较优的多元合金, 但不容易测得这些材料的堆垛层错能、结合能和屈服强度等性能指标。国外研究结果对国内生产实践的指导尚难实现, 而国内外研究报道均只局限于论述金属材料的抗空蚀性或抗磨蚀性与材料的某一个或某几个物理性能或力学性能之间的相依关系, 而对抗空蚀或抗磨蚀性影响十分重大的材料抗腐蚀因素却未加考虑和论述。

据笔者多年从事水机材料抗磨蚀性现场试验和实验室实验的观察与认识, 尽管影响材料抗磨蚀性的因素很多(含材料的若干性能指标和水力学条件因素等), 但在这些众多的影响因素中, 在水力学条件相同的情况下, 材料的硬度和抗腐蚀性是决定抗磨蚀性优劣的两个主要因素。因此, 弄清材料的

硬度和抗腐蚀性与抗磨蚀性之间的相依关系，对水机的生产和应用具有实用和指导意义。因为，金属材料的硬度和抗腐蚀性是容易测出的，而测试材料的抗空蚀性或抗磨蚀性不仅需昂贵的专门设备，而且还需耗费巨大的资金和很长的时间。

2 试验材料和方法

供试的 4 种材料中，第一种为纯度 99.5% 的钛棒。第二、三、四种以国产奥氏体不锈钢为基材，在其表面制成 3 种不同的复合材料：用电弧焊堆焊上 WC 金属陶瓷片，以 102 不锈钢焊条作粘结相（简称堆 WC）；用电弧焊堆焊上硼不锈钢焊条（简称堆 BSS）；用氧乙炔火焰喷焊上 NiCr 合金涂层（简称喷 NiCr）。三种复合材料形成后，车削和磨削加工成 $\phi 30$ ，厚 6 mm 的试样，机加工后复合层的厚度约为 1 mm。

磨蚀和空蚀在 30 kW 电机驱动的 $\phi 350$ 转盘式 NC 型空蚀机上进行。空蚀试验在不含泥沙的自来水中进行。磨蚀试验在含河沙 35 kg/m^3 的天然水中进行。材料的抗空蚀或抗磨蚀性由相同运行时间间隔内试样的失重量来判断。流动腐蚀试验在 150 W 电机驱动的叶浆搅拌槽中进行。试样安装在叶片位置，4 个试样同时参试，以试样的失重或增重和外观状态变化作为材料抗腐蚀性的评定依据。

3 结果和讨论

3.1 磨蚀试验

仿黄河中游洪水季的水力学条件，选取含黄河泥沙 35 kg/m^3 的天然水，流速分别取 29 m/s 和 35 m/s ，每次 6 个试样参试，在相同的水力学条件下进行快速磨蚀试验，每隔 3 h 停机称重，所得结果如图 1 和图 2 所示。

从图 1 和图 2 的结果可见，在磨蚀条件下，4 种参试材料的磨蚀抗力顺序是：

$$(\text{堆 WC})_{AR} > (\text{喷 NiCr})_{AR} > (\text{堆 BSS})_{AR} > \text{Ti}_{AR} \quad (1)$$

3.2 空蚀试验

空蚀试验在不含泥沙的自来水中进行。仿黄河中游水电站水力学条件，选取 29 m/s 和 35 m/s 两种水流速度，6 个试样在相同的水力学条件下进行空蚀试验，每隔 3 h 停机称重，所得结果如图 3 和图 4 所示。

从图 3 和图 4 的结果可见，在空蚀条件下，无

论水流速度大小如何，4 种参试材料的空蚀抗力顺序是：

$$(\text{堆 BSS})_{CR} > (\text{喷 NiCr})_{CR} \approx \text{Ti}_{CR} > (\text{堆 WC})_{AR} \quad (2)$$

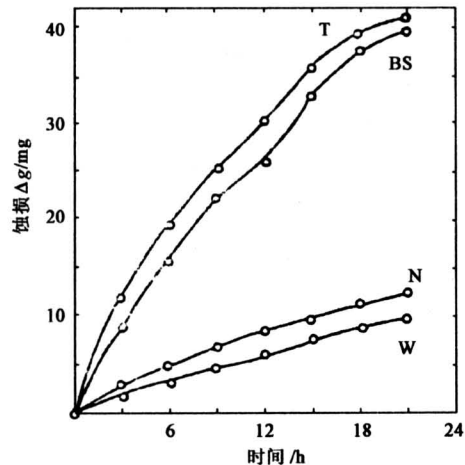


图 1 材料磨蚀失重随时间变化

Fig.1 Relationships of mass losses with time of cavitation erosion and abrasion (流速 29 m/s) (BS—堆 BSS; N—喷 NiCr; W—堆 WC; T—Ti)

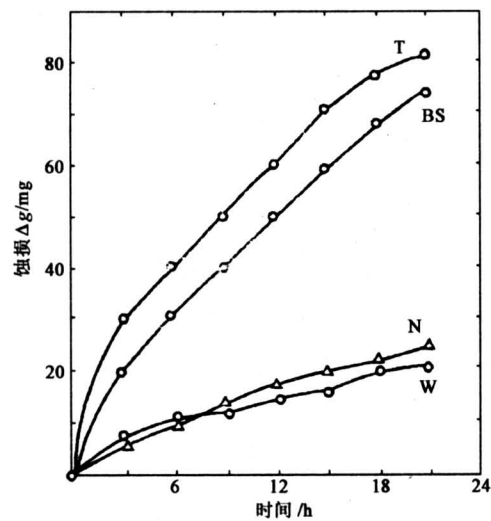


图 2 材料磨蚀失重随时间变化

Fig.2 Relationships of mass losses with time of cavitation erosion and abrasion (流速 35 m/s) (BS—堆 BSS; N—喷 NiCr; W—堆 WC; T—Ti)

3.3 硬度和抗腐蚀性测试

表 1 给出 4 种参试材料的硬度值范围和和在 25% NaCl 溶液中流动磨蚀 1 700 h 后的试样重量和外观变化情况。

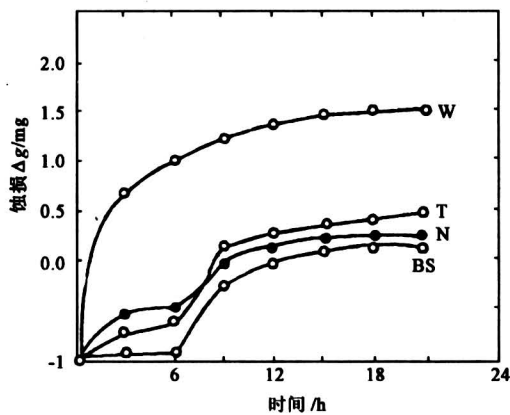


图3 材料空蚀失重随时间变化

Fig. 3 Relationships of mass losses with time of cavitation erosion

(流速 29 m/s) (BS—堆 BSS; N—喷 NiCr; W—堆 WC; T—Ti)

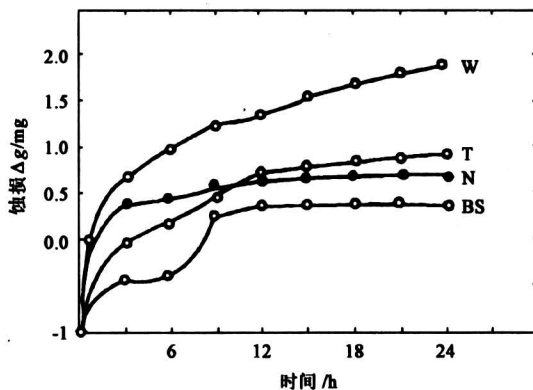


图4 材料空蚀失重随时间变化

Fig. 4 Relationships of mass losses with time of cavitation erosion

(流速 35 m/s) (BS—堆 BSS; N—喷 NiCr; W—堆 WC; T—Ti)

表1 4种材料的硬度和流动腐蚀1700h后单位面积失重及外观变化

Table 1 Hardnesses and variations of materials masses and appearances after 1700 h corrosion

| 材料 | Ti | 堆 BSS | 喷 NiCr | 堆 WC |
|---------------------------|-------|---------|---------|---------|
| 表层硬度 (HRC) | 15~19 | 46~49 | 54~56 | 59~61 |
| 腐蚀失重 (g/cm ²) | 0.000 | -0.0018 | +0.0090 | -0.0405 |
| 外观变化 | 无变化 | 微锈斑 | 明显锈斑 | 多锈斑 |

从表1结果可见,按材料硬度从大到小的顺序

排列,可得出:

$$(堆 WC)_H > (喷 NiCr)_H > (堆 BSS)_H > Ti_H \quad (3)$$

按材料在 NaCl 溶液中单位面积的腐蚀失重量绝对值的倒数(即腐蚀抗力)从大到小的顺序排列,可得:

$$Ti_{COR} > (堆 BSS)_{COR} > (喷 NiCr)_{COR} > (堆 WC)_{COR} \quad (4)$$

上述结果中的硬度不等式(3)与抗磨蚀不等式(1)形成大致相对应的顺序。除钛以外,腐蚀抗力不等式(4)与空蚀抗力不等式(2)又形成大致对应的顺序。钛的例外可解释为,与其他3种参试材料相比,钛的硬度过低。国内外的许多研究和实践经验已经表明^[1~3,5,8],即使是空蚀条件下(水中不含泥沙),许多抗腐蚀性和硬度均较高的金属材料,如高强不锈钢、钨、钼、镍、铬、钴等,才具有较高的空蚀抗力,硬度很低的金属如铝、镁、锌、纯铁等,其空蚀抗力也很差。

上述结果表明,在典型抗磨蚀条件下(即水中含较多泥沙时),水机材料的抗磨蚀性主要取决于硬度和抗腐蚀性,只有当抗腐蚀性达到不低于18-8不锈钢,材料的抗磨蚀性才随硬度的增加而增加,此时材料的硬度可作为抗磨蚀性的首要判据,抗腐蚀性可作为第二判据。但决不能认为材料的抗磨蚀性完全取决于硬度,与材料的抗腐蚀性无关。笔者曾经用硬度高达HRC70,但抗腐蚀性仅与碳钢相当的钢结硬质合金作过抗磨蚀试验^[8],结果其抗磨蚀性并不高(低于硼不锈钢)。这些试验结果表明,当材料的抗腐蚀性处于较低水平时,材料的抗磨蚀性并不随硬度增加而增加,只有当材料的抗腐蚀性达到一定水平后(至少与18-8不锈钢相当),抗磨蚀性才随硬度增加而增加。

同样,在水中不含泥沙的典型空蚀条件下,材料的空蚀抗力也取决于硬度和抗腐蚀性两因素,只有当材料的硬度达到起码水平后(按经验需在HRC40以上),材料的抗空蚀性才随抗腐蚀性的增加而增加。此时,材料的抗腐蚀性高低可作为空蚀抗力的首要判据,而硬度可作为第二判据。笔者在研究不锈钢电镀稀土铬涂层和离子氮化涂层的抗磨蚀性与显微硬度和阳极化曲线的相依关系时,也得出了与本文试验完全相同的结论^[9]。

4 结论

1) 综合考虑材料的硬度和抗腐蚀性,可作为

评判水机材料抗空蚀和抗磨蚀性能的两个主要指标。

2) 在典型的磨蚀条件下 (水中含多量泥沙时), 只有当材料的抗腐蚀性达到不低于 18-8 不锈钢, 材料的抗磨蚀性才随硬度增加而增加。硬度是材料抗磨蚀性的第一判据, 抗腐蚀性是第二判据。

3) 在典型的空蚀条件下 (水中含泥沙极少时), 只有当材料的硬度达到起码水平后 (按经验在 HRC40 以上), 材料的抗空蚀性才随抗腐蚀性的增加而增加, 材料抗腐蚀性的高低是抗空蚀性的第一判据, 而硬度是第二判据)。

参考文献

- [1] Heathcock C J, Ball A. Cavitation erosion of cobalt-based stellite alloys cemented carbides and surfact-treated low alloy steels[J]. *Wear*, 1982: 11~27
- [2] Feller H G, Kharrazi Y. Deformation and erosion of f. c. c metals and alloys under cavitation attack [J]. *Wear*, 1984, (93): 249~260
- [3] Karimi A, Martin J L. Cavitation erosion of materials [J]. *Inter Materials Review*, 1986, 31(1): 1~25
- [4] Rickerby D G, Okada T. Incubation period and cavitation erosion Resistance of some Metals [J]. *Wear*, 1992, (156): 33~47
- [5] Verdon C, Karimi A, Martin J. A study of HVOF thermal sprayed tungsten carbide based coating [J]. *Materials Science and Engineering*. 1998, (A246): 11~24
- [6] 陈文革, 谷臣清, 沈福三. 钢的气蚀抗力与力学性能的相关性[J]. *水力发电学报*, 1998, (2): 79~87
- [7] 陈文革, 谷臣清, 沈福三. 钢的磨蚀抗力与力学性能的相关性[J]. *西安理工大学学报*, 1998, (4): 422~426
- [8] Wang Biao, Wu Bing, Bell T. Study of electroplating rare earth chromium and its properties and microstructure [A]. *Inter conf on Surface Engineerings [C]*. Newcastle U K: Ellis Horwood Limited, 1990. 676~686
- [9] 王 飏, 王宇栋, 张自华. 周期反相电镀稀土铬提高水轮机的抗空蚀磨损能力[J]. *中国腐蚀与防护学报*. 2003, (2): 24~30

The Theorem of the Resistance of Hydraulic Machine's Materials to Cavitation Erosion and Abrasion

Wang Biao, Wang Yudong, Zhang Zihua, Ye Xianguo

(Scientific and Technological University of Kunming, Kunming 650051, China)

[Abstract] In order to confirm the dependence of the resistance of cavitation erosion and abrasion (CEA) on the common properties of materials, four typical materials (WC coating, NiCr alloy coating, boron stainless steel and titanium) were used to do the experiments of CEA and cavitation erosion (CE), to do corrosive experiment, and to test their hardnesses. The experiments results indicated that all resistance to CEA and resistance to CE depend on the hardness and the corrosive resistance of materials. The high hardness is the first factor of good resistance to CEA, strong corrosive resistance is the second factor. Meanwhile, the strong corrosive resistance is the first factor of good resistance to CE, high hardness is the second factor.

[Key words] hydraulic machine's materials; cavitation erosion and abrasion; theorem