

水力机械抗磨蚀材料及其防护技术的进展

康进兴¹,赵文轸²,徐英鸽³,马康民¹,冀捐炆¹

(1. 空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038;

2. 西安交通大学 金属材料强度国家重点实验室, 陕西 西安 710049;

3. 西安建筑科技大学 机电学院, 陕西 西安 710055)

摘要:综述了水力机械过流部件抗磨蚀材料及其防护技术的发展历程;概括了抗磨蚀材料的组织结构及机械性能与磨蚀的关系;讨论了抗磨蚀材料从铸铁、青铜、碳钢到合金钢的发展历程;分析了表面抗磨技术的应用现状,指出表面覆层处理是解决磨蚀的有效方法,其关键是抗磨蚀材料的设计与选择。最后对抗磨蚀材料及其防护技术进行了预测。

关键词:冲蚀;汽蚀;喷焊;表面防护

中图分类号:TG174.44;TK730.5+3 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-3516(2002)03-0047

-04

我国水利资源丰富,可能开发的有 3.8×10^8 kW之多。但多数河流中含有大量泥沙,它造成水电站水轮机叶片等水力机械过流部件严重磨蚀,即使采用抗冲蚀、抗汽蚀性能较优的0Cr13Ni4-6Mo不锈钢还会遭受严重破坏,这也是造成水轮机等水力机械过流部件失效的主要形式。因此,设计、选择抗冲蚀磨损材料和材料防护技术是发展我国水电事业的重要课题之一^[1]。研究浆体冲蚀时虽然借助了空气中冲蚀磨损的研究成果,但浆体冲蚀在机理和规律上有其特殊性,如水中的腐蚀问题、流体铺展效应问题以及疲劳问题等。尽管取得了一些成果,但总的来说,对浆体冲蚀的研究还远远不够,还需要不断拓展研究的深度和广度,为实现水力机械抗磨蚀材料和防护技术的设计与选择提供必要的依据。

1 材料的组织、性能与磨蚀的关系

1.1 显微组织

材料的抗冲蚀能力与其组织有密切关系。铁素体组织抗冲蚀能力最低,珠光体和高温回火低碳钢的索氏体组织的抗冲蚀性也不佳。而屈氏体-马氏体、奥氏体、马氏体、马氏体-渗碳体组织均有较高的抗冲蚀能力。合金奥氏体组织,特别是某些不稳定和介稳定合金奥氏体组织,除易于产生加工硬化外,在冲蚀过程中还可能分裂而转化为新的晶相,如马氏体和 ϵ 相组织等,新的转化相往往具有较高的硬度和抗冲蚀能力。金属材料的冲蚀破坏,实际上是在材料表面反复塑性变形产生加工硬化和相变强化过程结束后才开始的,因此,变形和强化效果愈好,对材料的抗冲蚀性愈有利。

合金的晶粒愈细小,某些硬质相如合金碳化物、氮化物的弥散度愈好,抗冲蚀性愈好。

1.2 机械性能

1.2.1 弹性模量和强度

金属材料的弹性模量取决于组成合金的基体金属原子特性和晶格常数,而对金属的显微结构和合金化不敏感,且经不同热处理的合金材料,弹性模量几乎不变。弹性模量是材料抵抗弹性变形的指标,弹性模量愈大,阻止被磨表面产生塑性变形的内在阻力越大。

收稿日期:2001-07-11

基金项目:国家自然科学基金资助(59831030);国家重点基础研究专项经费资助(G19990650)

作者简介:康进兴(1964-),男,河北深泽县人,讲师,硕士,主要从事表面工程、失效分析研究;

赵文轸(1945-),男,山东青岛人,教授,博士生导师,主要从事表面工程研究。

与材料抗磨损性能有关的强度指标主要是抗拉强度和屈服强度,它们分别指材料拉伸时抵抗塑性变形的最大应力和发生明显塑性流动时的应力。材料耐磨性随着强度提高而得到增强。对高应力的磨粒磨损,尤其是冲击作用时,较高的强度和韧性是材料获得较好耐磨性的必要条件。

1.2.2 硬度和韧性

对于弹性材料,不以其硬度来表征它的磨损性能;对于韧性和脆性材料,其硬度与磨损性能有密切关系。退火材料是高韧性材料,硬度较低,在沙粒磨损下的体积损失主要由冲击颗粒的微切削作用所造成,在较小冲击角下有最大冲蚀磨损量。磨损量与硬度成反比^[2],即随着硬度提高,耐磨性随之升高。因为硬度较高者,沙粒压入金属表面的深度和切削运动距离均较小,故有较低的磨损失重量。

对于脆性材料,硬度越高,可以减轻和阻止磨粒的微切削作用,抗磨性越好。但与相同硬度的典型韧性材料相比,韧性降低时,在一定磨损能量水平下可能使其疲劳磨损量增加,而且韧性较差的材料在变形磨损过程中,易于产生冲击裂纹,进而破碎成相对体积较大的碎块,耐磨性较低。韧性使硬度-抗磨性关系更加复杂^[3-4]。

1.2.3 加工硬化

在冲蚀过程中,材料表面受到水体冲击,以及沙粒反复锤击作用,使材料表面产生加工硬化,因而材料表面实际硬度值会发生变化。故在磨损过程中被磨损层的显微硬度值才是影响材料磨损的直接数据。但是,这一硬度无法测定或只能在磨损过程结束后测得。当然,材料的初始硬度仍然是影响材料抗磨性的基本因素之一。

2 抗磨蚀材料的发展历程及前景

2.1 铸铁和青铜

早期水轮机部件常用青铜和铸铁制造,它们价格便宜,但抗冲蚀抗汽蚀性能不良,20世纪50年代以后逐渐被碳钢和合金钢代替。

铜及其合金硬度低,抗冲蚀能力低于碳钢,但某些铝铜合金有较好的抗汽蚀性,如热压铝青铜(Cu83% Al10.3% Fe5.8%)、铸造铝青铜(Cu83% Al12.4% Fe4.1%)的抗汽蚀性为18-8不锈钢的2-4倍。也有人报道铝铜合金抗冲蚀、抗汽蚀性均较好,可用于水轮机转轮,法国曾有使用铝铜合金制造水轮机转轮的例子^[1]。

普通铸铁抗冲蚀性能很差,除非小型水轮机考虑它的低价格而准备磨损后随时更换备品才使用它。

2.2 碳素钢

水轮机部件常用碳素钢整铸制造。我国在20世纪50年代主要采用25号、30号铸钢,以后逐渐改用20SiMn钢。碳钢的抗冲蚀抗汽蚀性能较低,不宜做抗冲蚀抗汽蚀材料使用。但它的加工性、焊接性和机械性能良好,价格便宜,并且冲蚀汽蚀磨损只在材料表面层内进行,因此,可使用普通碳钢或低合金钢做为母材,进行表面覆层保护处理。

2.3 合金钢

近年来,合金钢广泛用于水轮机部件,特别是用于制造大型和巨型水轮机过流部件。我国科研工作者先后研制出Cr5Cu、Cr8CuMo、0Cr13Ni4CuMo、0Cr13Ni6Mo、0Cr13Ni4Mo、17-4PH等钢种。实践证明,一种试验室性能优良的新型钢种,要在电站生产中得到推广,必须解决它的冶炼、铸造、热处理、机加工等问题。目前,0Cr13Ni4-6Mo马氏体不锈钢具有较好的抗磨蚀性能,且其制造和加工问题已得到较好的解决,在我国大中型水电站水轮机上得到了普遍应用。国内新建电站几乎全部采用这种材料^[1]。

虽然0Cr13Ni4-6Mo马氏体不锈钢的抗磨蚀能力已较好,但由于它不是专门为抗磨蚀而设计的,因此作为水轮机过流部件材料使用时,还需要定期(一般为1-3年)进行大修,抗冲蚀抗汽蚀性能还不够理想,所以设计开发抗磨蚀新材料是急待解决的问题。

2.4 抗磨蚀材料的展望

抗冲蚀磨损材料,首先要考虑其抗浆体冲蚀性能,要保证材料中有足够数量的、硬度可与泥沙相抗衡的硬质强化相,其次才是抗汽蚀性。即在材料具有良好抗汽蚀性的基础上,致力于提高材料的抗浆体冲蚀性能。

1) 镍基合金具有较好的抗冲蚀汽蚀能力。进一步改善现有Ni基合金的成份和配比,覆层硬度可高达

HRC70 以上,使镍基覆层材料具有更高的抗磨蚀性能;铜基合金价格便宜,且具有较优异的塑性和韧性,通过成份及组织调整,有可能形成抗汽蚀性能优异的材料。

2) 超弹性合金因其具有伪弹性,在受到粒子冲击或微射流的作用时,可以吸收较多的冲击动能,因此有可能在抗浆体冲蚀抗汽蚀材料中得到应用。

3) 复合材料。不同种类和性能差异较大的材料复合到一起,只要搭配合理,结合良好,就能形成性能优异的复合材料。如选择抗汽蚀性能优异的铜基合金或镍基合金作为基体,加入陶瓷颗粒以抵抗浆体冲蚀的作用,形成的复合材料能够抵抗浆体冲蚀和汽蚀的联合破坏。

3 抗磨蚀防护技术及发展方向

采用抗冲蚀汽蚀性能优良的整体材料,由于价格高等原因在实际应用中受到限制。水力机械过流部件冲蚀、气蚀破坏仅在表面发生,采用价格便宜的碳素结构钢或低合金结构钢作为母材,进行覆层处理,这样即节约了贵重材料,又使冲蚀汽蚀严重部位得到恰当的保护,因而表面覆层处理是一种经济有效的措施^[5-7]。

3.1 涂层法

我国早在 20 世纪六七十年代就开始将环氧树脂及其化合物应用于水轮机的抗磨蚀防护。八十年代又相继开发了复合尼龙涂层、聚氨酯涂层、橡胶涂层以及陶瓷涂层等非金属涂层。国外主要是环氧和聚氨酯系列。实践证明,非金属涂层与金属基体结合强度不高,脱落问题没能得到彻底解决,难以达到预期的抗磨蚀效果^[1]。

3.2 堆焊法

堆焊法设备简单,水电站检修车间均有此设备,技术成熟,目前仍是最普遍的抗磨损修复方法。目前我国用于水轮机抗磨蚀堆焊的焊条主要有以下几类:高铬铸铁型(如耐磨一号 D642 等)、高 Cr-Mn 奥氏体型(如 D277 等)、Cr-Ni 奥氏体不锈钢型(如 A102、A103)和低碳马氏体不锈钢型(0Cr13Ni4-6MoRe 系列,16-5、17-4 系列等)。其中 0Cr13Ni4-6MoRe 系列低碳马氏体不锈钢型焊条具有较好的抗磨蚀效果,其抗磨蚀能力为 1Cr18Ni9Ti(A102)的 2 倍左右^[8]。堆焊法可使焊层与基体形成冶金结合,结合强度高,但冲蚀率大,焊层厚且不均匀,加工余量大,对工件基体材料的可焊性要求高。经堆焊法处理的水轮机叶片表面,在堆焊处未发生汽蚀破坏前,在堆焊点周围又迅速发生新的汽蚀破坏,直至堆焊层底部。因此,堆焊法不能彻底解决水力机械过流部件浆体冲蚀汽蚀问题。

3.3 喷焊法

喷焊法是在喷涂和堆焊基础上发展起来的一种表面防护技术。它利用氧乙炔焰经专用喷焊枪将具有特殊性能的自熔合金粉末喷焊到工件基体表面。由于喷焊层经过重熔过程,所以与基体形成冶金结合,结合强度可达 300~500MPa,覆层为组织均匀,致密无孔的铸态结晶组织,表面光滑平整,具有材料省、质量好、效率高的优点。喷焊覆层硬度可高达 HRC60-70,使用寿命可延长 6~10 倍,如 NiCrMoSiB 喷焊覆层抗汽蚀能力为 0Cr13Ni5Mo 不锈钢的 11 倍,在 NiCrSiB 中加入 35% 的硬质 WC 陶瓷颗粒形成的 WC/NiCrSiB 复合覆层,其抗冲蚀能力为 NiCrSiB 覆层的 5.4~7 倍^[9]。该法适合大型水力机械过流部件现场作业,技术容易掌握,是过流部件修复和预保护的一种比较理想的表面保护工艺。

3.4 表面防护技术的发展前景

表面防护技术仅消耗较少的优质材料而能最大限度地改善和大幅度地提高普通材料的抗冲蚀抗汽蚀性能。随着水电站大容量高效率要求的逐步提高,浆体冲蚀和汽蚀机理的进一步揭示及抗浆体冲蚀抗汽蚀新材料的开发研制,表面防护新技术必将不断出现。

1) 超音速火焰喷涂大大提高熔融粉末颗粒撞击基体表面的能量,从而使涂层更加致密,增加了与基体的结合强度和自身强度,将可能解决喷涂层与基体结合不牢的缺点。

2) 等离子弧喷焊技术。由于等离子焰流的温度高(可达 2 000 ℃),粉末在其中飞行速度快(300~500 m/s),因而形成的涂层更加致密,结合强度更高,同时对高熔点硬质材料如硼化物、氮化物、碳化物、金属陶瓷等均可采用^[10]。

3) 激光熔覆方法在表面可得到细小、均匀的致密组织,且硬度高,与基体结合牢固,对磨粒磨损有较好的抵抗作用,可望在抗浆体冲蚀、抗汽蚀中发挥作用^[11]。

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.
- [2] FINNIE I. Some reflections on the past and future of erosion[J]. *Wear*, 1995, 186 - 187: 1 - 10.
- [3] ALAN V L, BUQLAN W. Erosion of Hard Material Coating Systems[J]. *Wear*, 1988, 121: 325 - 346.
- [4] ROGERS M., HUTCHINGS I M. Coatings and Surface Treatments for Protection against Low - velocity erosion - corrosion in Fluidized beds[J]. *Wear*, 1995, 186 - 187: 238 - 246.
- [5] WOOD R J K, PUGET Y. The performance of marine coatings and pipe materials under fluid - borne sand erosion[J]. *Wear*, 1998, 219: 46 - 59.
- [6] BRYAN P. Complexities in predicting erosion corrosion[J]. *Wear*, 1999, 233 - 235: 497 - 504.
- [7] KARIMI A, VERDON C. Slurry erosion behavior of thermally sprayed WC - M coatings[J]. *Wear*, 1995, 186 - 187: 480 - 486.
- [8] 许 健. 0Cr13Ni4 - 6MoRe 抗磨性电焊条在水电站抗磨蚀修复中的应用[J]. *水利水电技术*, 1998, 29(6): 24 - 26.
- [9] 康进兴. 用表面覆层法提高材料耐冲蚀汽蚀性[D]. 西安: 西安交通大学. 2001.
- [10] 揭晓华. Ni - Cr - B - Si 合金粉末等离子喷涂层的高温滑动磨损特性[J]. *摩擦学学报*, 1998, 18(4): 306 - 311.
- [11] 刘永生. 激光熔覆技术的研究现状[J]. *粉末冶金技术*, 1998, 16(3): 209 - 212.

(编辑: 姚树峰)

Progress in Application of Resisting Erosion Wear Materials of Hydraulic Turbines and the Protecting Technology

KANG Jin - xing¹, ZHAO Wen - zhen², XU Ying - ge³, MA Kang - min¹, JI Juan - zao¹

(1. The Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China; 2. State Key Laboratory for Mechanical Behavior of Material, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 3. Mechanics and Electronics Engineering Institute, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, 710055, China)

Abstract: This paper reviews the developing course of the erosion - wear resistant materials and the protective technology of hydraulic equipment, discusses the relationship between the material microstructure and the mechanical property. Through analyzing the present situation of the application of the materials, it is obtained that the surface coating treatment is the effective method of resolving erosion - wear and the key to resisting erosion - wear is the design and selection of the material. Finally, the paper presents the prediction to and looks forward to the erosion - wear resistant materials and the protective techniques.

Key Words: erosion - wear; cavitation erosion; spray welding; surface protection