

提高非金属涂层耐磨蚀性能的途径

寇建章

(山西省水利科学研究所,山西 太原 030002)

摘要 分析总结泥沙对过流部件表面的磨损和空蚀破坏机理,评述了当前常用的环氧金刚砂涂层、聚氨酯涂层、复合尼龙(聚酰胺)涂层的应用现状,指出它们各自性能的优点和存在的问题。通过借鉴高分子材料、陶瓷工艺、矿物加工颗粒学等相关领域的研究成果并结合实际工作经验,探讨了有助于进一步提高过流部件表面非金属涂层耐磨蚀性能的途径。

关键词 水轮机;过流部件;磨损;空蚀;非金属抗磨蚀涂层

中图分类号 :TK730.5⁺3 **文献标识码** :A **文章编号** :1006-764X(2005)S1-0069-03

在过流部件表面制备非金属耐磨蚀涂层是一种花钱少、见效快且效果好的保护措施。为此国内外诸多专家做了大量研究试验,取得了一定的成果。目前比较成熟的非金属耐磨蚀涂层有环氧金刚砂涂层、复合尼龙涂层、聚氨酯涂层等,但总体上仍停留在 10 多年前的水平,且这些非金属涂层的抗磨蚀性能存在一定程度的缺陷^[1-5]。本文在分析总结以往非金属涂层研究现状的同时,根据泥沙在过流部件表面的磨损和空蚀破坏机理及其影响因素,在借鉴高分子材料、陶瓷工艺以及矿物加工颗粒学等领域研究成果的基础上,探讨进一步提高非金属涂层抗磨蚀性能的有效途径。

1 过流部件表面泥沙磨损和空蚀破坏机理及影响因素

1.1 泥沙磨损机理及影响因素

当含沙水流流经水轮机时,过流部件表面不断遭到沙粒的冲击和切削,沙粒的动能被基体局部吸收并发生形变造成弹性能增加,塑性应变积累,最终产生加工硬化、脆化而导致断裂、剥落形成坑穴,坑穴彼此相连并向整个表面扩展^[4]。

从摩擦学角度考虑,影响泥沙磨损的因素包括两个方面^[2-5]:一是含沙水流,包括水流相对速度、含沙量、沙粒的形状、尺寸、硬度、打击角度等;二是过流部件表面的几何特性和各种力学性能,其中各种力学性能主要指材料的强度、硬度、弹性模量、疲劳极限、塑韧性等。一般而言,当非金属涂层与过流部

件表面的黏结力很强时,涂层表面硬度高于沙粒的硬度,会很好地抵抗沙粒的切削和磨损;同时,若涂层材料的弹性模量很大,在遭受沙粒打击时,会将沙粒弹出,而不易发生塑性变形,即减少了划痕和坑穴形成的可能性。总结归纳起来可表示为^[1]

$$\delta = \frac{1}{(\epsilon k)\beta \rho^n W^m T} \tag{1}$$

式中: δ 为磨损平均深度,mm; ϵ 为材料的耐磨系数; k 为材料表面光洁度影响系数; β 为泥沙磨损能力系数,与泥沙级配、形状、硬度等有关,由试验确定; ρ 为过机平均含沙量, kg/m^3 ; W 为水流相对速度, m/s ; n 为含沙量指数($n = 0.4 \sim 1.0$); m 为磨损速度指数,平面磨损时 $m = 2 \sim 2.3$,冲击磨损时 $m = 2.3 \sim 3.0$; T 为运行时间,h。

1.2 空蚀破坏机理及其影响因素^[6-11]

空蚀是一种高速瞬态现象^[7]。当水流在水轮机流道中运动时,水体局部压力降低到汽化压力便开始汽化形成气泡。气泡随水流进入高于汽化压力的区域时,便会瞬时溃灭。一般来说,在部件表面边壁处溃灭的空泡将引起材料的空蚀,此时对边壁产生巨大的高频、脉冲压力(冲击压力可达几十至几百大气压,高频可达每秒 23 万次^[8])。在空泡溃灭过程中大量的动能瞬时转变为其他形式的能量,如变形能、热能等。对于部件表面层材料而言,若刚性很强,弹性变形能极小时,大量动能将变成热能,又因时间极短来不及传导,将形成瞬时高温^[10]。

空蚀过程比较复杂,影响因素也较多。在总结材

料抗空蚀性与其力学性能之间的关系时,已初步得出两者间的定性结果,即抗空蚀材料应具有良好的韧性、弹性、强度、硬度、加工硬化能力、疲劳极限和腐蚀疲劳极限等^[9]。对于非金属涂层而言,一般弹性材料具有较高的抗气蚀性,因为良好的弹性可有效减少冲击力,吸收大量能量,但弹性较好的材料相对硬度较低。

1.3 泥沙磨损与空蚀破坏二者之间的关系

通过大量真机观察表明^[1-4,11]在含沙水中工作的水轮机的正压区(如叶片正面),以磨损为主,当磨损(坑穴或沟槽)发展到一定程度时,为空蚀创造了必要条件,因而引起磨损与空蚀的联合作用,而在负压区(如叶片的背面、轴流式叶片的外缘和转轮室之间的空隙处),往往以空蚀为主。空蚀不仅使过流部件表面材料结构受到损伤而易被沙粒磨削,且在空蚀形成过程中,由于气泡溃灭所产生的微射流使沙粒加速,因而加剧了磨损。空蚀为磨损创造了条件,两者交互作用,加速了水轮机过流部件表面的破坏过程。

2 目前非金属抗磨蚀涂层的应用现状及存在的主要问题

2.1 环氧金刚砂涂层

环氧金刚砂涂层是由不同粒径的金刚砂为主要填料,按比例与环氧树脂混合而成的颗粒体增强热固性复合材料。该涂层利用环氧树脂黏结强度高,金刚砂硬度高、耐磨性好的特点,涂敷在过流部件表面,通过化学聚合形成三维结构的连续薄膜。该涂层相对价格低廉,抗磨性能较好,施工方便且施工工艺适合现场条件,涂层局部剥落后容易修复。

环氧金刚砂涂层现存的主要问题^[2,3,8]有:①在水流的强冲击区,如叶片的头部和外缘都存在部分脱落现象,且脱落时间不一致而导致局部绕流,出现一些局部凹坑,说明该涂层的硬度和耐磨性在强冲击区偏低。对于涂层脱落时间不一致现象可能是施工工艺造成涂层局部性能的不稳定所致。②该涂层在强空蚀部位或负压区(如叶片的背面)无法保留,说明该涂层弹性、韧性太小,不具有抗空蚀性能。

2.2 复合尼龙涂层

复合尼龙涂层(或称复合聚酰胺涂层)是由纤维或颗粒物为主要填料,按比例与尼龙粉混合而成的热塑性增强复合材料。该涂层利用了纤维抗拉强度和抗剪切强度高,颗粒物耐磨性好以及尼龙韧性好、热塑性等特点,喷涂在过流部件表面通过熔融、流平而形成连续薄膜。

复合尼龙涂层存在的主要问题^[1]是工艺条件苛

刻,要求工件必须预热到 200℃ 以上。故此现场施工,尤其在机坑内施工很难实现,只能集中在拥有大型烘箱的喷涂站内预热后喷涂。目前复合尼龙涂层仅限于水泵或小型水轮机上应用。

2.3 聚氨酯涂层

聚氨酯涂层(或称聚氨基甲酸酯涂层)是由多异氰酸酯与多羟基化合物为原料反应而得到的高分子聚合物,也是一种综合性能优良的弹性工程材料。该涂层利用聚氨酯耐水、抗蚀且弹性好等特点,以“以柔克刚”的形式吸收空泡溃灭时所产生的冲击能量从而减小对材料的疲劳破坏。在低水头电站和某些部件(如导水叶上止水密封条)上使用,效果明显。

聚氨酯涂层现存的主要问题^[1-4,11]是:在常温下固化,该涂层与基体的黏结强度低(难以冲破 20 MPa),且通过大量的室内模拟和现场真机试验表明,该涂层大都在短期内脱落(现场观测在 72 h 以内),发挥不了弹性体固有的耐空蚀特性。

3 提高非金属耐磨蚀涂层性能的有效途径

从水轮机过流部件的实际工作环境出发,要求非金属耐磨蚀涂层的性能必须具有与基体的黏结强度在 30~40 MPa 以上、抗磨蚀性能好、能常温下固化、施工工艺简单且相对价格低时才能得到推广应用。

3.1 进一步提高涂层与部件表面的黏结强度

a. 在对部件表面进行严格的喷丸处理基础上,可通过原位磷化处理工艺^[12]在部件表面形成一层磷化膜,然后再涂底漆可进一步提高涂层与部件表面的黏结强度。

b. 选择环氧当量值高的环氧树脂作涂层底漆,可与基体表面材料形成更多化学键从而提高涂层的黏结强度。

c. 施工中,严禁继续使用已接近玻璃化状的环氧树脂,此时树脂已不能与基体表面很好结合,影响其黏结强度。

3.2 进一步提高涂层的耐磨性能

a. 在选择硬度和耐磨性好的填料时,可根据密堆积理论填充模型^[13]确定颗粒体的最佳配合比,使涂层的硬度达到最大,从而提高其耐磨性。

b. 在涂层结构层中,可选择支链化程度较多的环氧类树脂为基料,并加入不同聚合度的改性环氧树脂类界面改性剂 $[C_2H_5O-CH_2-(O-CH_2-CH_2)_n-O-Si(OCH_3)_3]$,使得耐磨填料粒子周围形成具有良好界面和一定厚度的柔性界面层,从而可有效提高涂层的整体硬度及耐磨性能^[14]。

c. 根据泥沙磨损实验和涂层的耐磨性能试验,分别确定部件表面强冲击部位与一般磨损部位的涂

层厚度,以保证涂层在一个检修期内有效。

3.3 进一步提高涂层的抗空蚀性能

根据环氧金刚砂涂层耐磨损不耐空蚀和聚氨酯涂层耐空蚀而黏结强度低的特点,提出以下改善非金属材料抗空蚀性能的途径。

a. 以环氧树脂为底漆,以环氧-改性聚氨酯树脂为结构层基料,并借鉴陶瓷工艺中的小颗粒增韧基体颗粒的研究成果^[15],选择确定第二相颗粒体尺寸,使涂层既有高的黏结强度、硬度,又有好的韧性,从而达到提高其抗空蚀性能的目的。

b. 根据壳核复合分散相结构体系具有超高冲击韧性的研究成果^[16],可利用复合材料正交性原则在环氧树脂中直接引入三元乙丙橡胶,制备环氧-金刚砂-三元乙丙橡胶复合结构层材料,也可以提高涂层的抗空蚀性能。

c. 利用高分子材料中的互穿网络原理,可在环氧树脂中混合其他聚合物(如聚酰胺、聚酯类树脂),用互穿网络树脂制备非金属材料,除了存在树脂与颗粒体界面外,又多了一种树脂与树脂界面,后者不仅可起到增韧作用,而且互穿网络树脂的模量、玻璃化温度等性能均未受到大的影响^[17],从而也可提高涂层的强韧性和抗疲劳极限。

3.4 提高涂层耐磨蚀性能的其他途径

a. 进一步改进施工工艺,建立相应的施工工艺技术标准。

b. 加强施工人员技能培训,提高施工人员的综合素质。

c. 进一步改进施工自动化程度,克服施工中人为及主观因素对涂层性能的影响。

4 结 语

进一步提高过流部件表面非金属材料涂层的耐磨蚀性能是一项紧迫而又艰巨的工作,同时又是一项不断实验—试用—积累的过程。随着相关研究的不断深入,新材料和新技术的逐步应用,必将使过流部件表面非金属材料涂层的性能再上一个新台阶;而且每当涂层材料潜力被进一步挖掘,深层潜能进一步改善时,都将对延长过流部件使用寿命,提高电站经济效益产生重要影响。

参考文献:

[1] 顾四行. 关于水利机械过流部件表面磨蚀防护涂层 [C]//顾四行. 水机磨蚀:2002—2003 论文集.《水机磨蚀》编辑部 2003 25-29.

[2] 王志高. 我国水机磨蚀的现状和防护措施的进展 [C]//顾四行. 水机磨蚀:2002—2003 论文集.《水机磨蚀》编辑部 2003 13-18.

[3] 卢进玉,符建平. 水轮机过流部件表面的磨蚀与防护 [C]//顾四行. 水机磨蚀:1999—2000 论文集.《水机磨蚀》编辑部 2000 222-226.

[4] 段生孝. 我国水轮机空蚀磨损破坏状况与对策 [J]. 大电机技术 2001(6):56-59.

[5] 张阁,周香林,张济山,等. 水轮机过流部件用高耐磨涂层制备技术 [J]. 表面技术 2004(2):4-7.

[6] 鲍崇高,高义民,邢建东,等. 含沙水域水轮机过流部件的材料应用及进展 [J]. 水利水电科技进展 2001 21(6):14-16.

[7] 陆力. 用高速摄影机技术研究夹砂水中的空泡溃灭问题 [C]//顾四行. 水机磨蚀:1991 论文集.《水机磨蚀》编辑部 1991 7-11.

[8] 吴佩豪. 波纹、鱼鳞状破坏的性质与成因的探讨 [C]//顾四行. 水机磨蚀:1999-2000 论文集.《水机磨蚀》编辑部, 2000 51-59.

[9] 张秀丽,孙冬柏,余宏英,等. 金属材料空蚀过程中的腐蚀作用 [J]. 腐蚀科学与防护技术 2001 13(3):162-164.

[10] 王者昌,张仪,张晓强,等. 空蚀过程的热效应 [C]//顾四行. 水机磨蚀:1999-2000 论文集.《水机磨蚀》编辑部, 2000 60-62.

[11] 王志高. 关于水利机械保护层适应市场需求的探讨 [C]//顾四行. 水机磨蚀 2001 论文集.《水机磨蚀》编辑部 2001 150-152.

[12] 张金涛,胡吉明,张鉴清,等. 金属涂装预处理新技术与涂层性能研究方法进展 [J]. 表面技术 2005 34(1):1-4.

[13] 曾凡,胡永平,杨毅,等. 矿物加工颗粒学 [M]. 徐州:中国矿业大学出版社 2001 91-109.

[14] 欧玉春. 刚性离子填充聚合物的增强增韧与界面结构 [J]. 高分子材料科学与工程 1998 14(2):12-16.

[15] 张国军,金宗哲. 颗粒增韧陶瓷的增韧机理 [J]. 硅酸盐学报 1994 22(3):259-268.

[16] 朱晓光,蔡忠龙,李兰,等. 壳/核结构复合分散相对 PP/硅灰石/EPDM 体系力学性能的影响 [J]. 高分子材料科学与工程 1998 14(1):115-118.

[17] 桂红星. 树枝形聚合物/线性聚合物共混的研究进展 [J]. 高分子材料与工程 2004 20(1):9-13.

(收稿日期 2004-10-08 编辑 熊水斌)

