

基于同步波动原理的抗冲蚀弹性涂层设计

郭源君, 肖华林, 徐大清, 李文斌

(湖南科技大学机械设备健康维护省级重点实验室, 湖南湘潭 411201)

[摘要] 基于过流面冲蚀波纹形貌特征与流体边界层扰动波参数的对应关系,提出了实现弹性涂层边壁与边界层扰动波的同步波动,从而变边壁被动承受粒子冲击为主动回避与粒子的碰撞的抗冲蚀设计思想;分析了实现弹性涂层边壁与边界层扰动波同步波动的条件,并由此确定出弹性涂层的材料常数。

[关键词] 冲蚀;边界层;弹性边壁;弹性涂层;同步波动

[中图分类号] TB333 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2008)09-0060-04

1 前言

水流夹带沙粒冲击流道边壁造成的冲蚀损伤是水轮机过流件早期失效的重要原因,是流体动力学磨粒磨损的具体体现,被认为是世界性的技术难题。案例分析表明,即使水中含沙量小于1%,这种损伤也可达到相当严重的程度^[1,2]。随着工业化进程的加快,植被不断遭到破坏,水土流失加剧,含沙河流愈来愈多,过流件冲蚀损伤研究受到世界范围的广泛关注^[3~6]。

中国是世界上水力资源最丰富的国家,水电站数量与装机容量均居首位。与此同时,中国河流含沙的严重程度也名列世界前茅,水轮机冲蚀损伤问题十分突出。20世纪80年代初,国内开始研究过流件涂层保护和修复技术^[7],其中笔者研制的水机过流件抗冲蚀弹性涂层,在80 m水头左右,可使涡轮磨损面修复周期延长2倍左右^[8,9]。涂层性能的优劣取决于材料配方,选择涂层配方的关键主要在保证足够的粘结强度和涂层整体力学性能两个方面。针对已知的流动条件,弹性涂层的应用配方需通过反复模拟实验确定,由于没有理论指导,使得配方试验存在很大的盲目性。基于有关流道边壁冲蚀成因的分析结论,笔者将近壁流动特性与边壁材料响应相结合,以降低粒子对边壁的冲击动应力为目

标,提出一种抗冲蚀弹性涂层的设计方法。

2 过流面冲蚀形貌成因分析

2.1 过流面冲蚀形貌

观测绕流流道表面初期的冲蚀形貌,波纹和鱼鳞坑是一个普遍现象,仔细研究鱼鳞坑的排列特征发现,同一面积上,坑的排列整齐,数目基本相同;在与水流平行的剖面看,鱼鳞坑同样构成准周期的波形,波形的幅度 f 与波长 λ 之比约为1/10。过流面波纹冲蚀形貌特征表明,边壁材料的流失并非缘于粒子的直接连续摩擦,而是粒子周期性的冲击。

2.2 边界层扰动波与冲蚀波纹的相关性

近壁粒子的运动受绕流边界层流动特性的控制,根据流体力学边界层理论,边界层存在扰动波并夹带近壁粒子作周期性振荡运动。冲蚀形貌的成因与近壁两相流动及边壁材料的响应有着必然的内在联系。

1987年,余卫国^[10]首次对水力机械流道表面的冲蚀形貌做了系统的实验研究,结论指出,边界层扰动使近壁粒子作振荡运动并冲击边壁,从而使金属表面出现冲蚀波纹。1992年,A. Karimia和R. K. Schmid等^[11]综合了流体力学各领域中有波纹状边界轮廓成因的几种主要假设,以实验结果为依据,提出了冲蚀波纹形成的物理模型,指出冲蚀波纹

[收稿日期] 2006-11-30;修回日期 2007-03-19

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目(50775071);湖南省自然科学基金重点资助项目(06JJ2021);湖南省教育厅2006年重点科研资助项目(06A018)

[作者简介] 郭源君(1962-),男,湖南桃源县人,博士,湖南科技大学教授,研究方向为冲蚀磨蚀

是边界层中粒子振荡运动与刚性边壁相互作用的结果,且波纹状冲蚀可出现在各种含粒子流动的刚性材料流道表面。1996年前后,黄社华、程良骏等^[12,13]学者分析研究了边界层中粘性子层的稳定性;涡层与边壁间夹着粘性层,粘性层扰动波与涡层作用将波幅放大夹带粒子作振荡运动,从理论上推导出近壁粒子的运动轨迹是一条与边界层扰动波相同的正弦波曲线。笔者就边界层扰动波与过流面冲蚀形貌特征参数的相关性做了进一步的定量分析。

水机固液两项流动中颗粒项是稀疏的,可认为颗粒的存在对边界层流动无本质影响。在水机涡轮、导叶及上下环流道中,过流面曲率很小,扰动波的波长较短,可将弧面展成平面考虑,流道中的流动就可简化为平行平板间的二维流动(见图1)。

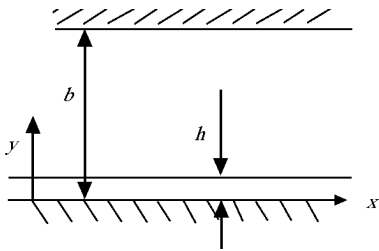


图1 流道简化图

Fig. 1 Simplified photograph of fluid-pass channel

根据边界层理论,流道边壁附近总存在一粘性边界层,若边界层厚度为 δ ,平行板间距(转轮叶片平面间距)为 b ,粘性层内无量纲流速分布规律^[14]为

$$\bar{u} = (y/\delta)(1 - 6\delta/b + 2y/b)/(1 - 4y/b), \text{ 令: } \bar{y} = y/\delta, A = [1 - 6\delta/b]/[1 - 4\delta/b], \text{ 则:}$$

$$\bar{u} = \bar{y}[A + (1 - A)\bar{y}] \quad (1)$$

又 $\delta \ll b$,则 $A \approx 1$,有

$$\bar{u} \approx \bar{y} \quad (2)$$

即在边界层内流速接近直线分布。

根据粘性流体力学理论,扰动波的基本方程为^[14]

$$\partial(\partial u'/\partial y - \partial v'/\partial x)/\partial t + U \cdot \partial(\partial u'/\partial y - \partial v'/\partial x)/\partial x + v'd^2U/dy^2 = v \nabla^2(\partial u'/\partial y - \partial v'/\partial x) \quad (3)$$

设代表边界层扰动波的流函数为

$$\phi = \phi(\bar{y}e^{i(\alpha x - ct)}) \quad (4)$$

因边界层主流流动的 $U = U(\bar{y}) \approx \bar{y}$,可设扰动波的幅度也只是 \bar{y} 的函数,并有

$$U' = (\partial \phi / \partial y) \phi'(\bar{y}) e^{i(\alpha x - ct)} \quad (5)$$

$$V' = \partial \phi / \partial x - i\alpha \phi(\bar{y}) e^{i(\alpha x - ct)} \quad (6)$$

将式(5)、式(6)代入式(3)并经量纲化处理后将

$$(\bar{u} - c)(\phi'' - \alpha^2 \phi) - \bar{U}\phi' =$$

$$-(i/\alpha Re)(\phi^{(4)} - 2\alpha^2 \phi'' + \alpha^4 \phi) \quad (7)$$

以上式中

$$\alpha = 2\pi \delta/\lambda, c = \bar{c}/U, Re = U\delta/v, \bar{y} = y/\delta \quad (8)$$

$k = 2\pi/\lambda$ 为扰动频率, λ 为扰动波波长, δ 为边界层厚度。

由此计算出扰动波圆频率 $\omega = (2\pi g/\lambda)^{1/2}$,波速 $c = (g\lambda/2\pi)^{1/2}$ 。

壁面上: $\bar{y} = 0, \phi'(0) = \phi(0) = 0$;

边界层外: $\bar{y} \rightarrow \infty, \phi' = \alpha\phi \approx 0$ 。

采用数值方法^[15],解得不同雷诺数对应的中性稳定波动参数数值解结果如表1所示。

表1 不同雷诺数 Re 对应的扰动波参数值

Table 1 Parameters value of boundary layer perturbation wave

Re	33	70	191	558	∞
c	0.74	0.63	0.51	0.42	0
α	1.06	0.80	0.54	0.342	0

对于涡轮流道粘性边界层流动, $Re \approx 150$,通过表中数据插值得到:

$$\alpha = 2\pi \delta/\lambda = k\delta \approx 0.64, \text{ 即 } \delta/\lambda \approx 1/10 \quad (9)$$

比较过流面冲蚀波纹与边界层扰动波的特征参数,表明其具有密切的相关性。

3 弹性涂层整体力学参数设计

3.1 弹性涂层力学参数的设计思想

由前述研究结果,可分析金属边壁冲蚀形貌的成因:边界层扰动夹带近壁沙粒作正弦波形的振荡运动,从而形成对边壁的周期性冲击,这种冲击力图使边壁形状与近壁粒子运动轨迹相适应,金属材料的刚性边壁只能被动地承受这种冲击,从而导致冲蚀波纹。基于这一结论,笔者研究的基本思想是,边壁弹性涂层整体力学参数的选择应满足实现弹性边壁在流体作用下与边界层扰动波同步波动的理想条件,这样,理论上可使边壁表面与近壁粒子运动轨迹平行,变边壁被动承受冲击为主动回避与粒子的碰撞,从而降低粒子对边壁的冲击动应力,达到减轻边壁冲蚀的目的。

3.2 弹性涂层力学参数选择条件

根据弹性力学理论,在无体积力情况下,弹性体变形平衡方程为^[16]

$$\left. \begin{aligned} (\beta + G) \partial e / \partial x + G \nabla^2 u - \rho \partial^2 u / \partial t^2 &= 0 \\ (\beta + G) \partial e / \partial y + G \nabla^2 v - \rho \partial^2 v / \partial t^2 &= 0 \\ (\beta + G) \partial e / \partial z + G \nabla^2 w - \rho \partial^2 w / \partial t^2 &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中, $\beta = \nu E / [(1 + \nu)(1 - 2\nu)]$, E 为材料弹性模

量; ν 为材料泊松比; $G = E/[2(1 + \nu)]$; ρ 为材料密度; u, v, w 分别为 x, y, z 3 个方向的位移分量; $e = E_x + E_y + E_z$, 为体积膨胀系数。

弹性体畸变波为横波, 与边界层扰动波对应。波动过程中体积保持不变, 满足

$$e = \partial u / \partial x + \partial v / \partial y + \partial w / \partial z = 0 \quad (11)$$

则式(10)成为

$$\left. \begin{aligned} G \nabla^2 u - \rho \partial^2 u / \partial t^2 &= 0 \\ G \nabla^2 v - \rho \partial^2 v / \partial t^2 &= 0 \\ G \nabla^2 w - \rho \partial^2 w / \partial t^2 &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

对于要分析的问题, 弹性涂层厚度 h 远小于金属基体, 可看成弹性膜, 则波动不随 y 增减。波动发生于 $x - y$ 平面内, 相应位移项 w 略去(见图2)。

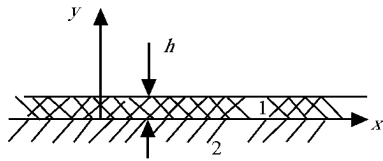


图2 波动分析简图

Fig. 2 Simplified map of fluctuate analysis

故畸变波与无旋波的统一方程为

$$\partial^2 u / \partial t^2 = c_1^2 \nabla^2 u \quad (13)$$

$$\partial^2 v / \partial t^2 = c_1^2 \nabla^2 v \quad (14)$$

$$c_1 = (G/\rho)^{\frac{1}{2}} \quad (15)$$

c_1 为弹性膜波的传播速度。

弹性体对应式(13)、式(14)的解有

$$u = f \cos k_1 (x - \omega_1 t / k_1) \quad (16)$$

$$v = f \sin k_1 (x - \omega_1 t / k_1) \quad (17)$$

在式(13)~式(15)中, $c_1 = \omega_1 / k_1$ 为弹性体的波速, 要实现弹性边壁与边界层扰动的同步波动, 则要满足弹性膜波动参数与边界层扰动波参数对应相等, 即:

$$k_1 = 2 \pi / \lambda, \omega_1 = (2 \pi g / \lambda)^{\frac{1}{2}},$$

$$c_1 = (g \lambda / 2 \pi)^{\frac{1}{2}} \quad (18)$$

对选定的流道进行设计时, λ 可通过对过流面冲蚀波纹的实测得到。

4 抗冲蚀弹性涂层设计与应用

桂阳电站弹性涂层设计与使用效果对比如下。

1) 过流的基本数据。水头为 55 m, 水中平均含沙量为 3.8 kg/m³, 沙粒成分为长石、石英等, 平均粒径 0.01 ~ 0.1 mm, $\rho_s = 3.1$ 。涡轮型号为 HL110 - WJ - 60, $\varphi 600$ mm。

2) 弹性涂层的材料常数设计。由碳钢涡轮叶片冲蚀面量测平均值 $\lambda = 0.8$ cm 计算频率

$$k = 2 \pi / \lambda = 7.85, c = (g \lambda / 2 \pi)^{\frac{1}{2}} = 11.2 \text{ cm/s};$$

设计弹性涂层的弹性模量 $E = 600 \text{ N/cm}^2$, 泊松比 $\nu = 0.40$; $G = E/[2(1 + \nu)] = 214 \text{ N/cm}^2$ 。

按同步波动条件设计涂层材料密度, $(G/\rho)^{\frac{1}{2}} = (g \lambda / 2 \pi)^{\frac{1}{2}} = 11.2 \text{ cm/s}$, 则 $\rho = 1.7 \times 10^{-3} \text{ kg/cm}^3$ 。

3) 弹性涂层的运行结果。有关电站做了多次涂层运行对比试验, 表 2 为桂阳电站的运行记录。弹性涂层保护的涡轮见图 3。

表 2 涂层涡轮运行对比结果

Table 2 Running result of elastic coating of hydraulic turbine

累积运行时间	未涂层涡轮表面	涂层保护涡轮表面
2002 - 01—2002 - 05	表面冲蚀坑深 0.5 ~ 0.8 mm	涂层完好, 表面平滑
2002 - 01—2002 - 09	表面蚀坑连成片, 最深达 1.5 mm, 用涂层修补、保护	涂层基本完好
2002 - 01—2003 - 01	涂层完好平滑	涂层保留 80%, 涂层表面粗糙, 见冲蚀斑, 为分层脱落状, 脱落部位未见金属
2002 - 01—2003 - 06	修补涂层保留 90% 以上, 未见金属	涂层保留 60% 左右, 涂层分层脱落, 全脱部位金属基材表面有冲蚀斑
2002 - 01—2004 - 01	涂层保留 70% 以上, 涂层表面粗糙, 未见明显冲蚀坑; 金属基体冲蚀轻微	涂层保留 60% 左右, 脱落区的金属表面出现冲蚀波纹, 仍可运行

5 结语

基于过流面冲蚀行貌的分析结论, 指出过流面边壁材料的流失并非缘于粒子的直接连续摩擦, 而是粒子周期性的冲击。边界层扰动夹带近壁沙粒作正弦波形的振荡运动, 从而形成对边壁的周期性冲

击, 这种冲击力图使边壁形状与近壁粒子运动轨迹相适应, 金属材料的刚性边壁只能被动地承受这种冲击, 从而导致冲蚀波纹。

基于上述分析结论, 提出了实现边壁与边界层扰动波的同步波动, 变边壁被动承受粒子冲击为主动回避与粒子的碰撞, 从而降低粒子对边壁的冲击

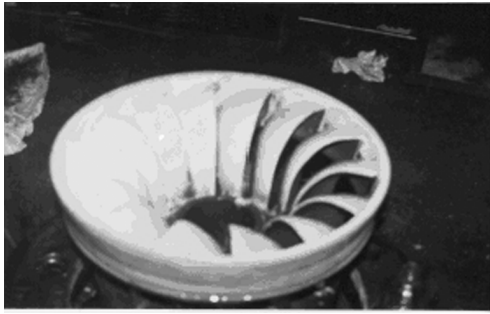


图3 涂层保护的涡轮

Fig. 3 Map of elastic coating of hydraulic turbine

动应力的抗冲蚀设计思想;分析了实现弹性边壁与边界层扰动波同步波动的条件,发展了一种确定弹性涂层材料常数的方法;按本方法设计制备的水机涡轮弹性护面涂层,在水头 55 m,平均含沙量 3.8 kg/m^3 的水流中可运行 1 年以上。

参考文献

[1] 郭源君,庞佑霞,唐果宁. 水力磨蚀与耐磨胶粘涂层[M]. 长沙:湖南科技出版社,2001

[2] 顾四行. 关于水力机械过流部件磨蚀与防护涂层[J]. 水机磨蚀,2003,(1):25-27

[3] 袁成清,严新平,彭中吴. 第十四届材料磨损国际会议评述[J]. 摩擦学学报,2003,(4):356-359

[4] Chang C S, He J L, Lin Z P. The grain size effect on the empirically determined erosion resistance of material [A]. Proceedings of 14th

International Conference on Wear of Materials [C]. USA, 2003

[5] Oka Y L Nagahashik. Measurements of plastic strain around indentation caused by the impact of round and angular particles, and the origin of erosion [A]. Proceedings of 14th International Conference on Wear of Materials [C]. USA, 2003

[6] Gee M G, Gee R H. Stepwise erosion as a method for determining the mechanisms of wear in gas borne particulate erosion [A]. Proceedings of 14th International Conference on Wear of Materials [C]. USA, 2003

[7] 王志高. 我国水机磨蚀的现状和防护措施的进展[J]. 水机磨蚀,2003,(1):13-18

[8] 庞佑霞,郭源君. 水轮机过流件防冲蚀有机涂层试验研究[J]. 湘潭工学院学报,2000,(3):13-17

[9] 郭源君,庞佑霞. 水轮机过流件抗冲蚀弹性缓冲涂层[J]. 振动与冲击,2002,(1):87-90

[10] 余卫国. 含沙水流中鱼鳞波纹状破坏规律的研究[D]. 北京:水科院硕士论文,1987

[11] Karimi A, Schmid R K. Ripple formation insolid liquid erosion [J]. Wear, 1992, (1): 33-47

[12] 黄社华,程良骏. 合沙水流中过流件表现波纹的成因探讨[J]. 水利学报,1996,(5):76-80

[13] 黄社华. 水机通流部件表面磨损波纹与边界层中的不稳定波[J]. 华中理工大学学报,1994,(11):98-104

[14] 章梓雄. 粘性流体力学[M]. 北京:清华大学出版社,1998

[15] 侯辉昌. 河流动力学基本问题[M]. 北京:水利电力出版社,1982

[16] 杨桂通,张善元. 弹性动力学[M]. 北京:中国铁道出版社,1998

Anti-erosion elastic coating design based on synchronous fluctuation principle

Guo Yuanjun, Xiao Hualin, Xu Daqing, Li Wenbin

(Hunan Provincial Key Laboratory for Health Maintaining of Mechanical Equipment, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411201, China)

[Abstract] Based on the corresponding relation of characteristic parameters between the perturbation wave of boundary layer and the surface erosion corrugation wave of fluid-pass section, the anti-erosion design idea is proposed, which can realize the synchronistic fluctuate of elastic coating channel border with the perturbation of boundary layer, and change the passive state that channel border bears particle's impacting into that the channel border collision contacts with particles on its own initiative. The condition of realized synchronous fluctuation of elastic coating channel border with the perturbation of boundary layer is analyzed. On the basis of analysis result, the method of determining the material parameters of elastic coating is proposed.

[Key words] erosion; boundary layer; elastic channel border; elastic coating; synchronous fluctuation