

超温水体蒸发系数通用公式的研究与应用

毛世民¹, 陈惠泉²

(1. 安徽省·水利部淮河水利委员会水利科学研究院, 安徽 蚌埠 233000;
2. 中国水利水电科学研究院水力学研究所, 北京 100044)

摘要 在环境参数可控风洞中对影响蒸发的风速、水气温差、水温、相对湿度等物理量进行系统试验。试验结果表明蒸发系数取决于风速的强迫对流和水气温差的自由对流。分析试验数据得到了水面蒸发系数的建议公式和相应的水面散热系数公式以及附加蒸发系数公式。用参数变幅很大的天然水体和受纳废热水体的实测资料 and 研究成果检验了建议公式的通用性。建议公式已为 DL/T 5084—98《电力工程水文技术规程》及 GB/T 50102—2003《工业循环水冷却设计规范》推荐应用于计算水面蒸发、水面散热及附加蒸发。

关键词 超温水体 水面蒸发系数 水面散热 风洞试验

中图分类号 S152.7+3 **文献标识码** A **文章编号** 1006-7647(2007)06-0085-05

Study and application of universal formula for evaporation coefficient of heated water bodies//MAO Shi-min¹, CHEN Hui-quan²(1. Anhui and Huaihe River Water Resources Research Institute, Bengbu 233000, China; 2. Department of Hydraulics, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044, China)

Abstract : Experiments were conducted in a specially designed wind tunnel with concerned environmental parameters precisely controllable. The emphasis was placed on some influencing factors on evaporation, including the wind velocity, the air-water temperature difference, the water temperature, and the relative humidity. The result shows that the evaporation coefficient mainly depends on the wind velocity-induced forced convection and air-water temperature difference-induced free convection. By analysis of experimental data recommended, formulas for the surface evaporation coefficient, the coefficient of heat dissipation from water surface, and the additional evaporation coefficient were derived. The universality of the formulas for evaporation coefficient was tested with the measured data and research results about natural water body and heated waste-water with the values of relevant parameters varying in a large range. The formulas were accepted by Technical Code of Hydrology for Electrical Power Projects (DL/T 5084—98) and Code for Design of Cooling for Industrial Recirculating Water (GB/T 50102—2003) for calculation of water surface evaporation, heat dissipation from water surface, and additional evaporation.

Key words : heated water body ; water surface evaporation coefficient ; heat dissipation from water surface ; wind tunnel experiment

火/核电厂需用大量冷却水。进入汽机系统增温的冷却水携带的废热除利用冷却塔散失外,一般直接排入湖、库、河、海,通过水温升高的自由水面的蒸发、对流和辐射 3 种机制散失于大气。水面冷却以蒸发散热为主。体现水面散热能力之和的综合散热系数的确定可以归结为蒸发系数的确定。水面散热与水面蒸发的密切结合给传统的水面蒸发研究增加了新的动力和意义——获得自由对流与强迫对流共同作用下的蒸发规律以及确定新的蒸发系数与散热系数的计算公式,使受热水域的水温和热污染预报建立在更为坚实的基础上。

我国火电装机约有一半使用水面冷却,但在 20 世纪 90 年代以前,有关的技术标准体系没有推荐水

面蒸发系数及水面散热系数计算公式的条文,而是规定采用当地或邻近地区相似水体的蒸发量经验公式计算^[1]。实际工程中,这种公式很难取得,而且用于将建的冷却池,往往误差很大。为此,原水利电力部将“水面蒸发与散热系数研究”列为 1978 ~ 1988 年重点课题,由中国水利水电科学研究院负责,组织科研、设计与生产单位协作,在典型气候地区和水域建立 9 个水面蒸发试验点,按照统一的量测手段和量测方法开展天然水温和超温水面蒸发试验,并在专门设计的环境参数可控风洞中进行风速、水温、相对湿度和水气温差各变量的系统试验,检验各参数影响蒸发系数的程度和规律,结合各站点现场试验的经验,提出蒸发系数通用公式。公式结构简明,使

用方便,经国内外实测资料检验有着较好的通用性和计算精度,已为 1998 年修订的 DL/T5084—98《电力工程水文技术规程》和 2003 年修订的国家标准 GB/T50102—2003《工业循环水冷却设计规范》^[1] 推荐,用于计算受纳废热前后的水面蒸发、水面散热和附加蒸发。这项研究以改进我国有关技术标准出发点,历时 20 多年。在此过程中,对阶段性工作作过报道^[2-4]。本文概述这一试验情况,重点介绍成果的检验及应用。

1 试验设施及试验方法

在环境参数可控风洞中进行系统试验,除可以直接反映各因素对蒸发系数的影响和规律外,还具有下述有利条件:在稳态下进行单因子相关试验可以消除野外条件下水文气象参数不稳定过程的‘均化’影响;试验布置按水平方向动力、热力均匀设计,试验得到的蒸发量可不需折算,直接代表大水面的蒸发量;参数组合及变化范围包括极端工况(自由对流或强迫对流单独作用)及常见工况(自由对流与强迫对流共同作用),可以比较完整地揭示客观规律。

试验主要设备为环境参数(水面上 1.5 m 处的风速、气温、相对湿度)、表面水温及水气温差可控的回流式低速风洞(图 1)^[2]。

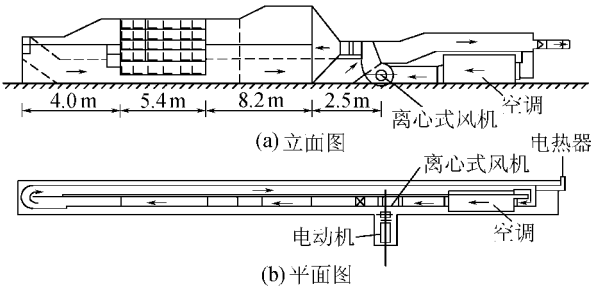


图 1 风洞布置示意图

试验采用单因子相关法,即控制水温及相对湿度不变,以水气温差为参变量,观测各级风速下的蒸发系数,然后改变水温或相对湿度以观测水温或相对湿度的影响。

根据冷却水工况及试验设备条件,确定各参数的变幅:风速 $W_{1.5} = 0 \sim 4.4 \text{ m/s}$ 、表面水温 $T_s = 10 \sim 45 \text{ }^\circ\text{C}$ 、气温 $T_a = 6 \sim 30 \text{ }^\circ\text{C}$ 、相对湿度 $R_H = 31\% \sim 95\%$ 、水气温差 $\Delta T = T_s - T_a = 0 \sim 39 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

2 试验成果

完成了 93 组稳态过程的试验,得到每组试验过程平均的 $T_s, T_a, R_H, W_{1.5}, T_s - T_a$ 及相应的蒸发率 E 。温度、压强、风速的单位分别为 $^\circ\text{C}, \text{hPa}$ 及 m/s 。蒸发率的单位为 $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ 或 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$;蒸发系数 α 按

通用的定义计算: $\alpha = E/(e_0 - e_a)$, 单位为 $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}$ 或 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{hPa}^{-1}$, 两者可按 $1 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1} \approx 28.4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{hPa}^{-1}$ 换算,其中 e_a 为空气水汽压; e_0 为饱和水汽压, e_0 为 T_s 的函数, $e_0 \approx 6.1 \times 10^{\frac{7.45}{(237 + T_s)}}$ 。

对试验资料的分析,揭示了各参数对 α 的作用及影响:①水温对 α 无明显影响。②相对湿度为 50% 和 90% 的试验点据无明显的规律性差别。③风速(强迫对流)的影响最为显著, $\alpha \sim W_{1.5}$ 是非线性变化关系。④水气温差(自由对流)的影响也是非线性的。因空气的密度为水汽的 1.608 倍,水面上较湿的空气有增大浮力的作用。这种作用较小,可用虚温差 ΔT_V 代替温差 ΔT :

$$\Delta T_V = (T_s - T_a) + \frac{0.378}{P}(T_s + 273)(e_0 - e_a) \tag{1}$$

式中 P 为大气压。以 ΔT (或 ΔT_V)为参变量的 $\alpha \sim W_{1.5}$ 曲线簇见图 2,随风速增大曲线簇趋于交汇,形成‘扫帚’形状。图中实线表示各水气温差 ΔT 条件下 α 的计算值。

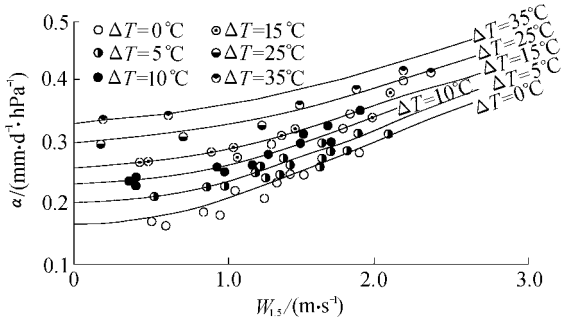


图 2 $\alpha \sim (\Delta T, W)$ 关系曲线($R_H = 55\% \sim 90\%$)

对 93 组精确试验资料用多元回归处理,得出以 ΔT 或 ΔT_V 为参数的两组计算公式:

$$\begin{cases} \alpha = (2.77 + 1.56 W_{1.5}^2 + 0.25 \Delta T)^{1/2} \times 10^{-1} \\ \text{(单位: } \text{mm}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}) \\ \alpha = (22.0 + 12.5 W_{1.5}^2 + 2.0 \Delta T)^{1/2} \\ \text{(单位: } \text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{hPa}^{-1}) \end{cases} \tag{2}$$

及

$$\begin{cases} \alpha = (2.45 + 1.56 W_{1.5}^2 + 0.20 \Delta T_V)^{1/2} \times 10^{-1} \\ \text{(单位: } \text{mm}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}) \\ \alpha = (19.6 + 12.5 W_{1.5}^2 + 1.6 \Delta T_V)^{1/2} \\ \text{(单位: } \text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{hPa}^{-1}) \end{cases} \tag{3}$$

实际上,式(2)与式(3)的计算值接近。用式(2)计算比较简便,建议使用。上述公式具有以下特点:

①包含常数项,这是由于时均风速为零时仍有脉动风的作用;②强迫对流单独作用时 $\alpha = (a_0 + a_1 W^2)^{1/2}$,这种模式与我国 10 多个大型蒸发池天然水温蒸发试验得到的结果一致^[5];③自由对流单独作用下 α 与 $\Delta T_V^{1/2}$ 相关,不同于自由对流传质比拟加热平板传热得到的 $\alpha \sim \Delta T_V^{1/3}$ 的关系^[6-7];④自由对流与强迫对流共同作用不是两者单独作用的简单叠加^[6-8]。

3 公式的检验

由风洞稳态试验建立的公式(2)及(3)是经验性的,用不同气候地区、不同水域以及天然水温水体与超温水体水面蒸发资料或研究成果检验其通用性和适用性是后续研究工作的重点:

a. 公式(2)不包含相对湿度,其适用性得到了润湿地区的广州蒸发站($R_H = 70\% \sim 90\%$)和干旱地区的新疆猛进水库($R_H = 40\% \sim 55\%$)实测资料的检验,公式计算值与当地实测值的相对差值小于 8% (图 3)。

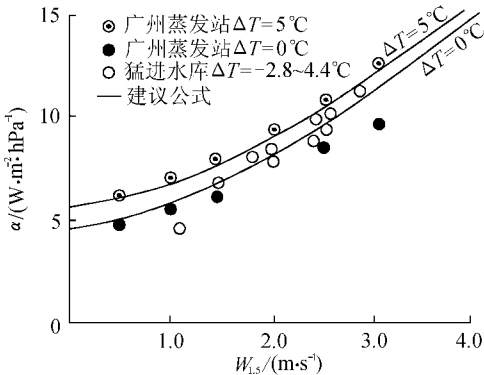


图 3 建议公式与广州蒸发站、猛进水库实测资料比较

b. 公式(2)用于计算天然水温水面蒸发的适用性得到了国内众多蒸发试验站成果的检验:江西鄱阳湖都昌蒸发站 1984 ~ 1987 连续 4 年实测的蒸发量过程线与建议公式计算结果吻合良好(图 4)施成熙等根据我国分布在典型气候区的 13 个蒸发试

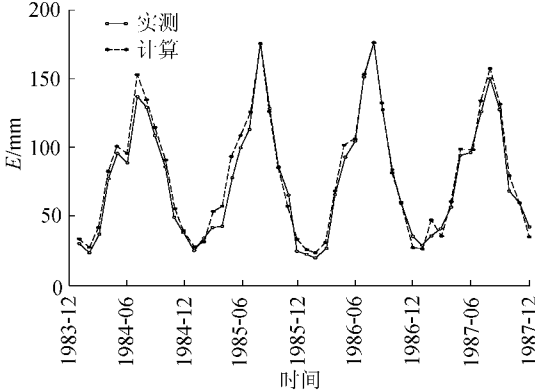


图 4 都昌蒸发站月蒸发量实测资料与计算资料对比

验站 $10 \sim 100 \text{ m}^2$ 大型蒸发池的观测资料建立的公式^[5] $\alpha = (4.84 + 1.55 W_{1.5}^2)^{1/2} \times 10^{-1}$ (单位: $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$) 与公式(2)在 $\Delta T = 0$ 时不但模式相同而且风速的系数接近,只是两式的常数项有所差异。应当指出,一年中大部分时间天然水温高于气温,仍有自由对流作用,其作用实际隐含在上式的常数项中,加大了该常数项值。

c. 公式(3)与本项研究综合分析 10 个站点大量野外试验资料提出的另一通用计算公式 α_A 比较,两者计算值相差小于 10%,互相得到有力支持与检验。

d. 公式(3)也得到了大水域实测成果的检验。引自文献[6-7,9]的 25 项观测成果,24 项都属于原体水域,包括受纳废热的河道、湖泊、水库和水池,参数取值为:水面面积 $0.3 \sim 15100 \text{ hm}^2$, $\Delta T_V = 2 \sim 67 \text{ }^\circ\text{C}$, $W_{1.5} = 1.0 \sim 5.6 \text{ m/s}$, $R_H = 53\% \sim 94\%$ 。对于如此大范围的参数变化,公式计算值 $\alpha_{\text{计}}$ 与原型观测值 $\alpha_{\text{测}}$ 之比在 0.70 ~ 1.26 之间,其中比值在 0.9 ~ 1.1 之间的有 11 项,平均比值为 0.91。

e. 引自文献[8]的 23 组水库月蒸发量观测资料, $W_2 = 3.2 \sim 5.6 \text{ m/s}$, $\Delta T = -4.2 \sim 5.1 \text{ }^\circ\text{C}$,其中有 14 组 $\Delta T = -0.2 \sim -4.2 \text{ }^\circ\text{C}$,处于建议公式的外延区。如剔除观测资料本身明显异常的 2 组,有 7 组 $\alpha_{\text{计}}/\alpha_{\text{测}} = 1.05 \sim 0.95$,平均值为 0.99;有 14 组 $\alpha_{\text{计}}/\alpha_{\text{测}} < 0.95$,平均值为 0.87;总的平均值为 0.91。

上述比较,除了验证公式的合理性外,也反映了公式(2)和(3)对大风及逆温($\Delta T < 0$)条件的适用性。

4 蒸发系数通用公式的应用

4.1 水面散热通量与散热系数

受纳废热的水体通过水气交面蒸发、对流和辐射 3 种机制向大气散热。令 Φ_L, Φ_c, Φ_e 和 Φ_r 分别为水面散热通量、对流散热通量、蒸发散热通量和辐射散热通量,则 $\Phi_L = \Phi_c + \Phi_e + \Phi_r$ 。水面散热系数 K 定义为单位温升、单位水面面积散热通量的增量,是计算水面冷却能力、水体对废热的自净能力的主要参数,在 1962 年和 1965 年先后由中国水利水电科学研究院和美国学者 Edinger 提出,已为国内外普遍采用。

对散热通量的计算已取得共识:

$$\begin{aligned}\Phi_e &= \alpha(e_0 - e_a) \\ \Phi_c &= \alpha_c(T_s - T_a) = b\alpha(T_s - T_a) \\ \Phi_r &= \epsilon\sigma(T_s + 273)^4\end{aligned}$$

式中: $b = 0.66 \text{ hPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$; α_c 为对流散热系数; ϵ 为水面发射率, $\epsilon = 0.97$; σ 为常数, $\sigma = 5.67 \times$

10⁻⁸W·m⁻²·℃⁻⁴。

由 $K = \frac{\partial(\Phi_c + \Phi_e + \Phi_r)}{\partial T_s}$ 得 K 的计算公式：

$$K = \left(b + \frac{de_0}{dT_s} \right) \alpha + 4\varepsilon\sigma(T_s + 273)^3 + \frac{\partial\alpha}{\partial T_s} [b(T_s - T_a) + (e_0 - e_a)] \tag{4}$$

由式(4)可知,散热系数 K 的确定可以归结为蒸发系数 α 的确定。

令 $k = \frac{de_0}{dT_s}$, $\Delta K = \frac{\partial\alpha}{\partial T_s} [b(T_s - T_a) + (e_0 - e_a)]$, 将 b, ε, σ 代入式(4), 得

$$K = (0.66 + k)\alpha + 22 \times 10^{-8} \times (273 + T_s)^3 + \Delta K \quad (\text{单位: } W \cdot m^{-2} \cdot \text{℃}^{-1}) \tag{5}$$

4.2 蒸发系数公式与散热系数的关系

对于给定的 W, T_s, T_a 及 R_H, α 对 K 的影响不仅是 α 的最终值,而且与取值所用的公式结构有关。如 α 公式中含有水温或水气温差变量,就要考虑到 ΔK 项。同一条件用不同的公式计算,即使 α 值相同, K 值也因有无 ΔK 及 ΔK 的不同而异,举例见表 1。

表 1 不同 α 公式计算 α, K 及 $\Delta K/K$ 的比较
($T_a = 30\text{℃}, R_H = 75\%, T_s = 36\text{℃}, W_{1.5} = 3.0\text{ m/s}$)

公 式	$\alpha / (W \cdot m^{-2} \cdot hPa^{-1})$	$K / (W \cdot m^{-2} \cdot \text{℃}^{-1})$	$\frac{\Delta K}{K} / \%$
$\alpha = (39 + 12W_{1.5}^2)^{1/2}$	12.1	53.9	0
$\alpha = 8.4 + 1.2W_{1.5}$	12.0	53.4	0
$\alpha = 2.7(\Delta T_v)^{1/3} + 3.13W_{1.5}$	15.2	74.3	11.0
$\alpha = (19.6 + 1.6\Delta T_v + 12.5W_{1.5}^2)^{1/2}$	12.1	56.4	4.8

4.3 散热系数的计算

用式(2)或(3)计算 α 及 $\frac{\partial\alpha}{\partial T_s}$, 代入式(5)得到 K 的两个计算公式：

$$K = (0.66 + k)(22 + 12.5W_{1.5}^2 + 2.0\Delta T)^{1/2} + 22 \times 10^{-8} \times (273 + T_s)^3 + \frac{(0.66\Delta T + e_0 - e_a)}{(22 + 12.5W_{1.5}^2 + 2.0\Delta T)^{1/2}} \tag{6}$$

$$K = (0.66 + k)(19.6 + 12.5W_{1.5}^2 + 1.6\Delta T_v)^{1/2} + 22 \times 10^{-8} \times (273 + T_s)^3 + \frac{0.9(0.66\Delta T + e_0 - e_a)}{(19.6 + 12.5W_{1.5}^2 + 1.6\Delta T_v)^{1/2}} \tag{7}$$

式(6)、式(7)的计算结果相差甚小。一般工程问题可用公式(6)计算。为便于应用,制备了 $K \sim (T_s, T_a, W_{1.5}, R_H = 75\%)$ 的等值线图及计算表, 示例见表 2。

水面散热系数公式中的 $k, e_0, \Delta T$ 均取决于水温 T_s , 可取水域水面平均水温 $\overline{T_s}$ 与自然水温 T_∞ 的

平均值计算 K 值。

表 2 $K \sim (W_{1.5}, T_s, T_a)$

$T_s / \text{℃}$	$W_{1.5} / (m \cdot s^{-1})$	$K / (W \cdot m^{-2} \cdot \text{℃}^{-1})$							
		$T_a = 10\text{℃}$	$T_a = 15\text{℃}$	$T_a = 20\text{℃}$	$T_a = 25\text{℃}$	$T_a = 30\text{℃}$	$T_a = 35\text{℃}$	$T_a = 40\text{℃}$	
20	1.0	25.2	23.0	20.2					
	2.0	29.1	27.4	25.4					
	3.0	34.6	33.2	31.7					
30	1.0	39.4	37.1	34.4	31.3	27.4			
	2.0	44.3	42.4	40.2	37.7	34.8			
	3.0	51.5	49.9	48.1	46.2	44.0			
40	1.0	60.9	58.2	55.3	52.0	48.2	43.7	38.1	
	2.0	67.5	65.2	62.7	59.9	56.7	53.1	48.9	
	3.0	77.3	75.4	73.2	70.9	68.4	65.5	62.3	

注: $R_H = 75\%$ 。

4.4 附加蒸发计算

水体接纳的废热通过水面蒸发、对流和辐射散失于大气,其中只有蒸发(潜热传送)耗水,附加蒸发流量 q_e 可由散热系数中蒸发项占的比重及接纳的废热流量计算^[4]：

$$q_e = \frac{\alpha k + (e_0 - e_a)/\alpha}{K} \frac{CQ(T_1 - T_2)}{L} \tag{8}$$

式中: q_e 为附加蒸发质量流量, t/h ; Q 为循环水质量流量, t/h ; C 为水的比热容; L 为水的汽化热; T_1 和 T_2 分别为循环水的排水温度和取水温度。

对于给定的 $Q(T_1 - T_2)$ 及有关的水文气象参数, 将式(2)及式(6)计算的 α 及 K 代入式(8)求得

q_e 。工程上习惯用附加蒸发系数 $K_e = \frac{q_e}{Q} \times 100\%$ 评估附加蒸发。由式(8)得

$$K_e = \frac{C[\alpha k + (e_s - e_a)/\alpha]}{KL(T_1 - T_2)} \times 100\% \tag{9}$$

5 结 语

a. 与水面散热研究相结合,水面蒸发研究获得了新的动力和新的进展,也使水域水温预报、工程环境影响评估有了更符合实际的科学依据。

b. 实践证明,环境参数可控的风洞试验是探求水面蒸发规律的一个有效途径,以此为主得出的水面蒸发系数通用公式(2)或(3),统一了自由对流与强迫对流影响蒸发的规律,得到了国内外天然水面和受热水面实测资料的良好验证。

c. 水面蒸发系数对水面散热系数起决定性作用。对蒸发系数公式含水气温差变量引起的散热系数增量应予重视。由式(2)得出的水面散热系数公式(6)及附加蒸发系数公式(9)已作为国家标准推广应用。

d. 无论是水气界面质量、热量的交换机理还是各种环境因素包括本项研究还未计及的波浪、盐度

等对蒸发机理的影响程度和影响规律,都需进行进一步探索。大风和逆温条件下的实测资料尚需更多的积累和分析。作为经验公式,本项研究成果虽然已具有良好的科学依据,但仍有待更多实践的检验,需进一步充实提高。

参考文献：

[1] GB/T50102—2003,工业循环水冷却设计规范[s].
[2] 陈惠泉,毛世民,何树椿,等.超温水体水面蒸发与散热[J].水利学报,1989(10) 27-31.
[3] 陈惠泉,毛世民.水面蒸发系数全国通用公式的验证[J].水科学进展,1995,6(2) 16-20.
[4] 毛世民.冷却池附加蒸发的计算[J].水科学进展,1999,10(4) 435-438.
[5] 施成熙,卞毓明,朱晓原.确定水面蒸发模型[J].地理科学,1984,4(1) 1-10.

[6] RYAN P J, HARLEMAN D R F, STOLZENBACH K D. Surface heat loss from cooling ponds [J]. Water Resources Research, 1974, 10(5) 930-938.
[7] ADAMS E E, DOUGLASS J C, KARL R H. Evaporation from heated water bodies [J]. Water Resources Research, 1990, 26(3) 425-435.
[8] БРАСЛАСКИЙ А Л, НУРКАЛЬЕВ С Н, KARL R. Новая формула расчета испарения с учетом разности между водой и воздухом [М]. Проблемы Гидроэнергетики И Водного Хозяйства, 1966 195-206.
[9] КОСТИИ А Г, ДОМАНОВ В Н. Анализ существующих методик расчета теплоотдачи испарением [J]. Изв Внииг, 1988, Т210 12-17.
[10] БРАСЛАСКИЙ А Л, КУМАРИНА М Н, СМЕРНОВА М Е. Тепловое влияние объектов энергетики на водную среду [М]. Ленинград Гидрометеозидат, 1989.

(收稿日期 2007-07-15 编辑 骆超)

(上接第 48 页)

加剧。多次密封故障均是外环烧损也证实了这一结论。从密封环及其支架运行中变形的计算机仿真可以看出,密封环支架偏转是轻微的,变形主要集中于材料为耐磨树脂、强度较低的密封环上,密封环出现了明显的扭曲现象。为了改善密封环外侧的受力并减小变形,采取了以下改进方案 ①在密封环的薄弱部位,即密封内环侧增加一个起限位作用并约束密封环变形的支撑环,支撑环用 M10 螺栓固定在密封环支架上,并与密封环支架焊接成整体以保证支撑环能可靠限位,如图 7 所示。计算机仿真结果表明,此时密封环及其支架在径向推力的作用下变形大大改善。②选用高性能的合成耐磨树脂材料,避免密封面出现裂块而导致事故扩大。

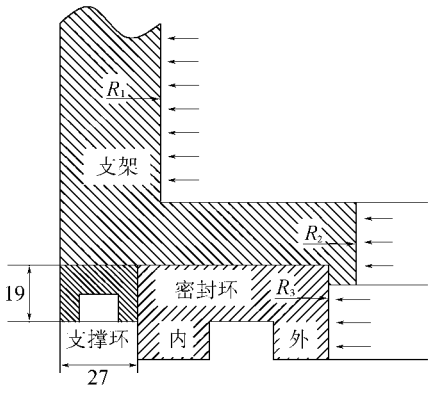


图 7 密封环受力分析及改造示意图(单位：mm)

4 结 语

抽水蓄能电站主轴密封故障的成功处理表明：

在密封结构具有高刚度、合适的密封摩擦副磨损率及水膜弹性润滑能力强并能随尾水压力变化自动调整等设计制造条件下,保证高 PV 值主轴密封的安装精度并对新安装或经大修的主轴密封摩擦副进行低转速磨合,以消除制造、加工、安装所造成的表面不平度至为关键。文中密封故障处理措施为我国高水头、大容量、高转速水泵水轮机主轴密封技术故障处理积累了宝贵的经验。

参考文献：

[1] 郑源,鞠小明,程云山.水轮机[M].北京:水利水电出版社,2000.
[2] 李胜亮.双岭水电站水轮机工作密封改造[J].水力发电,2007,33(1) 77-79.
[3] 陈以武.高坝洲电厂 3 号水轮机主轴密封改造[J].水电站机电技术,2006,29(4) 72-73.
[4] 黄更生.HLA244-LJ-160 型水轮机主轴密封电水处理[J].水利科技,2006(2) 51-52.
[5] 林锦生.水轮机工作密封的技术改造[J].中国农村水电及电气化,2006(6) 44-45.
[6] 周康武.万家寨水电站 5 号机主轴密封漏水原因分析与处理[J].中国农村水电及电气化,2005(9) 59-60.
[7] 戴强.新型水轮机主轴密封组合式密封环的应用[J].大电机技术,2005(6) 55-57.
[8] 陈湘匀.主轴密封结构剖析及烧损分析[J].水电站机电技术,2001(3) 49-50.
[9] 袁丰江.广州蓄能水电厂 B 厂机组主轴密封浅析[J].水电站机电技术,2007,30(1) 12-13.

(收稿日期 2007-04-26 编辑 骆超)