

泵站技术供水盘管冷却器布置与换热面积计算

颜红勤¹, 黄毅²

(1. 江苏省水利工程科技咨询有限公司, 南京 210029; 2. 上海勘测设计研究院, 上海 200434)

摘要: 根据泵站工程特点, 利用置于天然水体中进行冷却的盘管冷却器组成的密闭循环供水系统, 是一种节能、可靠的技术供水方式。依据传热学理论对盘管冷却器传热原理进行分析后, 提出不同安装形式的冷却盘管换热面积计算公式。研究发现, 当盘管处于静止水体中且以自然对流传热为主而利用水体容量带走热量时, 所需盘管的换热面积最大; 当盘管处于流动水体中且以强制对流传热为主而利用水体流动带走热量时, 所需盘管换热面积较小; 采取加大管道内部热流体或管道外部冷却水体流速代射, 可以减少换热面积, 但需相应增加管道安装要求和运行成本; 为节省投资、延长使用寿命, 盘管换热材料建议采用不锈钢材质。

关键词: 泵站; 技术供水; 盘管冷却器; 布置; 换热面积

中图分类号: TH3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2013)03-0173-04

Installation of Coiled Pipe Cooling Device and Calculation of Heat Exchange Area for the Technical Water Supply of Pumping Station

YAN Hong qin¹, HU ANG Yi²

(1. Hydraulic Engineering Science and Technology Consultation Limited Company of Jiangsu Province, Nanjing 210029, China; 2. Shanghai Survey & Design Research Institute, Shanghai 200434, China)

Abstract: According to the engineering characteristics of the pump station, the closed circulating water supply system composed of the coiled pipe cooling device which was installed in natural water for cooling is an energy saving and reliable technical water supply mode. The heat transfer principle of the coiled pipe cooler was analyzed using the heat transfer theory, and the calculation formulas of heat exchange area of coiled pipe cooler under different installation forms were proposed. The results showed that (1) when the coiled pipe cooler is in static water with natural convection heat transfer and water capacity is used to carry away heat, the heat exchange area of the coiled pipe cooler is the largest; (2) when the coiled pipe cooler is in flowing water with forced convection heat transfer and water flow is used to carry away heat, the heat exchange area of the coiled pipe cooler is the lower; (3) increasing of the pipe internal thermal fluid or the flow rate of cooling water outside of the pipe can reduce the heat transfer area, but it increases the pipeline installation requirements and operation cost; and (4) the stainless steel material is recommended for the coil material in order to save the investment and prolong the service life.

Key words: pumping station; technical water supply system coiled pipe cooling device; installation; heat transfer area

泵站工程中, 供给生产的用水称为技术供水, 包括冷却水和润滑水, 其中冷却水主要供应电机或齿轮箱的油(空气)冷却器, 供应量约占全部供水量的85%左右^[1-3]。冷却水供应既要保证持续供给, 又需满足设备冷却要求, 是泵站技术供水系统的重要组成部分, 该系统设计的合理性与经济性, 直接影响机组运行可靠性及日常运行成本。

传统的泵站技术供水系统一般采用河水直供方式, 近年来出现了一些新型技术供水方式, 如利用板式换热器^[4]或冷水机组^[5-9]形成循环供水方式。另外, 利用置于水中的盘管

冷却器, 通过热交换实现管内水体冷却的循环供水方式在部分泵站技术供水系统中得到应用, 这种冷却器随主体工程一次设计建成后, 可长期运行。从热量传递方式看, 盘管冷却器属于间壁式热交换器^[7]的一种, 但与化工、暖通等行业使用的定型产品不同, 冷却盘管置于开放式水池中, 无需提供冷流体, 而是依靠天然水体冷却, 因此节能、环保。常见换热器盘管换热面积计算在各种技术手册中均有说明, 同时毛培元^[8]采用列图法提出了化工生产中盘管热交换器最佳尺寸确定方法, 沙站等^[9]认为闭式冷却塔中管壁热阻对冷却盘管

传热影响较小,可忽略不计,而泵站技术供水系统中盘管冷却器换热面积计算尚未见相关文献说明。

1 技术供水系统组成与布置

盘管冷却器是指由金属管道弯曲形成盘状、置与自然水体中的热交换系统。根据管外水体流动与否,可分为静水冷却器和动水冷却器两类。静水冷却器一般安装于泵站排水廊道或空箱岸墙内,要求有较大的水体容量,多做成具有较多弯头的蛇状盘管,见图 1(a)。由于周边水体处于静止状态,静水冷却器对管道的安装固定要求较低。动水冷却器可安装于出水流道中或进出水池内,由于周边水体处于流动状态,对安装固定要求较高,通常做成较长的通道形式,利用站墩等大体积混凝土进行固定,见图 1(b)。

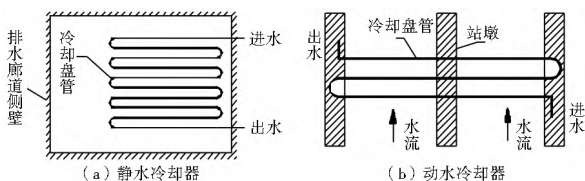
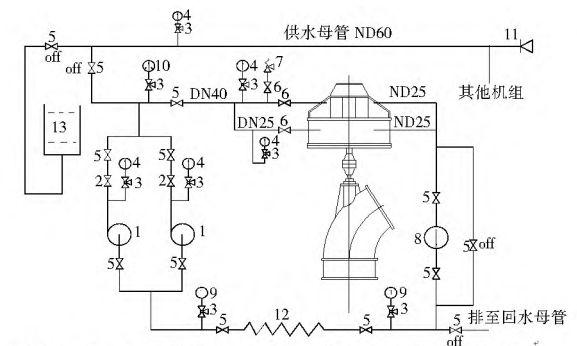


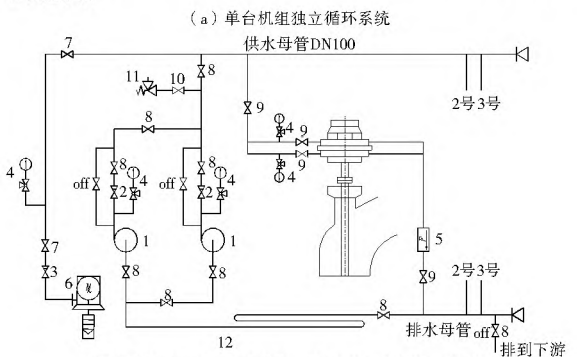
图 1 盘管冷却器安装示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the installation of coiled pipe cooling device

包括盘管冷却器在内的循环供水系统主要由油(空气)冷却器、供水泵、盘管冷却器、管道、闸阀等组成。根据机组是否共用冷却器,又可分为单台机组独立循环系统和多台机组共用循环系统两种形式,见图 2。运行初期利用补水装置、供水母管向系统充水,充水完成后关闭系统与供水母管连接闸阀,开启供水泵,实现循环运行。



1 供水泵; 2 止回阀; 3 仪表三通旋塞; 4 压力表; 5、6 截止阀; 7 排气阀; 8 电磁流量计; 9 温度传感器; 10 电接点压力表; 11 法兰闸板; 12 盘管冷却器; 13 高位水箱



1 管道增压泵; 2、3 止回阀; 4 压力表; 5 水表; 6 深井泵; 7、8、9、10 闸阀; 11 排气阀; 12 盘管冷却器

(b) 多台机组共用循环系统

图 2 供水系统图

Fig. 2 The technical water supply system

常见冷却器由冷水系统与热水系统组成。由图 2 可知,本文所述的盘管冷却器仅包括热水系统。相对于利用板式换热器或冷水机组组成的循环供水系统,冷水系统根据泵站站身特点,直接利用天然水体,工程直接投资可减少一半,同时也提高了运行可靠性。

2 盘管冷却器的传热计算方法

传热计算的主要目的是根据设备冷却负荷要求,确定换热面积,优选布置方案。

2.1 热负荷计算方法

泵站工程中,需用冷却水的设备主要有电机、齿轮箱、推力轴承等,油(空气)冷却器中的热流体(主要为水)在盘管中流动,通过管外冷流体(水)的流动,利用管壁的热交换带走热量,达到冷却目的。

假设盘管中水体传热为恒压过程,不计盘管以外段管道热量传递,根据热力学定律,热负荷计算公式为:

$$Q = q_m C_p (T_1 - T_2) = \rho q C_p (T_1 - T_2) \quad (1)$$

式中: Q 为盘管冷却装置需冷却的热负荷(W); q_m 、 q 为管内热水的质量流量(kg/s)、体积流量(m^3/s),一般由设备厂家确定; C_p 为管内热水的平均恒压比热($J/kg \cdot ^\circ C$); ρ 为管内热水的平均密度(kg/m^3); T_1 、 T_2 为冷却盘管内热水进、出口温度($^\circ C$),一般可采用设备油(空气)冷却器的出口与进口温度。

2.2 换热面积计算方法

盘管冷却装置的理论换热面积可由传热基本方程计算确定,即:

$$S_t = \frac{Q}{K \Delta t_m} \quad (2)$$

式中: S_t 为盘管理论换热面积(m^2); K 为管道传热系数($W/m^2 \cdot ^\circ C$); Δt_m 为传热平均温度差($^\circ C$)。

考虑管壁污垢等不确定因素影响,设计换热面积 $S = K_a \cdot S_t$, K_a 为安全系数,可取 1.5~2.0。

2.2.1 传热平均温度差 Δt_m 计算方法

通常管外冷却水体容量较大,可将盘管传热简化为管内水体变温,管外为恒温状态的错流传热模式,则有:

$$\Delta t_m = \frac{T_1 - T_2}{\ln \left(\frac{T_1 - t}{T_2 - t} \right)} \quad (3)$$

式中: t 为管外流体温度($^\circ C$)。

2.2.2 管道传热系数 K 计算方法

盘管可采用不锈钢或碳钢等材质制成的弯曲管道,根据对流传热基本方程,热、冷流体通过间壁的传热是一个“对流传热-热传导-对流传热”的串联过程,盘管传热系数可用下式计算:

$$K = \frac{1}{\alpha_i d_i + R_s + \frac{\delta d_o}{\lambda d_m} + R_o + \frac{1}{\alpha_o}} \quad (4)$$

式中: α_i 、 α_o 为管壁内外侧水体的传热膜系数($W/m^2 \cdot ^\circ C$); R_s 、 R_o 为管壁内外侧污垢热阻($m^2 \cdot ^\circ C/W$); δ 、 λ 为管壁厚度(m)及导热系数($W/m \cdot ^\circ C$); d_i 、 d_o 、 d_m 分别为管道内径、外径、平均直径(m)。

对于管壁内外侧水体的传热膜系数, 根据水体流动方式及速度不同, 分别采用相应计算方法^{[10][11]}。

(1) 管壁内侧水体传热膜系数 α_i 。

通常冷却盘管内水体雷诺数 Re 在 10 000 以上, 水体流动方式为湍(紊)流, 有:

$$\alpha_i = 0.023 \frac{\lambda_w}{d_i} Re^{0.8} Pr^{0.3} = 0.023 \frac{\lambda_w}{d_i} \left(\frac{d_i u \rho}{\mu} \right)^{0.8} Pr^{0.3}$$

式中: Pr 、 u 、 ρ 、 μ 和 λ_w 分别为管内水体普兰特准数、流速 (m/s), 密度 (kg/m³)、水体动力黏滞系数 (Pa·s) 和对流换热系数 (W/(m²·°C))。定性温度采用管道进出口温度的算术平均值。应用时, 要求 $0.7 < Pr < 120$, 管道的长径比 $L/d_i \geq 60$ 。若 $L/d_i < 60$, 上式计算结果乘以 $[1 + (d_i/L)^{0.7}]$ 加以修正。

(2) 管壁外侧水体传热膜系数 α_o 。

a. 盘管外为流动水体。当盘管位于流动水体中时, 参照间壁式换热器中直列管的计算方法, 即:

$$\alpha_o = 0.26 \varphi \frac{\lambda_w}{d_o} Re^{0.6} Pr^{0.33} = 0.26 \varphi \frac{\lambda_w}{d_o} \left(\frac{d_o u \rho}{\mu} \right)^{0.6} Pr^{0.33}$$

式中: Pr 、 u 、 ρ 、 μ 和 λ_w 为管外水体物理参数, 意义同前, 定性温度直接取水体温度; φ 为管道排数修正系数, 由于间距较大, 参照间壁式换热器取 0.64。

b. 管道外为静止水体。盘管位于静止水体中时, 此时传热以自然对流为主, 则:

$$\alpha_o = c \frac{\lambda_w}{d_o} (Gr \cdot Pr)^n = c \frac{\lambda_w}{d_o} \left(\frac{\rho^2 g \beta \Delta t d_o^3}{\mu^2} \cdot \frac{C_p \mu}{\lambda_w} \right)^n$$

式中: Gr 为管外流体格拉斯霍夫准数; $\Delta t = t_w - t$, t_w 为壁温, t 为流体温度; 定性温度 $t_m = (t_w + t)/2$; $\beta = 1/(273 + t_m)$; c 、 n 为系数, 当 $10^4 < Gr \cdot Pr < 10^9$ 时, $c = 0.53$, $n = 0.25$; $10^9 < Gr \cdot Pr < 10^{11}$ 时, $c = 0.13$, $n = 0.33$ 。

3 计算案例与讨论

现以某轴流泵站为例, 分析盘管冷却器管道内、外水体流速及管壁材质对换热面积的影响。该站共安装 2 800 kW 同步电机 3 台套, 设计要求电机油冷却器进水温度不高于 33 °C^[12], 经过电机后温升 4 °C, 每台电机冷却水量为 8.0 m³/h, 共用一套冷却装置。盘管冷却装置进口温度 T_1 取 37 °C, 出口温度 T_2 取 33 °C, 管外水体温度取 25 °C。分别计算不同管内、管外水体流速、管壁材料与盘管换热面积 S_i 关系曲线, 见图 3。

由图 3 可得以下结论。

(1) 盘管处于静止水体中的情况下, 管外流速为 0 m/s, 以自然对流传热为主, 利用水体容量带走热量, 此时所需盘管换热面积最大。如管外水体容量较小, 机组长期运行易导致其温度升高, 传热平均温差减小, 所需换热面积将进一步增加。

(2) 盘管处于流动水体中的情况下, 以强制对流传热为主, 利用水体流动带走热量, 此时随着管外水流流速加大, 换热面积逐渐减小, 但管外流速增加到一定数值时, 会在管壁产生脱流, 换热面积不再下降且基本保持不变。管外流速增加, 对管道结构强度及安装要求随之提高。从本例看, 管外流速不宜大于 3 m/s。

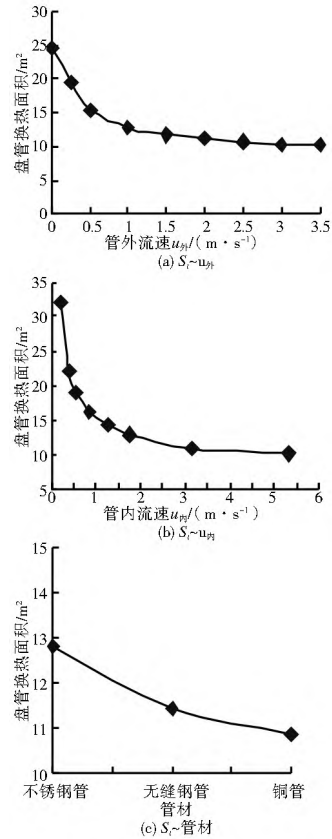


图 3 管内、管外水体流速、管壁材料与换热面积关系曲线

Fig. 3 Relationship curves between the flow rates inside and outside of the coiled pipe, pipe material and the heat transfer area

(3) 随着管内流速的增加, 所需换热面积随之减小, 但管内流速增加至某一值时, 换热面积基本保持不变; 同时管内流速加大, 相应管道水力损失增加, 运行成本亦将增加。从本例看, 管内流速不宜大于 2~2.5 m/s。

(4) 对于不锈钢管、无缝钢管、铜管制成的盘管, 30 °C 时, 不锈钢管的导热系数约为 17 W/(m²·°C), 无缝钢管为 52 W/(m²·°C), 铜管为 382 W/(m²·°C), 尽管三者导热系数相差较大, 但换热面积相差不到 20%, 说明管壁材质对换热面积的影响与导热系数不成比例, 材料选用时主要考虑造价、防腐及导热等因素。

4 成果应用

目前江苏省江西北调的淮阴二站、常州市城市防洪工程南运河枢纽泵站、通榆河北道送水工程大套三站、走马塘张家港枢纽泵站等工程采用了盘管冷却器, 换热面积采用前述公式计算, 经多次运行, 运行效果良好。各站盘管冷却器设计参数见表 1。

5 结语

(1) 结合泵站工程特点, 利用置于天然水体中并进行冷却的盘管冷却器组成密闭循环供水系统, 是一种节能、可靠的技术供水方式。

(2) 位于流动水体中的动水冷却器所需换热面积少于静水冷却器; 加大管道内、外水体流速, 对减少换热面积是有利的, 但随着流速加大, 管道安装要求及运行成本相应提高, 因此管内、外水体流速的选择应考虑其经济合理性; 管壁材料

表 1 部分泵站盘管冷却装置设计参数

Table 1 The design parameters of coiled pipe cooling device in some pumping stations

项目名称	装置形式	电机		冷却器温度(℃)		安装位置	每台冷却水量/(m ³ ·h ⁻¹)	盘管外径/mm	盘管换热面积/m ²	盘管材质	备注
		台数	功率/kW	进口	出口						
淮阴二站	立式轴流泵配肘形进水、虹吸式出水水道	3	2 800	< 33	< 37	虹吸流道出口上缘	8.0	76	18.1	不锈钢	三台机组共用一套冷却装置
南运河枢纽	竖井式贯流泵	3	355	< 33	< 37	直管式出水水道侧壁	8.5	108	30.5	不锈钢	三台机组共用一套冷却装置
大套三站	立式轴流泵配肘形进水、虹吸式出水水道	5	710	< 30	< 34	排水廊道内	3.0	45	4.5	不锈钢	每台机组配置一套冷却装置
张家港枢纽	竖井式贯流泵	3	500	< 33	< 37	直管式出水水道侧壁	10.5	133	41.7	不锈钢	三台机组共用一套冷却装置

对换热面积有一定影响,但差异相对较小,为节省工程投资,延长使用寿命,盘管材料建议采用不锈钢。

(3) 利用文中提出的换热面积计算公式求得的盘管面积,经实际工程运行检验,立式机组电机上下导轴承油温均未超标,机组运行稳定,工程运行良好,该计算方法可供其他工程设计参考。

参考文献(References):

- [1] 湖北水利勘测设计院. 大型电力排灌站[M]. 北京: 水利电力出版社, 1984: 300-303. (Hubei Water Conservancy Survey and Design Institute. Large Power Irrigation and Drainage Stations [M]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1984: 300-303. (in Chinese))
- [2] 江都水利工程管理处. 江都排灌站[M]. 北京, 水利电力出版社, 1979: 257. (Jiangdu Water Conservancy Project Management Office. Jiangdu Pump Station[M]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1979: 257. (in Chinese))
- [3] 丘传忻. 泵站[M]. 北京: 水利电力出版社, 2004: 200-202. (QIU Chuanxin. Pumping Station [M]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 2004: 200-202. (in Chinese))
- [4] 董金龙, 何小军, 张建峰. 大型水泵电动机冷却水的供应方式[J]. 江苏水利, 2007, (5): 31. (DONG Jinlong, HE Xiaojun, ZHANG Jianfeng. Large scale Water Pump Motor Cooling Water Supply Mode[J]. Jiangsu Water, 2007, (5): 31. (in Chinese))
- [5] 温泽杭, 周元斌, 张前进, 等. 冷水机组在泵站冷却水系统中的应用[J]. 排灌机械, 2005, 23(1): 19-21. (WEN Zehang, ZHOU Yuanbin, ZHANG Qianjin, et al. Water Chiller Cooling Water System of Pumping Station[J]. Drainage And Irrigation Machinery, 2005, 23(1): 19-21. (in Chinese))
- [6] 袁风友, 程淼. 刘老涧抽水站机组冷却供水系统技术分析 with 改造[J]. 江苏水利, 2009, (12): 25-26. (YUAN Fengyou, CHENG Miao. Liulaojian Pumping Station unit Cooling Water System Technology Analysis and Transformation[J]. Jiangsu Water, 2009, (12): 25-26. (in Chinese))
- [7] 史美中, 王中铮. 热交换器原理与设计[M]. 南京: 东南大学出版社, 2009: 2-5. (SHI Meizhong, WANG Zhongzheng. Principle and Design of Heat Exchangers [M]. Nanjing: Publishing House of Southeast University, 2009: 2-5. (in Chinese))
- [8] 毛培元. 盘管热交换器的优化设计[J]. 化工装备技术, 1999, 20(2): 36-37. (MAO Peiyuan. Coil Heat Exchanger Optimization Design [J]. Chemical Equipment Technology, 1999, 20(2): 36-37. (in Chinese))
- [9] 沙站, 周亚素. 闭式冷却塔内冷却盘管传热热阻分析[J]. 能源研究与信息, 2008, 24(4): 238-242. (SHA Zhan, ZHOU Yasu, Thermal Resistance Analysis of the Cooling Coil for a Closed circuit Cooling Tower. Energy Research and Information, 2008, 24(4): 238-242. (in Chinese))
- [10] 张洪流. 化工原理—流体流动与传热分册[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009: 253-255. (ZHANG Hongliu. Principles of Chemical Engineering Fluid Flow and Heat Transfer[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009: 253-255.)
- [11] 王志魁, 刘丽英, 刘伟. 化工原理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010: 132-135. (WANG Zhikui, LIU Liying, LIU Wei. Principles of Chemical Engineering[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2010: 132-135. (in Chinese))
- [12] JB/T 7607-2005, 立式电机轴承用 LYJH 型油冷却器[S]. (JB/T 7607-2005, Vertical Motor Bearing LYJH Type Oil Cooler[S]. (in Chinese))