



直流式水源利用中要解决的关键问题和研究进展

大连理工大学 毕海洋[☆] 端木琳
清华大学 朱颖心

摘要 分析了利用直流式水源要解决的结垢问题与设计参数确定问题,从污垢类型、结垢机理、管材防垢、除垢方法、改变运行参数防垢与设计参数选择等几个方面介绍了目前的研究进展。

关键词 直流式水源 结垢机理 在线清洗 阻力特性

Key problems to be solved in utilization of once-through water source and relative research development

By Bi Haiyang[★], Duanmu Lin and Zhu Yingxin

Abstract Analyses the problems of scaling and determining of design parameters. Presents the current advances in researches of fouling product type, scaling mechanism, fouling prevention of tube material, descaling methods, fouling prevention by changing operating parameters and the selection of designing parameters.

Keywords once-through water source, scaling mechanism, on-line cleaning, resistance characteristic

[★] Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning Province, China

①

0 引言

为了确保社会经济的可持续发展和资源的最大限度利用,很多国家提出了建立“循环型社会”的口号,并将其作为 21 世纪的重大发展战略目标,从工业生产和人民生活的多种角度着手实施^[1]。人们在保护和利用好现有能源的基础上,正以极大的努力去寻找能源的出路:一是开发新能源;二是减少能量消耗。到目前为止,节能技术一方面是以热力学第一定律为基础,从量的方面着手,减少各种损失和浪费。另一方面是从热力学第二定律出发,从质的方面着手研究,利用低位能源(如空气、土壤、水、太阳能、工业废热等)来代替一部分高位能源(如煤、石油、电能等),以达到节约高位能源的目的。近年来低温能源日益受到人们的重视,直流式水源(江河水、城市污水、湖水、地下水、海水等)因一年四季温度变化较小、数量稳定、具有冬暖夏凉

的温度特征而成为可利用的能源之一。本文就直流式水源冷热源利用中存在的 key 问题进行探讨。

1 直流式水源冷热源利用中的 key 问题

1.1 污垢引起的问题

1.1.1 传热性能下降

直流式水源冷热源之所以没有被大面积推广使用主要是因为其水质不能满足设备的运行要求,生成的污垢恶化传热问题严重。实际工程中出现的比较明显的问题是系统换热性能显著下降。

1.1.2 阻力增大

①[☆] 毕海洋,男,1978 年 1 月生,在读博士研究生
116024 大连理工大学土木学院暖通空调教研室
(0411) 84707684
E-mail: bocean19@sohu.com
收稿日期:2006-04-11
修回日期:2007-06-02

垢层增厚减小了流通截面积,在流量恒定的情况下,必然导致平均流动速度 v 增加,由式(1)可知,这必然引起整个换热设备内的流动阻力增大,进而增大水泵的功耗。又由泵与管道的性能曲线可知,水泵流量将减小,从而导致污垢增厚,进一步降低了机组的效率。

$$\Delta p = \left(f \frac{l}{d} + \sum \zeta \right) \frac{\rho v^2}{2} \quad (1)$$

式中 Δp 为换热设备内流动阻力, Pa; f 为沿程阻力系数; l 为管长, m; d 为管径, m; ζ 为局部阻力系数; ρ 为流体密度, kg/m³; v 为断面平均流速, m/s。

1.2 参数问题

根据传热理论^[2]可知:

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{\alpha_w} + \frac{1}{\alpha_{cf}} + \frac{\delta}{\lambda} + R_f \quad (2)$$

式中 K 为传热系数, W/(m² · °C); α_w 为管外表面传热系数, W/(m² · °C); α_{cf} 为管内表面传热系数, W/(m² · °C); δ 为管壁厚度, m; λ 为导热系数, W/(m · °C); R_f 为污垢热阻, m² · °C/W。

由式(2)可见, $K = f(\alpha_w, \alpha_{cf}, \lambda, R_f)$, 对于已知的换热系统, λ 与 α_w 基本保持不变, 所以 α_{cf} 与 R_f 是影响传热系数 K 的主要因素。

1.2.1 管内表面传热系数 α_{cf}

以文献[2]给出的光滑管内湍流关联式为例,

$$\alpha_{cf} = f(Re, Pr) = f(u^{0.8}, \lambda^{0.6}, c_p^{0.4}, \rho^{0.8}, \mu^{-0.4}, d^{-0.2}) \quad (3)$$

式中 Re 为雷诺数; Pr 为普朗特数; u 为流速, m/s; c_p 为比定压热容, kJ/(kg · °C); μ 为动力黏度, kg/(s · m)。

对于已经设计好的换热设备来讲, u, d 都是定值, 影响表面传热系数的主要是流体的物性, 对于牛顿流体, 已经证实流体以 $Pr^{1/3}$ 来影响传热^[2]。经实验可看出, 黏度等物性参数对管内表面传热系数影响很大, 利用直流式水源冷热源时仅仅套用常规公式是不合适的, 需要进一步研究推导出流体为直流式水源时管内表面传热系数关系式。

1.2.2 污垢热阻 R_f

美国 HTRI/TEMA Joint Committee 推荐河水的污垢热阻值为 0.352~0.528 m² · K/kW^[3] (速度小于 1 m/s 时, 为 0.528 m² · K/kW; 速度大于 1 m/s 时, 为 0.352 m² · K/kW); 《工业循环水处理设计规范》(GB 50050—95) 规定, 敞开式循

环水系统的污垢热阻值为 0.171~0.344 m² · K/kW。由于不同规范提供的污垢热阻值范围相差较大, 往往会对实际工作产生不良影响。由于目前我国污垢的现场数据几近空白, 尤其是主要水系及城市污水的污垢热阻数据的缺乏, 迫使换热器设计采用美国 TEMA 标准。

1.2.3 流动参数

目前直流式水源的流动阻力计算仍然基于牛顿流体理论, 以早期的谢才 (Chezy) 公式中的谢才系数来描述阻力特性。大量实践与实验表明, 与清水相比, 直流式水源流动性能表现出显著差异, 其黏度为非常数, 表现出非牛顿流体的特性。曼宁 (Manning) 提出的在工程中被广泛应用的经验公式仅考虑了流动壁面的粗糙特性, 没有考虑直流式水源非牛顿特性引起的阻力系数的增大, 造成实际工程中水泵的流量减小、扬程增大, 从而造成污垢集聚与系统性能下降等问题^[4]。

2 研究概况及分析

2.1 污垢种类

文献[5]指出, 对于水质较差的情况, 换热器中水流速应大于 1 m/s, 即使如此在实际工程中仍然出现了污垢沉积现象, 导致系统换热性能显著下降。Epstein 按照形成机制把污垢分为: 1) 析晶污垢; 2) 颗粒污垢; 3) 化学反应污垢; 4) 腐蚀污垢; 5) 生物污垢; 6) 凝固污垢^[6]。笔者对广州地铁利用珠江水工程、采用热泵提取城市污水中大热量的大连开发区高尔夫球场工程以及哈尔滨望江宾馆工程的调研发现, 堵塞换热器的污垢主要是黏泥类物质, 以微生物污垢为主, 并夹杂非常细小的泥砂, 不存在析晶污垢, 与文献[7~9]的结论一致。

2.2 与污垢有关的研究

直流式水源主要特点在于水量大、水质差, 目前直流式水源热泵应用中的污垢研究主要集中在结垢机理、除垢方法、改变运行参数防垢、管材防垢等方面。

2.2.1 结垢机理

最早的结垢模型之一是由 Kern 与 Seaton 提出的^[10], 多年来在结垢模型建立方面所做的努力很多都是针对污垢不同的形成机制围绕特定情况下对污垢沉积速率、污垢对传热面的剥蚀速率的估算而进行的。生物污垢方面, Melo 着重评述了近期生物污垢的影响参数的研究进展, 特别是表面材

料、流速和无机物粒子对生物污垢的影响^[11]。De Beer 等人研究了厌氧黏膜的结构与输运之间的关系^[12-13]。Fowler 等人建立了辐流室以进行黏膜生长时的流速、剪切力研究^[14]。How 等人研究了湍流条件下的前期膜附着,得到了剪切应力的关联式,他们分别用荧光假单胞菌与经粗效过滤后的河水进行了试验,得出:一般而言,细胞沉积率随着剪切力的增大而急剧下降,但当剪切力增大到某个临界值后,沉积率仍保持一虽然较低但仍然有效的数值^[15]。实际中的污垢多是混合污垢,常常出现不同污垢之间产生相互作用的情况,从而造成结垢机理复杂化。Zubair 等人从新的角度来研究结垢问题,将其增长规律归纳为线性、幂律、降率和渐近四类,并引入概率分析方法,建立了污垢增长概率模型^[16]。徐志明等人在 Zubair 等人的研究成果基础上提出了考虑初始污垢热阻的影响的污垢模型,更适合用来指导换热设备的设计和运行^[17]。

2.2.2 管材防垢

Rankin 等人认为具有低表面能的聚四氟乙烯 (PTFE) 或硅酮可以延缓污垢层的生成且易于清洗^[18-20]。Müller-Steinhagen 等人利用 DLC 和其他材料涂层开发了一种可长久维持低污垢的表面来延缓污垢的形成^[21]。大部分研究表明,淡水在铜或铜合金材料表面上形成生物污垢的程度要轻于在其他材质上形成生物污垢的程度,铜合金表面对生物污垢的形成能有所抑制的原因在于铜离子对微生物的毒性作用。笔者也曾做过紫铜管与 PTFE 管在生活污水中的结垢实验,发现 PTFE 管较紫铜管更易结垢。司秀华考察了几种自由能不同的表面的结垢情况^[22]。刘天庆等人发现只有固体材料与生物污垢之间的固-固界面能与生物污垢的形成有明确的关系^[23]。Forster 等人对 9 种材料的表面能与污垢的诱导期进行比较后推测表明,表面能与污垢特性没有直接的关系^[24]。文献^[25]的研究表明,采用强电技术对换热表面进行处理,能使其具有很好的亲水性,从而可以改善换热表面在热湿状态下的性能。

2.2.3 除污方法

直流式水源水质较差,更易在换热面上结垢,当换热面被污染到一定的程度时,就需要进行清洗。目前有两种清除换热面上污垢的方法:一是机械清洗,广州地铁制冷站安装的清洗系统与毛刷自

动清洗装置就属于此种方式;二是化学清洗,但化学清洗易造成环境污染,与利用直流式水源低温能源的初衷相违背。日本在污水热能利用方面做得较好,尤其以荏原株式会社最为突出,其工作人员在污水的腐蚀性、结垢特性上做了大量实验,并发明了换热管毛刷自动清洗装置等。

2.2.4 改变运行参数防垢

运行参数是影响污垢形成的重要因素,研究表明,污垢增长率随流体速度增大而减小,但流速的增大再加上直流式水源黏性较大的原因,易造成直流式水源泵耗急剧增大,文献^[9]介绍的城市污水热能利用工程中,污水流速达到了 3 m/s。另外在线清洗技术与设备也得到了发展,如自动清洗扭带技术^[26]与循环流态化在线清洗技术^[27]。

2.3 相关参数研究

直流式水源的水质差,水体中含有大量的物理化学污染物,流动与换热特性较清水有显著的差异。目前国内外对直流式水源参数的研究有限,文献^[1,28]从宏观角度探讨了污水能源的利用及对应用工艺问题的探讨和个别实践;吴荣华等人对城市生活污水的参数特性进行了研究^[29-30],将污水视为一种均质流体,采用单相非牛顿流模型将固相污垢的影响归结到流体黏度特性之中,经验证所得到的计算公式可用于指导城市污水冷热源系统设计。

2.4 小结

徐志明等人在 Zubair 研究的基础上考虑初始污垢的影响,提出的污垢模型更适合指导换热设备的设计和运行,但其应用的前提是必须知道污垢曲线的类型(线性、幂律、降率和渐近),而这在初始时是不知道的;由于污垢形成过程的复杂性,刘天庆等人用模糊数学的方法对不同材料表面上形成生物膜的诱导期和平均生物污垢形成量建立了评价及预测模型,但其主要是从管材成分与流速的角度来进行预测的,偏重于不同管材的防垢能力的预测上,实际中的污垢量是由管材、水质及运行参数等因素决定的,因而其模型有待考虑更多的影响因素以进一步完善;通过改善管材来提高防垢能力因直流式水源水质较差的缘故而显得作用不大,即在目前的实际工程应用中结垢是必然的;在实际工程中亟需解决的是在不影响机组运行的情况下进行除污,可采用的方法是在线清洗,广州地铁海珠制冷站所安装的清洗系统与毛刷自动清洗装置均属于

此种方式,但从使用效果来看仍没有彻底解决问题,再者每台设备造价高达 28 万元,大大增加了设备的初投资;荏原株式会社的毛刷自动清洗装置虽然可自动清除污垢,但具体多长时间清洗一次以及采用这样的装置的换热器的污垢系数是多大等主要问题都没有相关的报道;在换热管内安装自动清洗扭带等技术虽然有防垢与加强换热的双重效果,但其受流体流动状态等因素的影响较大,在实际工程中很难把握其效果,文献资料中往往提到的是其能增强换热效果,而对其的防垢能力没有从量值上给出;流化床强化换热与防垢研究同样更多是偏重于其强化换热效果如何,对防垢性能与加入粒子后的流体的流动特性研究还不充分。

3 结论

1) 污垢的抑制与换热流动参数的选择是利用直流式水源所遇到的关键问题。

2) 直流式水源热泵系统利用直流式水源进行供冷供热时出现的污垢主要是生物污垢与细小的泥砂。

3) 目前的防垢方法主要是增大流速,但流速的增大会使泵的功耗急剧增加。目前亟需研究混合污垢的生成机理,找出污垢的变化规律和主要影响因素,进而采取有针对性的防垢措施,减少泵功耗,进一步提高系统的节能效果。

4) 直流式水源换热设备设计中只以一个与时间无关的经验性污垢热阻来考虑污垢的影响满足不了实际需要。我国换热器设计采用美国 TEMA 标准,而 TEMA 标准提供的污垢热阻有不少不足与局限,主要是数据来源可靠性不高、数据影响因素考虑不当、时间相关性不好等;另外我国的水体与美国有很大差异,因而目前亟需得到利用我国直流式水源的污垢系数参考值。

5) 目前有关直流式水源流动与换热特性的研究还处于起步阶段,需要针对不同直流式水源进行换热性能与流动特性参数的研究,以便更好地利用直流式水源。

参考文献:

- [1] 尹军,陈雷,王鹤立. 城市污水的资源再生及热能回收利用[M]. 北京:化学工业出版社,2003
- [2] 章熙民,任泽霁,梅飞鸣. 传热学[M]. 3 版. 北京:中国建筑工业出版社,1993
- [3] 杨善让,徐志明,孙灵芳. 换热设备污垢与对策[M]. 2 版. 北京:科学出版社,2004
- [4] 毕海洋,端木琳,朱颖心,等. 广州地铁制冷站采用珠江水冷却的实践[J]. 中国给水排水,2007,23(2): 50-52
- [5] 程林,杨培毅,陆煜. 换热器运行导论[M]. 北京:科学出版社,1995
- [6] Epstein N. Fouling in heat exchangers[C]// Heat Transfer 1978—Pro 6th IHTC, 1979:235-253
- [7] 吴荣华,孙德兴. 哈尔滨望江宾馆利用城市污水中的能源[J]. 给水排水,2003,19(12)
- [8] 崔福义,李晓明,周红. 污水换热器污垢热阻特性研究[J]. 煤气与热力,2005,25(6)
- [9] 于永辉,郑官振. 贵阳市污水源热泵集中供热可行性分析[C]//2005 年全国空调与热泵节能技术交流会论文集,2005
- [10] Kern D Q, Seaton R E. A theoretical analysis of thermal surface fouling[J]. Br Chem Eng, 1959(4): 258-262
- [11] Melo L F. An overview of biofouling: from basic science to mitigation[M]// Panchal C B, Bott T R, Melo L F, et al. Understanding Heat Exchanger Fouling and Its Mitigation. New York: Begell House Inc, 1997:55-66
- [12] De Beer D, Stoodley P. Relation between the structure of an anaerobic biofilm and transport phenomena[J]. Wat Sci Tech, 1995, 32(8): 11-18
- [13] Trulear M G. Cellular reproduction and extracellular polymer formation in the development of biofilms[D]. Bozeman: Montana State University, 1983
- [14] Fowler H W, McKay A J. The measurement of microbial adhesion[M]// Berkeley R C W, Lynch J M, Melling J. Microbial Adhesion to Surfaces. London: Academic Press, 1980
- [15] How I, Duddridge J E, Kent C A, et al. The effects of shear stress on biofouling deposit formation and removal[R]//H T F S Research Symposium. AERE Report R-10583. United Kingdom Atomic Energy Authority, 1982
- [16] Zubair S M, Sheikh A K, Shaik M N. A probabilistic approach to the maintenance of heat-transfer equipment subject to fouling[J]. Energy, 1992, 17(8):769-776
- [17] 徐志明,郭淑清,杨善让. 基于概率分析的污垢模型[J]. 工程热物理学报,2003,24(2):322-324
- [18] Rankin B H, Adamson W L. Scale formation as related to evaporator surface conditions [J]. Desalination, 1973, 13(1):63-87
- [19] Baier R E. Substrata influences on the adhesion of micro-organisms and their resultant new surface properties[M]// Bitton G, Marshall K S. Adsorption (下转第 20 页)

峰值负荷。另外,照明能耗减少量随着 SFR 的增大而增大,且照明能耗的减少是建筑能耗减少的主要因素;而供冷能耗减少量刚开始时有小幅度的增加,后来随着 SFR 的增大而减小;供热能耗减少量则始终为负值。

5.2 昼光照明时,存在一最佳 SFR,此时供冷能耗、供热能耗、照明能耗达到最佳平衡点,使得建筑总能耗减少量达最大值。

5.3 昼光照明在不同气候地区的节能效果有所差异。在本研究模型中,在以供冷为主导的地区如广州等城市采用昼光照明有着更大的节能潜力,而在以供暖为主导的地区如哈尔滨等地区,其节能潜力则相对要小些。

5.4 在同时有夏季供冷和冬季供暖的情况下,要综合考虑遮阳系数对供冷和供暖能耗的影响,选择合适的玻璃类型,综合考虑经济性和节能效果之间的关系。

5.5 天窗昼光照明涉及的建筑能耗因素较多,各因素之间的交互作用也很复杂。因此,有必要着重针对不同的气候地区进行深入的探讨,研究适合不同地区的最佳昼光照明形式,如照明控制方式、天窗热物性的选择等都是有待进一步深入探讨的课题。

参考文献:

[1] 薛志峰,江亿.北京市大型公共建筑用能现状与节能

潜力分析[J].暖通空调,2004,34(9):8-10

[2] EIA. Energy end-use intensities in commercial buildings [R]. US Department of Energy, Washington, 1994

[3] Sliepenbeek W, Van Broekhoven L. Evaluation of stimev, the all-Dutch utility-sponsored lighting rebate programs[C]// Right Light Three, Third European Conference on Energy-Efficient Lighting. England, 1995

[4] PROCEL. Handbook of energy savings in public and commercial buildings[M], 1993

[5] (日)照明协会.照明手册[M].李农,杨燕,译.北京:科学出版社,2005

[6] Frederick Winkelmann, Stephen Selkowitz. Daylighting simulation in DOE-2: theory, validation and applications [R]. Applied Science Division, Lawrence Berkeley Laboratory, University of California Berkeley, California, 1984:326-336

[7] James J H. DOE-2. 2 building energy use and cost analysis program volume 3: topics [R]. Lawrence Berkeley National Laboratory, 2004:166-179

[8] James J H. eQUEST energy simulation training for design and construction professionals[M], 2004

[9] 中国建筑科学研究院,中国建筑业协会建筑节能专业委员会. GB 50189—2005 公共建筑节能设计标准[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2005

(上接第 30 页)

of Micro-organisms to Surface. New York: Wiley-Interscience Publishers, 1980:59-104

[20] Kjaer E B. Bioactive materials for antifouling coatings[J]. Progress in Organic Coatings, 1992, 20(9): 339-352

[21] Müller-Steinhagen H, Zhao Q. Investigation of low fouling surface alloys made by ion implantation technology[J]. Chemical Engineering Science, 1997, 52: 3321-3332

[22] 司秀华. 改性表面及磁化水防垢的研究[D]. 大连:大连理工大学,1999

[23] 刘天庆,李香琴,于瑞红,等. 表面材料性质对生物垢形成过程的影响[J]. 大连理工大学学报,2002,42(2)

[24] Forster M, Augustin W, Bohnet M. Influence of the adhesion force crystal heat exchanger surface on fouling mitigation [J]. Chemical Engineering and

Processing, 1999, 38(4): 449-461

[25] Suwon Lee, Hyunuk Lee, Samchul Ha. Plasma hydrophilic surface treatment for dehumidifying heat exchangers[C]// The 4th International Symposium on Heating, Ventilating and Air Conditioning, 2003

[26] 俞秀民,吴金香,俞天兰. 流振旋转螺旋自动除垢防垢技术研究[J]. 化学清洗,1996,12(3)

[27] 贺运初,彭德其,俞秀民,等. 套管式换热器管间污垢循环流态化在线清洗技术[J]. 化工装备技术,1999, 20(5):24-26

[28] Yoshii T. Technology for utilizing unused low temperature difference energy [J]. Journal of the Japan Institute of Energy, 2001, 80(8):696-706

[29] 吴荣华,孙德兴,马广兴. 城市原生污水冷热源水参数特性与应用方法评价[J]. 可再生能源,2005,123(5)

[30] 吴荣华,张承虎,孙德兴. 城市污水类非牛顿幂律湍流流动特性研究[J]. 水动力学研究与进展,2005,20(6)