

板式换热器在供热系统中结垢处理及效果分析

李响¹, 刘峰^{2*}, 刘张¹

¹华电青岛热力有限公司, 山东 青岛

²中国特种设备检测研究院, 北京

收稿日期: 2022年3月7日; 录用日期: 2022年3月21日; 发布日期: 2022年4月8日

摘要

板式换热器作为工业生产中常用的热交换器, 一旦出现结垢现象, 就很容易形成堵塞, 进而降低换热效率。本文以华电青岛热力有限公司四机医院换热站1号机组为研究对象, 分析得出板式换热器结垢是导致其供热不达标率的主要原因, 列举了两种板式换热器的清洗方法并进行了对比评估, 最终采用化学清洗的方法通过对换热器进行拆洗除垢操作。经除垢后, 1号机组每日用电量下降约100 kW·h, 供热不达标率从5.4‰降至4.0‰。本研究以期能够为降低供热系统中供热不达标率提供解决方案。

关键词

板式换热器, 供热系统, 不达标率, 除垢方法, 效果分析

Scale Treatment and Effect Analysis of Plate Heat Exchanger in Heating System

Xiang Li¹, Feng Liu^{2*}, Zhang Liu¹

¹Huadian Qingdao Thermal Energy Co., Ltd., Qingdao Shandong

²China Special Equipment Inspection and Research Institute, Beijing

Received: Mar. 7th, 2022; accepted: Mar. 21st, 2022; published: Apr. 8th, 2022

Abstract

As a common heat exchanger in industrial industry, the plate heat exchanger is easy to form blockage once scaling phenomenon occurs, thereby reducing heat exchange efficiency. Taking Unit 1 of the heat exchange station in Siji Hospital of Huadian Qingdao Thermal Energy Co., Ltd. as the research object, this paper analyzed that the scaling of the plate heat exchanger is the main reason

*通讯作者。

for the substandard rate of heat supply. Two different cleaning methods of the plate heat exchanger were compared and evaluated, and finally adopted the chemical cleaning method to remove the scale of the heat exchanger. After descaling, the daily power consumption of Unit 1 decreased by about 100 kW·h, and the substandard heating rate decreased from 5.4‰ to 4.0‰, so as to provide solutions for reducing the substandard rate in the heating system.

Keywords

Plate Heat Exchanger, Heating System, Substandard Rate, Scale Treatment, Effect Analysis

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

我国“十四五规划”高度重视能源消耗，努力实现“碳达峰”和“碳中和”的国家战略。近年来，换热器行业也开始朝着节能增效的方向发展，主要通过提高传热效率，减少污垢形成，降低压降等方法提高换热系统的节能水平[1]。

换热器主要包括管壳式换热器，板式换热器，微通道换热器和印刷电路板换热器等[2]。其中板式换热器是当前常用且较为高效节能的换热器，具有结构相对紧凑，比表面积大，传热效率高，维护成本低等特点[3]，作为大多数供热系统中的核心设备，被广泛应用在造纸纺织，集中供暖，钢铁冶金和电力等行业。板式换热器在使用过程中容易发生腐蚀现象，这会明显降低板式换热器的金属结构强度[4]；除此之外，由于板式换热器流道间距比较狭窄，当换热介质中有较大颗粒时，很容易堵塞结垢[5]，影响换热器的正常使用。若板式换热器无法高效工作，会严重降低换热效率和系统的总效能[6]。张仲彬等[7]研究了6种水质参数对板式换热器结垢的影响，结果表明污垢主要是以析晶污垢和颗粒污垢为主，掺杂生物污垢和腐蚀污垢等的混合污垢。李煜等[8]通过改变冷热水的入口温度和冷水流量，对污垢热阻进行了实时监控，结果发现对板式换热器结垢影响最大的为流速，最小的为溶解氧。Friis等[9]采用薄涂层技术在板式换热器表面添加纳米厚度的图层，对表面引发聚合反应的工艺参数，比如引发剂层类型、聚合时间和引发剂添加量等进行了优化，以实现污垢形成的缓解效果。此外，张彩瑜[10]提出加强对板式换热器的日常清洗是解决板式换热器在传热过程中效率低下的主要手段之一。

为了进一步研究换热器结垢现象，本文选取华电青岛热力有限公司四机医院换热站1号机组为研究对象，排查了板式换热器在供热系统中的产生结垢现象的原因，并确定了清理方案处理，对进行清垢后的效果进行验证和分析，以期对生产实践中的换热器清垢提供一定指导。

2. 故障背景与分析

2.1. 故障背景

华电青岛热力有限公司四机医院换热站1号机组的设计负荷为12 MW，负载居民3752户，供热面积达18.35万平方米。根据2016~2017采暖季12月份的数据显示，1号机组所负载区域用户来电量和供热测温不达标率较其他换热站同比较高，如图1所示。为进一步确定供热测温不达标率的原因，将2017年6月对采暖季中换热站1号机组供热不达标情况的总数进行了分层统计。为排除供热初期管网水力不平

衡, 管道高点积气等因素对统计结果造成的影响, 选取了管网运行相对平稳, 室外气温较低一月份作为数据来源, 如表 1 所示。可以明显看出, 造成四机医院换热站 1 号机组供热不达标的主要问题在于供水温度低于理论值, 占总发生数的 72%。经过排查发现造成该问题的主要原因可能为板式换热器面积不足, 一次侧循环流量低和板式换热器结垢, 导致传热系数降低。

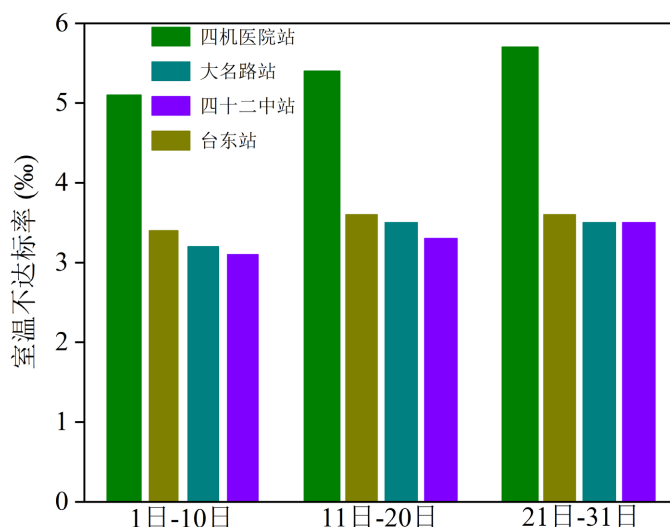


Figure 1. Comparison of room temperature substandard rate of heat exchange station in December (thousand households)

图 1. 12 月份换热站室温不达标率(千户)对比

Table 1. Statistics on substandard rate of heat supply of Unit 1 on January 1, 2017

表 1. 2017 年 1 月 1 号机组供热不达标情况统计

类目	频数	累计频数	累计百分比(%)
供水温度低于理论值	36	36	72
管网流量低于理论值	6	42	84
室内采暖设施设计安装缺陷	5	47	94
测温误差	2	49	98
居民楼外墙无保温层	1	50	100

2.2. 问题分析

1) 板式换热器板片面积不足

根据四机医院站设计施工图显示, 四机医院换热站设计供热面积为 20 万平米。通过实际统计 2016~2017 年采暖季实际供热面积为 18.35 万平米, 未超出设计值, 且该换热站供热面积不存在无序增长等因素。所以板式换热器板片面积不足并非造成四机医院换热站 1 号机组供水温度低于理论值的主要因素。

2) 一次侧循环流量低

统计 2016~2017 年采暖季, 将四机医院站与台东站、大名路站、四十二中站的一次侧流量计进行统计分析, 并根据换热站面积, 计算出各站的万平米循环流量, 数值如表 2 所示。通过计算对比发现, 各换热站万平米循环流量均高于《城镇供热管网设计规范(CJJ34-2010)》中所要求的 ≥ 5 t/万平米/h, 且四机

医院站万平米循环流量高于其他换热站。由此得知，一次侧循环流量低不是造成四机医院换热站 1 号机组供水温度低于理论值的主要因素。

Table 2. Primary side flow data of different heat exchange stations

表 2. 不同换热站一次侧流量数据

换热站	换热站流量(t/h)	换热站面积(万平米)	循环流量(t/万平米/h)	标准(t/万平米/h)	偏离
四机医院站	159.6	18.35	8.55	≥5	未偏离
台东站	266.7	39.32	6.78	≥5	未偏离
大名路站	70.58	10.50	6.72	≥5	未偏离
四十二中站	59.40	7.47	7.95	≥5	未偏离

3) 板式换热器结垢，导致传热系数降低

调取 2016~2017 年供热季四机医院换热站 1 号机组一、二次侧供回水温度、流量、板式换热器面积和机组负荷等数据，计算分析板式换热器传热系数。从传热学基本方程式(1)可知，影响换热量的主要因素是与板式换热器结构形式有关的因素 K 和 A ，相关的传热单元数 NTU 和与流动状况相关的对数平均温差 Δt_m 。

$$Q = K \cdot A \cdot \Delta t_m \quad (1)$$

$$NTU = \frac{K \cdot A}{G \cdot C_p} \quad (2)$$

其中， Q 为换热站机组负荷， A 为板式换热器换热面积， Δt_m 为对数平均温差。

由此计算并绘制了板式换热器传热系数与一次网流量变化的散点图，如图 2 所示。

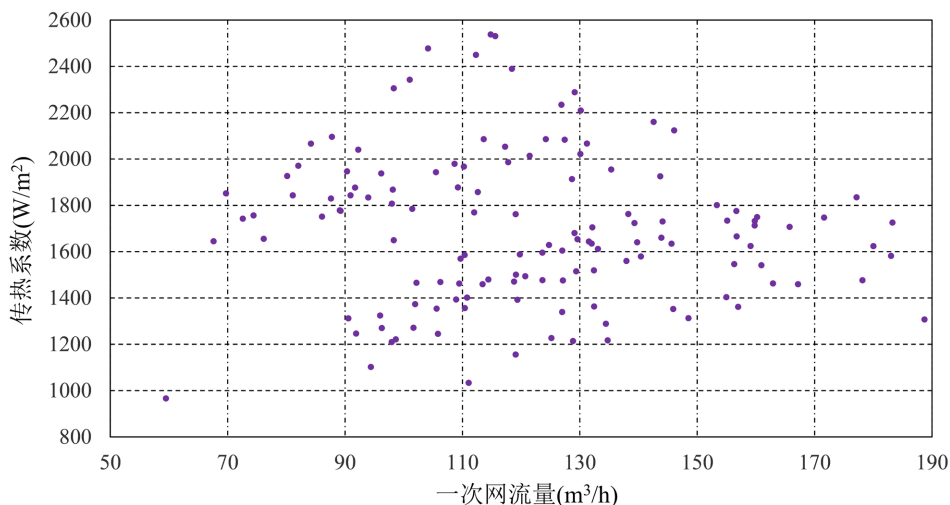


Figure 2. Scatter diagram of heat transfer coefficient and flow of plate heat exchanger in Siji hospital station from 2016 to 2017

图 2. 2016~2017 年四机医院站板式换热器传热系数 - 流量关系散点图

分析图表可知，在相同的一次网流量的情况下，板式换热器传热系数随着供热天数的推移有着明显的下降趋势，传热系数的下降意味着板式换热器的换热能力下降。所以板式换热器结垢造成传热系数降低是造成四机医院换热站 1 号机组供水温度低于理论值的主要因素。

3. 可行性分析及方案实施

3.1. 可行性分析

针对 1 号机组换热站近三年内机组供热不达标率进行了分析统计, 其平均水平为 3.6%; 而四机医院换热站同期历史最低水平为 3.4%, 而在 12 月份供热不达标率最高为 5.7%。考虑到 1 号机组地处老城区, 建筑保温性能普遍较差, 投入使用年限较长等客观因素影响, 1 号机组供热不达标情况可降为 4% 左右。

为了降低供热不达标情况, 需要对板式换热器进行除垢。板式换热器结垢的主要成份为钙、镁、铝等离子的无机碱或无机盐[11], 现在板式换热器的清洗方法主要采用物理清洗和化学清洗两种[12][13]。针对这两种清洗方法进行了评估, 如表 3 所示, 经过对比最后选择采用清洗效果较好的化学清洗。

Table 3. Comparison and evaluation of cleaning schemes

表 3. 清洗方案对比评估表

方案	物理清洗	化学清洗
简介	将板式换热器拆卸后, 用高压水枪、毛刷等工具对附着在板片上的结垢进行清洗。	将板式换热器拆卸后, 将换热片浸泡在清洗剂中进行清洗, 结束后用清水复洗。
优点	1、时间灵活; 2、无需专用工具; 3、成本低廉。	1、可以进行深度清洗; 2、清洗效果不受操作人员技术水平影响。
缺点	1、清洗效果受人员操作影响较大; 2、部分深层结垢无法清除彻底; 3、操作时存在误操作刮伤板片的风险。	1、清洗液(酸)与人员直接接触; 2、清洗液可能腐蚀板片; 3、清洗液不能直接排放。
成本	人工费用: 10 人 × 200 元 = 2000 元 材料费用: 200 元 共计: 2200 元	人工费用: 6 人 × 100 元 = 600 元 材料费用: 28000 元/t × 0.1 t = 2800 元 共计: 3400 元
耗时	耗时 8 小时	耗时 5 小时

3.2. 方案实施

根据安全操作规程和实践经验, 设计并绘制了板式换热器拆洗操作流程: 第一步, 拆卸压紧板; 第二步, 沿活动压紧板至固定压紧板方向, 依次拆下换热板片和密封垫片; 第三步, 根据编号逐一清洗浸泡板片; 第四步, 复装板式换热器。依此流程对四机医院换热站 1 号机组的板式换热器进行了拆卸 - 清洗 - 复装工作, 如图 3 所示。

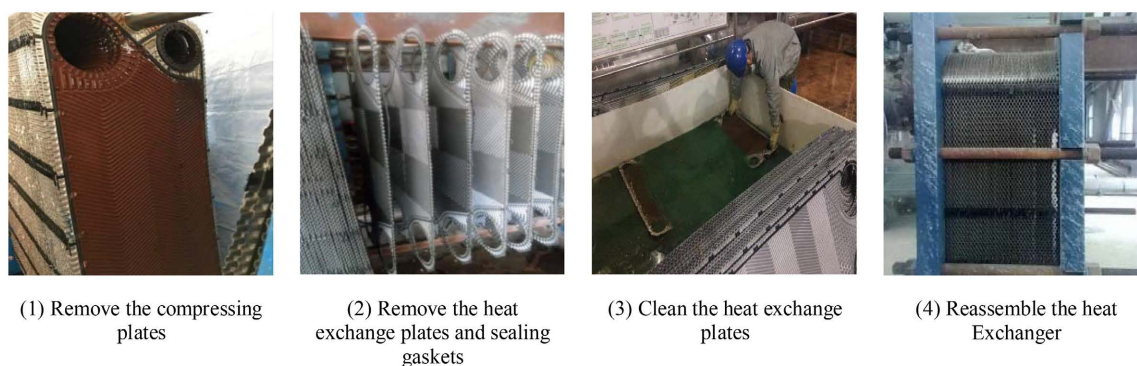


Figure 3. Flow chart of disassemble-cleaning-reassemble for plate heat exchangers

图 3. 板式换热器拆卸 - 清洗 - 复装流程图

4. 效果验证与分析

4.1. 效果验证

为验证清洗效果,排除供热初期管网水力不平衡,管道高点积气等因素造成的影响,选取2018年1月中下旬作为效果验证期。抽取四机医院换热站1号机组一、二次侧回水温度、流量和板式换热器面积等数据,经计算并绘制了酸洗之后的板式换热器传热系数随一次侧流量变化的散点图,同时统计了该时段内四机医院换热站1号机组供热各项不达标情况,并进行了分析,分别如图4和表4所示。

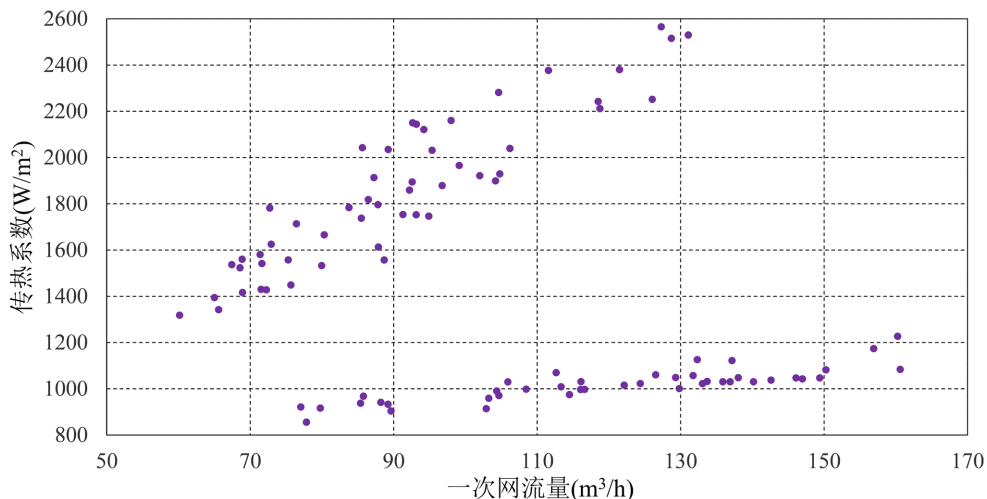


Figure 4. Scatter diagram of heat transfer coefficient and flow of plate heat exchanger in Siji hospital station after implementing the scheme

图4. 方案实施后四机医院站板式换热器传热系数 - 流量关系散点图

Table 4. Statistics on substandard rate of heat supply of Unit 1 on January 1, 2018

表4. 2018年1月1号机组供热不达标统计表

类目	频数	累计频数	累计百分比(%)
供水温度低于理论值	1	1	8.33
管网流量低于理论值	2	3	25
室内采暖设施设计安装缺陷	5	8	66.67
测温误差	1	9	75
居民楼外墙无保温层	3	12	100

根据以上图表计算得知。在实施化学清洗方案后,四机医院换热站1号机组传热系数较清洗前有明显改善。“供水温度低于理论值”作为活动前影响四机医院换热站1号机组供热不达标问题的主要症结,在清洗后抽样调查数据中频数为1,发生比8.33%,原关键因素“供水温度低于理论值”已变成非关键因素。通过计算,抽样时段内四机医院换热站1号机组供热不达标率为4.0‰,实现了既定目标。

4.2. 效果分析

方案实施后经济效益主要从电耗指标和居民退费两部分进行分析。

1) 电耗指标下降

通过此次对板式换热器进行除垢处理,四机医院换热站1号机组电耗指标有较大幅度的下降,如图5

所示。在一次侧流量与上采暖季持平情况下，每日用电量下降约 100 kW·h，根据青岛市普通工商业用电平均电费 0.9 元每千瓦时计算，方案实施后四机医院换热站共能节省电费约 $0.9 \text{ 元/kW}\cdot\text{h} \times 100 \text{ kW}\cdot\text{h} \times 98 \text{ 天} = 8820 \text{ 元}$ 。

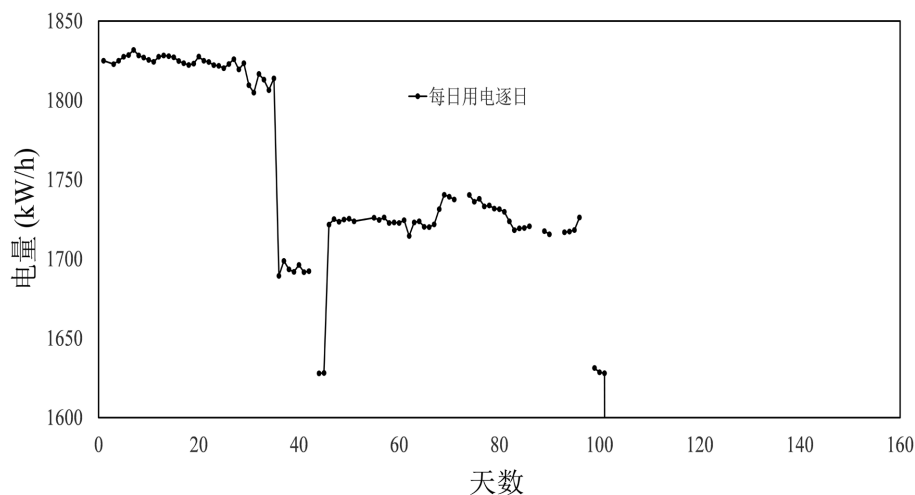


Figure 5. Daily power consumption diagram of plate heat exchanger before and after cleaning in Siji hospital station

图 5. 四机医院换热站板式换热器清洗前后日用电量图

2) 居民退费下降

根据《青岛市城市供热条例》规定[14]：用户被测房间供热温度不达标，属于供热单位原因的，供热单位应当采取措施。对被测房间室温不合格的天数，且供热单位应当按照如下标准向用户退还热费。

- a) 供热温度高于或者等于 16℃、低于 18℃的，退还热费的 20%；
- b) 供热温度高于或者等于 14℃、低于 16℃的，退还热费的 50%；
- c) 供热温度低于 14℃的，全额退还热费。

四机医院换热站供热面积 18.35 万平米，居民 3752 户，根据活动后四机医院换热站 1 号机组供热不达标率由 5.4‰降至 4.0‰，按照往年平均每户退费额 400 元粗略计算，2017~2018 采暖季预计可节约居民退费 2101 元。

5. 结论

本文选取华电青岛热力有限公司四机医院换热站 1 号机组为研究对象，通过排查表明板式换热器结垢是影响供热不达标的主要原因，并采用化学清洗的方法对换热器进行了除垢。通过对效果验证与分析，发现通过此次对板式换热器进行除垢处理，四机医院换热站 1 号机组每日用电量下降约 100 kW·h，四机医院换热站共能节省电费约 8820 元，并且 2017~2018 年采暖季预计可节约居民退费 2101 元。

本文致力于板式换热器在供热系统中的结垢分析方法和化学清洗研究，在供热质量下降的情况下，给出了具体的解决方案，在能源节约和安全保供方面，可以为各供热企业提供一定借鉴，从而有利于改进生产策略，提高供热效果、效益和效率。

参考文献

- [1] 栾辉宝, 陶文铨, 朱国庆, 等. 全焊接板式换热器发展综述[J]. 中国科学: 技术科学, 2013, 43(9): 1020-1033.
- [2] 杜文静, 赵浚哲, 张立新, 等. 换热器结构发展综述及展望[J]. 山东大学学报(工学版), 2021, 51(5): 76-83.

-
- [3] 刘景成, 张树有, 周智勇. 板翅换热器流道结构改进与流体流动性能分析[J]. 机械工程学报, 2014, 50(18): 167-176.
- [4] 李凯, 付鹏飞, 麻彦龙, 等. AF1410 钢电子束焊接接头的腐蚀行为[J]. 失效分析与预防, 2021, 16(2): 89-97.
- [5] 周先桃, 汪飞, 冉慧慧, 等. 冲渣水用板式换热器渣水通道传热流动特性研究及应用[J]. 压力容器, 2020, 37(6): 26-33.
- [6] 袁凤涛. 供热行业板式换热器传热低效的原因分析及解决方法[J]. 区域供热, 2019(3): 104-105+113.
- [7] 张仲彬, 李煜, 杜祥云, 等. 水质对板式换热器结垢的影响权重及其机制分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(32): 69-74+12.
- [8] 李煜, 徐志明, 陈健美, 等. 板式换热器冷却水污垢影响因素权重及结垢机理[J]. 邵阳学院学报(自然科学版), 2016, 13(4): 61-67.
- [9] Friis, J.E., Subbiahdoss, G., Gerved, G., *et al.* (2019) Evaluation of Surface-Initiated Polymer Brush as Anti-Scaling Coating for Plate Heat Exchangers. *Progress in Organic Coatings*, **136**, 105196-105196. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2019.06.042>
- [10] 张彩瑜. 板式换热器传热低效原因分析及解决办法[J]. 居舍, 2019(36): 193.
- [11] 代中华. 板式换热器在供热系统使用中的结垢处理[J]. 设备管理与维修, 2020(13): 128-129.
- [12] 邹积强, 黄艳. 板式换热器的腐蚀结垢与化学清洗[J]. 石油化工腐蚀与防护, 2017, 34(1): 34-37.
- [13] 李洁, 侯来灵, 李多民. 换热器结垢与清洗[J]. 广东化工, 2009, 36(1): 57-58+70.
- [14] 山东省青岛市人大常委会. 青岛市城市供热条例[Z]. 2007.