

# 35℃ CaCO<sub>3</sub> 溶液中不锈钢 304 和 316 表面结垢特性

盛 健, 张 华, 史雪菲, 赵 萍

(上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093)

**摘 要:** 不锈钢 304 和 316 是换热器常用材料, 研究 CaCO<sub>3</sub> 析晶污垢在这两种金属表面的生长特性是抗垢研究的第一步。在 35℃ 0.05 g/L CaCO<sub>3</sub> 溶液中, 通过静态反应法研究 CaCO<sub>3</sub> 在两种金属表面的生长特性, 采用称重法获得不同时间结垢重量, 采用扫描电子显微镜(SEM) 获得不同时间污垢的微观形貌。结果表明: 在相同条件下, 不锈钢 304 和 316 表面结垢量很接近; pH 升高不仅使结垢量增多而且促进四方文石和方解石的形成, 并且文石不断重结晶形成热力学最稳定晶型(方解石); pH 升高使表面产生更多晶核, 并且晶体分布没有规律、交叉重叠生长。

**关 键 词:** CaCO<sub>3</sub> 析晶污垢; 挂片实验; 晶体形貌; 晶体尺寸分布

中图分类号: O631 文献标识码: A

## 引 言

在能源、化工、食品加工等领域, 冷却塔内循环冷却水不断蒸发使大部分冷却水降温, 同时使冷却水中溶解的矿物盐浓度升高而形成污垢, 严重影响换热效果<sup>[1]</sup>。不仅要周期停机清洗且易产生安全事故。污垢的生长机理及如何有效抗垢成为研究焦点, 但始终未能解决。我国换热器析晶污垢主要成份是碳酸钙<sup>[2]</sup>。冷却塔标准规定设计进出塔水温 32~43℃<sup>[3-5]</sup>。热负荷和环境的变化均影响冷却塔中实际水温。本研究采用 35℃ 作为实验温度, 采用静态反应法研究 CaCO<sub>3</sub> 析晶污垢在常用换热器材料—不锈钢 304 和 316(简称 ss304 和 ss316) 表面的生长特性, 进一步研究碳酸钙析晶污垢的生长机理。

## 1 实验方法

采用电火花线切割(DK7725BD 型高速电火花线切割机床) 将 0.5 mm 厚 ss304 和 316 板切割成实验挂片, 用金相砂纸(W5(06), 1200 目) 和煤油湿磨

挂片两面, 保存于煤油中, 最终尺寸 2 cm × 2 cm × 0.4 mm。实验前取出 10 片, 先用棉签擦去煤油, 再用丙酮清洗至清洁, 使用精密电子分析天平(Discovery DV215CD, 可读性 0.01 mg) 称重并编号, 以便与结垢后挂片重量比较得到污垢重量。

用 35℃ 蒸馏水分别配制 0.106 g/L Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 和 0.111 g/L CaCl<sub>2</sub> 溶液各 1 L, 在 2 L 烧杯中混合, 置于恒温水浴中, 将 5 枚准备好的挂片悬挂于自制的挂片悬挂架, 挂片置于烧杯的一半高度, 并将水银温度计悬挂于溶液中, 另 5 枚挂片悬挂于另一恒温水浴烧杯中, 通过加入 4.0 g/L NaOH 溶液或 3.6 g/L HCl 溶液调节 pH 值, 待达到实验要求参数时开始实验。每半小时取出一枚挂片, 用蒸馏水清洗后放入 30℃ 电热恒温鼓风干燥箱中干燥, 干燥后按编号保存于挂片盒中, 称重后用扫描电子显微镜(TESCAN VEGA II) 观察微观结构。

为保持实验中浓度和 pH 恒定, 采用 EDTA(C<sub>10</sub>H<sub>14</sub>N<sub>2</sub>O<sub>8</sub>Na<sub>2</sub> · 2H<sub>2</sub>O) 络合滴定法<sup>[6-7]</sup> 每半小时测一次 Ca<sup>2+</sup> 浓度, 并分别加入需要的 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 和 CaCl<sub>2</sub> 溶液; 使用 pH 计每半小时测量一次 pH 值, 并加入 NaOH 或 HCl 溶液调节 pH。试剂均为分析纯。

在 35℃ 0.05 g/L CaCO<sub>3</sub> 溶液中研究 ss304 和 316 挂片上结垢特性, pH 值分别为 10 和 11, 为保证实验数据可靠性, 每个实验均做一次重复性实验。

## 2 实验结果

### 2.1 结垢重量

图 1 为 ss304 和 316 表面结垢重量变化。由图 1 可知 (1) 结垢量: 1 小时 pH11ss316 挂片重量减少, 原因有: 当挂片清洁处理时有油等残留、实验后残留物脱离表面; 当高 pH 值促进溶液内均相成核, 降低金属表面和溶液界面的 CaCO<sub>3</sub> 浓度, 降低界面异相成核的驱动力; 5 小时 pH10ss304 和 316 结垢

收稿日期: 2011-11-01; 修订日期: 2012-06-03

基金项目: 上海市研究生创新基金项目(JWCXSL1101); 上海市重点学科建设项目(S30503)

作者简介: 盛 健(1985-) 男, 江苏盱眙人, 上海理工大学博士研究生。

量分别为 0.61 和 0.60 mg, pH11ss304 和 316 结垢量分别为 0.63 和 0.645 mg, ss304 和 316 表面结垢量差异很小, 两种材料 pH11 时结垢量均比 pH10 时大, 因此 pH 比材质对结垢的影响更大; (2) 生长率: pH10ss316 表面 CaCO<sub>3</sub> 析晶污垢生长率  $2.89 \times 10^{-8}$  g/s, pH11ss316 表面生长率  $3.31 \times 10^{-8}$  g/s, pH10ss304 表面生长率  $3.17 \times 10^{-8}$  g/s, pH11ss304 表面生长率  $3.28 \times 10^{-8}$  g/s, 可见 pH 值升高仅使生长率略有增大, pH 值升高对 ss316 表面 CaCO<sub>3</sub> 析晶污垢的成核和生长促进作用更大。

有些挂片上结垢重量异常大或小, 是由于各挂片表面粗糙度有差异等因素造成<sup>[8]</sup>。

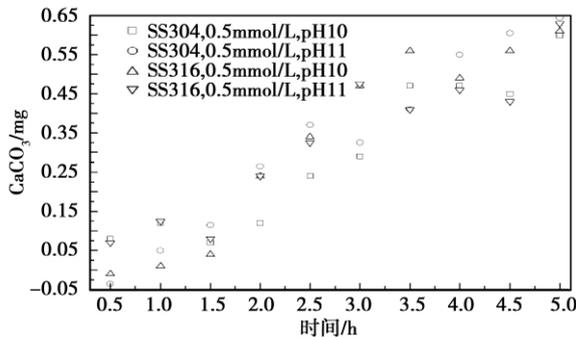


图1 ss304 和 316 表面结垢重量变化

Fig. 1 Change of fouls in weight on the surface of ss304 and 316 steel

## 2.2 微观形貌

为从微观角度研究碳酸钙在不同 pH 值下 ss304 和 316 表面结垢特性, 先后使用普通偏振光显微镜和 SEM 观察实验挂片表面结垢特性。

### 2.2.1 pH10ss304 表面 CaCO<sub>3</sub> 形貌

图 2(a) 主要是柳叶状文石, 尺寸均匀, 长 3.6 μm; 四方形文石极少, 尺寸差异大, 最大长 2.7 μm; 六边形圆盘状球霰石生长一半, 尺寸均匀, 直径 3.9 μm; 有很少的 0.1 μm 小晶核形成。图 2(b) 柳叶状文石比例下降但仍为是主要晶型, 尺寸均匀, 长大至长 5.5 μm; 四方形文石增多增大但仍很少, 尺寸差异大, 最大长 3.6 μm; 六边形圆盘状球霰石生长一半或大半, 直径 5.7 μm, 尺寸均匀; 有很少的 0.1 μm 小晶核形成。图 2(c) 柳叶状文石比例继续下降, 尺寸均匀, 长大至长 12.4 ~ 13.5 μm; 四方形文石增多增大但仍较少, 尺寸差异大, 最大长 4.5 μm; 六边形圆盘状球霰石生长一半或大半, 直径 13.3 μm, 尺寸均匀; 有很少的 0.1 μm 小晶核形成。图 2(d) 柳叶状文石比例恒定约 1/3, 主要晶型之一, 尺寸均匀,

但长度下降至 9.7 μm; 四方形文石约占 1/4, 尺寸差异大, 最大长 5.1 μm; 六边形圆盘状球霰石生长大半或完整约占 1/3, 直径约 10.0 μm, 尺寸均匀; 斜方形方解石出现但较少, 尺寸差异大, 最大长 4.8 μm; 已无小晶核形成。表面缺陷处晶体生长密集, 该结论与文献 [9] 一致, 虽然污垢形成比沸腾更复杂, 但从新相形成看, 高表面能区域更适宜新相生长, 表面缺陷处不仅是沸腾气泡易形成点也是污垢晶核易生长点。

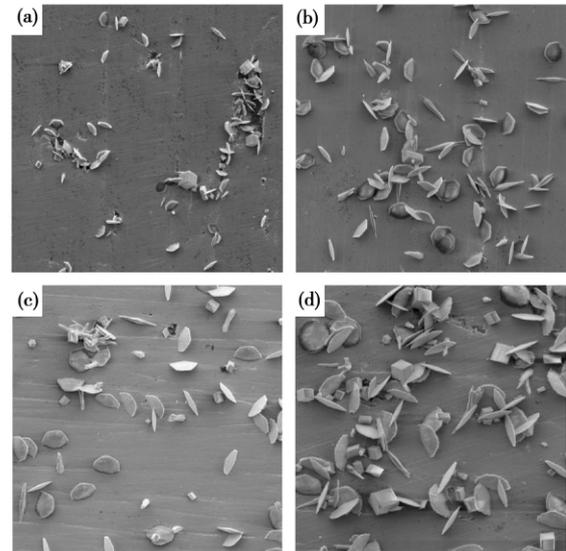


图2 pH10ss304 表面形貌:

(a) 1 h, (b) 2 h, (c) 3 h, (d) 4 h

Fig. 2 Morphology on the surface of ss304 steel at pH value of 10: (a) 1 h, (b) 2 h, (c) 3 h, (d) 4 h

### 2.2.2 pH11ss304 表面 CaCO<sub>3</sub> 形貌

图 3(a) 为柳叶状文石约占 40%, 尺寸均匀, 长 4.0 μm; 四方形文石约占 45%, 尺寸差异大, 最大长 3.0 μm; 六边形圆盘状球霰石生长一半, 尺寸均匀, 直径 3.1 μm; 有很少 0.1 μm 小晶核形成。图 3(b) 柳叶状文石比例下降较多, 尺寸均匀, 长大至长 5.4 μm; 四方形文石最多, 尺寸差异大, 最大长 3.2 μm; 针状文石较少, 尺寸差异大, 最大长 11.1 μm; 六边形圆盘状球霰石生长一半或大半, 尺寸均匀, 直径长大至 5.7 μm; 斜方形方解石出现, 尺寸差异大, 最大长 2.4 μm, 数量很少; 有很少 0.1 μm 小晶核形成。图 3(c) 柳叶状文石比例略下降, 数量略少于四方形文石, 尺寸均匀, 长大至长 6.2 μm; 四方形文石仍是数量最多的晶型, 尺寸差异大, 最大长 4.5 μm; 针状文石数量第四, 尺寸差异大, 最大长 11.2 μm; 六边形圆盘状球霰石生长一半或大半, 直径长大至 6.7

$\mu\text{m}$ , 尺寸均匀, 比柳叶状文石略少数量第三; 斜方形方解石数量略有增多但较少, 尺寸差异大, 最大长  $3.4 \mu\text{m}$ ; 有很少  $0.1 \mu\text{m}$  小晶核形成。图 3 (d) 柳叶状文石比例略下降, 少于四方形文石, 尺寸均匀, 长度仍为  $6.2 \mu\text{m}$ ; 四方形文石最多约占 50%, 尺寸差异大, 最大长  $7.1 \mu\text{m}$ ; 六边形圆盘状球霰石生长大半或接近完整, 直径约  $9.7 \mu\text{m}$ , 尺寸均匀; 斜方形方解石增多但和球霰石均数量少, 尺寸较小, 最大长  $2.9 \mu\text{m}$ ; 仍有极少  $0.1 \mu\text{m}$  小晶核形成。

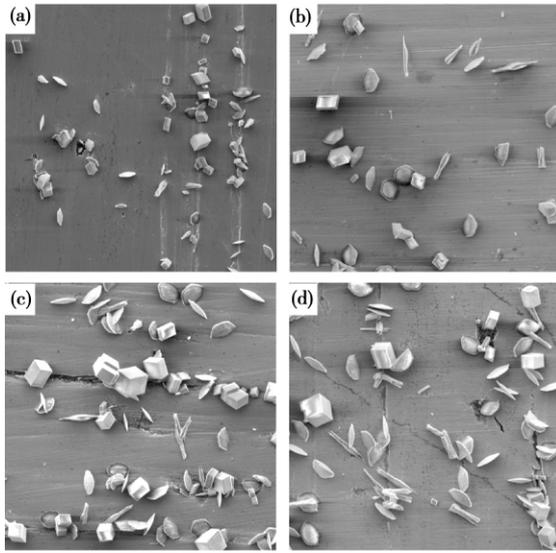


图 3 pH11ss304 表面形貌:

(a) 1 h, (b) 2 h, (c) 3 h, (d) 4 h

Fig. 3 Morphology on the surface of ss304 steel at pH value of 11: (a) 1 h, (b) 2 h, (c) 3 h, (d) 4 h

### 2.2.3 pH10ss316 表面 $\text{CaCO}_3$ 形貌

图 4 (a) 柳叶状文石约占 2/3, 尺寸均匀, 长  $5.6 \mu\text{m}$ ; 四方形文石和针状文石, 尺寸差异大, 最大长  $1.5$  和  $7.6 \mu\text{m}$ ; 六边形圆盘状球霰石生长一半或大半, 尺寸均匀, 直径  $5.0 \mu\text{m}$ , 占 1/3; 有很少  $0.1 \mu\text{m}$  小晶核形成。图 4 (b) 柳叶状文石仍占绝大部分, 尺寸均匀, 长大至长  $5.4 \mu\text{m}$ ; 四方形文石和针状文石极少, 尺寸差异大, 最大长  $1.5$  和  $4.9 \mu\text{m}$ ; 六边形圆盘状球霰石生长一半或大半, 尺寸均匀, 直径长大至  $5.3 \mu\text{m}$ , 占 1/6; 有很少  $0.1 \mu\text{m}$  小晶核形成。图 4 (c) 柳叶状文石略减少仍占绝大部分, 尺寸均匀, 长  $9.6 \mu\text{m}$ ; 四方形文石略增多仍很少, 尺寸差异大, 最大长  $2.2 \mu\text{m}$ ; 针状文石极少, 尺寸差异大, 最大长  $11.9 \mu\text{m}$ ; 六边形圆盘状球霰石生长一半或大半, 直径  $8.1 \mu\text{m}$ , 尺寸均匀, 占 1/6; 有很少小晶核形成。图 4 (d) 柳叶状文石占绝大部分, 尺寸均匀, 长  $7.8$

$\mu\text{m}$ ; 四方形文石仍较少, 尺寸差异大, 最大长  $2.3 \mu\text{m}$ ; 针状文石很少, 尺寸差异大, 最大长  $11.4 \mu\text{m}$ , 另有从同一晶核长出而向四周发散的复杂针状文石簇, 长  $9.7 \mu\text{m}$ ; 六边形圆盘状球霰石生长大半或接近完整, 直径  $8.1 \mu\text{m}$ , 尺寸均匀, 约占 1/6; 仍有极少  $0.1 \mu\text{m}$  小晶核形成。

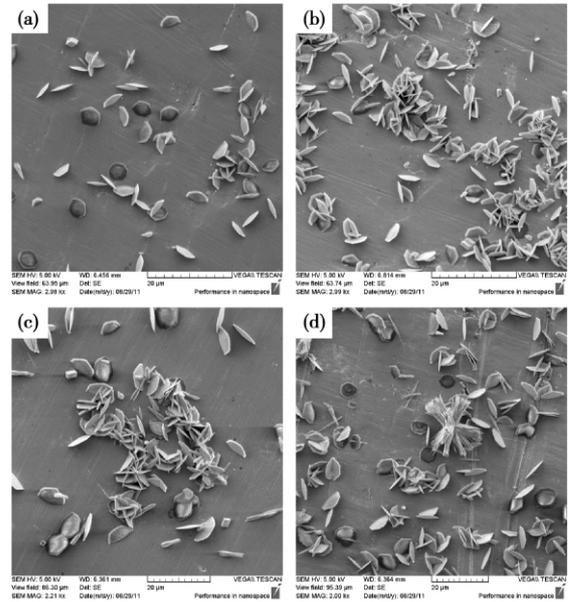


图 4 pH10ss316 表面形貌:

(a) 1 h, (b) 2 h, (c) 3 h, (d) 4 h

Fig. 4 Morphology on the surface of ss316 steel at pH value of 10: (a) 1 h, (b) 2 h, (c) 3 h, (d) 4 h

### 2.2.4 pH11ss316 表面 $\text{CaCO}_3$ 形貌

图 5 (a) 相比图 3 (a), 表面出现大量四方形文石, 占 34.1%, 尺寸较其它晶型大, 最大长  $5.5 \mu\text{m}$ ; 柳叶状文石约占 24.4%, 尺寸均匀, 长  $3.5 \mu\text{m}$ ; 有生长一半至完整的六边形圆盘状球霰石约占 34.1%, 直径  $2.8 \mu\text{m}$ ; 斜方形方解石出现约占 7.4%, 尺寸差异大, 最大长  $3.5 \mu\text{m}$ ; 有  $0.1 \mu\text{m}$  小晶核形成。图 5 (b) 四方形文石约占 26.4%, 尺寸差异大, 最大长  $5.4 \mu\text{m}$ ; 柳叶状文石数量和四方形文石相等, 尺寸较小且大小基本相等, 长  $3.7 \mu\text{m}$ ; 生长一半或完整的六边形圆盘状球霰石约占 13.9%, 最大直径  $10.5 \mu\text{m}$ ; 斜方形方解石数量增多但增幅较小而比例下降, 约占 5.6%, 尺寸差异大, 最大长  $4.4 \mu\text{m}$ ; 针状文石约占 27.8%, 尺寸差异大, 最大长  $6.6 \mu\text{m}$ , 部分在圆盘状球霰石表面形成针状簇, 长  $4.5 \mu\text{m}$ , 针状文石总是以簇的形式出现, 且容易在已生成晶体表面形成; 有很少小晶核形成。图 5 (c) 四方形文石约占 14.4%, 尺寸差异大, 最大长  $6.5 \mu\text{m}$ ; 柳叶状文石

数量比四方形文石略多约占 16.9%, 尺寸均匀, 长 3.0 μm; 生长一半至完整的六边形圆盘状球霰石约占 6.8%, 完整的球霰石直径很大, 最大直径 10.2 μm; 斜方形方解石增多但比例仍下降, 约占 2.5%, 最大长 3.1 μm; 针状文石最多约占 59.3%, 尤其是针状文石形成针状文石簇, 体积很大, 相比 2 h 针状文石簇分布更密、长度更长(7.1 μm); 有极少小晶核形成。图 5(d) 柳叶状文石占绝大部分, 尺寸均匀, 长 4.4 μm; 四方形文石比例较低, 尺寸差异大, 最大长 6.3 μm; 针状文石簇极少但尺寸很大, 长 18.2 μm; 六边形圆盘状球霰石生长大半或完整, 直径 3.7 μm, 尺寸均匀, 约占 1/6; 新晶核极少。

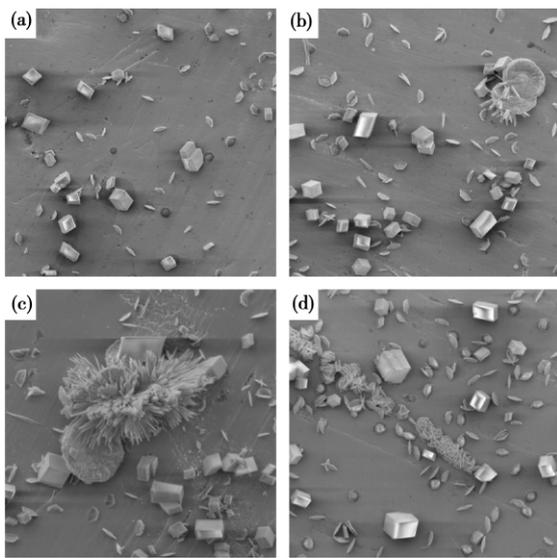


图 5 pH11ss316 表面形貌:

(a) 1 h, (b) 2 h, (c) 3 h, (d) 4 h

Fig. 5 Morphology on the surface of ss316 steel at pH value of 11: (a) 1 h, (b) 2 h, (c) 3 h, (d) 4 h

### 3 结论

在 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> - CaCl<sub>2</sub> 溶液中采用静态反应法研究 CaCO<sub>3</sub> 析晶污垢在 ss304 和 316 表面生长特性, 并采用称重法和显微图像法进一步分析。

(1) 结垢量: 5 h, pH11ss316 表面结垢量最多, 单位面积结垢量 0.81 g/m<sup>2</sup>; 其次 pH11ss304 单位面积结垢量 0.79 g/m<sup>2</sup>; 其次 pH10ss304 单位面积结垢量 0.76 g/m<sup>2</sup>; 最少 pH10ss316 单位面积结垢量 0.75 g/m<sup>2</sup>。因此, 材质上, ss316 和 304 结垢差别很小; 水质上, pH 值越高越促进结垢。

(2) 表面污垢覆盖率: 与结垢量规律相同, 表面

污垢覆盖率也是 pH11ss316 (78.3%) > pH11ss304 (78.2%) > pH10ss304 (70.3%) > pH10ss316 (70.2%)。

(3) 晶型: pH10ss304 表面柳叶状文石是主要成份、四方形文石不断增多至和柳叶状文石数量相当, 球霰石数量略有下降, 方解石在 4 h 开始出现、数量较少; pH11ss304 表面起始阶段柳叶状文石和四方形文石是主要成份, 之后柳叶状文石不断减少, 四方形文石先增多成为最多晶型至 4 h 后因转变成方解石而比例下降, 针状文石一直增多, 并形成大的针状簇; 球霰石比例一直较低, 方解石在 2 h 开始出现、数量不断增多成为最多晶型; pH10ss316 表面柳叶状文石是主要成份, 但比例不断下降; 四方形文石和针状文石开始极少, 不断增多; 圆盘状球霰石比例较恒定; pH11ss316 表面柳叶状文石是主要成份之一, 但比例不断下降; 四方形文石和针状文石一直是主要成份之一; 圆盘状球霰石比例持续下降。

(4) 尺寸分布: pH10ss304: 柳叶状文石从 3.6 μm 长至 13.5 μm 又降至 10.5 μm; 四方形文石从 2.7 μm 长至 8.1 μm; 六方形圆盘状球霰石从一半长至完整, 直径从 3.9 μm 长至 13.3 μm 又降至 9.1 μm; 方解石出现很晚, 从 4.8 μm 长至 5.2 μm; 虽然静态实验无流体剪力的影响, 但晶体也有临界尺寸, 约 10 μm, 之后不再长大而互相连接。pH11ss304: 柳叶状文石从 4.0 μm 长至 6.2 μm 之后缓慢长至 6.3 μm; 四方形文石从 3.0 μm 长至 9.7 μm 又降至 4.4 μm; 六方形圆盘状球霰石从一半长至完整, 直径从 3.1 μm 长至 6.1 μm; 方解石出现很快, 从 2.4 μm 长至 4.5 μm; pH 值增大促进四方形文石、针状文石和方解石的形成, 临界尺寸约 6.0 ~ 7.0 μm, pH11 下晶体尺寸和临界尺寸都较 pH10 下小许多, 原因是 pH 值升高促进晶体生长和新晶核的形成, 因而使晶体尺寸降低但数量多并互相连接形成大晶体簇最终形成污垢层<sup>[8]</sup>。pH10ss316: 柳叶状文石从 5.6 μm 长至 14.5 μm; 四方形文石从 1.5 μm 长至 5.9 μm; 针状文石从 7.6 μm 长至 25.2 μm; 六方形圆盘状球霰石从一半长至完整, 直径从 5.0 μm 长至 15.8 μm; 超大针状文石晶体簇长 47.1 μm 直径 8.2 μm。pH11ss316: 柳叶状文石从 3.5 μm 长至 7.8 μm; 四方形文石从 5.5 μm 长至 6.6 μm; 针状文石从 6.6 μm 长至 18.3 μm; 六方形圆盘状球霰石从一半长至完整, 直径从 2.8 μm 长至 8.1 μm; 超大针状文石晶体簇与 pH10ss316 表面的超大晶体簇不同, 该超大针状文石晶体簇是在表面水平展开。文

献 [9] 中观察到的无定形碳酸钙在本实验中未观察到。

(5) 新晶核形成<sup>[10-11]</sup>: pH10<sub>ss304</sub>: 4h 之后无新晶核形成, 且已形成的晶体抑制了附近表面新晶核的形成; pH11<sub>ss304</sub>: 5 h 实验一直有新晶核形成但数量很少, pH 升高促进 CaCO<sub>3</sub> 晶体成核, 但已形成晶体抑制了附近表面新晶核的形成; pH10<sub>ss316</sub>: 5 h 实验一直有新晶核形成, <sub>ss316</sub> 表面促进 CaCO<sub>3</sub> 晶体的成核和生长, 但已形成的晶体抑制了附近表面新晶核形成; pH11<sub>ss316</sub>: 5 h 实验一直有新晶核形成但数量较 pH10 下少, 一方面 pH11 下晶体快速生长抑制了附近表面新晶核的形成, 另一方面 pH 值升高促进溶液内部的均相成核, 形成 CaCO<sub>3</sub> 颗粒悬浮溶液降低了表面与溶液界面的实际 CaCO<sub>3</sub> 浓度。

(6) 晶体分布很杂乱、没有规律, 各种晶型互相交错生长, 尤其是生长时间长后, 晶体互相连接并叠加生长, 形成大晶体簇和复杂形状, 并完全覆盖表面, 产生污垢层。

参考文献:

[1] 张明智, 魏博, 孙刚, 等. 单相逆流换热器温度分布及传递特性的研究 [J]. 动力工程学报, 2009, 29(11): 1023-1026.  
ZHANG Ming-zhi, WEI Bo, SUN Gang, et al. Study of the temperature distribution and transfer characteristics of a single-phase flow heat exchanger [J]. Journal of Power Engineering, 2009, 29(11): 1023-1026.

[2] Yida Liu, Yong Zou, Liang Zhao, et al. Investigation of adhesion of CaCO<sub>3</sub> crystalline fouling on stainless steel surfaces with different roughness [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2011, 38: 730-733.

[3] GB/T7190.1-2008, 玻璃纤维增强塑料冷却塔第 1 部分: 中小型玻璃纤维增强塑料冷却塔 [S].  
GB/T 7190.1-2008. Glass fiber reinforced plastic cooling tower Part 1: Middle and small-sized glass fiber reinforced plastic cooling towers [S].

[4] GB/T7190.2-2008, 玻璃纤维增强塑料冷却塔第 2 部分: 大型玻璃纤维增强塑料冷却塔 [S].  
GB/T 7190.2-2008. Glass fiber reinforced plastic cooling tower Part 2: Large-sized glass fiber reinforced plastic cooling towers [S].

[5] GB/T50392-2006, 机械通风冷却塔工艺设计规范 [S].  
GB/T50392-2006. Code for design of mechanical ventilation cooling towers [S].

[6] GB15452-2009, 工业循环冷却水中钙、镁离子的测定 EDTA 滴定法 [S].

GB15452-2009. EDTA titration method for determination of calcium and magnesium ions in industrial circulating cooling water [S].

[7] GB19281-2003, 碳酸钙分析方法 [S].  
GB/T 19281-2003. Method for analyzing calcium carbonate [S].

[8] Herz A, Malayeri M R, Müller-Steinhagen H. Fouling of roughened stainless steel surfaces during convective heat transfer to aqueous solutions [J]. Energy Conversion and Management, 2008, 49: 3381-3386.

[9] Wang J, Shen Z W, Shen Z Q. Process dynamics and fractal analysis of new phase formation in thermal processes [J]. Journal of Thermal Science, 2001, 10(2): 153-158.

[10] Tao Chen, Anne Neville, Mingdong Yuan. Calcium carbonate scale formation—assessing the initial stages of precipitation and deposition [J]. Journal of Petroleum and Engineering, 2005, 46: 185-194.

[11] Silvia Rosa, Hans E, Lundager Madsen. Kinetics of mass crystallization of calcium carbonate at 25, 30 and 37°C [J]. Journal of Crystal Growth, 2011, 318: 99-102.

( 辉 编辑)

• 书 讯 •

《2010 中国能源发展报告》

内容简介: 中国正处于城市化和工业化阶段, 经济快速发展加剧了我国对各种能源的依赖。当能源的长期稳定供给和环境保护成为全球性敏感问题时, 如何清楚地认识中国能源现状以及发展趋势, 对能源发展战略的选择、能源政策措施的制定都是至关重要的问题。以此为初衷, 《2010 中国能源发展报告》首先针对公众熟悉的传统能源, 例如煤、石油、电力、天然气等在我国现状以及目前相关前沿讨论作出详细介绍和分析。其次《2010 中国能源发展报告》对当今能源新兴领域也做了尽可能多的介绍和分析。例如对低碳经济、碳税、能源合同需求侧管理等能源领域最前沿问题作出详细分析和阐述, 力求及时、深刻、全面地反映中国能源发展问题。

清华大学出版社出版

出版日期: 2010 年 9 月 1 日

Gang ( National Key Laboratory on Coal Combustion ,Central China University of Science and Technology ,Wuhan , China ,Post Code: 430074) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2012 27( 4) . - 472 ~ 477

To solve such problems of a large-capacity boiler as a frequent change in coal quality , a small design allowance for the wet-method desulfurization system , a large work load and a high cost of an extension project etc. , an on-the-spot test was conducted of a 220 t/h boiler installed with an in-furnace calcium spraying system and the influence of the spraying location and Ca/S on the desulfurization efficiency was obtained. Furthermore , in combination with the numerical simulation results of the combustion of a 660 MW unit , the authors concluded that the optimum height for desulfurization by spraying calcium is around 40.51 m. By measuring and calculating the ash composition , ash melting point and particle diameter distribution etc. , the authors arrived at a conclusion that an additional installation of the in-furnace calcium spraying auxiliary desulfurization system to the 660 MW unit did not worsen the corrosion , ash deposition , slagging and wear of the heating surfaces of the boiler and the overall efficiency of the boiler decreased by 0.757% at the most outside , indicating that it has a relatively good safe and cost effectiveness. The research results are of realistic significance for power plants to widen the adaptability of their boilers for various coal ranks , enhance the reliability of their desulfurization systems and meet increasingly strict emissions standard etc.

**Key words:** calcium spraying desulfurization auxiliary system , efficiency , corrosion , ash accumulation and slagging , wear

35℃ CaCO<sub>3</sub>溶液中不锈钢 304 和 316 表面结垢特性 = **Surface Fouling Characteristics of Stainless Steel 304 and 316 in CaCO<sub>3</sub> Solution at 35 °C** [刊 汉] SHENG Jian , ZHANG Hua , SHI Xue-fei , ZHAO Ping ( College of Energy Source and Power Engineering , Shanghai University of Science and Technology , Shanghai , China , Post Code: 200093) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2012 27( 4) . - 478 ~ 482

Stainless steel 304 and 316 are commonly-used materials for heat exchangers. To study the growth characteristics of CaCO<sub>3</sub> crystallization fouls on the surface of both metals is the first step for studying the means to resist the fouling. In 0.05 g/l CaCO<sub>3</sub> solution at 35 °C , by employing the static-state reaction method , the authors studied the growth characteristics of CaCO<sub>3</sub> on the surface of both metals. The weights of fouls were obtained at different times by adopting the weighing method and the microscopic morphology of the fouls at different times was acquired by using a scanning electronic microscope ( SEM) . The research results show that under a same condition , the weights of fouls on the surface of stainless steel 316 and 304 are very close. To enhance the pH value can not only increase the weight of fouls but also promote the formation of square aragonite and calcite , and aragonite can increasingly recrystallize into the most stable crystal( calcite) in thermodynamics. To increase the pH value can make the metallic sur-

face produce more crystal nuclei and the crystal distribution is irregular ,resulting in a cross and superimposed growth. **Key words:** CaCO<sub>3</sub> crystallization fowl coupon test ,crystal morphology ,crystal size distribution

基于流固耦合的化容补水泵性能分析 = **Analysis of the Performance of a Chemical Vessel Make-up Water Pump Based on a Fluid-solid Coupling** [刊 ,汉] ZHU Li-kai ,HU Jing-ning ,ZHANG Jun-hui ,LI Hao ( Engineering Technology Research Center for Fluid Machinery ,Jiangsu University ,Zhenjiang ,China ,Post Code: 212013) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2012 27( 4) . - 483 ~ 488

Three groups of models were designed for chemical vessel supplementary water pumps and three-dimensional models were established by using the software Pro/E. CFD software was used to conduct a simulation and a test was performed of the hydraulic models to acquire an optimum model by comparing the test results with the simulation ones. The link of the CFD with the Static Structural and Modal was established by using the Ansys Workbench to conduct an analysis of the optimum model. On the basis of the three-dimensional steady numerical calculation results of the pump and by making use of the sequence coupling technology ,an iterative calculation was performed of the solid and fluid domain to analyze the static stress and vibration mode of the impeller. It has been found that under the action of the hydraulic pressure ,the maximal displacement due to the blade deformation occurs at a place nearing the trailing edge of the blade. Due to an action of the balance holes ,the equivalent stress of the blade is relatively uniform and small. Under the action of the pressure difference before and after the wheel ,the hub has a relatively big equivalent stress. Under the design operating condition ,the deformation of the hub has a conspicuous influence on the vibration mode. **Key words:** chemical vessel supplementary ( CVS) water pump ,static stress ,mode ,fluid-solid coupling

烟煤掺烧污泥 HCl 的排放和脱除实验研究 = **Experimental Study of HCl emissions and Removal During Combustion of Coal Mixed and Diluted with Sewage Sludge** [刊 ,汉] CUI Hao ,ZHANG Cheng ,XIA Ji ,CHEN Gang( National Key Laboratory on Coal Combustion ,Central China University of Science and Technology ,Wuhan ,China ,Post Code: 430074) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2012 27( 4) . - 489 ~ 493

Power generation by burning coal mixed and diluted with sewage sludge is a sludge treatment method with a relatively good prospect. However ,a great amount of HCl gas produced during the combustion may result in such harms to the heating surfaces as corrosion and erosion. By making use of a horizontal tube type reactor ,the authors studied the influence of such factors as temperature rise speed ,combustion temperature ,proportion of sludge mixed and diluted