

# Analysis of Scaling Characteristics of Wellhead Geothermal Power Plant Based on Geothermal Resources at Olkaria in Kenya

Zhengmin Cai<sup>1</sup>, Yuxu Wang<sup>2</sup>, Shen Zheng<sup>1\*</sup>, Shuang Zeng<sup>1</sup>, Fasheng Sun<sup>1</sup>, Wei Cheng<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Branch of Engineering Service, CNPC Great Wall Drilling Company, Beijing

<sup>2</sup>Department of Production Coordination, CNPC Great Wall Drilling Company, Beijing

Email: \*[shen\\_zheng\\_gw@163.com](mailto:shen_zheng_gw@163.com)

Received: Feb. 1<sup>st</sup>, 2015; accepted: Feb. 15<sup>th</sup>, 2015; published: Feb. 26<sup>th</sup>, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

---

## Abstract

This paper analyzed the scaling problems in geothermal power plants and summarized the main components of scaling. Based on the steam parameters at Olkaria in Kenya, the scaling problems in geothermal power plants have been elaborated in detail. This paper provided a theoretical basis for the design of geothermal power plants at Olkaria area in Kenya.

## Keywords

Geothermal Power Plant, Geothermal Steam, Steam Parameter, Scaling

---

# 肯尼亚Olkaria地热资源的井口地热电站热力系统的结垢分析

蔡正敏<sup>1</sup>, 王玉旭<sup>2</sup>, 郑申<sup>1\*</sup>, 曾双<sup>1</sup>, 孙法胜<sup>1</sup>, 成伟<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国石油集团长城钻探工程有限公司工程服务公司, 北京

<sup>2</sup>中国石油集团长城钻探工程有限公司生产协调处, 北京

Email: \*[shen\\_zheng\\_gw@163.com](mailto:shen_zheng_gw@163.com)

收稿日期: 2015年2月1日; 录用日期: 2015年2月15日; 发布日期: 2015年2月26日

\*通讯作者。

## 摘要

本文对地热电站的热力系统的结垢问题进行了分析，总结了地热电站结垢的重点部位。文章对以肯尼亚 Olkaria 地区地热蒸汽参数为设计参数的地热电站中热力系统中的结垢问题进行了详细的论述，为该地区的地热电站的设计提供了理论依据。

## 关键词

地热电站，地热蒸汽，蒸汽参数，结垢

## 1. 引言

地热电站的设计包括：热力系统、循环冷却水系统、井口汽水分离系统、冷热回灌系统；管线防腐与保温设计；升压及厂用电系统等。其中地热电站的热力系统设计是整个设计中一个重要环节，地热电站热力系统主要由地热蒸汽集输及放空系统、主蒸汽系统、循环冷却水系统、疏水系统、回灌水系统、轴封系统、抽真空系统、调节保安润滑油系统八大部分组成[1]。

由于地热电站中的工作介质地热蒸汽和地热卤水中通常溶解有多种成分，其中含量较高的有  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{F}^-$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 。由于压力和温度的变化，其中的二氧化硅和溶解碳酸钙有可能在地热电站热力系统中的汽水分离器、放空和疏水管线、汽轮机前段、凝汽器及抽气管线、热回灌系统中产生结垢问题，会直接影响地热电站的正常运行[2]。

## 2. 地热电站的热力系统

在地热电站设计中，地热井的井口压力高于汽轮机的额定工作压力，而且产生的蒸汽含有大量的卤水产生的蒸汽经过汽水分离器后，进入主蒸汽管道，因此在井口设置手动节流阀和自动调压阀，将地热流体压力调压然后进入汽水分离器，分离卤水和蒸汽。分离出的卤水通过回灌泵回灌至同一口热回灌井，分离出的蒸汽通过管线输送至汽机棚并汇合。

地热蒸汽管道的沿线设置经常疏水装置，以防止水击的发生。同时在调压阀后的管线上设置爆破片，防止管线超压。爆破片排汽口和汽水分离器蒸汽出口紧急放空旁路均接至放空系统，放空系统由放空管线和消声器组成。

## 3. 热力系统结垢情况分析

本文以肯尼亚奥卡瑞地热田完钻的某蒸汽井地热蒸汽设计的地热电站中的管线材料进行优选研究[3]。对于该地热井的地下热储温度维持在  $308^\circ\text{C}$  左右，井口蒸汽温度为  $160^\circ\text{C}$  左右，压力在  $6\text{ bar}$ ，干度在  $70\%$  左右。

1) 从井口到汽轮机前段工况条件为：设计压力  $P = 1.6\text{ MPa}$ ，工作温度  $t = 163.8^\circ\text{C}$ ，介质为地热蒸汽、不凝性气体、卤水的混合物。按可能存在的最苛刻工况条件考虑，介质组分如表 1 和表 2 所示。

2) 地热汽轮机后段工况条件为：设计压力  $P = 1.6\text{ MPa}$ ，设计温度  $t = 45.8^\circ\text{C}$ ，介质主要为地热汽轮机乏汽和真空泵抽气，主要包括不凝性气体、液相介质，介质组分如表 3 和表 4 所示。

### 3.1. 电站中二氧化硅结垢分析

$\text{SiO}_2$  在水中的饱和溶解度随温度降低而降低，故系统中的冷却表面会成为  $\text{SiO}_2$  结垢的部位；另外系

**Table 1. Constituents of NCGs in geothermal steam**  
**表 1. 地热蒸汽中不凝性气体成分表**

组分	质量分数(ppm)	体积分数 X (%)
CO <sub>2</sub>	4950.00	0.21
H <sub>2</sub> S	47.22	0.0025
CH <sub>4</sub>	0.36	0.00004
H <sub>2</sub>	26.93	0.025
N <sub>2</sub>	1469.69	0.096
O <sub>2</sub>	0.00	0.00
其余	-	-

**Table 2. Constituents of geothermal brine**  
**表 2. 地热卤水成分**

组分	水中溶解量(ppm)	组分	水中溶解量(ppm)
SiO <sub>2</sub>	350	Li	2.9
B	3.5	Na	702.6
Cl	548.0	K	168.9
F	102.3	Ca	6.0
SO <sub>4</sub>	471.7	Mg	0.8
CO <sub>2</sub>	138.2	Fe	0.2
H <sub>2</sub> S	0.7	-	-

**Table 3. Constituents of NCGs in geothermal steam**  
**表 3. 地热蒸汽中不凝性气体成分**

组分	质量分数(%)	体积分数 X (%)
CO <sub>2</sub>	67.74	53.03
H <sub>2</sub> S	0.49	0.5
CH <sub>4</sub>	5.11	11.0
H <sub>2</sub>	0.0041	0.07
N <sub>2</sub>	14.63	18.0
空气	7.74	9.2

**Table 4. Constituents of geothermal brine**  
**表 4. 地热卤水成分**

组分	水中溶解量(ppm)	组分	水中溶解量(ppm)
SiO <sub>2</sub>	367	Li	2.648
B	3.549	Na	639.3
Cl	520.252	K	59.4
F	96.24	Ca	6.177
SO <sub>4</sub>	451.4	Mg	0.796
H <sub>2</sub> S	0.068	Fe	0.177

统中卤水发生闪蒸的位置，会使  $\text{SiO}_2$  浓度增大而达到饱和造成结垢。

#### a) 汽水分离器内 $\text{SiO}_2$ 结垢情况

井口汽水分离器前调压阀的存在，会造成地热流体的闪蒸和降温，蒸发浓缩效应使  $\text{SiO}_2$  浓度升高，温度降低使  $\text{SiO}_2$  的饱和溶解度减小，可能造成  $\text{SiO}_2$  析出结垢，使距离调压阀出口很近的汽水分离器成为可能积聚  $\text{SiO}_2$  的部位。如果能够保证在汽水分离器工作压力下，分离出的卤水中  $\text{SiO}_2$  的浓度仍低于相应温度下的饱和浓度，则可排除汽水分离器内产生  $\text{SiO}_2$  结垢的可能，判断依据见表 5。

由表 5 中数据可见，工作压力压力处于汽水分离器正常工作压力范围下，地热卤水中  $\text{SiO}_2$  浓度低于相应温度下的  $\text{SiO}_2$  饱和溶解度，因此汽水分离器内不会产生  $\text{SiO}_2$  结垢。

#### b) 放空及疏水管线 $\text{SiO}_2$ 结垢情况

放空管线和疏水管线内的卤水在排至大气压环境下时，由于压力降低而发生闪蒸，同时温度降低导致  $\text{SiO}_2$  溶解度降低，可能产生  $\text{SiO}_2$  结垢[4]，判断依据见表 6。

由表 6 可见，放空和疏水管线中的卤水发生闪蒸后其含有的  $\text{SiO}_2$  浓度高于相应温度下的饱和溶解度，会产生  $\text{SiO}_2$  结垢。但由于放空点位于汽水分离器后，放空蒸汽的干度可达 99.9%，携带的卤水极少；主蒸汽疏水管线的疏水量也只有约 7 kg/h，故该管线的结垢速率缓慢，预期使用寿命不会低于汽轮机的大修周期 5 年。

#### c) 汽轮机内 $\text{SiO}_2$ 结垢情况

汽轮机进汽喷嘴处蒸汽增速降压，液滴蒸发浓缩导致  $\text{SiO}_2$  浓度增大，超过其饱和溶解度时，便会形成硅垢，因此在汽轮机中，硅垢通常产生在进汽喷嘴及前级叶片处；蒸汽通过喷嘴进入汽轮机以后，由于膨胀做功，干度不断减小， $\text{SiO}_2$  浓度相应减小，因此末级叶片产生硅垢的概率与喷嘴和前级叶片相比要小得多。硅垢产生的根本原因是汽水分离器分离出的蒸汽携带液滴，因此提高汽水分离器的分离效率，可以大大减缓汽轮机的结垢。

根据羊八井地热电站的运行经验，在进入汽轮机的主蒸汽干度为 99.5% 的情况下，经过四年的运行，汽轮机的前三级静叶片产生了结垢，垢层最厚处约 5~6 mm，但机组仍能正常运行并达到额定出力。此次设计采纳了冰岛地热工程咨询公司的建议，汽水分离器出口蒸汽干度设计为 99.9%，预期在汽轮机 5 年大修周期内，叶片结垢不会影响机组的正常运行。

#### d) 凝汽器及抽气管线 $\text{SiO}_2$ 结垢情况

为了避免凝汽器结垢，该地热电站采用了混合式凝汽器，但由于冷却水不可能充满混合式凝汽器内部的各个角落，不能保证所有位置都受到冷却水的冲刷，特别是凝汽器进汽接口和抽气接口附近，仍可

Table 5. Criteria for silicon scaling in water/steam separator

表 5. 汽水分离器  $\text{SiO}_2$  结垢情况判据

压力 MPa	温度 $^{\circ}\text{C}$	$\text{SiO}_2$ 化验浓度 ppm	$\text{SiO}_2$ 饱和溶解度 ppm
0.65	162	410	692

Table 6. Criteria for the scaling features in evacuation and drainage pipelines

表 6. 放空管线和疏水管线  $\text{SiO}_2$  结垢情况判据

状态	名称	单位	值
闪蒸前	卤水中 $\text{SiO}_2$ 化验浓度	ppm	410
	卤水中 $\text{SiO}_2$ 浓度	ppm	471.3
闪蒸后	相应温度下 $\text{SiO}_2$ 饱和溶解度	ppm	327.2

能成为  $\text{SiO}_2$  结垢的位置。如果在冷却水最低温度  $27^\circ\text{C}$  下，汽轮机排汽携带卤水中  $\text{SiO}_2$  浓度仍未达到饱和和溶解度，则可以排除凝汽器及抽气管线产生  $\text{SiO}_2$  结垢的可能，判断依据见表 7。

由表 7 的计算结果可见，汽轮机排汽携带卤水中  $\text{SiO}_2$  的浓度远小于凝汽器内最低温度处  $\text{SiO}_2$  的饱和溶解度，因此凝汽器及抽气管道不会出现  $\text{SiO}_2$  结垢情况。

#### e) 热回灌系统 $\text{SiO}_2$ 结垢情况

热回灌水为汽水分离器分离出的卤水，卤水出汽水分离器时温度为  $162^\circ\text{C}$ ，所含  $\text{SiO}_2$  浓度为 410 ppm，低于  $162^\circ\text{C}$  对应的  $\text{SiO}_2$  饱和浓度 692 ppm。如果后续工艺过程使卤水温度降至  $110^\circ\text{C}$  以下，才会出现  $\text{SiO}_2$  沉淀，故此次设计没有对卤水进行二次闪蒸利用，而是直接回灌。另外此次设计采用了冷、热回灌水单独输送、单独回灌的方案，这样可以有效避免回灌井和回灌管线产生  $\text{SiO}_2$  结垢。

### 3.2. 碳酸钙结垢情况分析

影响  $\text{CaCO}_3$  溶解度的因素主要有两个，一是溶液的温度， $\text{CaCO}_3$  的溶解度随温度降低而升高，为逆向溶解度；二是溶液气相中的  $\text{CO}_2$  分压， $\text{CO}_2$  分压越高，其溶解度越大。整个地热电站工质沿流向呈温度降低趋势，温度降低会使  $\text{CaCO}_3$  的溶解度增大，因此不会因为温度变化而导致钙垢。但系统中压力降低发生卤水闪蒸的位置，仍然可能由于浓缩效应和  $\text{CO}_2$  析出而产生钙垢，如汽水分离器、放空和疏水管线、汽轮机前段。

#### a) 汽水分离器内 $\text{CaCO}_3$ 结垢情况

地热流体经调压阀后进入汽水分离器，一方面由于闪蒸浓缩效应，另一方面由于压力降低使气相中  $\text{CO}_2$  分压降低， $\text{CaCO}_3$  的饱和溶解度降低，可能导致  $\text{CaCO}_3$  沉淀沉积于汽水分离器中，判断依据见表 8。

由表 8 可见，在汽水分离器正常工作压力下，卤水中的  $\text{CaCO}_3$  浓度低于相应温度和  $\text{CO}_2$  分压下的  $\text{CaCO}_3$  饱和溶解度，不会产生  $\text{CaCO}_3$  结垢。

#### b) 放空管线及疏水管线 $\text{CaCO}_3$ 结垢情况

放空管线和疏水管线的  $\text{CaCO}_3$  结垢情况判断除考虑闪蒸造成的浓缩作用外，还要考虑  $\text{CO}_2$  分压降低对  $\text{CaCO}_3$  溶解度的影响[5]，判断依据见表 9。

由表 9 的计算结果可见，放空管线和疏水管线中的溶解  $\text{CaCO}_3$  浓度均低于相应温度和压力下  $\text{CaCO}_3$  的饱和溶解度，不会产生  $\text{CaCO}_3$  结垢。

#### c) 汽轮机内 $\text{CaCO}_3$ 结垢情况

汽轮机内可能产生  $\text{CaCO}_3$  结垢的原因与  $\text{SiO}_2$  相同，但  $\text{CaCO}_3$  垢的质地不像  $\text{SiO}_2$  垢那样紧密坚硬，即使产生沉淀，在高速气流的冲刷下绝大部分会被冲出机组，不是汽轮机产生结垢的主要原因。

**Table 7. Criteria for the silicon scaling features in condenser and NCG extractor pipelines**  
**表 7. 凝汽器及抽气管线  $\text{SiO}_2$  结垢情况判据**

状态	名称	单位	值
汽轮机排汽	排汽携带卤水中 $\text{SiO}_2$ 的浓度	ppm	36.3
	$27^\circ\text{C}$ 时 $\text{SiO}_2$ 的饱和溶解度	ppm	121.5

**Table 8. Criteria for the calcium scaling features in separator**  
**表 8. 汽水分离器  $\text{CaCO}_3$  结垢情况判据**

压力 MPa	温度 $^\circ\text{C}$	$\text{CaCO}_3$ 化验浓度 ppm	$\text{CO}_2$ 分压 kPa	$\text{CaCO}_3$ 饱和浓度 ppm
0.65	162	6.2	1.38	20.1

**Table 9. Criteria for the calcium scaling features in evacuation and drainage pipelines**  
**表 9. 放空管线和疏水管线 CaCO<sub>3</sub> 结垢情况判据**

状态	名称	单位	值
闪蒸前	卤水中 CaCO <sub>3</sub> 化验浓度	ppm	6.2
	气相 CO <sub>2</sub> 分压	kPa	0.03
闪蒸后	卤水中 CaCO <sub>3</sub> 浓度	ppm	7.13
	CaCO <sub>3</sub> 饱和浓度	ppm	20.56

#### 4. 结论

本文首先对地热电站的热力系统的运行进行分析,然后以以肯尼亚 Olkaria 地区地热蒸汽参数为设计参数的地热电站中热力系统中的结垢问题进行了详细的论述,分析了地热电站结垢的重点部位和结垢的特性,由于肯尼亚 Olkaria 地区地热卤水中 Ca<sup>2+</sup>的含量只有 SiO<sub>2</sub>含量的 1.5%,可以预见 CaCO<sub>3</sub>在汽轮机垢层中只占极小的比例,汽轮机结垢的预防和结垢后处理措施的主要考虑对象应是 SiO<sub>2</sub>,为该地热电站的设计中防止结垢提供了理论依据。

#### 基金项目

该项目为中国石油集团“可再生能源技术开发与应用研究”科研项目,课题名称:“肯尼亚地热开发技术研究与现场试验”,项目号:2012A-4906。

#### 参考文献 (References)

- [1] GB50791-2013 地热电站设计规范.
- [2] 吴剑 (1978) 地热电站的腐蚀及选材. *机械工程材料*, **6**, 11-18.
- [3] 王宏伟 (2002) 地热供热系统的结垢问题初探. *辽宁化工*, **10**, 419-420.
- [4] 刘昌云 (2012) 地热水管道结垢规律研究. *腐蚀科学与防护技术*, **24**, 517-520.
- [5] 何静 (2012) 地热井水结垢趋势的实验室研究. *全面腐蚀控制*, **12**, 37-39.