

文章编号: 2095-4980(2020)02-0264-06

双端口旋转对微波加热均匀性和互耦的影响

李伊帆¹, 王凤霞², 解田², 朱铎丞^{*1}, 杨阳¹, 黄卡玛¹

(1.四川大学 电子信息学院, 四川 成都 610065; 2.瓮福(集团)有限责任公司 中低品位磷矿及其共伴生资源
高效利用国家重点实验室, 贵州 贵阳 550501)

摘要: 微波加热相对于传统热传导加热具有内外加热的效果, 但其在工业应用中存在加热效率低下、加热不均匀等问题。据此, 提出一种基于双端口非同步旋转结构的加热方法, 降低端口间的互耦; 并基于 COMSOL Multiphysics 建立了双端口旋转下的微波加热模型, 分析了双微波源端口之间的旋转速度对端口间的互耦和加热均匀性的影响, 实现了端口间低互耦、高均匀性的加热, 同时极大提高了微波加热的效率。

关键词: 双端口; 旋转速度; 互耦; 均匀性; 效率

中图分类号: TN99

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2019443

Influence of dual port rotation on microwave heating uniformity and mutual coupling

LI Yifan¹, WANG Fengxia², XIE Tian², ZHU Huacheng^{*1}, YANG Yang¹, HUANG Kama¹

(1.College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu Sichuan 610065, China;
2.State Key Laboratory for Efficient Utilization of Middle and Low Grade Phosphate Rock and Its Associated Resources,
Wengfu(Group) Limited Liability Company, Guiyang Guizhou 550501, China)

Abstract: Compared to conventional heat conduction heating, microwave heating has the effect of internal and external heating and has been widely used in various fields such as industry and agriculture. Nevertheless, the problems of low heating efficiency and low heating uniformity in industrial applications are still widespread. A heating method based on dual-port non-synchronous rotating structure is proposed to reduce the mutual coupling between ports, and a microwave heating model of dual-port rotating structure is established based on COMSOL multiphysics. This paper analyzes the effect of the rotation speed between the two microwave source ports on the mutual coupling and heating uniformity between the ports, realizes the low mutual coupling and high uniformity heating between the ports, and greatly improves the efficiency of microwave heating.

Keywords: dual port; rotation speed; mutual coupling; uniformity; efficiency

微波具有良好的穿透物质内部性能, 因此常使用微波加热代替传统的热传导加热, 达到物质内外同时加热的效果。微波加热已广泛用于冶金行业、污水处理、石油化工行业、食品化工行业^[1-2]等领域, 但普遍存在加热均匀性差^[3]、能量利用率较低的问题。此外, 工业加热应用功率的使用范围较大, 为降低微波功率源成本和保证功率源的稳定性, 常使用多个价格低、寿命长的家用微波炉磁控管替代单个大功率磁控管^[4]。因此, 实际工业生产过程中, 需要优化多个微波源的馈入结构, 降低耦合, 避免磁控管过热、烧毁或功率不能正常输出等情况。国内外学者对改善微波加热效果已有大量研究, 其中模式搅拌器是最频繁用来提高加热性能的方法^[5], 也有其他学者研究 2 个馈入端口电极化方向对减少端口之间的耦合的影响^[6]。针对多源微波加热的耦合和效率问题, 本文提出一种双端口非同步旋转的加热方法, 即通过多个微波源在相同的加热时间、不同的旋转速度来减少互耦, 提高加热均匀性和加热效率。通过实验与仿真比较, 验证了设计方法提升加热效果的正确性。同时对不同倍速下的非同

收稿日期: 2019-11-05; 修回日期: 2019-12-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61731013; 61601312)

作者简介: 李伊帆(1995-), 女, 在读硕士研究生, 研究方向为微波能应用、多物理场计算。email:541919924@qq.com

*通信作者: 朱铎丞 email:hc Zhu@scu.edu.cn

步旋转加热进行仿真分析,验证了设计方法提升加热效果的一致性。

1 模型和方法

1.1 几何模型

基于 COMSOL Multiphysics 建立了双端口旋转下的微波加热模型,如图 1 所示。加热腔体尺寸为常见的家用微波炉内腔尺寸 291 mm×291 mm×186 mm,2 个 BJ26 波导分别作为两端馈口以使微波进入加热腔体,波导长度为 2.45 GHz 下微波在 BJ26 波导中波导波长的一半,以对应实验中所用的 BJ26 波导同轴转换。波导连接在铝质的转盘上,通过两端口转盘的同向转动来实现微波源的旋转功能,加热物料为 40 mm×40 mm×10 mm 方形土豆块,聚乙烯盘为支撑板,高度为 45 mm。本文进行的仿真都是在 2.45 GHz 下进行,所涉及的 3 种加热方法分别为非同步旋转结构加热、同步旋转结构加热、静态加热即传统加热方法。非同步旋转结构加热方法是指 2 个微波源旋转一周的速度不同,即 2 个微波源在同一时间以不同的角度旋转;同步旋转结构加热方法是指 2 个微波源旋转一周的速度相同。模型加热时间较短,因此不考虑加热过程中存在的质量传递和水分迁移现象。

1.2 控制方程

模型以介电损耗为纽带,耦合电磁场方程、固体的热传导方程。通过电磁场 Maxwell 方程^[7]计算电磁场在腔体内的分布:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \varepsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_c \quad (4)$$

式中: \mathbf{H} 为磁场矢量; \mathbf{J} 为电流密度; ε 为介电常数; \mathbf{E} 为电场矢量; t 为时间; \mathbf{B} 为磁感应矢量; \mathbf{D} 为电位移矢量; ρ_c 为电荷密度。由方程(5)可算出模型中的电场分布,从而计算出加热材料所造成的电磁功率损耗:

$$Q_c = \frac{1}{2} \omega \varepsilon_0 \varepsilon'' |\mathbf{E}|^2 \quad (5)$$

式中: ε_0 为真空中介电常数; ε'' 为对应材料的复相对介电常数的虚部; ω 为角频率。

温度分布情况由传热控制方程^[8]计算:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - k \nabla^2 T = Q = Q_c \quad (6)$$

式中: ρ 为材料密度; C_p 为热容; T 为温度; Q 为热源; k 为热导率。

对于微波源的旋转过程,定义 ϕ_{i1}, ϕ_{i2} 分别表征 2 个转盘在计算单位时间内的转动角度:

$$\begin{cases} \phi_{i1} = \frac{360^\circ}{t_1} \\ \phi_{i2} = \frac{360^\circ}{t_2} \end{cases} \quad (7)$$

式中: t_1 为微波源 1 旋转一圈即 360°的时间; t_2 为微波源 2 旋转一圈即 360°的时间。

1.3 仿真实现方法

为实现连续动态旋转过程的仿真,将微波源旋转的过程进行分段、静态的假设划分。以 1 s 为加热时间步长,划分为多个时间步长,每一个时间步长里假定转盘静止不动,通过 COMSOL 多物理场耦合计算静态模型。在时间步长之间,引入 Matlab 编程执行模型的几何变换和结果温度的传递,即最后一个模型的最终温度分布定义为下一时间步长的初始温度分布,以此保证计算结果的连续性。

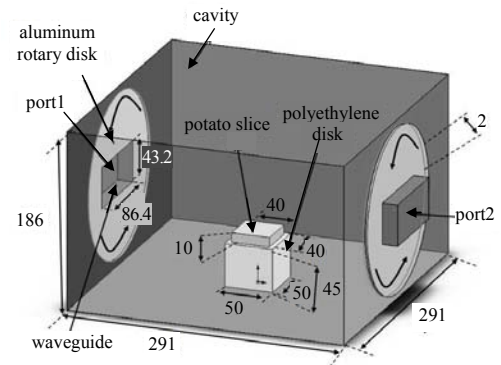


Fig.1 Microwave heating model of dual port rotating structure
图 1 双端口旋转结构微波加热模型

1.4 材料参数

仿真的被加热物为土豆块，支撑板为聚乙烯，波导、转盘及腔体四壁金属均为完美电导体，空间材料设置为空气，具体材料参数如表 1 所示。

表 1 材料属性及参数

property	potato	polyethylene	air	source
relative permittivity	57-j17	2.3	1	
relative permeability	1	1	1	
conductivity/(S·m ⁻¹)	0	0	0	ref.[9]
heat conductivity coefficient/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	0.648	—	—	
density/(kg·m ⁻³)	1 050	—	—	
heat capacity at constant pressure/(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	3 640	—	—	

2 仿真与实验结果讨论

2.1 模型验证

2.1.1 实验设置

验证仿真实验装置系统如图 2 所示，固态微波源线缆、波导同轴转换与加热腔体相连接，由铝质转盘带动微波源进行旋转。腔体上端设有带圆形截止波导的盖板作为操作窗口，用于测温的光纤从截止波导插入，光纤传感器读取数据。

由于端口通过同轴线连接微波源，在现有实验条件下，只可控制馈源端口旋转 1~2 圈。本次实验两端口功率各为 60 W，总功率为 120 W。2 个端口以中心水平位置为起点同向旋转，单位时间内的旋转角度需小于 360°，2 个端口同时旋转回到起点结束，加热时间因旋转倍速的不同而不同。为实验方便，倍速确定后，仿真的加热时间设置为当前倍速的最小加热时间。为研究两端口旋转结构对于微波加热效果的影响，腔体大小、总功率、加热时间、土豆及其位置条件均保持不变，设置非同步旋转结构、同步旋转结构两组加热实验对比。

实验开启固态微波源，同时同向旋转馈源端口(1 源顺时针旋转，2 源逆时针旋转)，到达加热时间，立刻关闭微波源，用热像仪在截止波导口拍摄物料上表面的加热情况。

2.1.2 上表面中心点温度仿真、实验结果对比

图 3 为仿真和实验在加热 6 s 后的中心点温度变化趋势。为实验方便，需减小旋转角度及旋转圈数，实验中设置非同步旋转结构为 1.33 倍速即 1 源旋转速度为 60°/s，2 源旋转速度为 45°/s，加热时间设置为非同步旋转刚好旋转一圈的时间 6 s。同步结构的旋转速度选择为非同步旋转中较小的速度，则电场馈入角度更多，电场模式分布更均匀，因此同步旋转 2 个源旋转速度同为 45°/s。两端口各输入 60 W 功率，2 组旋转结构在上表面中心点处的温度变化趋势如图 3(a)所示，土豆块上表面中心点温升曲线的实验和仿真数据存在微小误差，但整体趋势一致，最高点温较为接近。数据存在微小误差是因为土豆的实际形状和摆放位置存在一定的误差。

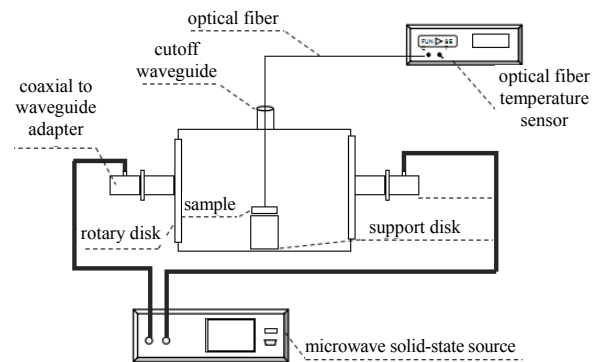


Fig.2 Schematic of experimental system
图 2 实验系统示意图

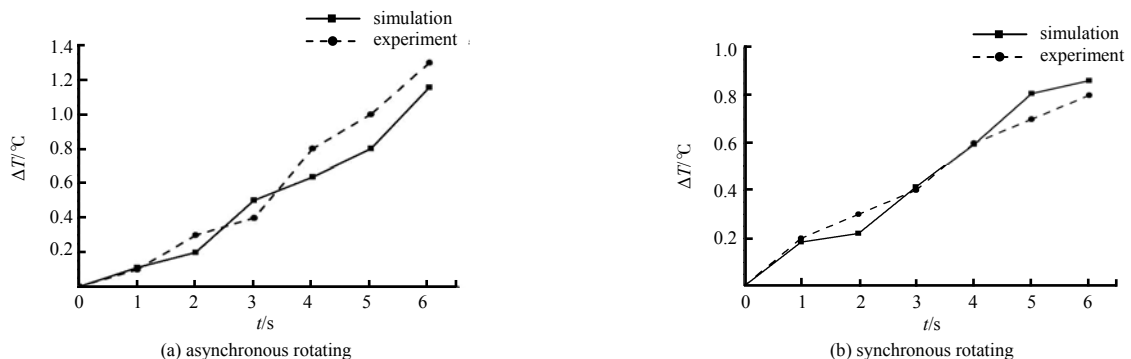


Fig.3 Experimental and simulated heating of the upper surface of the potato block
图 3 实验和仿真加热土豆块上表面中心点温升曲线对比

2.1.3 上表面温度仿真、实验结果对比

进一步对比发现,基于非同步旋转微波源结构的加热方法,在仿真的上表面温度分布如图 4(a)所示,最左、右两块温度相对较高,实验中拍摄到的上表面温度热像如图 4(b)所示,与图 4(a)相似的区域可观察到温度相对较高,且具有更好的导热效果。基于同步旋转微波源结构的加热方法,仿真和实验上表面温度分布如图 4(c)~(d)所示,也存在相对应的温度较高的两块区域,实验结果所得到的低温区域主要在上、下边界附近以及中心点的左右两块,这与仿真结果较为一致。因此,通过仿真与实验的点温以及温度分布的对比,得出仿真与实验有较好的一致性,该模型的仿真可以模拟实验。

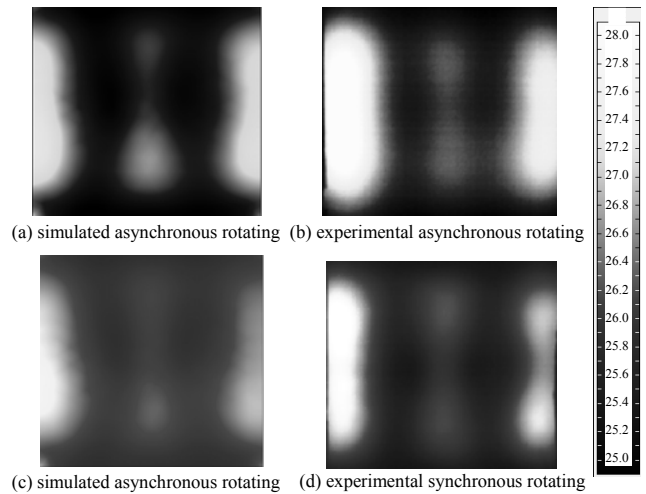


Fig.4 Upper surface temperature profiles of the potato block heated by microwave

图 4 微波加热土豆块上表面温度分布图对比

2.2 端口旋转的影响分析

2.2.1 端口旋转对加热过程的耦合分析

为分析旋转速度对互耦的影响,通过仿真分别研究非同步旋转 1.2 倍速及 1.5 倍速下对微波加热土豆块的影响,同时设置同步旋转组进行对比,所有旋转源结构在 120 W 总功率的情况下对土豆块加热。非同步旋转组 1 源旋转速度为 $180^\circ/\text{s}$, 2 源旋转角度为 $150^\circ/\text{s}$,即以 1.2 倍速旋转,保证两源同时旋转回到水平位置共需要加热 12 s;同步旋转组两源旋转速度为 $150^\circ/\text{s}$ 。当非同步旋转组以 1.5 倍速旋转时,即 1 源旋转速度为 $180^\circ/\text{s}$, 2 源旋转速度为 $120^\circ/\text{s}$,加热时间为 6 s。在相同加热时间,同步结构两源旋转速度为 $120^\circ/\text{s}$ 。

S_{21} 作为 S 参数中的传输系数,衡量能量传输的大小。 S_{21} 越小,能量传输越少,到另一端口则耦合越小。1.2 倍速的非同步与同步旋转组如图 5(a)所示,可以看出,在一半的加热时间非同步旋转结构的传输参数远小于同步旋转结构,则非同步旋转结构的耦合远小于同步旋转结构。1.5 倍速的非同步与同步旋转组如图 5(b)所示,从图中可以看出,第 3 s,6 s 二者传输参数相等,这是因为 2 个结构的 2 个旋转源都处于水平位置,而其余时间点非同步旋转结构的传输参数远小于同步旋转结构,表明非同步旋转结构的耦合远小于同步旋转结构。通过 1.2 倍速、1.5 倍速可以得到:在相同功率、相同加热时间,非同步多源旋转结构微波加热具有降低互耦的特性。

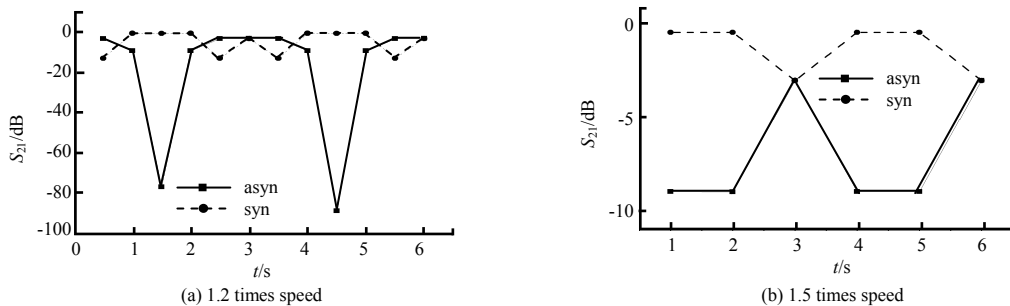


Fig.5 Comparison of transmission parameters of asynchronous rotation and synchronous rotation at different speeds

图 5 不同倍速下的非同步旋转结构与同步旋转结构的传输参数对比图

2.2.2 端口旋转对加热过程中均匀性的影响

定义温度变化系数(Coefficient Of Variation, COV)用来衡量所选区域温度分布的不均匀性,其计算方法为样品各个位置的温升标准差除以各个位置温升的平均值,其值越小,说明加热的均匀性越好^[10]。

为分析双端口旋转微波源结构在物料加热均匀性上的改善效果,通过仿真分别研究了 3 种倍速下与静态微波加热土豆块的加热均匀性差异,3 组方法均使用相同的腔体、物料等相同条件进行模型加热仿真,仿真分别为:1.2 倍速非同步旋转(源 1 旋转速度为 $180^\circ/\text{s}$,源 2 旋转速度为 $150^\circ/\text{s}$,加热 12 s),静态加热 12 s;1.5 倍速非同步旋转(源 1 旋转速度为 $180^\circ/\text{s}$,源 2 旋转速度为 $120^\circ/\text{s}$,加热 6 s),静态加热 6 s;1.8 倍速非同步旋转(源 1 旋转速度为 $180^\circ/\text{s}$,源 2 旋转速度为 $100^\circ/\text{s}$,加热 18 s),静态加热 18 s。不同倍速下非同步旋转结构、同步旋转结构与静态加热土豆片的 COV 比较如表 2 所示,相较于直接静态加热,旋转结构在加热均匀性上有显著提升,且不同倍速下都具有相似效果。

表 2 不同倍速下非同步旋转结构、同步旋转结构与静态加热土豆片的体平均温升和 COV 比较
Table 2 Comparison of average temperature lift and COV of asynchronous structure, synchronous structure and static structure heating the potato chip at different times of speed

speed	asynchronous rotation		synchronous rotation		static heating	
	$\Delta T/$	COV	$\Delta T/^\circ\text{C}$	COV	$\Delta T/^\circ\text{C}$	COV
1.2x	3.67	0.533 54	2.1	0.491 54	2.35	0.561 73
1.5x	1.89	0.595 89	0.69	0.472 81	1.17	0.631 43
1.8x	5.52	0.489 07	3.06	0.439 15	3.52	0.518 45

2.2.3 不同组端口旋转对加热过程中效率的影响

通过仿真分别研究 3 种倍速下微波加热土豆块的加热效率。实验初始温度为 $24.4\text{ }^\circ\text{C}$ ，仿真初始温度设为相同温度。 ΔT 代表平均温升，不同倍速下非同步旋转结构、同步旋转结构与静态加热土豆片的平均温升的比较如表 2 所示。图 6 为仿真和实验在不同倍速加热下的温度分布，可见 3 种倍速下，非同步旋转加热法高温区域占比较大，同步旋转加热法低温区域占比大，3 种倍速从低到高，非同步旋转加热方法较同步方法平均温升分别提高了 74.80%、173.9% 和 80.4%。通过不同倍速的仿真可以分析，双端口旋转加热下，非同步旋转结构加热更高效，在不同倍速下具有一致性。非同步旋转方法较同步旋转、静态加热能够让旋转源有更多的旋转角度，腔体有更多不同的电场模式，在提升均匀性的性能上，提高了加热效率。

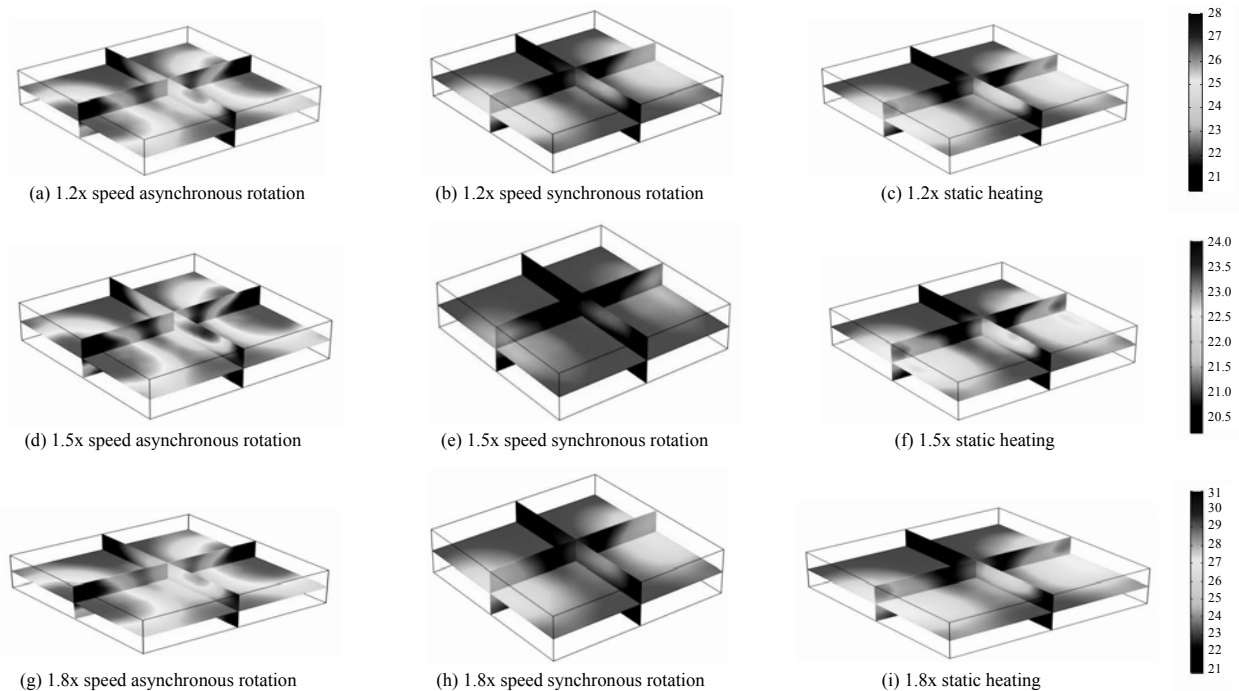


Fig.6 Temperature profiles of simulation results at different rotation speeds

图 6 不同倍速旋转下的仿真结果温度分布切面图

3 结论

本文设计了在 2.45 GHz 下基于 COMSOL Multiphysics 双端口旋转下的微波加热模型，分析了双微波源端口之间的旋转速度对端口间的互耦和加热均匀性的影响。与传统的静态加热相比，旋转结构的加热均匀性明显提高，而旋转结构中，非同步旋转加热相比同步旋转加热，降低耦合效果显著，极大提升了加热效率。同时，非同步旋转在改善加热效率上具有很好的一致性，实现了端口间低互耦、高均匀性的加热，为提高加热均匀性和加热效率提供了新思路。

参考文献：

- [1] JHA A K, JOSHI N, SINGH A. Applicability and assessment of Microwave Assisted Gravity Drainage(MWAGD) applications in Mehsana heavy oil field, India[C]// SPE International Heavy Oil Conference and Exhibition 2011. Kuwait City, Kuwait: [s.n.], 2011:68-76.

(下转第 277 页)