

## 周向不均匀加热圆管内熔盐传热特性数值研究

王为术<sup>1</sup>,雷佳<sup>1</sup>,张斌<sup>1</sup>,朱晓静<sup>2</sup>,上官闪闪<sup>1</sup>

(1. 华北水利水电大学热能工程研究中心,河南 郑州 450045;2. 大连理工大学 能源与动力学院,辽宁 大连 116024)

**摘要:**建立周向不均匀加热圆管物理模型,采用标准  $k-\varepsilon$  模型,在熔盐入口温度  $200^{\circ}\text{C} \sim 400^{\circ}\text{C}$ ,速度  $0.6 \sim 3.0 \text{ m/s}$ ,加热面热流密度  $200 \sim 400 \text{ kW/m}^2$  参数范围内,对内径  $16 \text{ mm}$ ,壁厚  $2 \text{ mm}$  的集热管内熔盐传热特性进行数值模拟。分析集热管出口截面温度分布规律和集热管传热性能,对比不同参数管内壁周向温度不均匀分布特性。研究结果表明:集热管出口截面管壁温度差异较大,熔盐存在温度梯度;熔盐入口温度越低,换热效果越好;不同热流密度对  $Nu$  影响很小, $Re$  相同时  $Nu$  几乎相同;集热管内壁周向温度分布不均匀,增加入口速度和降低热流密度有助于改善温度周向不均匀性。

**关键词:**集热管;不均匀加热;熔盐;传热特性;数值模拟

**中图分类号:**TK124

**文献标识码:**A

### Investigation on heat transfer of molten salt in circle tube with circumferentially non-uniform heated

WANG Wei-shu<sup>1</sup>, LEI Jia<sup>1</sup>, ZHANG Bin<sup>1</sup>, ZHU Xiao-jing<sup>2</sup>, SHANG GUAN Shan-shan<sup>1</sup>

(1. Institute of Thermal Energy Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, He'nan Zhengzhou 450045, China; 2. School of Energy and Power Engineering, Dalian University of Technology, Liaoning Dalian 116024, China)

**Abstract:** A physical model of circle tube with Circumferentially Non-uniform Heated, of which the inner diameter was  $16 \text{ mm}$  and wall thickness was  $2 \text{ mm}$ , was built to numerically investigate the heat transfer of molten salt in the circle tube. The numerical investigation was performed within the range of inlet temperature from  $200$  to  $400^{\circ}\text{C}$ , velocity from  $0.6$  to  $3.0 \text{ m/s}$ , heat fluxes from  $200$  to  $400 \text{ kW/m}^2$ . By using the  $k-\varepsilon$  model, the temperature distribution at outlet section and transfer characteristics were analyzed in detail, as well as the distribution of inner wall temperature. The investigation results show that the temperature of tube wall has large difference at outlet section, and the temperature of molten salt also has a graded distribution. The lower the inlet temperature is, the better the transfer performs. The heat flux has little effect on Nusselt Number. The temperatures at inner wall are non-uniformity on the circumference, increased inlet velocity and decreased heat flux are beneficial to improve the circumferentially non uniform.

**Key words:** collector tune; Non-uniform Heated; molten salt; heat transfer; numerical simulation

太阳能是一种公认的最具有发展潜力的清洁能源。太阳能发电技术作为一种太阳能利用领域的一项关键新技术得到了迅速发展<sup>[1-2]</sup>。在现有的太阳能热发电技术中,槽式太阳能热发电系统是发展最为成熟、应用最为广泛的集热技术<sup>[3]</sup>。太阳能集热管是实现太阳能转换的关键部件,集

热管表面热流密度高并且分布不均匀,造成集热管温度分布的不均。当温度分布不均度足够大时会破坏集热管,影响电站的稳定运行<sup>[4]</sup>。熔盐作为传热工质应用于太阳能热电站中,在常压下可以实现太阳能的高温传热蓄热,被广泛应用于太阳能热电站。国内外学者针对熔盐的传热特性进

行了研究,Pacheco<sup>[5]</sup>等研究了硝酸盐在太阳能集热器内传热特性,并分析了熔盐相变换热;Jeter<sup>[6]</sup>等采用几何法研究了抛物槽式集热管壁热流密度分布;Z. D. Cheng<sup>[7]</sup>利用程序法研究了抛物槽式集热管传热特性,给出了管壁热流密度的不均匀分布规律;吴玉庭<sup>[8-9]</sup>、沈向阳<sup>[10-11]</sup>试验研究了周向均匀加热条件下熔盐在圆管和横纹管内流动换热特性;常春<sup>[12]</sup>通过试验和数值模拟研究了水在周向不均匀热流圆管内湍流传热特性,得出经典 D-B 公式不适用于管壁温度分布计算;Shen X. Y.<sup>[13]</sup>试验研究了不同热流密度比圆管内熔盐强制对流换热特性,得出了  $Nu$  随  $Re$  变化的一般规律。前人研究多针对熔盐在周向均匀热流管内换热特性,对于非均匀热流管内熔盐换热特性研究较少,尤其是管壁温度周向分布的研究。集热管壁温分布关系到太阳能电站的运行安全,因此有必要对周向不均匀热流管内熔盐换热特性开展研究。

## 1 计算模型与数值方法

### 1.1 计算模型与网格

太阳能热电站运行时集热管内熔盐为稳态的湍流流动,集热管吸收太阳能辐射,能量由外壁通过热传导到内壁,再与管内熔盐发生对流换热作用。为模拟换热,设定集热管左半周为定热流密度,右半周绝热,集热管计算模型如图 1 所示。集热管材料为 316L 不锈钢,导热系数为  $18.4 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ,管外径  $20 \text{ mm}$ ,壁厚  $2 \text{ mm}$ ,管长  $1\,300 \text{ mm}$ 。

采用 Pro/E 5.0 建立集热管物理模型,包括集热管固体域和熔盐流体域。网格划分采用 ICEM CFD 14.0,计算模型采用六面体结构化网格。同时调整径向和轴向网格节点,对边界层网格进行加密处理,网格模型如图 2 所示。

### 1.2 数值方法与边界条件

数值计算雷诺时均采用 N-S 控制方程,利用有限体积法对控制方程进行离散,压力项采用标准格式,动量、湍动能和耗散率项采用二阶迎风格式,应用 SIMPLE 算法进行求解,采用标准 k-e 模型进行数值计算。数值计算采用三元熔盐(53%  $\text{KNO}_3$ 、40%  $\text{NaNO}_2$  和 7%  $\text{NaNO}_3$  混合物)为工质<sup>[14]</sup>,其热物性参数随温度变化规律如下:

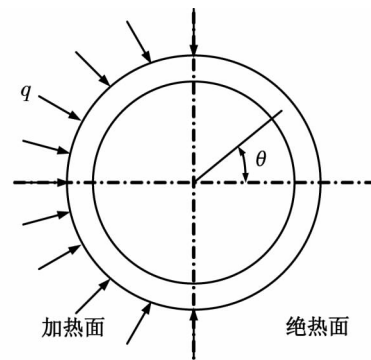


图1 集热管模型

Fig.1 Physical model of receiver tube

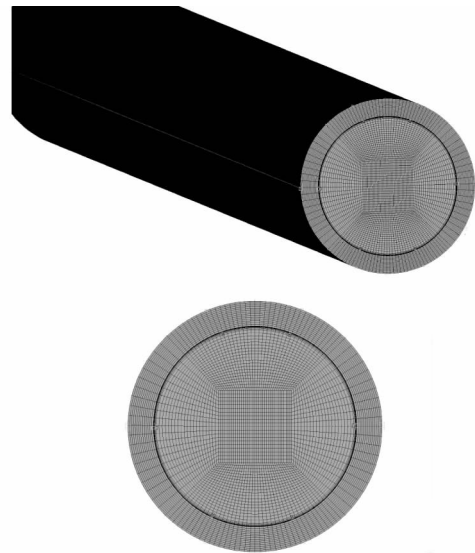


图2 集热管轴向和截面网格

Fig.2 The mesh of receiver tube

$$\rho = 2\,085 - 0.74t \quad (1)$$

$$C_p = 1\,549 - 0.15t \quad (2)$$

$$\lambda = 0.697 - 0.000\,461t \quad (3)$$

$$\mu = 31.59 - 0.194\,8t + 0.000\,425t^2 - 0.000\,000\,313\,3t^3 \quad (4)$$

式中: $\rho$  为密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $C_p$  为比热,  $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ;  $\lambda$  为导热系数,  $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ;  $\mu$  为动力粘度,  $\text{mPa}\cdot\text{s}$ ;  $t$  为温度,  $^\circ\text{C}$ 。边界条件设置为:入口给定质量、流量、温度、湍动度;出口给定压力边界;加热壁面给定热流密度;绝热面给定绝热边界;在计算过程中逐步细化网格,最终得到计算网格无关解,网格数量为  $1.8 \times 10^6$ 。数值计算的工况见表 1。

### 1.3 模型验证

为验证数值计算的准确性,图 3 给出了努塞尔数  $Nu$  计算结果与文献[13]试验结果的对比。从图中可以看出,数值模拟和试验结果  $Nu$  与  $Re$  关系变化趋势一致,试验值和计算值偏差较小,

表1 数值计算工况

**Tab. 1 Numerical simulation work conditions**

入口温度/℃	热流密度/ kW · m <sup>-2</sup>	入口速度/m · s <sup>-1</sup>
200	200, 300, 400	0.6, 0.9, 1.2, 1.8, 2.4, 3.0
300	200, 300, 400	0.6, 0.9, 1.2, 1.8, 2.4, 3.0
400	200, 300, 400	0.9, 1.2, 1.8, 2.4, 3.0

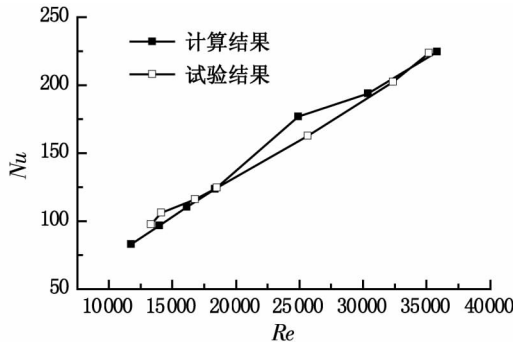


图3 数值计算结果与试验结果对比

Fig. 3 Comparison of numerical and experimental results

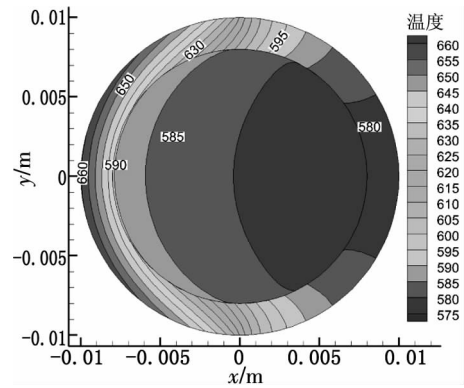
Re 在 20 000 ~ 30 000 之间偏差稍微增大,但整体误差不超过 10%,两者吻合较好。因此,采用 k - e 模型对周向不均匀加热集热管内熔盐传热特性进行数值研究的方法可靠。

## 2 计算结果与分析

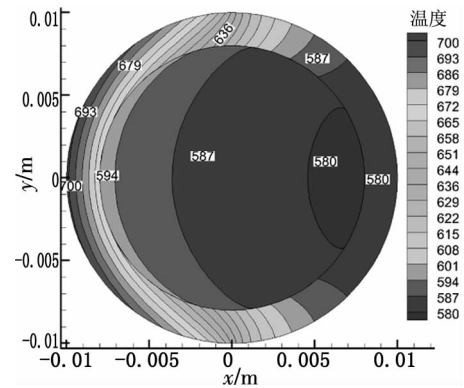
### 2.1 集热管截面温度分布

图 4 给出了入口温度  $t = 300^{\circ}\text{C}$ , 入口速度  $v = 1.8 \text{ m/s}$ , 加热面热流密度  $q$  分别为  $200, 300, 400 \text{ kW/m}^2$  时集热管出口截面温度分布图。由图可知,管壁温度存在分布不均匀现象,最高温度出现在加热面管壁外侧,温度最大值随着热流密度的增大而升高。随着热流密度从  $200 \text{ kW/m}^2$  增加到  $400 \text{ kW/m}^2$ , 加热侧与绝热侧温差从  $80^{\circ}\text{C}$  增大到  $160^{\circ}\text{C}$ , 热流密度越高,管壁温度不均匀性越强。管内熔盐温度也存在差异,近加热面熔盐温度要高于近绝热面温度。其原因为半周加热引起集热管受热不均,管壁温度差异较大,壁面与管内熔盐换热效果不同引起管内熔盐温度差异。

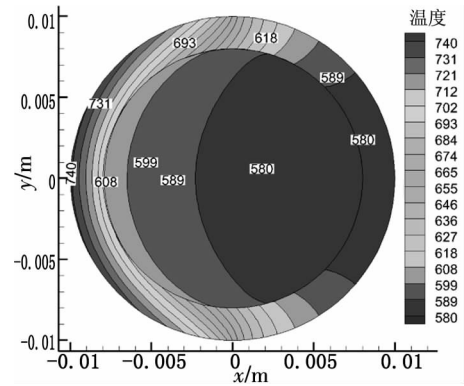
图 5 给出了进口温度为  $300^{\circ}\text{C}$ , 加热面热流密度  $q$  分别为  $200, 300, 400 \text{ kW/m}^2$  时集热管出口截面管外壁最高温度随入口速度变化的关系,结果表明,随着熔盐入口速度的增加,管壁温度逐渐降低,温度值趋于稳定。入口速度较低时,增大入口



(a)  $q = 200 \text{ kW/m}^2$



(b)  $q = 300 \text{ kW/m}^2$



(c)  $q = 400 \text{ kW/m}^2$

图 4 不同热负荷集热管出口截面温度分布图

Fig. 4 The temperature distribution at outlet section of different heat flux

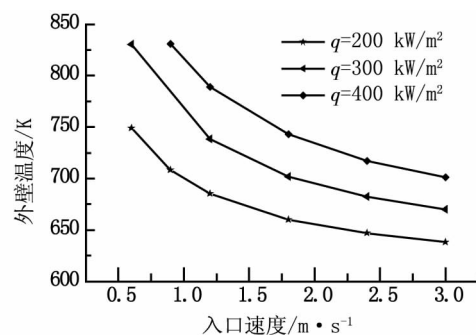


图5 管外壁温度与入口速度关系

Fig. 5 The maximum temperature of out wall distribution at different inlet velocity

速度能够明显降低管壁温度;当入口速度达到一定值后,入口速度的增大对降低管壁温度的作用被削弱。在相同入口速度下,热流密度越高,管壁温度越高。这是因为随着入口速度的增大,集热管内熔盐流量增加,带走更多的热量使管壁温度降低;增加热流密度,集热管吸收的热量增多,引起管壁温度的升高。

### 2.2 熔盐传热特性分析

加热面热流密度为  $200 \text{ kW/m}^2$ , 熔盐入口温度分别为  $200^\circ\text{C}$  和  $300^\circ\text{C}$  时,集热管加热面和绝热面传热性能如图6所示。 $Nu$  随着  $Re$  的增加而增加,换热得到强化。温度不同,换热效果也有所不同, $Re$  数相同时,进口温度越低, $Nu$  数越高,换热效果越明显,这一结果对于加热面和绝热面都得到体现。同时,绝热面的  $Nu$  大于加热面的  $Nu$ ,这是因为,加热面上的热量通过管壁热传导作用传递到绝热面,在绝热面和熔盐之间也存在对流换热作用,并且绝热面与熔盐温度差值较小,绝热面换热系数高于加热面。

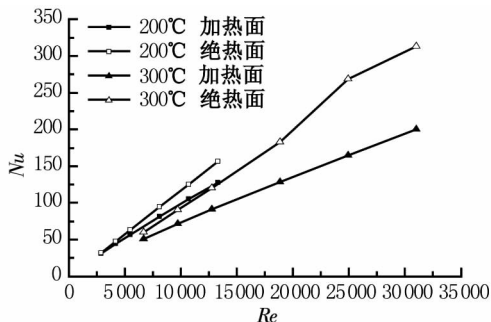


图6 不同进口温度对Nu与Re关系的影响

Fig.6 The effect of inlet temperature on the relationship of  $Nu$  and  $Re$

图7给出了加热面热流密度分别为  $200$ 、 $300 \text{ kW/m}^2$  时,加热面和绝热面  $Nu$  随  $Re$  变化关系。由图可知, $Re$  相同时,不同热流密度下  $Nu$  没有明显差异,热流密度对集热管换热效果影响较小。

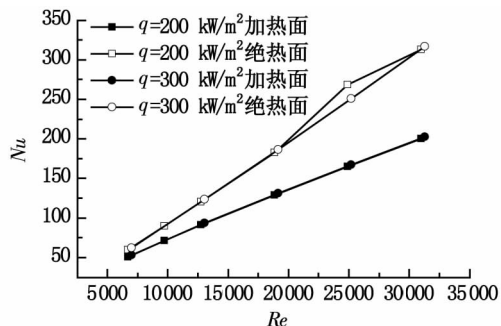


图7 不同热流密度对Nu与Re关系的影响

Fig.7 The effect of heat flux on the relationship of  $Nu$  and  $Re$

### 2.3 管壁温度周向不均匀分布特性

图8给出了熔盐入口温度  $300^\circ\text{C}$ , 速度  $1.8 \text{ m/s}$ , 热流密度  $q$  分别为  $200$ 、 $300$ 、 $400 \text{ kW/m}^2$  时,集热管轴向  $z=0.7 \text{ m}$  截面管壁周向温度分布,其中  $\theta=0^\circ$  为绝热面中心线,  $\theta=180^\circ$  为加热面中心。由图可知,管内壁温度存在明显的周向温度分布不均匀性,随着热流密度的增加,内壁温不均匀性更加显著。当热流密度  $q=200 \text{ kW/m}^2$  时,加热面与绝热面最大温差为  $57^\circ\text{C}$ ; 而当  $q=400 \text{ kW/m}^2$  时,这一数值达到  $111^\circ\text{C}$ 。周向不均匀热流是造成管内壁温分布不均的主要原因,热量在加热面通过热传导到绝热面,导致加热面壁温高于绝热面。

从图8中还可以看出,在周向角度为  $60^\circ \sim 120^\circ$  之间,随着角度增大内壁温度剧烈升高,这是由于该区域处于加热面与绝热面过渡区域,导致内壁温的剧烈变化。

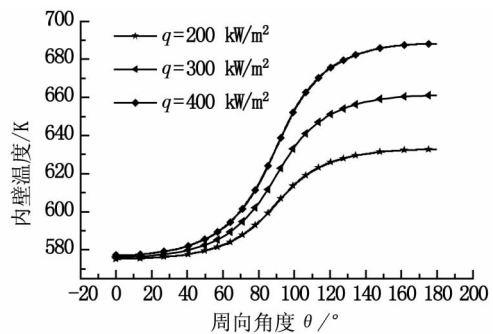


图8 不同热流密度对管壁周向温度分布影响

Fig.8 The temperature of inner wall of different angle at different heat flux

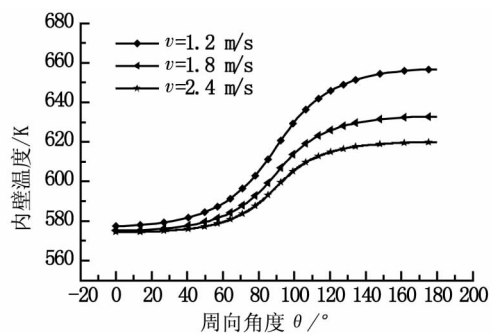


图9 不同入口速度对管壁周向温度分布影响

Fig.9 The temperature of inner wall of different angle at different inlet temperature

熔盐入口温度  $300^\circ\text{C}$ , 热流密度  $q=200 \text{ kW/m}^2$ , 入口速度分别为  $1.2$ 、 $1.8$ 、 $2.4 \text{ m/s}$  时集热管内壁温度周向不均匀分布见图9。增加熔盐入口流速可以明显改善壁温分布不均匀性,当流速从  $1.2 \text{ m/s}$  增加到  $2.4 \text{ m/s}$  时,加热面与绝热面最大温差从  $79^\circ\text{C}$  减小到  $45^\circ\text{C}$ 。然而增加入口速度对改善温度

不均的作用随着速度的增大而削弱。其原因是在速度较低时,增加入口速度可以增大集热管内熔盐流量,能够带走更多热量并强化换热,随着速度的提高强化换热作用遭到削弱而不够明显。

### 3 结论

1)半周加热下集热管壁温度存在较大梯度,热流密度越高,温度梯度越大;管内熔盐温度也存在差异,近加热面的熔盐温度高于近绝热面熔盐。集热管出口截面外壁最高温度随着入口速度的增加明显降低,最终趋于一稳定值。

2)努塞尔数  $Nu$  随着  $Re$  增大而增加, $Re$  越高换热效果越好;熔盐入口温度对换热效果影响较大,入口温度越高, $Nu$  越小;加热面热流密度对  $Nu$  数影响较小;同时,集热管绝热面  $Nu$  大于加热面。

3)集热管内壁温度周向分布不均性明显,加热面与绝热面内壁温差较大;降低热流密度和增加熔盐入口速度有助于改善周向温度不均匀性;同时,增加入口速度对改善温度不均的作用随着速度的增大而削弱。

### 参考文献:

- [1] ROMERO M, MARCOS M J, et al. Distributed power from solar tower systems: a MIUS approach [J]. *Solar Energy*, 1999, 67(4): 249 - 264.
- [2] 杨敏林, 杨晓西, 林汝谋, 等. 太阳能热发电技术与系统 [J]. *热能动力工程*, 2008, 23(3): 221 - 228.
- [3] MILLS D. Advances in solar thermal electricity technology [J]. *Solar Energy*, 2004(76): 19 - 31.
- [4] LITWIN R Z. Receiver System: Lessons Learned From Solar Two [R]. New Mexico and Livermore California; Sandia National Laboratories, Albuquerque, 2002.
- [5] PACHECO J E, RALPH M E, et al. Investigation of cold filling receiverpanels and piping in molten - nit - rate - salt central - receiver solar power plants [J]. *Journal of Solar Energy Engineering*, 1994, 117(4): 282 - 289.
- [6] JETER S M. Calculation of the concentrated flux density distribution in parabolic trough collectors by a semifinite formulation [J]. *Solar Energy*, 1986, 37(5): 335 - 345.
- [7] CHENG Z D, HE Y L, et al. Three - dimensional numerical study of heat transfer characteristics in the receiver tube of parabolic trough solar collector [J]. *International Communications in Heat & Mass Transfer*, 2010, 37(7): 782 - 787.
- [8] 刘斌, 吴玉庭, 马重芳, 等. 圆管内熔融盐强迫对流换热的实验研究 [J]. *工程热物理学报*, 2010, 31(10): 1739 - 1742.
- [9] LIU B, WU Y T, et al. Experimental study for turbulent convective heat transfer with molten salt in a circular tube [C]//Proceedings of the International Heat Transfer Conference, Washington, DC, USA, 2010.
- [10] 沈向阳, 陆建峰, 丁静, 等. 熔盐在螺旋槽管和横纹管内强化传热特性 [J]. *工程热物理学报*, 2013, 34(6): 1149 - 1152.
- [11] LU J, SHEN X, et al. Convective heat transfer of high temperature molten salt in transversely grooved tube [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2013, 61(2): 157 - 162.
- [12] 常春, 张强强, 李鑫. 周向非均匀热流边界条件下太阳能高温吸热管内湍流传热特性研究 [J]. *中国电机工程学报*, 2012, 32(17): 104 - 109.
- [13] SHEN X, LU J, et al. Convective heat transfer of molten salt in circular tube with nonuniform heat flux [J]. *Experimental Thermal & Fluid Science*, 2014: 6 - 11.
- [14] LU J, SHEN X, et al. Convective heat transfer of high temperature molten salt in transversely grooved tube [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2013, 61(2): 157 - 162.
- (责任编辑 王利君)
- (上接第 103 页)
- Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1989(53): 1209 - 1221.
- [15] 刘斌. 简单体系水溶液包裹体 pH 和 Eh 的计算 [J]. *岩石学报*, 2011, 27(5): 1533 - 1542.
- [16] 李华芹, 刘家齐, 杜国民. 内生金属矿床成矿作用年代学研究 - 以西华山钨矿为例 [J]. *科学通报*, 1992, 37(12): 1109 - 1112.
- [17] 毛光周, 华仁民, 龙光明, 等. 江西金山金矿成矿时代探讨 - 来自石英流体包裹体 Rb - Sr 年龄的证据 [J]. *地质学报*, 2008, 82(4): 532 - 537.
- [18] CHEN B, JAHN B M, ARAKAWA Y, et al. Petrogenesis of the Mesozoic intrusive complexes from the southern Taihang Orogen, North China Craton: elemental and Sr - Nd - Pb isotopic constraints [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2004(148): 489 - 501.
- (责任编辑 王利君)