

# 涂层发射比和基底粗糙度对降低高温真空集热管热损的作用机理研究

郎宇帆, 于庆河, 郝 雷, 杜 淼, 张 科

(北京有色金属研究总院, 能源材料与技术研究所, 北京 100088)

**摘 要:** 该文重点研究发射比和粗糙度对集热管中的热损的影响规律。研究表明,在集热管发射比为0.1,基底粗糙度为0.2  $\mu\text{m}$ ,管内真空度优于 $10^{-3}$  Pa时集热管热损较低,400  $^{\circ}\text{C}$ 下热损约为253.2 W/m。在维持管内真空不变的条件下,随着发射比的升高,集热管热损增加。发射比每升高0.01,集热管的热损约增大25 W/m。

**关键词:** 高温真空集热管; 热损; 发射比; 粗糙度

**中图分类号:** TK513.5

**文献标识码:** A

## 0 引 言

槽式太阳能热发电技术是当前最成熟、最经济、也最具规模的商业化太阳能发电技术<sup>[1]</sup>,其中,槽式太阳能真空集热管是整个槽式太阳能热发电系统的核心部件,其热性能直接影响整个系统的集热效率和经济效益。集热管的热损直接决定集热管集热效率的核心因素。研究表明<sup>[2]</sup>,集热管失效的主要表现为其热损值急剧上升,导致集热管集热效率的大幅降低。

集热管的热损主要来源于2个方面<sup>[3]</sup>,一方面为集热管内选择性吸收涂层辐射散热导致的辐射热损,另一方面为集热管真空夹层内残余气体热传导导致的传热损失。张业强等<sup>[4]</sup>的研究结果表明集热管管内真空度良好的情况下其辐射热损失占总体热损的70%~90%。美国国家可再生能源实验室(NREL)的研究表明,集热管的发射比随温度升高不断增大<sup>[5]</sup>。同时,Sibin等<sup>[6]</sup>发现在同种工艺条件下,粗糙度增加导致发射比提高。综合上述因素,在高真空条件下,有必要研究集热管发射比和粗糙度对热损的影响规律,从而提高集热系统的运行效率和经济效益。

本文通过研究基底不锈钢管的粗糙度变化与其发射比变化之间的关系,并对不同发射比的集热管的热损进行测试,对集热管热损随发射比的变化

规律进行探究,揭示发射比与热损之间的对应关系,阐明温度和基底粗糙度对发射比的影响情况。为开发低发射比的选择性吸收涂层,低热损的高温真空集热管理论与方法奠定基础。

## 1 实验材料与方法

本文的实验部分采用的高温真空集热管长为4.06 m,其吸热管直径为70 mm,外玻璃管直径为125 mm,在集热管外玻璃管上焊接电离规以检测集热管的管内真空度情况。将实验所用集热管编号为1001、1002和1003,集热管内金属吸热管的表面粗糙度加工至 $Ra \leq 0.2 \mu\text{m}$ ,其吸收涂层400  $^{\circ}\text{C}$ 的发射比分别为0.08、0.10和0.12,管内真空度均为 $10^{-3}$  Pa数量级。

对粗糙度不同的基底不锈钢进行发射比变化规律的研究,分别测试其镀膜前后在400  $^{\circ}\text{C}$ 下的发射比情况。基底不锈钢的粗糙度分别为0.267、0.334、0.454、0.573和0.632  $\mu\text{m}$ 。发射比使用德国制造的Optosol K3热发射仪进行测量,其测量误差小于3%。

使用稳态热损测试平台分别测试1001、1002和1003集热管在250、300、350和400  $^{\circ}\text{C}$ 下的热损。稳态热损测试的具体方式为,将2根长为2.2 m、内径为5.5 cm、内置加热棒的铜管分别由集热管2个端部置于集热管吸热管内部,并保证集热管内吸

热管与铜管的同轴性,在集热管 2 个端部(集热管可伐合金-波纹管处)放置 2 个端部加热器,分别铜管外壁设置 6 个 K 型热电偶,位置分别位于集热管端部、距集热管端部 1.0 和 1.8 m 处。为保证测量的准确性,热电偶以集热管中心为基准对称分布。该测试的加热和保温程序由 PID 温度控制器进行控制。使用 ZDR-10B-II 型电离真空计检测集热管在稳态热损测试过程中的管内真空度变化情况。该稳态热损的测量误差约为 $\pm 10$  W/m。

## 2 结果与讨论

### 2.1 集热管热损的理论计算

图 1 为集热管内金属吸热管与外玻璃管之间辐射热交换的示意图。由图 1 可知,集热管内金属吸热管外壁与外玻璃管内壁之间的辐射热交换发生于封闭腔体内,将金属吸热管和外玻璃管均视作灰体。

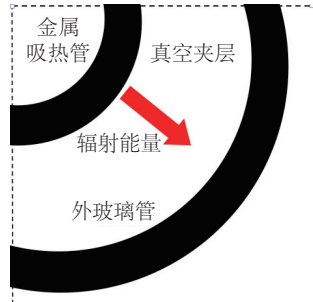


图 1 金属吸热管与外玻璃管辐射换热示意图

Fig. 1 Radiation heat transfer between absorber tube and glass envelop

根据漫灰表面间的辐射热交换的辐射网络,认为 2 个表面热阻与集热管真空夹层空间热阻构成了串联的关系,因此可得到热交换的关系式为:

$$Q_{\text{H.L.}} = \frac{E_a - E_g}{\frac{1 - \varepsilon_a}{\varepsilon_a A_a} + \frac{1}{A_a X_{a,g}} + \frac{1 - \varepsilon_g}{\varepsilon_g A_g}} \quad (1)$$

式中,  $E_a$ 、 $E_g$  ——金属吸热管和外玻璃管辐射出的能量;  $\varepsilon_a$ 、 $\varepsilon_g$  ——金属吸热管和外玻璃管的发射比;  $A_a$ 、 $A_g$  ——金属吸热管和外玻璃管的外表面面积;  $X_{a,g}$  ——角系数。

根据吸热管与外玻璃管辐射的相对位置可判断角系数  $X_{a,g}=1$ ,同时将斯蒂芬-玻尔兹曼定律代入式(1),并简化为<sup>[5]</sup>:

$$Q_{\text{H.L.}} = \frac{\pi D_a \sigma (T_a^4 - T_g^4)}{\frac{1}{\varepsilon_a} + \frac{1 - \varepsilon_g}{\varepsilon_g} \left( \frac{D_a}{D_g} \right)} \quad (2)$$

式中,  $D_a$ 、 $D_g$  ——金属吸热管和外玻璃管的直径;  $T_a$ 、 $T_g$  ——金属吸热管与外玻璃管的温度;  $\sigma$  ——斯蒂芬-玻尔兹曼常数,  $5.67 \times 10^{-8}$  W/( $\text{m}^2 \cdot \text{K}^4$ )。

式(2)表示集热管热损  $Q_{\text{H.L.}}$  与金属吸热管发射比  $\varepsilon_a$  之间的关系,该式中并未包含集热管管内真空度参数。因此,由式(2)计算得出的热损实质为集热管中的辐射热损,并未包含真空夹层内残余气体的传导热损。然而,在真空管真空夹层内真空度良好的情况下(真空度优于 0.013 Pa),残余气体的传导热损失小于 5 W/m<sup>[7]</sup>,在集热管总体热损中所占的比例很小。因此,在集热管管内真空度良好时,可近似认为集热管的总体热损约等于其辐射热损。

### 2.2 集热管发射比的影响因素

#### 2.2.1 温度对发射比的影响

图 2 为集热管发射比随温度变化情况及其拟合曲线,其中,集热管 1001、1002 和 1003 的发射比与温度间的拟合关系式分别为:

$$\varepsilon_{\text{abs}} = 0.046 + 2.26 \times 10^{-7} \times T^2$$

$$\varepsilon_{\text{abs}} = 0.061 + 2.51 \times 10^{-7} \times T^2$$

$$\varepsilon_{\text{abs}} = 0.080 + 2.44 \times 10^{-7} \times T^2$$

其拟合度分别为 0.99、0.98 和 0.99。由图 2 可知,集热管的发射比随着温度的升高逐渐增大,当温度 $\leq 250$  °C时,发射比增大的速度较慢;温度 $> 250$  °C时,发射比增大的速度较快。

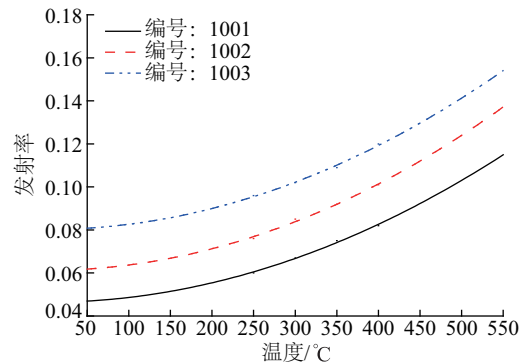


图 2 集热管发射比与温度的关系曲线

Fig. 2 Relation ship between receiver emittance and temperature

发射比与温度的拟合关系式的形式为  $\varepsilon_{\text{abs}} = A + B \times T^2$ , 根据该式的各项系数可知,系数 A

为涂层本征性能对发射比的影响情况,系数  $A$  的值越大,表明由涂层本征性能决定的发射比越高。系数  $B$  显示了发射比对温度的敏感程度。观察上述 3 根集热管发射比与温度的拟合关系式可以发现,3 个拟合关系式中的系数  $B$  值较为接近,此规律表明材料发射比对温度的敏感程度与涂层的本征性能无关,且本征发射比不同的吸收涂层的发射比随温度升高的变化趋势大致相同。

### 2.2.2 基底粗糙度对发射比的影响

图 3 为镀膜前后不锈钢的发射比随粗糙度的变化曲线,测试温度为  $T=400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。由图 3 可知,粗糙度  $Ra=0.008\text{ }\mu\text{m}$  的未镀膜不锈钢的发射比为 0.17,随着粗糙度的增加,不锈钢的发射比逐渐升高,当粗糙度  $Ra=0.63\text{ }\mu\text{m}$  时,其发射比高达 0.24,与粗糙度  $Ra=0.008\text{ }\mu\text{m}$  的不锈钢管相比发射比提高 0.07。同时,不锈钢管镀膜后的发射比随粗糙度变化情况与未镀膜时的曲线变化趋势基本相同。粗糙度  $Ra=0.008\text{ }\mu\text{m}$  的镀膜不锈钢管的发射比为 0.09,随着粗糙度的增加,发射比逐渐升高,粗糙度  $Ra=0.63\text{ }\mu\text{m}$  的不锈钢管镀膜后的发射比为 0.13,与粗糙度  $Ra=0.008\text{ }\mu\text{m}$  的不锈钢管相比提高约 0.04。同时,由发射比曲线变化可知,当  $Ra\leq 0.2\text{ }\mu\text{m}$  时,发射比随粗糙度增大而升高的速度较慢;当  $Ra>0.2\text{ }\mu\text{m}$  时,发射比随粗糙度增大而升高的速度较快。

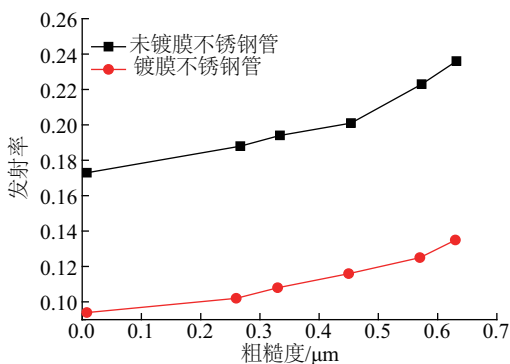


图3 镀膜前后不锈钢管的发射比随粗糙度变化情况  
Fig. 3 Emittance variation with roughness of no-coating and coated stainless steel

### 2.3 集热管热损与发射比的关系

使用稳态热损平台对集热管 1001、1002 和 1003 的热损进行测试,在稳态测试过程中使用电离真空计检测集热管的管内真空度变化情况,集热管

不锈钢管的粗糙度  $Ra\leq 0.2\text{ }\mu\text{m}$ ,发射比分别为 0.08、0.10 和 0.12。在  $250\sim 400\text{ }^{\circ}\text{C}$  区间内每隔  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  对集热管进行保温,测试集热管热损值,所得具体数据如下表 1。

表1 测试集热管的热损数据  
Table 1 Heat loss of receiver in experiment

| 编号   | 温度<br>$T/^{\circ}\text{C}$ | 发射<br>比 $\varepsilon$ | 外玻璃<br>管温度<br>$T/^{\circ}\text{C}$ | 热损<br>(理论值)<br>$Q_{\text{cal}}/\text{W}\cdot\text{m}^{-1}$ | 热损<br>(实测值)<br>$Q_{\text{exp}}/\text{W}\cdot\text{m}^{-1}$ |
|------|----------------------------|-----------------------|------------------------------------|--|--|
| 1001 | 250                        | 0.060                 | 46.1                               | 60.2   | 80.8   |
|      | 300                        | 0.067                 | 55.2                               | 97.4   | 118.2  |
|      | 350                        | 0.075                 | 60.8                               | 151.3  | 172.7  |
|      | 400                        | 0.082                 | 67.9                               | 230.3  | 253.2  |
| 1002 | 250                        | 0.076                 | 43.1                               | 69.0   | 94.1   |
|      | 300                        | 0.085                 | 57.5                               | 116.4  | 139.6  |
|      | 350                        | 0.092                 | 69.6                               | 183.8  | 207.8  |
|      | 400                        | 0.101                 | 86.5                               | 276.1  | 299.5  |
| 1003 | 250                        | 0.096                 | 42.8                               | 87.9   | 110.6  |
|      | 300                        | 0.102                 | 53.4                               | 141.8  | 171.3  |
|      | 350                        | 0.109                 | 68.7                               | 235.2  | 256.6  |
|      | 400                        | 0.120                 | 89.0                               | 336.3  | 360.1  |

其热损曲线由图 4 所示。电离真空计的对集热管管内真空度的监测情况显示,集热管 1001、1002 和 1003 在  $250\sim 400\text{ }^{\circ}\text{C}$  的各个保温区间内的管内真空度均可维持在  $10^{-3}\text{ Pa}$  数量级内。由图 4 可以看出,在集热管管内真空度均为  $10^{-3}\text{ Pa}$  的情况下,集热管内涂层发射比越高,在相同温度下集热管热损越大。 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$  下,集热管 1001、1002 和 1003 的实测发射比分别为 0.092、0.101 和 0.120,其热损

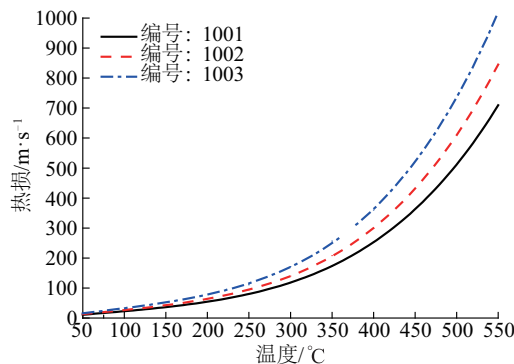


图4 发射比不同的集热管的热损与温度关系曲线  
Fig. 4 Relationship between different emittance receivers heat loss and temperature

值分别为 253.2、299.5 和 360.1 W/m。同时,结合表中数据可知,在 400 ℃时,集热管 1002 的发射比比集热管 1001 提高了 0.02,热损相应增大了 46.3 W/m;集热管 1003 的发射比比集热管 1001 提高了 0.04,热损相应增大了 106.7 W/m。从比较结果可知,温度为 400 ℃时,集热管吸收涂层的发射比每提高 0.01,热损相应增大 25 W/m。

比较上述热损的理论值与实测值可知,理论值小于实测值。根据式(2)对集热管热损理论值进行计算时,仅考虑了集热管的辐射热损,并未考虑集热管真空夹层内残余气体导致的传热损失以及集热管端部波纹管-可伐合金处的热损。因此,理论值和实测值间的误差来源于集热管上述两方面未考虑到的热损。对于上述所测的集热管,其管内真空度良好,真空夹层内的真空度均可达到  $10^{-3}$  Pa 数量级,真空夹层内残余气体的传热损失  $\leq 5$  W/m,在将传热损失计入理论热损后,其值仍与实测值存在较大的差异。由此可知,测试集热管的端部热损为其理论值与实测值的差异主要来源。由于集热管端部结构比较复杂,热交换的情况也比较复杂,主要传热方式包括了辐射散热,对流散热及传导散热等,难以对集热管端部的热损进行精确的理论计算。同时,在热损测试的过程中,为保证保温状态下集热管整管温度的均匀性,避免集热管在轴向上出现较大的温度差,在集热管两个端部设置端部加热器。在计算热损时,亦将端部加热器所消耗的电能耗计入了总体电能消耗中,因此,集热管热损的实测值包含其端部的热损,所以该值要高于理论热损值。

图 5 为集热管 1002 在 250~400 ℃区间内的热损理论值与实测值曲线。该图表明,在不同的温度下,集热管的理论值与实测值间的差值大致相等。造成此现象的原因为在稳态测试的过程中,对集热管端部采取绝热保护措施以减小端部处的集热管热损,然而端部绝热部件并不能完全消除集热管的端部热损,此时集热管的端部损失大小与端部绝热材料的绝热性能相关而与集热管本身性能并无太大关系。因此,在不同温度下集热管理论热损和实测热损的差值大致相同。

为了降低热损理论值与实测值的误差,尝试对集热管的热损理论值进行修正。定义修正系数  $k$  对

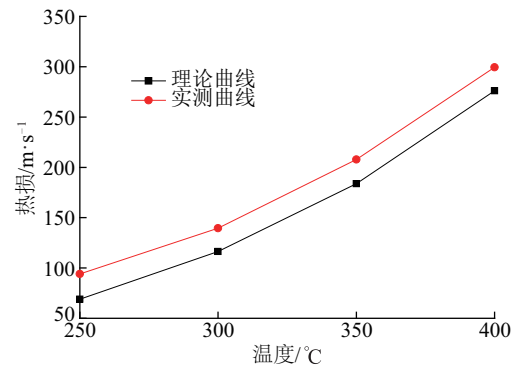


图5 集热管1002热损理论值与实测值曲线

Fig. 5 Calculated heat loss and experiment heat loss of No.1002 receiver

式(2)进行修正。由于热损理论值与实测值的误差来源主要为集热管端部的热损,因此,修正系数  $k$  值与集热管端部热损在总体热损中所占的百分比相关,如图 5 所示,集热管 1002 在 250 ℃下,其端部热损在总体热损中所占的比例为:  $\eta_{250\text{℃}} = (Q_{\text{exp}} - Q_{\text{cal}})/Q_{\text{exp}} = 0.267$ ; 当温度上升至 400 ℃时,该比例变为:  $\eta_{400\text{℃}} = (Q_{\text{exp}} - Q_{\text{cal}})/Q_{\text{exp}} = 0.078$ 。集热管端部热损在总体热损中所占的百分比随温度的升高而降低。该情况表明修正系数  $k$  并非常数,而是随温度变化而不断变化。根据集热管 1002 的理论热损与实测热损的误差,计算拟合得出修正系数  $k$  值与温度的变化关系如图 6 所示,所得拟合关系式为  $k = 20.8 \times T^{0.5}$ ,拟合度为 0.94。

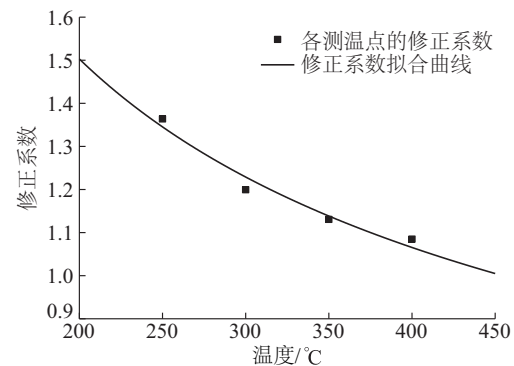


图6 修正系数  $k$  与温度间的关系曲线

Fig. 6 Relationship between modified coefficient  $k$  and temperature

由图 6 可知,修正系数  $k$  值随着温度的升高而降低,由于系数  $k$  值为根据 400 ℃下发射比为 0.10 的集热管 1002 拟合所得,因此集热管的发射比越



接近 0.10,修正系数  $k$  对其理论值的修正则越精确。

为了验证上述拟合关系式  $k$  值的准确性,使用该拟合所得  $k$  值对 400 ℃ 下发射比分别为 0.08 和 0.12 的集热管 1001 和 1003 的理论热损值进行修正,并与其实测热损值进行比较,所得结果如表 2 所示。

表 2 集热管 1001 及 1003 修正理论热损与实测热损比较

Table 2 Comparison between modified value of theoretic heat loss and experiment heat loss of the No.1001 and No.1003 receivers

| 编号   | 温度<br>$T/^\circ\text{C}$ | 热损/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}$ |                      | 误差<br>$\Delta Q/\text{W}\cdot\text{m}^{-1}$ |
|------|--------------------------|----------------------------------|----------------------|---|
|      |                          | 理论修正值 $Q_{\text{cal}}$           | 实测值 $Q_{\text{exp}}$ |   |
| 1001 | 250                      | 82.1                             | 80.8                 | 1.3   |
|      | 300                      | 116.8                            | 118.2                | 1.4   |
|      | 350                      | 171.1                            | 172.7                | 1.6   |
|      | 400                      | 249.8                            | 253.2                | 3.4   |
| 1003 | 250                      | 114.8                            | 110.6                | 4.2   |
|      | 300                      | 170.0                            | 171.3                | 1.3   |
|      | 350                      | 265.9                            | 256.6                | 9.3   |
|      | 400                      | 364.8                            | 360.1                | 4.7   |

比较表 2 中的数据可知,修正后的理论值与实测值的误差明显降低,误差范围基本维持在 5 W/m 内。由此可知,该修正系数  $k$  值准确性较高。

上述研究结果表明,集热管发射比受到温度和不锈钢粗糙的影响,选择性吸收涂层的温度升高,其内部分子热振动加剧,因此辐射能量的能力增强,导致其发射比升高,其热辐射的波长更短,能量更高。同时,从主动辐射的角度而言,凹凸不平的表面相对于光滑表面,其有效辐射面积更大,从而增加了其辐射能力,其主动辐射的能量更高,相应的发射比也更大。因此,在制造集热管内基底不锈钢管的时候,为保证集热管的发射比较低,应尽量降低不锈钢的粗糙度。考虑到加工时,不锈钢管的粗糙度越低,相应的加工成本越高,故在一般的生产中,将不锈钢管的粗糙度加工至  $Ra \leq 0.2 \mu\text{m}$  即可。集热管在其管内真空度为  $10^{-3} \text{Pa}$  的条件下,其热损主要受发射比的影响,发射比表征了集热管辐射能量的强度,因此,集热管的发射比越高,其热损值越大。

### 3 结 论

1)在集热管的发射比低于 0.1,粗糙度  $Ra \leq 0.2 \mu\text{m}$ ,管内真空度为  $10^{-3} \text{Pa}$  数量级条件下,集热管的热损值较低,约为 253.2 W/m,且在该粗糙度和真空度条件下,集热管的发射比每升高 0.01,其热损增加约 25 W/m。

2)集热管热损失的实测值总是高于理论值,其误差主要来源于集热管端部热损。通过使用修正系数  $k$  对理论值进行修正以减少其与实测值之间的误差,修正系数  $k$  值与温度相关,满足关系式:  $k = 20.8 \times T^{0.5}$ 。

3)集热管的发射比与温度和基底粗糙度有关,温度越高,涂层发射比随之升高。同时,为降低集热管的发射比,需将集热管中基底不锈钢管的粗糙度加工至  $Ra \leq 0.2 \mu\text{m}$ 。

#### [参考文献]

- [1] 罗智慧, 龙新峰. 槽式太阳能热发电技术研究现状与展望[J]. 电力设备, 2006, 7(11): 29—31.
- [1] Luo Zhihui, Long Xinfeng. State and trend of solar parabolic trough power generation technology[J]. Electrical Equipment, 2006, 7(11): 29—31.
- [2] 胡其颖. 太阳能热发电技术的进展及现状[J]. 能源技术, 2005, 26(5): 200—207.
- [2] Hu Qiying. History and present situation on generate electricity technology of solar heat[J]. Energy Technology, 2005, 26(5): 200—207.
- [3] Badar A W, Buchholz R, Ziegler F. Experimental and theoretical evaluation of the overall heat loss coefficient of vacuum tubes of a solar collector[J]. Solar Energy, 2011(85): 1447—1456.
- [4] 张业强, 吴玉庭, 马重芳, 等. 槽式太阳能真空集热管的热损失测量[J]. 化工学报, 2011, 62(S1): 185—189.
- [4] Zhang Yeqiang, Wu yuting, Ma chongfang, et al. Trough receiver heat loss testing[J]. CIESC Journal, 2011, 62(S1): 185—189.
- [5] Price H, Forristall R, Wendelin T, et al. Field survey of parabolic trough receiver thermal performance[A]. Proceedings of ISEC 2006, American Society of Mechanical Engineers[C], Denver, USA, 2006.
- [6] Sibin K P, Siju John, Barshilia H C. Control of thermal emittance of stainless steel using sputtered tungsten thin

- films for solar thermal power applications [J]. Solar Energy Materials & Solar Cells, 2015, 133: 1—7.
- [7] Forristall R. Heat transfer analysis and modeling of a parabolic trough solar receiver implemented in engineering equation solver [R], NREL/TP-550-34169, 2003.

## MECHANISM STUDY OF REDUCING HEAT LOSS OF HIGH TEMPERATURE VACUUM COLLECTOR BY COATING EMISSIVITY AND SURFACE ROUGHNESS

Lang Yufan, Yu Qinghe, Hao Lei, Du Miao, Zhang Ke

(Department of Energy Materials and Technology, General Research Institute for Nonferrous Metals, Beijing 100088, China)

**Abstract:** This paper focuses on the effect of emission ratio and roughness on the heat loss in collector tubes. The results show that when the emission ratio of collector tube is 0.1, the substrate roughness is 0.2  $\mu\text{m}$ , and the vacuum degree in the tube is better than  $10^{-3}$  Pa, the heat loss of the collector tube is lower, and the heat loss at 400  $^{\circ}\text{C}$  is about 253.2 W/m. As the emission ratio increases, the heat loss of the collector tube increases under the condition of maintaining the vacuum degree of the tube. For each increase of 0.01 in emission ratio, the heat loss of the collector tube is increased by approximately 25 W/m.

**Keywords:** parabolic trough receiver; heat loss; emittance; roughness