

# GRLM

## 国家太阳能光热产业技术创新战略联盟标准

T/GRLM 15-2020

---

# 塔式太阳能液体介质吸热器单元热 性能测试方法

**Thermal Performance Testing Method for Solar Receiver Unit with  
Liquid Medium in Solar Power Tower**

2020-01-06 发布

2020-02-06 实施

---

国家太阳能光热产业技术创新战略联盟 发布

# 目 次

|                 |     |
|-----------------|-----|
| 前 言.....        | III |
| 1. 范围.....      | 1   |
| 2. 规范性引用文件..... | 1   |
| 3. 术语和定义.....   | 1   |
| 4. 符号与单位.....   | 3   |
| 5. 热性能测试.....   | 4   |
| 6. 测试报告.....    | 10  |
| 附录 A.....       | 11  |
| 附录 B.....       | 14  |
| 附录 C.....       | 16  |
| 附录 D.....       | 18  |

# 前 言

本标准依据《标准化工作导则 第一部分：标准的结构和编写》（GB/T 1.1-2009）给定的规则起草。

本文件的某些内容可能涉及专利，本文件的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本标准由国家太阳能光热产业技术创新战略联盟提出。

本标准由国家太阳能光热产业技术创新战略联盟归口并解释。

本标准系首次提出并制定。

本标准起草单位：浙江大学、中国能源建设集团有限公司工程研究院、中国科学院电工研究所、西安交通大学、北京工业大学、天津大学、中国电力工程顾问集团西北电力设计院有限公司、内蒙古电力勘测设计院有限责任公司、中国科学院上海应用物理研究所、浙江中光新能源科技有限公司、浙江中控太阳能技术有限公司、杭州锅炉集团股份有限公司、北京首航艾启威节能技术股份有限公司、中国能源建设集团浙江省电力设计院有限公司、衢州市特种设备检验中心、中国特种设备检测研究院材料研究所、山东电力工程咨询院有限公司。

本标准主要起草人：肖刚、许继刚、王志峰、李明佳、何雅玲、魏进家、赵晓辉、徐有杰、寇建玉、吴玉庭、赵力、沈又幸、白凤武、唐忠锋、李心、齐志鹏、光旭、童良怀、赵博、易富兴、徐志强、刘可亮、刘义达、曾季川、倪明江、岑可法。

本标准在执行过程中的意见或建议反馈至国家太阳能光热产业技术创新战略联盟秘书处（地址：北京市海淀区中关村北二条6号，100190，网址：<http://www.cnste.org>，邮箱：[cnste@vip.126.com](mailto:cnste@vip.126.com)）。

# 塔式太阳能液体介质吸热器单元热性能测试方法

## 1 范围

本标准适用于采用液体传热介质的塔式太阳能吸热器单元，规定了吸热器单元热性能测试方法，适合塔式太阳能液体介质吸热器单元的测试和评价。

## 2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅所注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 12936 太阳能热利用术语

GB/T 26972 聚光型太阳能热发电术语

GB/T 18708 家用太阳热水系统热性能试验方法

GB 50264 工业设备及管道绝热工程设计规范

ISO 9488 Solar energy-Vocabulary（太阳能术语）

ISO 9806 Solar energy-Solar thermal collectors-Test methods（太阳能集热器热性能测试方法）

## 3 术语和定义

GB/T 12936和ISO 9488确立的下列术语和定义适用于本标准。

### 3.1 太阳能吸热器 solar receiver

吸收太阳辐射并将产生的热能传递给传热介质的装置。

### 3.2 熔盐 molten salt

一种不含水的无机盐熔融体，其固态大部分为离子晶体，在高温条件下融化后形成离子熔体。

通常由碱金属或碱土金属与卤化物、硝酸盐、碳酸盐及磷酸盐组成。

目前常用的熔盐为太阳盐。

### 3.3 太阳盐 solar salt

熔盐的一种类型，是硝酸钠与硝酸钾的混合物。

按照质量分数计算，其常用配比为 $\text{NaNO}_3(60\%) + \text{KNO}_3(40\%)$ 。

### 3.4 管屏 tube panel

由吸热管排列并构成传热介质通道的太阳能吸热部件。

### 3.5 熔盐吸热器 molten salt receiver (MSR)

由若干管屏组成，内部流动介质为熔盐的太阳能吸热器。

### 3.6 吸热器单元 solar receiver unit

将太阳能吸热器管屏中的一段或一部分，或者管屏间一段或一部分称为一个吸热器单元。

### 3.7 能流密度 flux density

单位面积上的辐射通量。

单位为瓦每平方米 ( $W/m^2$ )

### 3.8 入射功率 incident power

单位时间内照射到吸热器或吸热器单元受热面上的能量。

符号为 $P_{inc}$ ，单位为瓦特 (W)。

### 3.9 吸收功率 absorption power

单位时间内通过吸热器或吸热器单元受热面进入吸热器内的能量。

符号为 $P_{abs}$ ，单位为瓦特 (W)。

### 3.10 反射功率 reflected power

单位时间内由于吸热器或吸热器单元受热面的反射作用直接散失到环境中的能量。

符号为 $P_{ref}$ ，单位为瓦特 (W)。

### 3.11 输出功率 output power

单位时间内，通过吸热器或吸热器单元受热面进入吸热器内并被传热介质带走的能量。

符号为 $P_{outp}$ ，单位为瓦特 (W)。

### 3.12 热损失功率 heat loss power

单位时间内，吸热器或吸热器单元通过辐射、对流和导热等作用散失到环境中的能量，数值上为吸收功率与输出功率之差。

符号为 $P_{los}$ ，单位为瓦特 (W)。

### 3.13 吸热器单元吸收率 receiver unit absorption

吸热器单元的吸收功率与入射功率之比。

符号为 $\alpha_{rcv}$ 。

注：与面元的吸收比有差别。

### 3.14 吸热器单元热效率 receiver unit thermal efficiency

吸热器单元的输出功率与入射功率之比。

符号为 $\eta_{rcv}$ 。

### 3.15 吸热器单元热损率 receiver unit heat loss rate

吸热器单元的热损失功率与入射功率之比。

符号为 $L_{rcv}$ 。

### 3.16 最大极限参考值 **maximum limit reference**

测试时间段内 DNI 的最大值与实际追日的定日镜镜面面积的乘积。

符号为 $P_{inc0}$ ，单位为瓦（W）。

### 3.17 入射功率系数 **coefficient of incident power**

吸热器单元受热面上的入射功率与最大极限参考值之比。

符号为 $\varphi$ 。

### 3.18 能量分布均匀系数 **uniformity of energy distribution**

吸热器单元受热面上能流密度分布均匀程度的指标。

符号为 $\gamma$ 。

## 4 符号与单位

下列符号适用于本标准。

|                 |   |
|-----------------|---|
| $a_1, a_2, a_3$ | 公式(B.1-2)中描述热效率与平均能流密度关系的系数                   |
| $b_1, b_2, b_3$ | 公式(B.2-1)中描述热效率与液体介质温度关系的系数                   |
| $c_1, c_2, c_3$ | 公式(B.3-1)中描述热效率与外界风速关系的系数                     |
| $c_{in}$        | 吸热器单元进口温度所对应的液体介质的比热容, J/(kg·°C)              |
| $c_{out}$       | 吸热器单元出口温度所对应的液体介质的比热容, J/(kg·°C)              |
| $c_{T_{liq}}$   | 吸热器单元进口和出口平均温度所对应的液体介质的比热容, J/(kg·°C)         |
| $DNI$           | 直接法向辐射, W/m <sup>2</sup>                      |
| $DNI_{max}$     | 每一工况测试过程中的 DNI 最大值, W/m <sup>2</sup>          |
| $d$             | 辐射控制圆盘与吸热器单元的距离, m                            |
| $Flux$          | 吸热器单元受热面上的平均能流密度, W/m <sup>2</sup>            |
| $flux$          | 公式(B.1-1)中的平均能流密度, W/m <sup>2</sup>           |
| $f_{i0j0}$      | 辐射计测得的能流密度, W/m <sup>2</sup>                  |
| $g_{ij}$        | 公式(A.1-1)中某区域对应的灰度值                           |
| $g_{i0j0}$      | 辐射计位置的灰度值                                     |
| $L_{rcv}$       | 吸热器单元热损率                                      |
| $\dot{m}$       | 液体介质的质量流量, kg/s                               |
| $P_{abs}$       | 吸热器单元的吸收功率, W                                 |
| $P_{inc}$       | 吸热器单元的入射功率, W                                 |
| $P_{inc0}$      | 最大极限参考值, 为每一工况测试中 DNI 的最大值与实际追日的定日镜镜面面积的乘积, W |
| $P_{los}$       | 吸热器单元的热损失功率, W                                |
| $P_{los,cond}$  | 吸热器单元的导热热损失功率, W                              |
| $P_{los,conv}$  | 吸热器单元的对流热损失功率, W                              |
| $P_{los,rad}$   | 吸热器单元的辐射热损失功率, W                              |
| $P_{outp}$      | 吸热器单元的输出功率, W                                 |

|                   |                                |
|-------------------|--------------------------------|
| $P_{ref}$         | 吸热器单元的反射功率, W                  |
| $S_{mir}$         | 每一工况测试过程中实际追日的定日镜镜面面积, $m^2$   |
| $S_{rcv}$         | 吸热器单元受热面的投影面积, $m^2$           |
| $T_{in}, T_{out}$ | 吸热器单元进口和出口液体介质的温度, $^{\circ}C$ |
| $T_{liq}$         | 吸热器单元内液体介质的平均温度, $^{\circ}C$   |
| $v_{air}$         | 风速, m/s                        |
| $\Delta S_{ij}$   | 公式(A.1-1)中某区域的面积, $m^2$        |
| $\alpha_{rcv}$    | 吸热器单元吸收率                       |
| $\beta$           | 控制圆盘布置的角度, $^{\circ}$          |
| $\gamma$          | 能量分布均匀系数                       |
| $\rho_{rcv}$      | 吸热器单元反射率                       |
| $\tau_{ini}$      | 测试开始时间                         |
| $\tau_{end}$      | 测试结束时间                         |
| $\eta_{rcv}$      | 吸热器单元热效率                       |
| $\varphi$         | 吸热器单元受热面上的入射功率与最大极限参考值之比       |
| A                 | A 组的测量值                        |
| B                 | B 组的测量值                        |

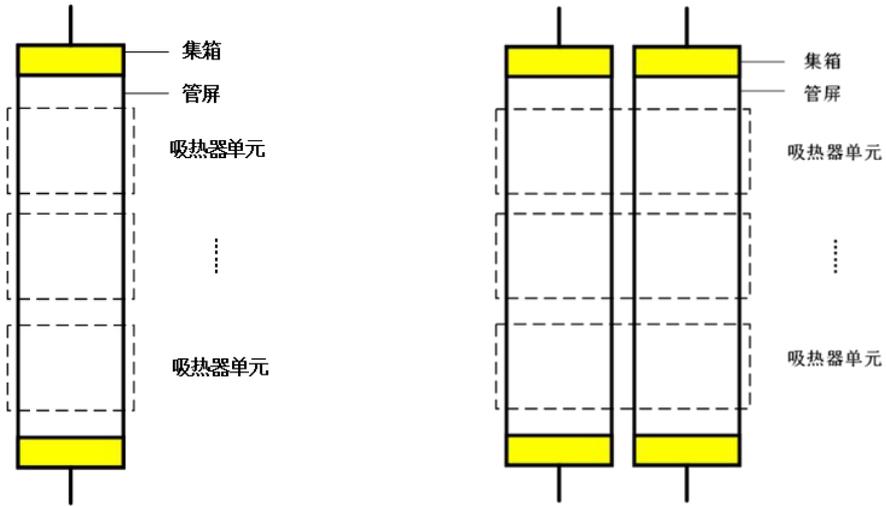
## 5 热性能测试

### 5.1 测试对象及目标

塔式太阳能液体介质吸热器包含若干管屏, 各管屏之间通过并联和串联组成一个整体。一般情况下, 吸热器各管屏结构基本相似, 内部介质的流动情况基本相近。实际的试验中, 单个管屏尺寸很大, 直接测试其热性能较为困难。将太阳能吸热器管屏中的一段或一部分, 或者管屏间的一段或一部分称为一个吸热器单元; 通过对其进行的热性能测试, 掌握太阳能吸热器整体性能评估的重要参数和依据。

吸热器单元测试样件应采用与实际吸热器管屏相同的结构形式、材料及加工方法进行制造。吸热管的规格和材料都应与实际管屏相同。测试样件与实际吸热器管屏之间的唯一区别在于吸热器单元的受热段长度较小, 宜至少为实际吸热器管屏受热段长度的十分之一。

吸热器单元的热性能包括吸收率、热效率和热损率。本标准的测试对象是塔式太阳能液体介质吸热器单元, 测试目标是获得吸热器单元吸收率、吸热器单元热效率和吸热器单元热损率。



(a) 吸热器管屏中的一段或一部分

(b) 吸热器管屏间的一段或一部分

图 1 吸热器单元的两两种主要形式的示意图

## 5.2 测试系统

本标准可以利用塔式聚光系统进行测试。

鉴于塔式聚光系统相对复杂，可采用定日镜与二次反射镜（抛物面反射镜或近似抛物面的组合反射镜等）结合的方法替代塔式聚光系统。如图 2 和图 3 所示，整个测试系统包括光路系统和热回路系统两个互相耦合的子系统。

在光路系统中，定日镜反射的太阳光线经过二次反射镜后到达接收窗。在接收窗位置布置吸热器单元（接收窗和吸热器单元都布置在接收塔上），在接收窗与二次反射镜之间布置一块辐射控制圆盘，其能沿着二次反射镜的光轴方向移动改变其与吸热器单元之间的距离  $d$ （见图 3），也能绕图示坐标系的  $y$  轴转动改变角度  $\beta$ （见图 4），用于调节到达吸热器单元受热面的能流密度。

在热回路系统中，来自储罐的液体介质（最常见的液体介质是太阳盐）在泵的作用下进入吸热器单元并被加热，然后进入液体介质出口罐。安装在管路中的泵用于调节管路中液体介质的质量流量，流量计用于测量液体介质的质量流量，测温装置用于测量吸热器单元进口和出口的液体介质温度。通风装置能够为吸热器单元表面提供设定流速的稳定气流。

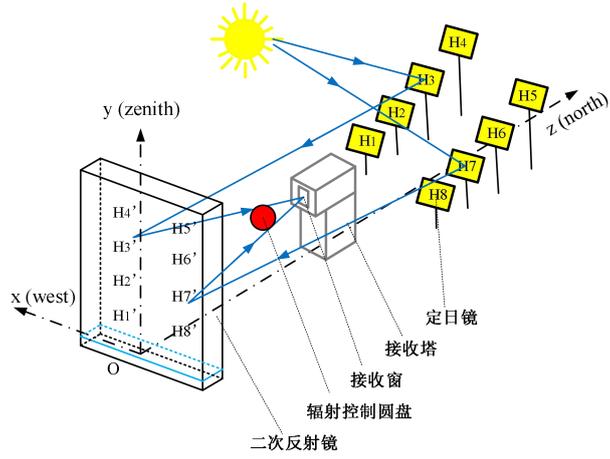


图 2 太阳能吸热器单元热性能测试光路系统示意图

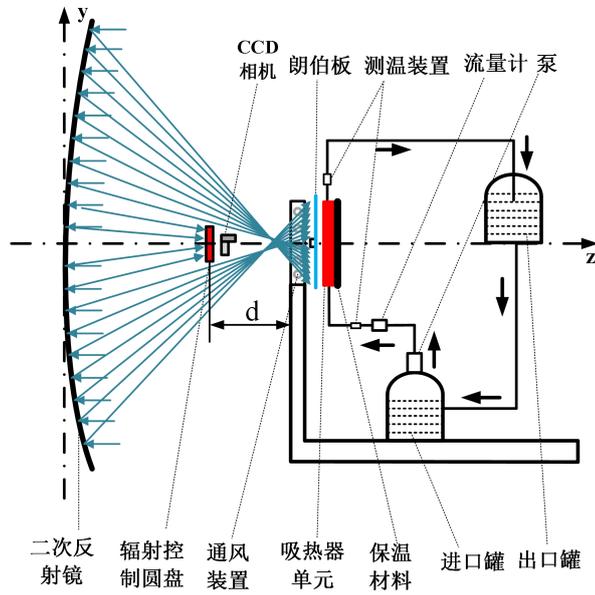


图 3 太阳能吸热器单元热性能测试热回路系统图

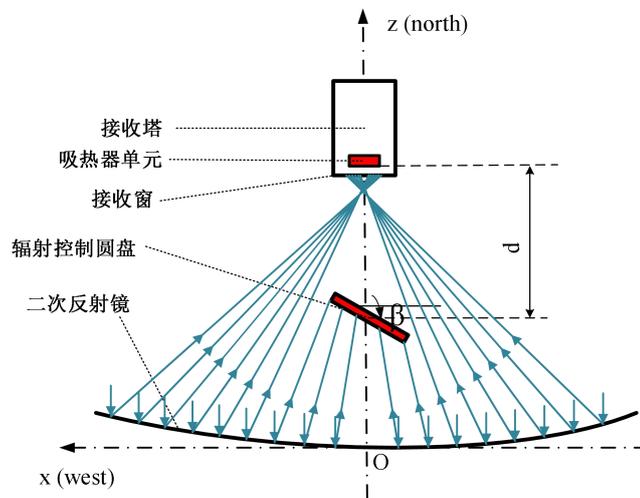


图 4 调整辐射控制圆盘角度

### 5.3 仪器及测量要求

#### 5.3.1 液体介质的测量要求

- 1) 温度传感器的精度应为 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ，同时还应装有防热辐射装置。
- 2) 进口温度传感器应安装在进口集箱内。
- 3) 出口温度传感器应安装在出口集箱内。
- 4) 为了使吸热器单元的进口温度接近设定值，应在进口罐内布置温度传感器。
- 5) 连续 2min 内，吸热器单元的进口和出口温度波动范围不超过  $2^{\circ}\text{C}$  即可认为达到稳定状态。
- 6) 对太阳盐介质而言，温度传感器的工作温度范围为  $200^{\circ}\text{C} \sim 800^{\circ}\text{C}$ 。
- 7) 可以采用流量计直接测量介质质量流量，精度应为 $\pm 2\%$ 。试验期间，泵及流量控制装置应能维持稳定的流量，流量的变化范围应稳定在 $\pm 1\%$ 以内。

#### 5.3.2 环境条件的测量要求

- 1) 必须选择晴朗天气。
- 2) 测量入射功率时，辐射计的精度应为 $\pm 3\%$ 。
- 3) 热效率测试过程中，应同时测量环境温度，精度应为 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 。
- 4) 用风速仪测量吸热器单元受热面附近空气流速。宜分别测量整个试验期间吸热器单元受热面附近上、中、下三个高度的平均风速，最后取三个高度对应风速的算术平均值作为该工况下的风速。风速测量误差应小于 5%。
- 5) 只需提供与吸热器单元受热面平行的水平方向的风速，如图 5 所示。可根据不同地域的气候特点，选取不同的风速进行测试。

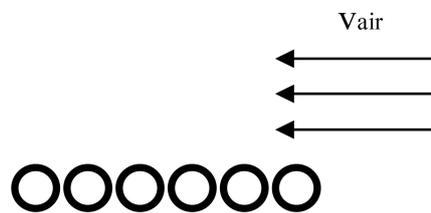


图 5 吸热器单元表面风速

#### 5.3.3 保温

整个测试系统中的管道必须采用隔热材料进行保温。

吸热器单元不接收辐射的一面必须做好保温措施。

隔热材料宜采用硅酸铝保温棉，隔热材料的厚度应符合《GB50264 工业设备及管道绝热工程设计规范》的规定，稳态条件下保温棉外表面温度与环境温度之间的差值不应超过  $15^{\circ}\text{C}$ 。

#### 5.3.4 入射功率调节

吸热器单元受热面的平均能流密度应不低于  $2.0 \times 10^5 \text{ W/m}^2$ ，其计算方法见附录 A.1。

测试过程中，辐射控制圆盘的调节距离  $d$  或者调节角度  $\beta$  应控制在合理范围内，使得吸热器单元受热面上能流密度分布仍然保持一定程度的均匀性。吸热器单元受热面上能量分布

均匀系数 $\gamma$ 应大于 0.75，其计算方法见附录 A.1。

#### 5.4 待测物理量

- 1) 吸热器单元内液体介质的进口 $T_{in}$ 和出口温度 $T_{out}$ 。
- 2) 吸热器单元内液体介质质量流量 $m$ 。
- 3) 测试过程中的太阳直射辐射 DNI。
- 4) 辐射控制控制圆盘距离  $d$  和角度 $\beta$ 。
- 5) 吸热器单元受热面辐射计读数 $f_{i,j_0}$ 。
- 6) 吸热器单元受热面附近平均风速 $v_{air}$ 。
- 7) 环境温度 $T_{air}$ 。

#### 5.5 测试步骤

整个测试过程分 A 组和 B 组进行，主要包括以下步骤：

- 1) 连接好光路系统和热回路系统，确认各仪表运行正常。
- 2) 根据测试工况，调节好吸热器单元受热面附近的风速。
- 3) 在 A 组中，调节辐射控制圆盘与吸热器单元之间的距离(记为 $d_A$ ) 或者调整其布置角度(记为 $\beta_A$ )，并调节液体介质的质量流量(记为 $m_A$ )，使得吸热器单元进口和出口温度分别达到设定值 $T_{in}$ 和 $T_{out}$ 并保持稳定。
- 4) 将朗伯板布置到吸热器单元的受光侧，打开 CCD 相机，测量入射功率 $P_{incA}$ ，此时入射功率系数为 $\varphi_A$ 。
- 5) 在 B 组中，调节辐射控制圆盘与吸热器单元之间的距离(记为 $d_B$ ) 或者调整其布置角度(记为 $\beta_B$ )，并调节液体介质的质量流量(记为 $m_B$ )，使得吸热器单元进口和出口温度分别达到设定值 $T_{in}$ 和 $T_{out}$ 并保持稳定。
- 6) 将朗伯板布置到吸热器单元的受光侧，打开 CCD 相机，测量入射功率 $P_{incB}$ ，此时入射功率系数为 $\varphi_B$ 。

至此，一个温区的测试过程结束。此后，应改变吸热器单元进口和出口温度，重复上述步骤，进行其它温区的测试（参见附录 D.2）。也可固定进口和出口温度，改变外界风速（见附录 D.3），重复上述步骤，测试外界风速的影响。

在同一组测试过程中，应确保 $|\varphi_A - \varphi_B| \leq 0.5$ 。

#### 5.6 数据处理及热性能分析

吸热器单元的热性能包括吸热器单元吸收率、吸热器单元热效率和吸热器单元热损率。下面给出相关数据处理方法，具体原理参见附录 A。

##### 5.6.1 吸热器单元热性能计算方法

- 1) 吸热器单元吸收率 $\alpha_{rcv}$

$$\alpha_{rcv} = \frac{P_{outpA} - P_{outpB}}{(\varphi_A - \varphi_B)P_{inc0}} \dots\dots\dots (1)$$

- 2) 吸热器单元热效率 $\eta_{rcv}$

$$\eta_{rcv} = \frac{\eta_{rcvA} + \eta_{rcvB}}{2} = \frac{\varphi_B P_{outpA} + \varphi_A P_{outpB}}{2\varphi_A \varphi_B P_{inc0}} \dots\dots\dots (2)$$

- 3) 吸热器单元热损率 $L_{rcv}$

$$L_{rcv} = \frac{L_{rcvA} + L_{rcvB}}{2} = \frac{(\varphi_A + \varphi_B)(\varphi_B P_{outpA} - \varphi_A P_{outpB})}{2(\varphi_A - \varphi_B)\varphi_A \varphi_B P_{inc0}} \dots\dots\dots (3)$$

4) 吸热器单元的输出功率 $P_{outp}$

$$P_{outp} = \dot{m}(c_{out}T_{out} - c_{in}T_{in}) \dots\dots\dots (4)$$

$P_{outpA}$ 和 $P_{outpB}$ 分别代表 A 组和 B 组的吸热器单元的输出功率。 $\varphi_A$ 和 $\varphi_B$ 分别代表 A 组和 B 组的入射功率系数。

### 5.6.2 吸热器单元热性能与运行工况之间的关系

吸热器单元受热面上平均能流密度、液体介质平均温度和外界风速对热性能的影响，可分别采用式（5）、式（6）和式（7）表示吸热器单元的热性能与运行工况之间的关系，并通过控制变量法分析单个因素的影响。

$$\alpha_{rcv} = f(Flux, T_{liq}, v_{air}) \dots\dots\dots (5)$$

$$\eta_{rcv} = f(Flux, T_{liq}, v_{air}) \dots\dots\dots (6)$$

$$L_{rcv} = f(Flux, T_{liq}, v_{air}) \dots\dots\dots (7)$$

式中， $Flux$ 为吸热器单元受热面上的平均能流密度，宜为 $2.0 \times 10^5 W/m^2 \sim 1.0 \times 10^6 W/m^2$ ； $T_{liq}$ 为吸热器单元进口和出口液体介质平均温度，可根据不同液体介质特性和实际运行工况选取； $v_{air}$ 为外界风速，宜不高于15m/s。另外，环境温度 $T_{air}$ 的范围宜为 $-30^\circ C \sim 50^\circ C$ 。

上述函数包含影响吸热器单元热性能的主要物理量，但是实际测试结果应分别针对单个影响因素给出，可参考附录 B 进行数据分析。

测试工况及函数关系可参考附录 B，在实际测试过程中，应根据具体情况选择测试工况和数据拟合方法。

## 5.7 误差分析与控制

### 5.7.1 系统误差

在实际测试过程中，A 组和 B 组对应的外界入射功率和液体介质流量不相同（ $\varphi$ 取不同值，假设 $\varphi_A > \varphi_B$ ）会导致吸热器单元吸收率的测试结果偏低、热效率的测试结果偏高、热损率的测试值偏低，但误差不超过 1%。

### 5.7.2 重复性试验

为了减小测试误差，本标准建议每个工况（A 组和 B 组）可进行三次重复试验，并取三次重复试验的算术平均值为最终测试结果。在对不同的工况进行重复试验时，应根据所设定的工况来判断重复试验的可靠性。重复试验之间的入射能流密度差异应在设定值的 $\pm 10\%$ 范围内，吸热器进口温度和出口温度应在设定值的 $\pm 2^\circ C$ 范围内，环境温度差异在设定值的 $\pm 5^\circ C$ 范围内，外界风速差异应在设定值的 $\pm 5\%$ 范围内。

## 5.8 吸热器单元热性能的比较

采用本标准的方法比较不同型号的太阳能盐介质吸热器单元热性能时，宜在下述测试工况范围内进行测试：

- 1) 吸热器单元受热面的平均能流密度  $3.0 \times 10^5 W/m^2 \sim 7.0 \times 10^5 W/m^2$ ；
- 2) 吸热器单元进口和出口液体介质平均温度  $350^\circ C \sim 550^\circ C$ ；
- 3) 外界风速宜不高于 5m/s。

测试结果可根据附录 B 所述函数关系进行拟合，进而获得选定的工况点对应的太阳盐介质吸热器单元热性能数据，并进行比较。选定的工况点可为：

- 1) 吸热器单元受热面的平均能流密度  $5.0 \times 10^5 \text{ W/m}^2$ ；
- 2) 吸热器单元进口和出口液体介质平均温度  $450^\circ\text{C}$ ；
- 3) 外界风速  $2.5\text{m/s}$ 。

其它液体介质可参考上述工况范围，并根据实际运行工况范围确定测试工况范围和选定的工况点。

## 6 测试报告

按照附录 C 中的要求详细记录测试过程中的天气条件和有关测试结果，测试结束之后将有关数据按照附录 D 的要求整理汇总。附录中的有关数据是以太阳盐为例，实际测试过程中可根据不同的液体介质对测试温区、能流密度和环境条件进行调整。

## 附录 A

### 吸热器热性能测试原理

#### A.1 入射功率测试原理

测试入射到吸热器单元上的辐射功率时，在辐射控制圆盘背光侧放一个 CCD 相机（图 A-1），同时在吸热器单元与接收窗口之间布置一块朗伯板（图 A-1）。朗伯板中心位置有一个辐射计，用于测试该位置的实际能流密度。

实际测试时，应在辐射计的读数稳定之后记下其读数，同时用 CCD 相机对准朗伯板拍照得到光斑的灰度图片。

处理数据时，将 CCD 相机所拍摄照片分为若干小区域，记为  $\Delta S_{ij}$  ( $1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n$ )，对应的灰度值为  $g_{ij}$ 。辐射计位置的灰度为  $g_{i_0j_0}$ ，测得的能流密度为  $f_{i_0j_0}$ 。则朗伯板上的总辐射能量按照式（A.1-1）计算。

$$P_{inc} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \frac{f_{i_0j_0}}{g_{i_0j_0}} g_{ij} \Delta S_{ij} \dots\dots\dots (A.1-1)$$

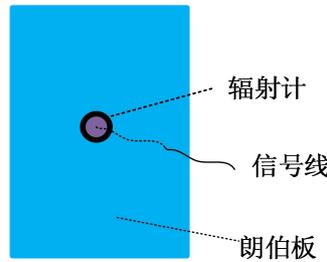


图 A-1 朗伯板示意图

注：当无法采用一个朗伯板完成较大区域的入射功率的测量时，可采用移动朗伯板或分块测试等方法。

得到总入射功率之后，根据式(A.1-2)计算吸热器单元受热面上的平均能流密度  $Flux$ ：

$$Flux = \frac{P_{inc}}{S_{rcv}} \dots\dots\dots (A.1-2)$$

$S_{rcv}$ 为吸热器单元受热面的投影面积。

进一步可以计算受热面上的能量分布均匀性系数 $\gamma$ ：

$$\gamma = 1 - \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n |f_{ij} - Flux|}{2mnFlux} \dots\dots\dots (A.1-3)$$

$f_{ij}$ 表示每个小区域 $\Delta S_{ij}$ 对应的能流密度，按照下式计算：

$$f_{ij} = \frac{f_{i_0j_0}}{g_{i_0j_0}} \cdot g_{ij} \dots\dots\dots (A.1-4)$$

#### A.2 吸热器单元吸收率测试原理

当投射到吸热器单元受热面的能流密度在一定范围内变化（ $\leq 50\%$ ），其余外界条件不变时，如果吸热器单元进口和出口液体介质温度保持不变，则吸热器单元表面的温度与外界入射功率的相关性可以忽略，即认为吸热器单元的热损失功率相等。

通过调节入射功率和液体介质的质量流量，使两次测试过程中吸热器单元的进口和出口

温度保持不变。根据所获数据计算得到吸热器单元的热损失功率，再结合吸热器单元的输出功率即可计算吸热器单元吸收率。

吸热器单元涉及的主要能量平衡方程如下：

$$P_{inc} = P_{ref} + P_{abs} \dots\dots\dots (A.2-1)$$

$$P_{abs} = P_{outp} + P_{los} \dots\dots\dots (A.2-2)$$

$$P_{los} = P_{los,rad} + P_{los,conv} + P_{los,cond} \dots\dots\dots (A.2-3)$$

其中,  $P_{inc}$ 、 $P_{ref}$ 和 $P_{abs}$ 分别表示吸热器单元的入射功率、反射功率和吸收功率,  $P_{outp}$ 和 $P_{los}$ 分别表示吸热器单元的输出功率和热损失功率,  $P_{los,rad}$ 、 $P_{los,conv}$ 和 $P_{los,cond}$ 分别表示辐射、对流和导热引起的热损失。在实际测试过程中, 吸热器单元的导热作用引起的热损失很小, 可以忽略不计。

当吸热器单元处于热平衡时, 其受热面上的入射功率等于吸热器单元的反射功率、输出功率和热损失功率之和。由于吸热器单元的能量透射可以忽略, 故吸收率 $\alpha_{rcv}$ 和反射率 $\rho_{rcv}$ 具有如下关系:

$$\rho_{rcv} = 1 - \alpha_{rcv} \dots\dots\dots (A.2-4)$$

于是有:

$$\alpha_{rcv}P_{inc} = P_{outp} + P_{los} \dots\dots\dots (A.2-5)$$

通过调节辐射控制圆盘与吸热器单元受热面之间的距离  $d$  或者角度 $\beta$ , 可以使吸热器单元受热面的入射功率变为:

$$P_{inc} = \varphi P_{inc0} \dots\dots\dots (A.2-6)$$

$$P_{inc0} = DNI_{max} \cdot S_{mir} \dots\dots\dots (A.2-7)$$

其中 $P_{inc0}$ 为最大极限参考值,  $DNI_{max}$ 为每一工况测试中 DNI 的最大值,  $S_{mir}$ 为每一工况测试中实际追日的定日镜镜面面积。  $\varphi$ 为采用辐射控制圆盘后吸热器单元受热面上的入射功率与最大极限参考值之比。

测试吸热器单元吸收率需要进行两组试验, 分别记为 A 组和 B 组。

A 组: 将辐射控制圆盘与吸热器单元受热面的距离调整为 $d_A$  (或者调整角度为 $\beta_A$ ), 此时实际入射功率为:

$$P_{incA} = \varphi_A \cdot P_{inc0} \dots\dots\dots (A.2-8)$$

B 组: 将辐射控制圆盘与吸热器单元受热面的距离调整为 $d_B$  (或者调整角度为 $\beta_B$ ), 此时实际入射功率为:

$$P_{incB} = \varphi_B \cdot P_{inc0} \dots\dots\dots (A.2-9)$$

得到:

$$\alpha_{rcv}\varphi_A P_{inc0} = P_{outpA} + P_{losA} \dots\dots\dots (A.2-10)$$

$$\alpha_{rcv}\varphi_B P_{inc0} = P_{outpB} + P_{losB} \dots\dots\dots (A.2-11)$$

通过调节液体介质流量使 A 组和 B 组中吸热器单元的进口和出口温度相同。由于吸热器单元的表面温度分布与吸热器单元的入射功率大小及液体介质的质量流量相关性很小, 可认为以上工况下吸热器单元的热损失功率相同, 即:

$$P_{losA} = P_{losB} = P_{los} \dots\dots\dots (A.2-12)$$

因此:

$$\frac{\varphi_A}{\varphi_B} = \frac{P_{outpA} + P_{los}}{P_{outpB} + P_{los}} \dots\dots\dots (A.2-13)$$

得到吸热器单元的热损失功率：

$$P_{los} = \frac{\varphi_B P_{outpA} - \varphi_A P_{outpB}}{\varphi_A - \varphi_B} \dots\dots\dots (A.2-14)$$

结合式 (A.2-2) 得到吸热器单元的吸收功率为：

$$P_{absA} = \frac{\varphi_A (P_{outpA} - P_{outpB})}{\varphi_A - \varphi_B} \dots\dots\dots (A.2-15)$$

$$P_{absB} = \frac{\varphi_B (P_{outpA} - P_{outpB})}{\varphi_A - \varphi_B} \dots\dots\dots (A.2-16)$$

吸热器单元的输出功率表示如下：

$$P_{outp} = \dot{m}(c_{out}T_{out} - c_{in}T_{in}) \dots\dots\dots (A.2-17)$$

其中,  $\dot{m}$  为液体介质的质量流量,  $T_{in}$  和  $T_{out}$  分别为吸热器单元进口和出口处液体介质的温度,  $c_{in}$  和  $c_{out}$  为吸热器单元进口和出口对应温度条件下的液体介质比热容。当  $T_{out}$  和  $T_{in}$  差别不是特别大时 (以太阳盐为例, 吸热器单元测试中, 进口和出口温差通常不超过 20℃), 液体介质的比热容变化很小, 此时可用进口和出口平均温度对应的比热容代替, 即：

$$c_{out} \approx c_{in} = c_{T_{liq}} \dots\dots\dots (A.2-18)$$

$$T_{liq} = \frac{T_{in} + T_{out}}{2} \dots\dots\dots (A.2-19)$$

此时有：

$$P_{outp} = \dot{m}c_{T_{liq}}(T_{out} - T_{in}) \dots\dots\dots (A.2-20)$$

吸热器单元吸收率定义为：

$$\alpha_{rcv} = \frac{P_{abs}}{P_{inc}} \dots\dots\dots (A.2-21)$$

结合式 (A.2-6) 和式 (A.2-16) 推导得到吸热器单元吸收率为：

$$\alpha_{rcv} = \frac{P_{outpA} - P_{outpB}}{(\varphi_A - \varphi_B)P_{inc0}} \dots\dots\dots (A.2-22)$$

### A.3 吸热器单元热效率测试原理

吸热器单元在测试工况范围内的热效率为：

$$\eta_{rcv} = \frac{P_{outp}}{P_{inc}} \dots\dots\dots (A.3-1)$$

取 A 组和 B 两组计算结果的算术平均值作为该温区的热效率值, 即：

$$\eta_{rcv} = \frac{\eta_{rcvA} + \eta_{rcvB}}{2} = \frac{\varphi_B P_{outpA} + \varphi_A P_{outpB}}{2\varphi_A \varphi_B P_{inc0}} \dots\dots\dots (A.3-2)$$

### A.4 吸热器单元热损率测试原理

吸热器单元在测试工况范围内的热损率为：

$$L_{rcv} = \frac{P_{los}}{P_{inc}} \dots\dots\dots (A.4-1)$$

取 A 组和 B 两组计算结果的算术平均值作为该温区的热损率值, 即：

$$L_{rcv} = \frac{L_{rcvA} + L_{rcvB}}{2} = \frac{(\varphi_A + \varphi_B)(\varphi_B P_{outpA} - \varphi_A P_{outpB})}{2(\varphi_A - \varphi_B)\varphi_A \varphi_B P_{inc0}} \dots\dots\dots (A.4-2)$$

## 附录 B

### 吸热器热性能与运行工况之间的关系

影响吸热器单元热性能的主要因素包括：受热面平均能流密度、液体介质平均温度和外界风速等。由于同时分析三个因素的影响比较困难，因此可采用控制变量法分别针对单个因素的影响进行分析。下面以传热介质为太阳盐的吸热器单元热效率为例进行说明。

#### B.1 吸热器单元热效率和平均能流密度之间的关系

在测试吸热器单元表面能流密度对吸热器单元热效率的影响时，由于环境温度变化对吸热器单元热性能的影响很小，所以只需保持外界风速以及吸热器单元的进口和出口温度不变。对每一工况的测试，应取 A 组和 B 组平均能流密度的算术平均值作为该组对应工况下的能流密度，即：

$$flux = \frac{Flux_A + Flux_B}{2} \dots\dots\dots (B.1-1)$$

此时，上式(A.3-1)计算所得结果表示 A 组和 B 组对应能流密度区间内的热效率。

改变定日镜数量或者在一天中不同时间段（DNI 变化较大）进行测试，可在较大范围内调节吸热器单元受热面上的能流密度，从而得到吸热器单元热效率与能流密度之间的关系，可将其表示为下列所示多项式函数，即：

$$\eta_{rcv} = a_1 + a_2 flux + a_3 flux^2 \dots\dots\dots (B.1-2)$$

同时，对每一个不同的  $flux$ ，还应在多种液体介质温度条件下进行测试，并将其绘制在同一幅图中，如下图所示：

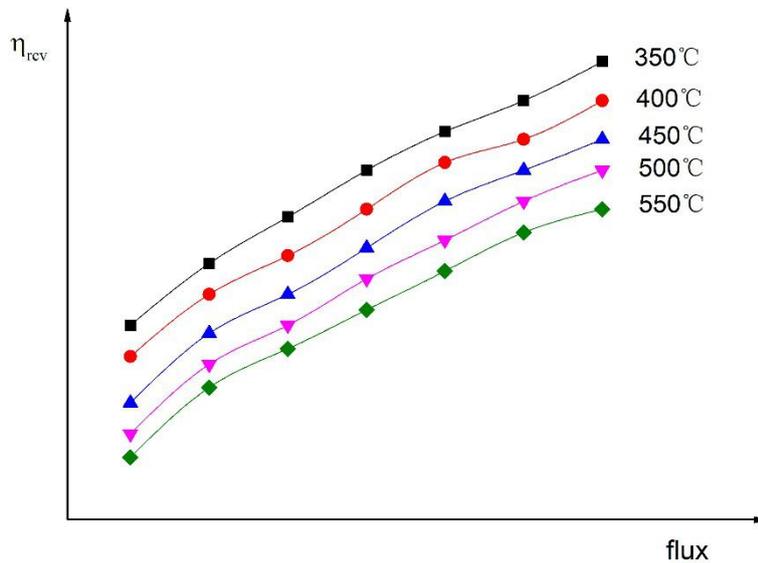


图 B-1 吸热器单元热效率和平均能流密度之间的关系

#### B.2 吸热器单元热效率和液体介质平均温度之间的关系

对吸热器单元在不同温区的热效率进行测试，得到热效率与液体介质温度之间的关系，如下图所示。也可将其表示为多项式函数，即：

$$\eta_{rcv} = b_1 + b_2 T_{liq} + b_3 T_{liq}^2 \dots\dots\dots (B.2-1)$$

同时，对每一个不同的 $T_{liq}$ ，应在多种能流密度条件下进行测试，并将其绘制在同一幅图中，如下图所示：

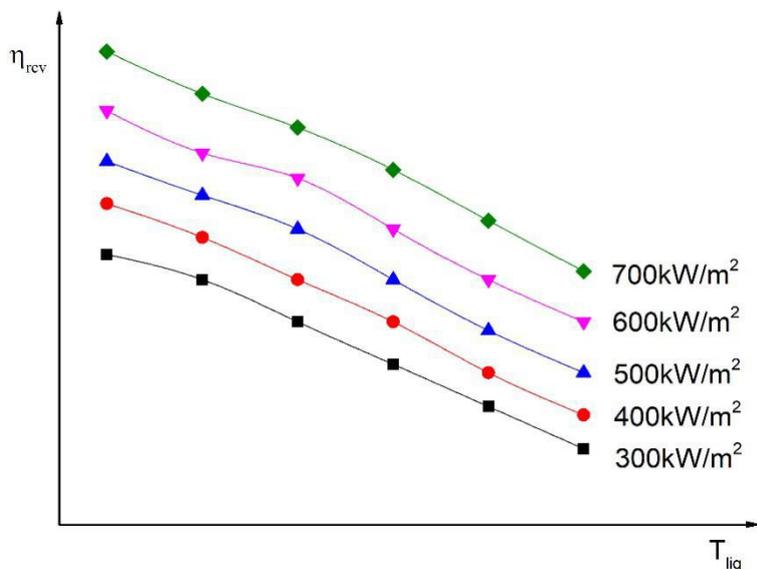


图 B-2 吸热器单元热效率和液体介质平均温度之间的关系

### B.3 吸热器单元热效率和外界风速之间的关系

与前面类似，可以测得外界风速对热效率的影响。

$$\eta_{rcv} = c_1 + c_2 v_{air} + c_3 v_{air}^2 \dots\dots\dots (B.3-1)$$

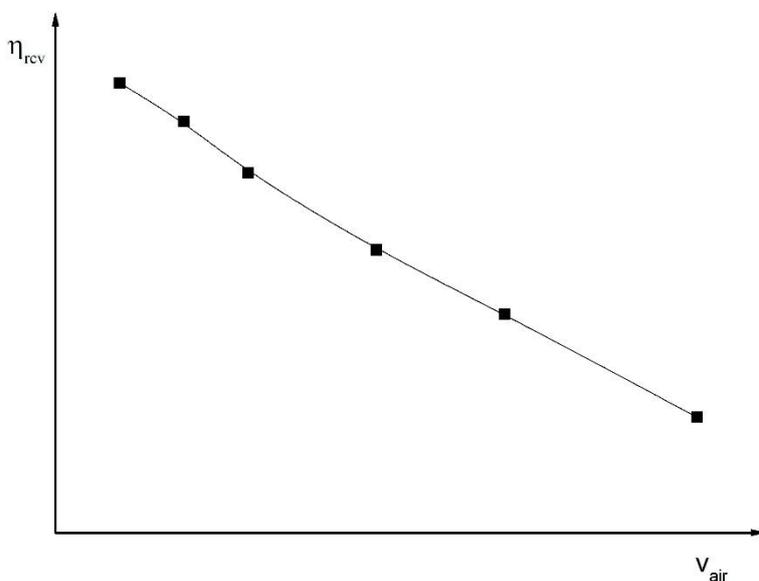


图 B-3 吸热器单元热效率和外界风速之间的关系

吸热器单元吸收率和热损率与各种影响因素之间的关系可以参照上述关系进行分析，此处不再赘述。需要注意的是，上述测试工况及函数关系仅做参考，在实际测试过程中，应根据具体情况选择测试工况和数据拟合方法。

## 附录 C

### 测试数据记录

#### C.1 测试设备记录

表 C.1 测试设备记录表

| 类别     | 名称 | 规格型号 | 生产厂家 | 精确度 | 备注 |
|--------|----|------|------|-----|----|
| 温度测量   |    |      |      |     |    |
|        |    |      |      |     |    |
| 风速测量   |    |      |      |     |    |
| 流量测量   |    |      |      |     |    |
| 距离测量   |    |      |      |     |    |
| 角度测量   |    |      |      |     |    |
| DNI 测量 |    |      |      |     |    |
| CCD 相机 |    |      |      |     |    |
| 辐射计    |    |      |      |     |    |
| 朗伯板    |    |      |      |     |    |

## C.2 测试数据记录

表 C.2 测试数据记录表

|          |                                |                |             |      |     |
|----------|--------------------------------|----------------|-------------|------|-----|
| 概况       | 测试日期                           |                |             | 测试时间 |     |
|          | 测试地点                           |                |             | 经纬度  |     |
|          | 吸热器单元尺寸（宽度、受热面长度、吸热管外径、壁厚、材料等） |                |             | 天气条件 |     |
| 测试数据记录   | 测试项目                           | 符号             | 单位          | A 组  | B 组 |
|          | 追日定日镜的镜面总面积                    | $S_{mir}$      | $m^2$       |      |     |
|          | 吸热器单元受热面投影面积                   | $S_{rcv}$      | $m^2$       |      |     |
|          | 测试开始时间                         | $\tau_{ini}$   | 1           |      |     |
|          | 测试结束时间                         | $\tau_{end}$   | 1           |      |     |
|          | 吸热器单元进口温度                      | $T_{in}$       | $^{\circ}C$ |      |     |
|          | 吸热器单元出口温度                      | $T_{out}$      | $^{\circ}C$ |      |     |
|          | 进口罐温度                          | $T_{cool}$     | $^{\circ}C$ |      |     |
|          | 出口罐温度                          | $T_{hot}$      | $^{\circ}C$ |      |     |
|          | 环境温度                           | $T_{air}$      | $^{\circ}C$ |      |     |
|          | 风速                             | $v_{air}$      | m/s         |      |     |
|          | 测试期间直射辐射最大值                    | $DNI_{max}$    | $W/m^2$     |      |     |
|          | 入射功率                           | $P_{inc}$      | W           |      |     |
|          | 平均能流密度                         | $Flux$         | $W/m^2$     |      |     |
|          | 能量分布均匀系数                       | $\gamma$       | 1           |      |     |
|          | 辐射控制圆盘距离                       | d              | m           |      |     |
|          | 辐射控制圆盘角度                       | $\beta$        | $^{\circ}$  |      |     |
| 辐射功率调节系数 | $\varphi$                      | 1              |             |      |     |
| 液体介质质量流量 | $\dot{m}$                      | kg/s           |             |      |     |
| 测试结果     | A 组和 B 组平均能流密度的算数平均值           | $flux$         | $W/m^2$     |      |     |
|          | 液体介质平均温度                       | $T_{liq}$      | $^{\circ}C$ |      |     |
|          | 吸收功率                           | $P_{abs}$      | W           |      |     |
|          | 热损失功率                          | $P_{los}$      | W           |      |     |
|          | 输出功率                           | $P_{outp}$     | W           |      |     |
|          | 吸热器单元吸收率                       | $\alpha_{rcv}$ | 1           |      |     |
|          | 吸热器单元热效率                       | $\eta_{rcv}$   | 1           |      |     |
|          | 吸热器单元热损率                       | $L_{rcv}$      | 1           |      |     |
| 备注       |                                |                |             |      |     |

## 附录 D

### 测试结果汇总表

**D.1 吸热器单元热效率 $\eta_{rcv}$ (吸收率 $\alpha_{rcv}$ 或热损率 $L_{rcv}$ )和受热面平均能流密度 flux 之间的关系。**

表 D.1  $\eta_{rcv}$ ( $\alpha_{rcv}$ 或 $L_{rcv}$ )与 flux 之间的关系 (汇总表, 以太阳盐为例)

| 风速 $v_{air}$ (m/s)   |                      |                      |                      |                      |                      |
|--|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 平均能流密度 (W/m <sup>2</sup> )<br>$flux = \frac{Flux_A + Flux_B}{2}$                 | $T_{liq} =$<br>350°C | $T_{liq} =$<br>400°C | $T_{liq} =$<br>450°C | $T_{liq} =$<br>500°C | $T_{liq} =$<br>550°C |
| 200  |                      |                      |                      |                      |                      |
| 300  |                      |                      |                      |                      |                      |
| 400  |                      |                      |                      |                      |                      |
| 500  |                      |                      |                      |                      |                      |
| 600  |                      |                      |                      |                      |                      |
| 700  |                      |                      |                      |                      |                      |
| 800  |                      |                      |                      |                      |                      |
| $\eta_{rcv} = a_1 + a_2 flux + a_3 flux^2$ (可分不同温度讨论)<br>$a_1 =$ $a_2 =$ $a_3 =$ |                      |                      |                      |                      |                      |
| 备注:<br>1) 本表只对结果做了汇总, 实际测试过程中仍应按照附录 C 中的要求详细记录。<br>2) 应按照本表格式记录各种工况下三次重复试验的结果。   |                      |                      |                      |                      |                      |

**D.2 吸热器单元热效率 $\eta_{rcv}$ (吸收率 $\alpha_{rcv}$ 或热损率 $L_{rcv}$ )和液体介质平均温度 $T_{liq}$ 之间的关系。**

表 D.2  $\eta_{rcv}$ ( $\alpha_{rcv}$ 或 $L_{rcv}$ )和 $T_{liq}$ 之间的关系 (汇总表, 以太阳光为例)

| 风速 $v_{air}$ (m/s)   |                                |                                |                                |                                |                                |
|--|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 液体介质平均温度 $T_{liq}$ (°C)  | flux = 300<br>W/m <sup>2</sup> | flux = 400<br>W/m <sup>2</sup> | flux = 500<br>W/m <sup>2</sup> | flux = 600<br>W/m <sup>2</sup> | flux = 700<br>W/m <sup>2</sup> |
| 300  |                                |                                |                                |                                |                                |
| 320  |                                |                                |                                |                                |                                |
| 340  |                                |                                |                                |                                |                                |
| 360  |                                |                                |                                |                                |                                |
| ...  |                                |                                |                                |                                |                                |
| 540  |                                |                                |                                |                                |                                |
| 560  |                                |                                |                                |                                |                                |
| $\eta_{rcv} = b_1 + b_2 T_{liq} + b_3 T_{liq}^2$ (可分不同入射能流密度讨论)<br>$b_1 =$ $b_2 =$ $b_3 =$ |                                |                                |                                |                                |                                |
| 备注:<br>1) 本表只对结果做了汇总, 实际测试过程中仍应按照附录 C 中的要求记录。<br>2) 应按照本表格式记录各种工况下三次重复试验的结果。               |                                |                                |                                |                                |                                |

**D.3 吸热器单元热效率 $\eta_{rcv}$ (吸收率 $\alpha_{rcv}$ 或热损率 $L_{rcv}$ )和外界风速 $v_{air}$ 之间的关系。**

表 D.3  $\eta_{rcv}$ ( $\alpha_{rcv}$ 或 $L_{rcv}$ )和 $v_{air}$ 之间的关系 (汇总表)

|   |                  |                                    |                  |                              |                  |
|---|------------------|------------------------------------|------------------|------------------------------|------------------|
| 液体介质平均温度 (°C)   |                  | 平均能流密度( $W/m^2$ )                  |                  |                              |                  |
| $T_{liq} = \frac{T_{in} + T_{out}}{2}$                                      |                  | $flux = \frac{Flux_A + Flux_B}{2}$ |                  |                              |                  |
| 风速 $v_{air}$ (m/s)<br>重复试验 1  | 热效率 $\eta_{rcv}$ | 风速 $v_{air}$ (m/s)<br>重复试验 2       | 热效率 $\eta_{rcv}$ | 风速 $v_{air}$ (m/s)<br>重复试验 3 | 热效率 $\eta_{rcv}$ |
| 0.5   |                  |                                    |                  |                              |                  |
| 1.0   |                  |                                    |                  |                              |                  |
| 2.0   |                  |                                    |                  |                              |                  |
| 5.0   |                  |                                    |                  |                              |                  |
| 7.0   |                  |                                    |                  |                              |                  |
| 10  |                  |                                    |                  |                              |                  |
| 15  |                  |                                    |                  |                              |                  |
| $\eta_{rcv} = c_1 + c_2 v_{air} + c_3 v_{air}^2$<br>$c_1 =$ $c_2 =$ $c_3 =$ |                  |                                    |                  |                              |                  |
| 备注: 本表只对结果做了汇总, 实际测试过程中仍应按照附录 C 中的要求详细记录各种信息。                               |                  |                                    |                  |                              |                  |