

天津瑞析科技有限公司报价单

太阳能光热转换海水淡化测试系统配置单（说明示意图中采用热电偶传感器加数据采集器方式，现在多采用红外热成像仪，可以得到温度数据和温度分布图像）

名称

报价

参数

太阳能模拟氙灯光源

37500

1光谱范围0.2—2.5mm, 2光源亮度40000cd/cm², 3光源德国进口, (含电源7IPX500, 1额定功率500W, 2电流调节范围22-30A, 3输出电流漂移±0.1%/h) (赠出光口配置可调光阑) (赠AM1.5太阳能1波长范围: 190nm-11000nm紫外可见红外可连续测量或分段测量

全谱光功率计

12000

2功率范围: 0-2500mw/cm²可换自动换挡挡测量, 保证同时测量弱光的精度和强光的精度

万分之一天平

12000

3测试输出光功率值 mw
1最大称量 220 g
2可读性 0.1 mg
3重复性测试载荷 0.1 mg (200 g)
4最小称量值 (USP, 0.1%, 典型值) 0.16 g
5校正 外部 (赠输出数据连接线, 控制程序) (电脑WIN7或者WIN10系统)

红外热成像

35000

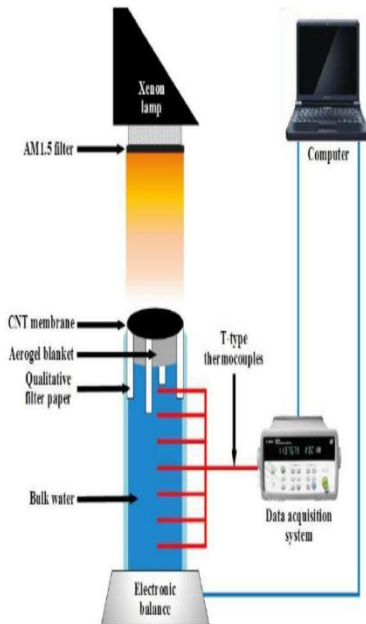


图2-2 太阳能蒸发系统示意图



Fluke TiS60+ 热像仪

热像仪



背景介绍

近年来，界面光蒸汽转换 (interfacial solar vapor generation) 作为新兴的太阳能利用技术，因其拥有较高的光热-蒸汽转换效率，以及在海水淡化、杀菌、发电、分馏等诸多领域具有很好的应用前景，引起了学界、产业界的广泛关注。

在过去的几年时间里，世界各地的诸多研究小组通过材料结构设计、光学调控、热学管理以及水通道的设计，获得了较好的光蒸发性能。同时，在众多发表的工作中，能量转化效率的测量方法并不统一，这使得客观比较不同材料和设计变得困难。所以，制定准确、客观、统一的光热-蒸汽转化效率测量标准尤为重要，并逐渐发展成为该领域的一个重要共识。

近日，来自中国南京大学的朱嘉教授团队、美国麻省理工学院的 George Ni 和加拿大约克大学的 Thomas Cooper 博士联合在 Joule 上撰写了题为“Measuring conversion efficiency of solar vapor generation”的评论文章，**从测试条件、光功率、蒸发速率和蒸发焓四个方面对转化效率的测量和计算进行全面的总结和梳理，介绍了如何准确测量得到热-蒸汽能量转化效率。**希望本文能够帮助研究者更加客观地对光热-蒸汽转化效率进行评价，为该领域进一步探索科学问题和推进实际应用提供有效的反馈。

图文介绍

目前光-蒸汽的转化的瞬时效率一般表示为：

$$\eta = \dot{m} h_{fg} / P_{in}$$

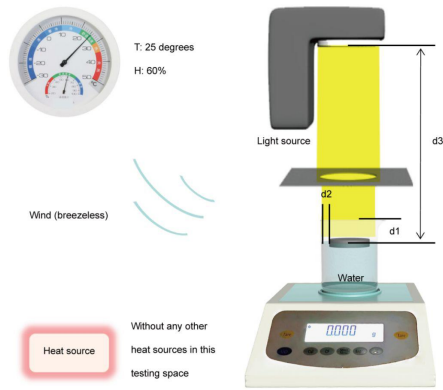
其中 \dot{m} 表示蒸发率 ($\dot{m} = \dot{m}_{Light} - \dot{m}_{Dark}$)， \dot{m}_{Light} 和 \dot{m}_{Dark} 分别表示在光照和无光照(暗场)条件下的蒸发速率。 h_{fg} 表示蒸发焓(注：该公式中的 \dot{m}_{Dark} 将被修正，见下文)。

1. 测试条件

为了确保测试的统一性，文中首先介绍了测试的温度，湿度以及风速的影响(图1)。因此，为了客观的衡量性能，文中推荐了全世界大多数地区是较易达到的实验条件：测试温度为 25 °C，湿度为 60 %，无风。同时对于测试所使用的装置也进行了相应讨论，如测试容器的选择要避免底部边界对热通量的影响。

文章对于三个重要的距离(分别是吸收器和烧杯边缘之间的距离 d_1 (图1)；吸收器和烧杯壁之间的距离 d_2 (图1)；和吸收器与光源之间的距离 d_3 (图1)) 的选择对实验可能产生的影响也进行了相应的讨论。合适的 d_1 是非常重要的，这可以确保吸收体产生的蒸汽不会冷凝在烧杯的侧壁上。 d_2 过大会导致额外暴露在液体-空气界面的蒸发。例如对于一个直径为 50 mm 的样品，1 mm 的空隙会导致 4 % 的误差。因此， d_2 要尽可能的小。对于 d_3 ，它应该足够的小来确保蒸汽可以充分扩散。最小的距离应该是在大于该距离时，质量减小速率与 d_3 没有依赖关系。

文章总结归纳了若干可能引入实验误差的因素，并进行了相应分析：(1) 测试等待时间，推荐将样品放置在水面上后、打开光源之前要等待一段时间，确保吸收体被充分浸润；(2) 烧杯壁上有无液体残留，因为这会导致光照下额外的蒸发；(3) 天平精度应该大于 0.001 g 并且有一个防风罩，这是因为防风罩可能会阻止蒸汽散逸；(4) 外部热源必须被移除，因为这可能会为蒸发过程提供可能的能量输入。



▲图1. 光热-蒸汽转化效率测试系统示意图。

2. 光功率

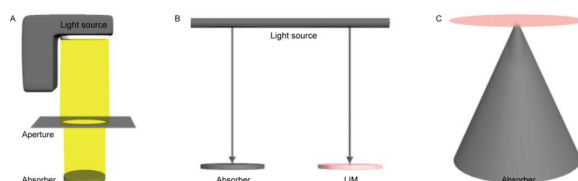
精确测量入射光功率是非常重要的。该部分首先讨论了基于 **thermopiles** 的光功率计和基于标准硅电池差异以及可能造成的实验误差，同时也讨论了测试中对于光源的要求。**thermopiles** 的光功率计有相对宽谱的响应，通常比 280-2500 nm 宽。标准硅电池对带隙以下的光子 (>1200 nm) 有很低的吸收。因此，如果光源在长波长有光谱发射，硅电池不能够探测到这部分能量。在这种情况下，文中推荐使用基于 **thermopiles** 的光功率计来测量入射光强。基于 **thermopiles** 的光功率对于标定光源也是相对理想的，因为 **thermopiles** 反射率的变化与入射光源的光谱相一致。

除了光源的仔细测量，另外一些因素也应该被充分考虑。（1）如图2A 所示，光斑的大小必须利用一个光阑来控制，以使得光斑大小与样品的尺寸一致。如果光斑太大，额外的照射区域会加热环境或者容器，可能会为蒸发区域提供额外未计入的热能输入。

（2）如图2B 所示，在测量入射光强时，必须确保吸收体和光强测量仪是处于同一高度。（3）光斑的均匀性也要被考虑，尤其是在校准阶段（理想的情况是给出光照的空间分布图）。（4）检测光强在测试过程中实时保持稳定也是非常重要的，因为在蒸发过程中，容器中水面的位置会下降。

商业化的配备氙灯的太阳光模拟器可以产生非常一致的光谱，并且有很好的空间和时间一致性。对于 A 级（或者 AAA 级）太阳光模拟器，他们的空间和时间不均匀性小于 2 %。如不能获得商业化太阳光模拟器，报道光源的光谱、空间和时间的性能是非常有必要的。

对于近几年兴起的三维（3D）吸收体，有两个事宜经常会导致困惑。首先是光强度的测量，另一个是在效率公式中吸收体面积的计算。对于一个 3D 吸收体，文中推荐使用上表面的投影面积（如图3C 所示），来计算转化效率。在上部投影面积的总能量等于吸收体在平行光下接收到的能量（在非平行光照射下，光照强度随着 3D 吸收体的高度改变，并且在实验室非常难以测量总的入射光照强度，尤其是对于光照强度大于 1 Sun）。



▲图2。（A）利用光栅控制光斑大小。（B）光强标定高度的选择。（C）三维（3D）吸收体的光功率密度的标定。

3. 蒸发速率

在计算蒸发效率过程中如何定义合理蒸发速率存在一些疑虑。通常认为在测试系统达到稳态时，水体质量随时间变化曲线的斜率为蒸发速率。但是，对于在不照光的情况下的蒸发速率（暗场蒸发）是否要减去仍然没有统一的结论。如图3A 所示的第一种情

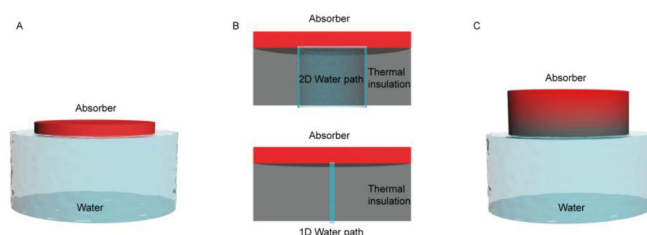
况，如果光照下吸收体的温度大于环境温度，暗场蒸发应该被减掉。二维或者一维的水通道被广泛用来降低传热损失。文中推荐使用这种局域的水通道来进行测试，因为这种情况下水通道暗场蒸发可以最小化，甚至可以被忽略 (图3B)。

对于第二种情形 (图3C)，如果如果只是部分吸收体吸收太阳光，吸收体会会有一个温度分布。如果吸收体一部分温度低于环境温度，就会有环境向吸收体表面的能量注入，导致蒸发。在这种情形下，为了合理估计能量转化效率，暗场蒸发应该被减掉。如该部分首先系统介绍了蒸发速率的计算方法，以及暗场蒸发速率应不应该考虑的问题。对于所有的情况，推荐报道暗场蒸发测试结果。这不仅可以提供关于测试环境条件的有效信息，同时也可以作为比较光照下蒸发速率的基线。

与此同时，关于蒸发速率，还有若干问题需要注意：

- (1) 如果水的蒸发焓没有改变，在 1 sun 光照下的最大蒸发速率约为 $1.47 \text{ kg/m}^2\text{h}$ 。
- (2) 吸收体本身需要是稳定的，即吸收体在光照下质量不会改变。
- (3) 吸收体的面积计算应该要非常小心，尤其对于形状不规则的样品。
- (4) 吸收体的尺寸会影响蒸发速率，因为蒸汽在离开吸收体时可以从多个方向扩散。

对于吸收体直径，一个厘米级的误差会导致蒸发传热系数的很大改变。因此，在探索从小面积吸收体到大规模应用的实验研究时，必须十分小心谨慎。



▲图3。(A)和(C)太阳能界面蒸汽装置示意图。(B)具有二维和一维供水通道的界面太阳能蒸汽装置示意图。

4. 蒸发焓

在太阳能蒸汽产生中，蒸发过程的焓变包含两个部分。第一部分是显热，即从 T_1 达到 T_2 温度的能量差。第二部分是相变潜热，即 T_2 温度的液态水转变为气态过程所需要的能量。文中建议在计算太阳能到蒸汽能量转化效率的过程中，将显热考虑进来。

像之前提到的，蒸发温度对于计算焓值非常重要。通常情况下使用两种一起来测量蒸发温度：红外相机和热电偶。在使用红外相机时，必须考虑中间介质，因为它可能会影响目标物体热辐射的改变。例如我们通常会看到利用红外相机透过烧杯来读取水体的温度。读出的温度要比实际的水体温度低数摄氏度。对于热电偶，应尽量避免热电偶引入额外的能量。将热电偶放在吸收体上时，热电偶本身会吸收太阳光，进而造成自身温度上升，导致实验误差 (最高可达 $5-10 \text{ }^\circ\text{C}$)。使用涂有 TiO_2 或 BN 的热电偶可有效降低光照的干扰，或通过热电偶垂直插入吸收体中，可以有效避免由太阳辐射所引起的干扰。另一种方法是使用小型热电偶，可以有效地减少辐射所引起的误差 (对流换热系数与 $1/D$ 成比例，而辐射换热系数不随尺寸而变化。)

5. 其他

现今，随着太阳能蒸汽技术的发展，一些密封装置被设计出来并用于室外实验，例如在自然光照下的湖和海。在这种情况下，文中建议除了上述太阳能光热蒸汽转化效率提到的参数，还要测量产出、环境和水温、太阳光实时入射强度、环境风速来全面衡量室外测试条件，以期帮助不同材料/系统，不同测试条件之间进行更加客观的比较。

该文章系统地讨论了与光热蒸汽转化能量计算相关的考量以及一些关键参数。这些参数包括光功率、蒸发速率和蒸发焓。文章也给出了如何准确获得这些参数的例子。希望这篇文章可以通过建立能量转化效率、蒸发速率的统一测量方法，为这个蓬勃发展的领域的可持续发展奠定坚实的基础。