

1 向空气要水的沙漠小甲虫 *Stenocara*

纳米比亚沙漠是地球上极度炎热干旱的地区之一,那里几乎四季无雨,但其昼夜温差较大,空气相对湿度变化也很大,且每月大西洋的海风也会为此地区带来湿气,生存其中的 *Stenocara* 可利用它特殊的背部表面获取含湿空气中的水分。如图 1 所示, *Stenocara* 集水时,头部朝着风向,背部与地平面大约成 45 度角,这样便可利用背部收集湿空气中的水蒸汽。Andrew 对 *Stenocara* 背部具体结构进行了研究,并对相应仿生表面的集水效果进行了实验分析,得到了一些定性的有益结论^[5-6]。



图 1 *Stenocara* 背部集水图

Fig.1 Water capture from air by *stenocara*

1.1 *Stenocara* 背部的表面特性

Andrew 的研究结果表明, *Stenocara* 背部是由一层疏水性基底和一些在其上间隔排布的亲水突起组成,具体结构如图 2 所示^[5]。

图 2(a)是一成年雌性 *Stenocara* 甲虫的背部,可以看到背部有很多无规则排列的突起。突起的直径在 0.5 mm 左右,各突起间距 0.5~1.5 mm。图 2(b)是其中一个突起的放大图,经染色处理后,可知突起顶部光滑洁净,无覆盖物,并具有亲水性质,而侧斜面 and 底面基体则有一层疏水物覆盖。图 2(c)是在电子显微镜下观测到的疏水表面,可知高度疏水的表面上有很多平的半球形结构,它们呈规则的六边形排列,每个半球的直径是 10 μm 。

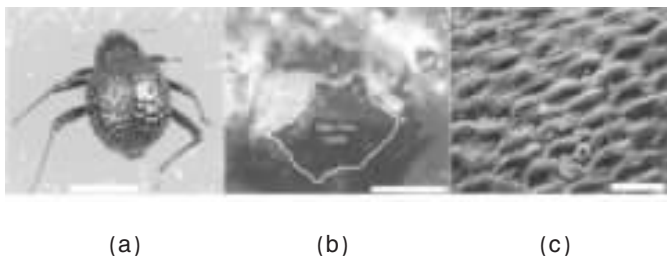


图 2 *Stenocara* 背部结构图

Fig.2 The *stenocara* beetle's back

1.2 仿生表面集水实验分析

Andrew 在观察 *Stenocara* 背部凝水时发现:含湿空气掠过甲虫背部时,水滴在亲水突起顶端形成,并不断凝聚空气中的水分,以至迅速长大,那些撞到疏水表面上的水滴也会弹到或被风吹到亲水区域,加速水滴长大,当水滴长大至 5 mm 左右时,就会从背部脱落。而水滴从形成到脱落的过程中,并不会被风吹走。这是因为它的表面积远没有体积增长得快。由此,Andrew 利用欧拉第一定律的控制容积形式,简略导出了临界风速与脱落直径的关系^[5-6]:

$$v \approx \sqrt{\left[\left(\frac{\rho_{\text{water}}}{\rho_{\text{air}}} \right) \left(\frac{3}{4} \right) R g \sin(\theta) \right]} \quad (1)$$

式中 R 是水滴半径, m; g 是重力加速度, $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$; θ 是倾斜角度, 度; ρ 是密度, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

为分析 *Stenocara* 背部结构和集水效果间的关系, Andrew 进行了类似甲虫集水过程的集水实验, 定性分析了测试表面的不同表面特性对集水量的影响^[5]。

实验中, 制作了一系列测试表面, 包括: ① 完全疏水的光滑表面(类似聚乙烯材料); ② 完全亲水的光滑表面(类似玻璃表面); ③ 疏水基底上整齐排列亲水小突起的表面; ④ 疏水基底上无规则随机排列亲水小突起的表面。其中表面③和④是在一层薄的蜡质表面上间隔嵌入了许多直径大约为罂粟种子大小的玻璃球制成的。在同样的环境模拟系统中, 对不同的测试表面进行了集水实验, 并通过对凝集水的收集、称重, 定性分析了不同表面特性与集水量间的关系。

实验表明, 表面③和④均比①和②收集的水多。因为, 表面①上的水滴较小, 容易被风带走, 或者在表面上弹落; 而在②表面上易形成水膜, 且凝集水流路不可预测, 也导致了集水困难。

1.3 *Stenocara* 向空气要水的启示

生物体的独特能力给社会进步和人类发展作出了许多贡献, 诸多高科技含量的技术均是从自然界中的生物体借鉴而来的。 *Stenocara* 向空气要水以满足生存所需的办法^[5-9], 给人类解决某些特殊情况下的淡水获取问题提供了新思路。尽管 Andrew 对 *Stenocara* 仿生表面的集水效果仅进行了定性研究, 然而这种特殊表面可使集水尽可能多的结论却给我们带来了有益思考, 即制作出甲虫背部的仿生表面, 用以实现一种高效的空气取水技术, 满足人类在不同情况下的淡水需求。

自 1992 年俞乔力提出空气取水方法以来^[10], 英、德、法、美、中亚及南美洲地区的许多国家纷纷开始对空气取水进行研究^[11-16]。但是空气取水面临的主要问题就是取水率较低, 这在一定程度上限制了它的推广应用。为解决这一问题, 科研人员进行了不同探索, 但针对材料表面特性而进行的提高取水率的工作却未见报道。因此, 将 *Stenocara* 的特殊背部表面和空气取水结合起来, 有可能给我们提供一种提高取水率的新思路。

2 空气取水

空气作为自然界水循环过程中水蒸汽存在的一种介质, 携带水蒸汽完成循环。采取一定方法收集空气中的水资源并加以利用, 即为空气取水技术。根据采用方法不同, 空气取水技术可分为传统方法和非传统方法两类, 如图 3 所示。

所谓传统方法是指降雨时收集雨水, 这主要依靠大气降水, 即靠天取水^[17], 本文不加叙述。

非传统方法是指将湿空气中以水蒸汽或微小水滴形式存在的水资源转化为液态水的方法, 主要有制冷结露法、吸附法及聚雾取水法 3 种。

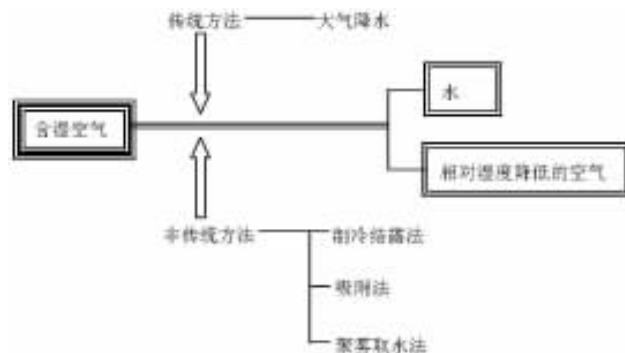


图 3 空气取水类型示意图

Fig.3 The types of water capture from air

2.1 制冷结露法

制冷结露法是将湿空气的温度降到露点以下,使其中的水蒸汽结露,从而获得液态水的方法。

1993 年法国科学家 Y.Jannot^[11]提出了一种利用制冷结露法进行空气取水的系统,并进行了实验分析,如图 4 所示。此系统利用太阳能吸附式热泵的蒸发端对凝水表面进行冷却,使空气中的水蒸汽结露,水在重力作用下落入下方集水盘中,并汇集至存水器中贮存。但实验研究表明,由于系统的能量转换环节较多,造成可用能损失较大,累积取水率较低。

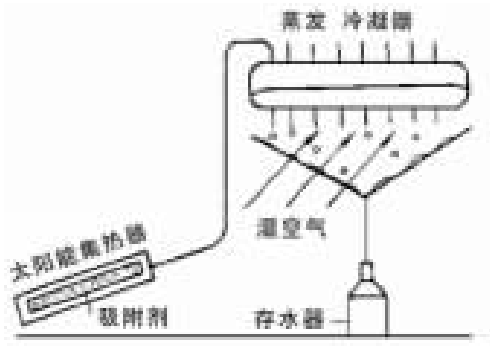


图 4 太阳能吸附式热泵制冷结露法空气取水系统
Fig.4 System of solar-energy adsorption pump refrigeration dewfall-based water collector from air

为提高制冷结露法的取水率,科研人员致力于对系统进行优化设计,并尝试采用不同的制冷形式。较有代表性的是太阳能半导体制冷结露法空气取水系统^[12],如图 5 所示。它采用太阳能半导体制冷对凝水表面冷却,同时在系统中添加回热器,使从凝水室出去的温度较低的空气和进入取水器的空气充分换热,从而使湿空气在进入冷板前得到预冷,同时也回收了冷量。此方法减少了能量转换环节,并回收了凝结水后空气的冷量,取水率有一定提高,初步解决了由于中间能量转换环节导致的低取水率问题。

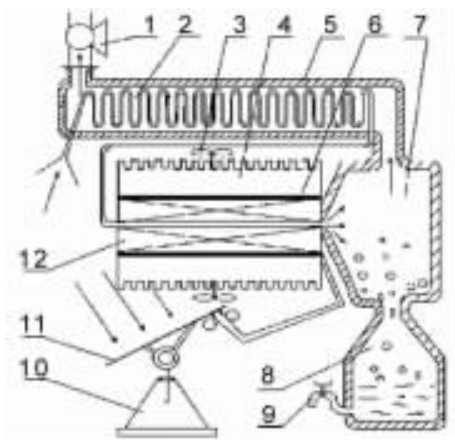


图 5 太阳能半导体制冷结露法空气取水系统
Fig.5 System of solar-energy semiconductor refrigeration dewfall-based water collector from air

注:1 风机;2 板式回热器;3 散热器;4 散热片;5 隔热层;6 热电堆;
7 凝水室;8 集水器;9 放水阀门;10 二维自动旋转台;
11 可折叠式太阳能电池板;12 冷板

2.2 吸附法

含湿空气流过吸附剂,其中的水蒸汽被吸附,然后加热吸附

剂使水分脱附,从而得到淡水,即为吸附法^[13]。

吸附剂有固态和液态 2 种。固态多采用新型复合多孔介质,液态为某些强吸湿性的浓溶液,但因大部分浓溶液对人体有危害,所以一般多采用固态吸附剂。

1992 年俞乔力等人提出了一种高效太阳能吸附式空气取水方案^[10],并进行了后续研究。如图 6 所示,夜晚吸附剂从流动的低湿空气中吸附水分,白天吸附剂被密封在玻璃容器中,利用太阳光聚焦加热使其水分脱附,水蒸汽在容器内表面凝结、汇集,实现空气取水^[13]。

关于吸附法,国内外研究较多^[14-22]。为提高该方法的取水率,研究重点侧重于高效吸附剂的开发,其中获得单位质量吸附剂最大循环出水量是关键问题之一。

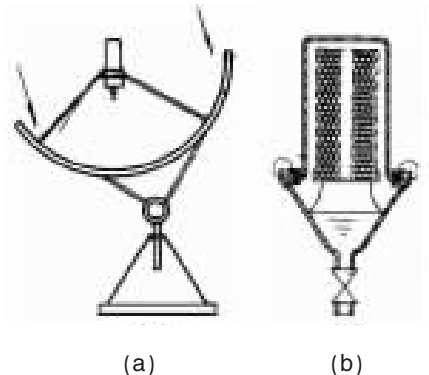


图 6 太阳能吸附法空气取水器取水系统
Fig.6 System of solar-energy adsorption-based water collector from air

20 世纪 90 年代,E. Yu. I. Aristov^[14]等配制出了无机盐(CaCl_2 、 SrCl_2 、 Na_2SO_4 等)与直径为 0.25~0.5 mm 的粉末状硅胶的复合材料。实验表明,该吸附剂最大取水率可达 50 g 水/100 g 吸附剂,但这种复合吸附剂的吸附/解吸的动力学特性分析是在闭式系统、只存在水蒸汽的条件下得出的。而实际应用中吸附过程是在开式系统和湿空气中进行,因此会影响吸附剂的吸附/解吸性能。

针对吸附剂的开发,国内学者进行了诸多工作^[15-16],已研制出新型复合吸附剂 $\text{SiO}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O} \cdot y\text{CaCl}_2$,并模拟塔克拉玛干沙漠地区的气候条件(空气温度 25℃、相对湿度 40%)进行了等温、等压的吸附量测试实验及解吸速度实验。结果表明,复合吸附剂的平衡吸附量和吸附速度等方面明显好于其它常用吸附剂。

另外,我国已研制出最大吸附水能力达 175%的吸附剂^[16],此吸附剂在 80℃脱附温度时,可脱附 90%以上的总吸附水量,每千克吸附剂可脱附水量高达 1.6 kg,是理想的空气取水器吸附材料。

目前,由德国波莱梅化学工程研究所采用吸附蒸发法研制的空气取水系统,已在约旦安装,且运行良好,经济效益显著,并向非洲和阿拉伯沙漠地区推广使用。

2.3 聚雾取水法

将雾中小水滴分离出来的取水方法,称作聚雾取水。聚雾取水一般采用巨幅尼龙屏障,吸附雾中小水滴,并使之聚合长大,这样大水珠就会沿着倾斜的尼龙线流到集水器中。

聚雾取水因成本低、效率高,在帐篷取水、建筑物取水等领域都有应用,但其受环境限制,只适宜在多雾且缺水的地方推广^[23-28],在我国这种方法并不多见。在南美洲西部的智利,其北部地区基本终年无雨,严重干旱,但西风或西南风常把海上潮湿的空气源源不断地送到这里,受到山脉阻挡后易形成云和雾,因此这个地区比较早就采用了聚雾取水。通常一台聚雾集水器,可每日供应 15 000 l 的水给 700 人使用^[28]。

2.4 空气取水的低取水率问题

空气取水为解决淡水匮乏问题提供了新思路,可适用于空气含湿量较高或相对湿度变化较大的地区,如淡水匮乏的某些沿海地区、海岛、轮船、经常停水的高楼住户、干旱乃至沙漠地区等。但较低的取水率,是其推广的一个瓶颈,如能研制出高效率、高性能的空气取水装置,应用前景将会更加广阔。

现有制冷结露法空气取水系统的凝水表面一般为普通金属,金属的高表面能,使冷凝水易形成水膜,造成传热恶化,因而凝水率降低。如采用具有低表面能的材料,虽会形成小水珠,并强化传热,但却有可能因水珠较小,而被风吹走,这样集水率也会降低。而对聚雾取水方法来说,为了保证雾滴吸附及长大过程的顺利进行,也需选择具有合适表面性质的聚雾材料。

近来,文献[29]提出,除湿器(其原理类似于空气取水)凝水表面的表面性质对除湿性能有较大影响,采用疏水表面上排布一些亲水点的凝水表面,可使除湿性能有大幅度提高。但对于相应表面改性的具体工艺及进一步的实验验证却未见后续报道^[29-30]。由此引申开来,我们发现文献[29]提出的凝水表面与 *Stenocara* 背部表面具有很强的相似性,因此可以尝试以 *Stenocara* 背部表面结构为基础,制作出相应仿生表面,作为制冷结露法中的凝水表面,或聚雾取水法中的聚雾材料,用以提高取水率。这种由表面特性入手的方法,或许可给我们提供一种提高取水率的新思路。

3 展望与结论

仿生技术在人类发展历程中扮演着重要角色,并解决了诸多疑难问题。结合 *Stenocara* 利用其特殊背部表面向空气要水的生存方式,我们或许可以探讨出解决空气取水取水率较低的方法。然而,仿生表面的工业应用还需科研人员进行更多的理论分析,以找出影响产水量的主要因素,并提供出相应的基本数据和公式。

因此,笔者认为从材料表面特性入手,进一步研究甲虫背部的集水机理,定量描述出表面特性(包括亲水突起的亲水性能、尺寸、排列及疏水表面的疏水特性)和水滴直径、风速间的关系,并进行优化,或许可以开发出一种适于空气取水系统的高效凝水表面,这也有望成为以后大型化、人工空气取水的基础。

参考文献(References)

- [1] MACHARG J P. The international desalination & water [J]. Resuse, 2001, 1: 42-45.
- [2] VIRJEE K, GASKIN S. Fuzzy cost recovery in planning for sustainable water supply systems in developing countries [J]. Energy, 2005, 30: 1 329-1 341.
- [3] FEDLER CLIFFORD B. Recycling water saves future drinking supplies[J]. Bio Cycle, 2005, 46: 50-55.
- [4] KIRSHEN P, MCCLUSKEY M, RICHARD V, et al. Global analysis of changes in water supply yields and costs under climate change: a case study in China [J]. Climatic Change, 2005, 68: 303-330.
- [5] ANDREW R P, CHRIS R L. Water capture by a desert beetle[J]. Nature, 2001, 414: 33-34.
- [6] SUMMERS A. Like water off a beetle's back [J]. Natural History, 2004, 2: 26-27.
- [7] PARKER A, HICKEY G. Water-harvesting Beetle [J]. Nature Australia, 2002, 27: 10
- [8] HAMILTON W J, HENSCHER J R, SEELY M K. Fog collection by Namib Desert beetles [J]. South African Journal of Science, 2003, 4: 181-182.
- [9] NAIDU S G. Water balance and osmoregulation in *Stenocara gracilipes*, a wax blooming tenebrionid beetle from the Namib

- Desert[J]. Journal of Insect Physiology, 2001, 47: 1 429-1 440.
- [10] 俞乔力. 空气取水器的可行性分析报告[R]. 第六届全国热力分析会议. 1992.
- [11] JANNOT Y. Production deau par condensation de l humidite atomosph erique [J]. Revue Generale de Thermique decembre, 1993, 6: 705-709.
- [12] 叶继涛, 谢继涛, 陈儿同. 太阳能半导体制冷结露法空气取水器的研究[J]. 鞍山科技大学学报, 2004, 4: 282-285.
- [13] 俞乔力. 太阳能吸附式空气取水器的技术方案及其理论和实验研究[J]. 太阳能学报, 1994, 15: 335-340.
- [14] YU I A, TOKAREV M M, GORDEEVA L G, et al. New composite sorbents for solar-divent technology of fresh water production from the atmosphere[J]. Solar Energy, 1999, 66: 165-168.
- [15] 刘业凤, 范宏武, 王如竹. 新型复合吸附剂 $\text{SiO}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O} \cdot y\text{CaCl}_2$ 与常用吸附剂空气取水性能的对比实验研究[J]. 太阳能学报, 2003, 2: 141-144.
- [16] 李建刚, 黎立新, 蒋维钢. 高效太阳能吸附式空气取水器吸附剂[J]. 化学工程, 2004, 3: 6-8.
- [17] VILLARREAL E L, DIXON A. Analysis of a rainwater collection system for domestic water supply in Ringdansen, Norrkoping, Sweden[J]. Building and Environment, 2005, 40: 1 174-1 184.
- [18] BAR E. Extraction of water from air—an alternative solution for water supply[J]. Desalination, 2004, 8: 335.
- [19] FASTYN, PATRYCJA, KORNACKI, et al. Adsorption of water vapour from humid air by selected carbon adsorbents[J]. Journal of Chromatography, 2005, 1 078: 7-12.
- [20] TORIBIO F, BELLAT J P, NGUYEN P H. Adsorption of water vapor by poly (styrene) sulfonic acid sodium salt – Isothermal and isobaric adsorption equilibria [J]. HVAC and R Research, 2005, 11: 305-317.
- [21] AHMED SULTAN. Absorption/regeneration non-conventional system for water extraction from atmospheric air [J]. Renewable Energy, 2004, 29: 1 515-1 535.
- [22] LONG G A, GASPARELLA A. Experi desiccant regeneration in a packed tower[J]. Journal of solar Energy Engineering, 2004, 126: 587.
- [23] VICTORIA M, MARZOL JAE'N. Fog water collection in a rural park in the Canary Islands (Spain) [J]. Atmospheric Research, 2002, 64: 239-250.
- [24] MA CHANG-JIN, KASAHARA MIKIO, TOHNO SUSUMU, et al. A replication technique for the collection of individual fog droplets and their chemical analysis using micro-PIXE [J]. Atmospheric Environment, 2003, 37: 4 679-4 686.
- [25] SHANYENGANA E S, SANDERSON R D., SEELY M K., et al. Testing greenhouse shade nets in collection of fog for water supply [J]. Journal of Water Supply Research and Technology, 2003, 52: 237-241.
- [26] AL-JAYYOUSI O R., MOHSEN M S. Source evaluation of fog collection in Jordan [J]. Journal of the Chartered Institution of Water and Environment Management, 1999, 13: 195-199.
- [27] LOUW C, VAN HEERDEN J, OLIVIER J. South African fog-water collection experiment meteorological features associated with water collection along the eastern escarpment of South Africa[J]. Water S.A., 1998, 24: 269-280.
- [28] SCHEMENAUER R S, CERECEDA P. The quality of fog water collected for domestic and agricultural use in Chile [J]. Journal of Applied Meteorology, 1992, 31: 275-290.
- [29] 吴桂涛, 岳丹婷, 吕欣荣. 除湿器冷凝表面应具备的特点分析[J]. 大连海事大学学报, 2000, 26: 103-106.
- [30] 费干, 岳丹婷, 吴桂涛, 等. 空气冷却器表面自由能对其性能的影响[J]. 大连海事大学学报, 1998, 24: 92-95.

(责任编辑 李慧政)