DOI: 10.3901/JME.2020.03.137

静压型机械密封中螺钉预紧调节机制的研究*

何 强¹ 王洪涛^{2,3} 黄伟峰¹ 刘 莹¹ 刘向锋¹ 李永健¹ 王玉明¹

(1. 清华大学摩擦学国家重点实验室 北京 100084;

2. 清华大学核能与新能源技术研究院 北京 100084;

3. 清华大学先进反应堆工程与安全教育部重点实验室 北京 100084)

摘要: 螺钉预紧力大小是静压型机械密封中重要的设计参数,考虑密封组件之间的多体接触关系与 O 形圈副密封的影响,建立了静压型机械密封的热流固耦合计算模型(Thermal fluid-solid interaction, TFSI),根据密封环与环座之间接触关系的转变,分析研究了螺钉预紧力对密封性能的调节机制。结果表明,螺钉预紧力对密封性能有着显著的影响,预紧力增大使得泄漏率增大,但其影响规律与密封环与环座之间接触关系有着密切的联系,同时发现,动环和静环在密封中起着不同的功能,并且环座的结构及边界条件的不同是导致动、静环功能差异性的重要原因。

关键词: 静压型机械密封; 多体接触; 流固热耦合; 螺钉预紧

中图分类号: TB42

Regulation Mechanism of Screw Preloading in Hydrostatic Mechanical Face Seals

HE Qiang¹ WANG Hongtao^{2,3} HUANG Weifeng¹ LIU Ying¹ LIU Xiangfeng¹

LI Yongjian¹ WANG Yuming¹

(1. Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 10084;

2. Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084;

3. Key Laboratory of Advanced Reactor Engineering and Safety of Ministry of Education, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract: The preloading is an important design parameter in hydrostatic mechanical face seals. Considering the multi-body contact relationship between the sealing components and the influence of the O-ring secondary seal, a thermal fluid-solid interaction (TFSI) model for hydrostatic mechanical face seal is finally developed. According to the change of contact relationship between the seal ring and the support ring, the regulation mechanism of the preloading on the sealing performance is analyzed. The results show that the preloading of the screw has a significant effect on the sealing performance. The leakage rate increase as the preloading increases, and this change law is affected by the contact status between the seal ring and its support. Moreover, it is found that the stationary ring and the rotating ring play different roles in sealing, because the size and boundary conditions of the supporting rings are different.

Key words: hydrostatic mechanical seal; multi-body contact; TFSI model; screw preloading

0 前言

核主泵为反应堆回路冷却液提供循环动力,是压水堆核电站的关键设备之一,而核主泵密封是用于控制反应堆冷却剂沿主泵泵轴泄漏的关键部件,其密封性能的优劣对主泵的安全、可靠运行有着重要影响。其中,流体静压型机械密封是核主泵所用

典型的密封结构之一^[1-2],其依靠密封端面间隙内流体的静压效应工作,密封性能与间隙形状密切相关。由于其密封间隙一般为微米量级,密封环端面微小的力变形及热变形都将会对其密封性能产生重要的影响。而在核主泵静压型机械密封结构中,密封环是被压紧环通过圆周若干个螺钉固定在环座端面上,螺钉力预紧力的大小将直接影响密封环端面的翻转变形,进而改变密封间隙的形状,因此螺钉预紧力的调整成为调节密封性能的重要手段。

国内外学者针对机械端面密封机理进行了研究,

* 国家自然科学基金(U1737202, 51735006)和国家重点研发计划(2018YFB2000800)资助项目。20190311 收到初稿,20190726 收到修改稿

并取得了较多成果。PASCOVICI 等^[3]提出了机械密封的 THD 模型(Thermo-hydrodynamic, THD), 考虑了实际的边界条件以及温度、黏度沿径向和轴向的变化; 用解析法求解了流体能量方程, 并给出了密封间隙径向温度变化的解析表达式。BRUNETIERE 等^[4-5]对非接触式机械密封进行数值研究, 模型中将螺钉预紧力的影响简化为液膜的一个初始锥角, 用影响系数矩阵的方法考虑了热弹性变形的影响, 研究了因端面形貌的改变而产生的热弹流效应对密封性能的影响。GALENNE^[6]通过影响系数考虑了热弹结构变形与流体流动的耦合变形, 把力变形、热力变形的影响进行了比较, 更准确描述了机械密封特性。黄伟峰等^[7]对核主泵静压型机械密封进行建模分析, 综合考虑热变形以及力变形的影响, 建立流固热耦合分析模型, 并与试验结果进行对比验证。但两者^[6-7]的二维轴对称模型中将螺钉等效为圆筒结构, 大大削弱了压紧环的刚度, 会大大影响压紧环的变形以及压紧与其它组件之间的接触作用。廖传军等^[8]基于圆环变形理论对密封单环建立了的解析式流固强耦合模型, 将螺钉预紧力等效为分布力, 研究发现螺钉预紧力对密封性能产生重要影响。彭旭东等^[9]考虑副密封的影响, 只对动环组件进行建模分析, 同样将螺钉预紧力等效为分布力, 结果表明随着螺钉预紧力的增大, 泄漏率产生显著的增加。

不少学者已经对静压型机械密封进行了深入研究, 但仍存在不足。首先, 已有的研究中螺钉预紧力的调节机制没有展开详细的研究, 由于密封环被压紧环固定在环座上, 而压紧环本身又通过螺栓与环座相连, 并且三个部件有着多处的接触关系, 从而这三者存在复杂的相互作用, 因此对于流体静压型机械密封的研究应该着眼于密封组件整体结构, 充分考虑组件之间的多体接触关系, 而不能仅仅局限于密封环本身。本文对机械密封组件整体结构进行建模分析, 考虑密封组件安装初始温度到工作温度的热膨胀变形的影响, 根据密封环与环座之间的接触关系, 研究螺钉预紧力的调节机制, 并分析了动、静环组件在密封中的不同作用。

1 模型建立

1.1 密封结构

图 1 为核主泵用流体静压型机械密封的结构示意图, 此机械密封由密封环(包括静环和动环)、支撑环、夹紧环、副密封和辅助 O 形密封圈等组成。密封环外径处为高压流体入口, 当密封环内、外径处存在一定的工作压差时, 密封端面之间的径向收

敛间隙会产生流体静压效应, 形成一层具有一定刚度的流体薄膜, 从而保持密封端面非接触运行。在稳定工作状态下, 动环组件固定于主轴上并随主轴一同旋转, 静环组件在液膜开启力、闭合力及自身重力的综合作用下保持轴向力的平衡, 因此静环组件处于浮动状态。

图 1 静压型核主泵机械密封装置示意图

1.2 TFSI 模型

1.2.1 流体域模型

图 2 所示为密封环与流体液膜的几何模型。静环与动环端面之间形成一层流体液膜, 密封环端面的综合翻转变形直接改变收敛间隙的锥角 α_1 和 α_2 , 从而改变流体液膜的形状, 进而影响密封性能^[10]。

图 2 流体膜的几何模型

在核主泵静压型机械密封是轴对称结构, 压力和膜厚周向梯度均为零, 对密封间隙内等温层流的控制方程采用如式(1)所示的雷诺方程^[11]。

$$\begin{cases} \frac{d}{dr} \left(\frac{r h^3}{\mu} \frac{dp}{dr} \right) = 0 \\ p|_{r=R_i} = p_i, p|_{r=R_e} = p_o \end{cases} \quad (1)$$

$$\frac{dp}{dr} = \frac{1}{r h^3} \frac{(p_o - p_i)}{\xi} \quad (2)$$

$$\xi(h_i) = \int_{R_i}^{R_o} \frac{\mu}{r h^3} dr \quad (3)$$

式中, p 为密封端面流场的分布压力; r 为半径; p_i 和 p_o 分别为密封环内径和外径处介质压力; h 为流体膜厚度。密封环在流体载荷作用下发生机械变形, 所产生的微小变形角同时改变了端面流场的形状, 此时流体膜厚度可表示为

$$h = \begin{cases} h_i + (r - R_i) \tan \alpha_1 - [\Delta u_{z1}(i) + \Delta u_{z2}(i)] & R_i \leq r \leq R_p \\ h_i + (R_p - R_i) \tan \alpha_1 + (r - R_p) \tan \alpha_2 - R_i \leq r \leq R_p \\ [\Delta u_{z1}(i) + \Delta u_{z2}(i)] \end{cases} \quad (4)$$

黏度 μ 定义为^[11]

$$\mu = \mu_0 \exp[-\delta(t - t_0)] \quad (5)$$

式中, μ_0 为温度为 t_0 时流体黏度, δ 为黏温系数。

泄漏率 Q 和开启力 F_{open} 通过下面式子计算得

$$Q = 2\pi \frac{h^3}{12\mu} \frac{dp}{dr} = \frac{\pi(p_o - p_i)}{6\xi} \quad (6)$$

$$F_{open} = 2\pi \int_{R_i}^{R_e} p r dr \quad (7)$$

根据黏性薄膜的经典假设, 稳态下不可压流体膜的能量方程表示为^[11]

$$\begin{cases} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial t}{\partial r} \right) - \frac{\rho_f c_f}{k_f} v_r \frac{\partial t}{\partial r} + \frac{\mu}{k_f} \left[\left(\frac{\partial v_\theta}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_r}{\partial z} \right)^2 \right] = 0 \\ \frac{\partial t}{\partial r} \Big|_{r=R_i} = 0, t \Big|_{r=R_e} = t_0 \end{cases} \quad (8)$$

式中, t 表示密封端面流场液膜的温度; ρ_f 、 k_f 和 c_f 分别表示流体的密度、热导率和比热容; v_r 和 v_θ 分别表示流体的径向速度和周向速度, 并可由流场求解部分得到, 其计算表达式分别为

$$v_r = \frac{1}{2\mu} \frac{dp}{dr} (z^2 - hz) \quad (9)$$

$$v_\theta = \omega r (1 - z/h) \quad (10)$$

根据流体与固体边界处温度相等, 热流密度连续, 则式(11)给出了边界热流密度 q 与温度在 r 方向梯度的关系, 具体推导参考文献[12]。

$$q_i + \frac{\rho_f c_f (p_o - p_i)}{12\xi r} \frac{dt_f}{dr} + \frac{\mu \omega^2 r^2}{h} + \frac{\mu (p_o - p_i)^2}{12\xi^2 r^2 h^3} = 0 \quad (11)$$

1.2.2 固体域模型

建立二维轴对称模型, 压紧环通过周向 8 个均匀分布的螺钉与环座进行连接, 由于采用二维轴对称模型, 将压紧环上 8 个螺钉等效为圆筒结构, 在已有的模型中^[6-7], 该等效方法会严重削弱压紧环的刚度, 对压紧环的变形产生较大影响, 从而影响了模型的正确性。为解决此问题, 本文采用一种重叠网格的方法。在重叠干涉区域中存在两套独立的网格结构分别代表压紧环与螺钉, 并对螺钉的弹性模

型、导热系数以及压紧环底部的介质压力进行等效计算, 从而将 8 个螺钉在功能上等效为圆筒结构, 保证了压紧环强度以及螺钉的作用, 使得模型更符合实际情况。

计算模型的力边界和热边界条件如图 3 所示, 具体的边界条件的选取参考文献[12]。核主泵静压型机械密封中 O 形圈副密封的作用比较重要^[13], 本文中对密封装置中不同位置的 O 形圈在不同工况条件下进行仿真计算, 将接触区的接触压力提取出来构建不同条件下接触压力的数据库, 并将接触力赋给模型中进行有限元计算。值得一提的是, 如图 1 所示, 核主泵静压型机械密封处于竖直放置的状态, 静环内径处与轴之间形成泄漏通道, 泄漏的流体经过剪切生热温度升高, 并对静环内径加热产生一定的热变形。因此 B2 处应该使用对流换热的边界条件, 而已有的研究^[6-7]多采用绝热条件。而液膜的温度在流固热耦合迭代计算过程中是变化的, 因此需要实时更新对流换热的边界条件。

图 3 有限元计算边界条件

综上所述, 不同密封组件之间的多体接触综合考虑, 以及 O 形圈副密封作用, 利用有限元分析软件建立了动环组件、静环组件和流体薄膜的三者之间的热流固耦合模型(TFSI), 其中迭代求解的算法参考文献^[7]。计算中所选取的部分重要几何参数、材料性能参数以及工况参数如表 1 所示。

表 1 几何参数、工况参数以及材料性能参数

参数	数值
内面板半径 R_i /mm	109
外面板半径 R_o /mm	153
外半径 R_0 /mm	156
水力半径 R_h /mm	122
面板锥度变形半径 R_p /mm	121.5
注射温度 t_0 /K	328.15
转子角速度 ω /(r/min)	1 500
黏温系数 δ	0.017 5
面板锥角 α_1 /rad	0
面板锥角 $\alpha_2/\times 10^{-6}\text{rad}$	750
出口压力 p_i /MPa	0.55
入口压力 p_o /MPa	15.5
流体导热率 k_f /(W/(K/m))	0.65
密封圈的弹性模量 E_1 /GPa	310
钢的弹性模量 E_2 /GPa	200
密封圈热导率 k_{s1} /(W/(K/m))	22
钢的热导率 k_{s2} /(W/(K/m))	30
密封圈的热膨胀系数 $\beta_1/\times 10^{-6}\text{K}^{-1}$	2.5
钢的热膨胀系数 $\beta_2/\times 10^{-6}\text{K}^{-1}$	12

2 结果和分析

2.1 模型验证

单根螺钉预紧力 $F_{pre} = 5\,000\text{ N}$ 进行计算, 其它参数如表 1 所列。图 4 为仿真计算得到泄漏率 Q 随入口处压力 p_o 的变化规律, 并与真实的操作数据(Saint-Alban nuclear power plant -EDF - 2002)^[6] 进行对比。可以看到, 本文模型预测的其泄漏率随压差变化规律与试验数据基本一致, 即在低压差时, 泄漏率随着压差的提高而增大, 当压差达到较大时, 泄漏率基本保持稳定。泄漏率与压差的这种关系是静压型机械密封的典型特点, 但已有数值计算中并没有复现这种规律^[6]。具体数值上的误差, 我们认为这是由于尺寸和工况上可能存在微小差异造成的。

图 4 泄漏率与入口压力的关系。

正常工况下, 入口压力 $p_o = 15.5\text{ MPa}$, 泄漏率 $Q = 647.5\text{ L/h}$, 液膜压力分布、温度分布及膜厚分布如图 5 所示, 密封组件温度分布如图 6 所示。从中可得, 泄漏介质因剪切加热而产生温升大约为 4 K , 泄漏的介质沿着静环内径流向下一级密封, 致使静环座及静环内径处与动环相比具有更高的温度。

图 5 正常工况下计算结果

图 6 密封组件温度分布图

2.2 预紧调节机制

在入口压力 $p_o = 15.5\text{ MPa}$, 入口介质温度为 $t_0 = 55\text{ }^\circ\text{C}$, 转速 $\omega = 1\,500\text{ r/min}$ 的工况条件下, 单根螺钉预紧力的大小与泄漏率的关系如图 7 所示。由图可知, 随着螺钉预紧力的增加, 泄漏率变化规律可以分为两个不同阶段, 此工况条件下, 状态转变的临界螺钉预紧力 $F_{pre}^{crit} \approx 2\,900\text{ N}$ 。

图 7 钉预紧力对泄漏率的影响

本文中通过提取环背部与环座的接触压力, 通过接触压力的分布判断环与环座是否分离。当螺钉预紧力 $F_{pre} < F_{pre}^{crit}$ 时, 如图 8a 所示, 动环与动环座完全脱离(两者之间的距离在十微米级别, 对环背部 O 形圈副密封基本不会产生影响), 静环与静环座外径处分离, 而在内径处保持接触, 接触压力如图 9 所示。动环与静环端面均呈发散变形, 并随着螺钉预紧力的增加, 动环整体平移, 其端面翻转倾斜程度基本保持不变, 如图 10a 所示, 而静环端面倾斜程度减小, 如图 10b 所示, 最终导致密封端面收敛性增加, 使得泄漏率提高, 且此阶段泄漏率随螺钉预紧力的变化率较大。

图 8 螺钉预紧力大小对环与环座接触状态的影响

图 9 密封环与环座的接触压力与螺钉预紧力的关系

图 10 密封环端面变形与螺钉预紧力的关系

当螺钉预紧力 $F_{pre} > F_{pre}^{crit}$ 时, 如图 8b 和图 9 所示, 随着螺钉预紧力增加, 动环与动环座的间隙逐渐缩小, 直至动环与动环座外径处接触, 而静环与静环座内径处的间隙也逐渐减小直至接触。动环在此阶段保持外径处分离, 内径处接触的状态; 静环则内外径处均为接触状态, 接触压力如图 9 所示。如图 10a 所示, 随着螺钉预紧力的增加, 动环绕着内径接触区发生翻转变形, 其端面倾斜程度降低, 而静环整体有微小的平移, 其端面倾斜角保持不变, 如图 10b 所示, 两者共同作用使得密封端面收敛性增加, 因而泄漏率提高。

螺钉的预紧力的大小可以直接调节密封泄漏率, 因此螺钉预紧力的选择十分关键。图 7 所示的第一阶段中, 泄漏率随螺钉预紧力的变化率太大, 不利于泄漏率的精确调节, 根据螺钉预紧力大小的合理性以及泄漏率的可控性, 静压型机械密封中螺钉预紧力一般取 $F_{pre} > F_{pre}^{crit}$ 。

其次, 静压型机械密封在正常工作下(认为 $F_{pre} > F_{pre}^{crit}$), 其静环与动环在密封中起的作用不同。如图 9 所示, 动环端面发生较大的发散性的翻转变形; 静环端面呈小量的发散性变形, 比动环翻转变形量小一个数量级。进一步分析其原因, 这是由于动、静环与环座的接触关系不同导致的, 而动环与静环是完全相同的设计, 因此可认为其接触关系不同是其环座结构及环座边界条件不同导致, 从图 3 中可以看出, 动环座与静环座结构完全不同, 并且动环座内径处与主轴接触, 在外径处的介质高压作用倾向于使得动环座绕着与主轴接触的位置发生翻转变形, 并且此翻转变形的程度可以由其底部的板簧进行调节, 而静环座整体是处于浮动状态, 其环座端面倾向于保持平直, 从而导致了动、静环与环座的接触关系的不同。

动环是平端面, 而静环端面加工有一定的锥角, 让静环的端面尽量保持平直, 而通过调节动环端面的翻转来调节泄漏率, 从设计的角度而言, 对于具有大泄漏率的静压型机械密封, 这种密封性能的调节方式也更加合理。

3 结 论

(1) 针对流体静压型核主泵机械密封, 综合考虑密封组件间的多体接触, 对密封组件建立了完整的二维轴对称有限元分析模型和流-固-热耦合计算模型, 发现组件之间的接触作用对密封有着重要的影响。

(2) 螺钉预紧力对密封性能的影响很大, 随着螺钉预紧力的增加, 泄漏率变化规律可以分为两个不同阶段, 并且其调节机制与密封环-环座之间的接触关系有着密切的关系, 因此必须合理地选择螺钉预紧力的大小。

(3) 静环与动环在密封中起的作用不同, 并且在正常工况条件下, 动环端面具有较大的发散性的翻转变形, 而静环端面翻转变形量比动环小一个数量级, 而这种差异性是由于动环座与静环座结构及边界条件不同导致的, 因此环座的结构设计非常关键。

参 考 文 献

- [1] FUJITA T, SOGABE T, TODOROKI T, et al. Takeshita, development of rotary shaft seals for primary coolant pumps for nuclear-reactors[J]. Tribology Transactions, 1989, 32(1): 16-29.
- [2] MAYER E. Performance of rotating high duty nuclear seals[J]. Lubr. Eng., 1989, 45(5): 275-286.
- [3] PASCOVICI M D, ETSION I. A thermohydrodynamic analysis of a mechanical face seal[J]. Journal of Tribology-Transactions of the ASME, 1992, 114(4): 639-645.
- [4] BRUNETIERE N, GALENNE E, TOURNERIE B, et al. Modelling of non-laminar phenomena in high reliability hydrostatic seals operating in extreme conditions[J]. Tribology International, 2008, 41(4): 211-220.
- [5] BRUNETIERE N, APOSTOLESCU A. A Simple Approach to the ThermoElastoHydroDynamic Behavior of Mechanical Face Seals[J]. Tribology Transactions, 2009, 52(2): 243-255.
- [6] GALENNE E, PIERRE-DANOS I. Thermo-elasto-hydro-dynamic modeling of hydrostatic seals in reactor coolant pumps[J]. Tribology Transactions, 2007, 50(4): 466-476.
- [7] HUANG W, LIAO C, LIU X, et al. Thermal fluid-solid interaction model and experimental validation for hydrostatic mechanical face seals[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2014, 27(5): 949-957.
- [8] 廖传军, 黄伟峰, 索双富, 等. 核主泵机械密封的流固强耦合模型[J]. 中国科学: 技术科学, 2011(12): 1649-1657.
- [9] 彭旭东, 康玉茹, 孟祥铠, 等. 核主泵用流体静压型机械密封性能的影响因素研究[J]. 机械工程学报, 2012, 48(17): 83-90.
- [10] LIU Xiangfeng, HUANG Weifeng, LIU Ying. Theroretical analysis on fluid-structure coupling of hydrostatic mechanical seal[J]. Tsinghua University, 2011, 1(12): 1839-1843.
- [11] WEN Shizhu, HUANG Ping. Principle of tribology[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008.
- [12] HE Q, HUANG W, LIU Y, et al. Contact status between

seal ring and its support: Crucial factor in hydrostatic mechanical face seal[J]. Industrial Lubrication and Tribology, 2019, 71(7): 885-892.

- [13] 廖传军, 黄伟峰, 索双富, 等. 流体静压型机械密封的半解析式流固耦合模型[J]. 机械工程学报, 2010, 46(20): 145-151.

LIAO Chuanjun, HUANG Weifeng, SUO Shuangfu, et al. Semi-analytical fluid-solid coupling model for

hydrostatic mechanical seals[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(20): 145-151.

作者简介: 何强, 男, 1991 年出生, 博士研究生。主要研究方向为机械密封。

E-mail: heqiang1100800722@163.com

黄伟峰(通信作者), 男, 1978 年出生, 副研究员。主要研究方向为机械密封。

E-mail: huangwf@tsinghua.edu.cn

第 9 届上银优秀机械博士论文奖——银奖

基于仿生材料的液滴极端环境下定向输运的研究

作 者: 李京

毕业学校: 香港城市大学

指导老师: 王钻开

液滴的定向输运不仅构成了各个自然系统的基础, 同时在很多工业应用中起着决定作用。这是因为, 有效的液滴输运能够从根本上改变固/液/气三相界面之间的交互作用, 从而促进质量、动量传递及能量转换。近年来, 随着加工技术的进步和基础研究的深入, 设计和制造多样的单向结构成为了可能。尽管如此, 由于复杂相变的发生, 我们在极端环境下对液滴的定向操控仍然面临重大挑战。本研究从自然界中获取灵感, 以机械加工为基础, 设计和优化各种仿生结构来解决这些问题。同时, 我们探索多空间尺度和多时间尺度耦合下的界面交互作用, 进而实现从低温到高温环境中的广泛应用。具体包括:

针对 Leidenfrost 状态下的传热效率低的问题, 设计多维梯度结构来单向控制液滴动态和降低界面换热热阻。通过结构形貌和温度的协同调节, 我们首次发现了介于两种对立的热力学状态(Leidenfrost 状态和接触沸腾状态)之间的第三种雅努斯状态。这种特殊的热力学状态可以使液滴从换热效率低的 Leidenfrost 区域自发地向换热效率高的接触沸腾区域迁移, 最终在沸腾区域快速蒸发。雅努斯状态的引入使界面换热效率提高了约 13 倍, 因此在高温环境下的喷水减温、热管理等方面有着广泛的应用。

此外, 基于 Leidenfrost 状态的超润滑特性, 设计二维平面棘轮结构, 首次实现对超润滑 Leidenfrost 液滴的多向调控。研究表明, 液滴在平面棘轮结构上的动态不仅取决于结构单元的形貌, 同时和相邻单元之间的相互耦合有关。通过两级结构的竞争和配合, 气膜的动态也随之改变, 进而牵引液滴向不同方向以多种速度自发运动。平面棘轮结构的设计在基于微机电系统的流体装置中具有更高的适用性。

除了高温, 本文同时研究了冷凝液滴在排水蝇上的多尺度、长距离弹道输运。在结构的多级性、周期性、表面疏水性及机械柔软性的共同作用下, 局部凝结的微纳米级液滴最终被整流为宏观长距离运动的毫米级液滴, 从而有效避免了高饱和度下液膜的形成。我们的发现为更优化的冷凝器和集水器的设计提供了设计准则。