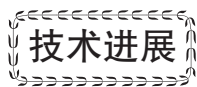


doi:10.3969/j.issn.1005-0329.2022.10.009



接触式密封结构泄漏模型研究现状及发展

闫国华^{1,2}, 武 松¹, 刘 勇¹, 刘中华³

(1. 中国民航大学 航空工程学院, 天津 300300; 2. 中国民航大学 工程技术训练中心, 天津 300300;

3. 中国航发沈阳发动机研究所, 沈阳 110015)

摘 要:密封结构失效导致的泄漏故障已成为影响产品使用可靠性和安全性的关键因素之一, 因此开展密封失效研究已成为当前的热点和难点。针对接触式密封结构泄漏研究所包含的表面接触问题与密封界面渗流问题两部分内容, 介绍了 Hertz 接触模型、统计学接触模型以及分形接触模型, 并对 3 种经典的接触模型的优缺点进行了评述; 梳理了基于分形理论、多孔介质理论以及逾渗理论等 3 种常见的密封泄漏模型的研究现状。总结了基于人工神经网络、数值仿真计算和格子玻尔兹曼等 3 种未来可能在密封结构泄漏研究领域出现的研究热点方法, 为密封连接系统的设计和密封界面的机械加工提供了理论依据和指导。

关键词:密封结构; 接触模型; 泄漏模型; 泄漏率; 输运特性

中图分类号: TH136; TB12

文献标志码: A

Research status and development of leakage model of contact seal structure

YAN Guohua^{1,2}, WU Song¹, LIU Yong¹, LIU Zhonghua³

(1. School of Aeronautical Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

2. Engineering Techniques Training Center, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China; 3. AVIC Shenyang Engine Design Institute, Shenyang 110015, China)

Abstract: Leakage failure caused by the failure of sealing structure has become one of the key factors affecting the reliability and safety of product use, so it has become a hot spot and difficulty to carry out seal failure research. For the surface contact problem and sealing interface leakage problem contained in the leakage research of contact seal structure, the Hertz contact model, statistical contact model and fractal contact model were introduced, and the advantages and disadvantages of the three classical contact models were reviewed; and the research status of three common seal leakage models based on fractal theory, porous media theory and percolation theory was sorted out. Three methods for researching hotspots based on artificial neural network, numerical simulation calculation and Lattice Boltzmann that may appear in the field of leakage of seal structures in the future were summarized, which provides a theoretical basis and guidance for the design of seal connection system and the machining of sealing interface.

Key words: seal structure; contact model; leakage model; leakage rate; transport properties

0 引言

泄漏故障普遍存在于工业领域, 因此, 人们对密封泄漏问题的相关研究从未停止, 并试图通过揭示其机理, 采取应对措施。密封泄漏问题的研究主要包括密封表面接触和密封介质输运特性两

部分内容^[1], 文章将从这两方面进行评述。针对密封结构密封性能的研究侧重于从宏观力学和工艺参数等角度开展, 以密封界面的接触面宽和接触压力作为密封性能的评价指标, 缺少从微观尺度上揭示密封界面泄漏机理的研究工作。由于现有的加工技术不可能实现工程表面的绝对光滑,

收稿日期: 2021-03-14 修稿日期: 2022-05-24

基金项目: 天津市教委科研计划项目(2020KJ017); 中央高校基本科研业务费项目中国民航大学专项资助项目(3122019093); 中国民航大学科研启动基金资助项目(2020KYQD76)

特别是在微观尺度对其进行观察可以发现接触表面是由许多大小不一的粗糙峰(微凸体)构成的^[2-3],所以当2个密封表面进行接触时,实际接触面积远小于理论接触面积,只有尺寸较大或较高的微凸体发生了实际接触,而其余未接触部分的空隙相互贯通,形成了泄漏通道,使流体介质在流动力的作用下从高压一侧流向低压一侧,进而造成泄漏故障的发生,如图1所示。因此密封界面微观接触问题的研究是密封界面泄漏机理研究的基础,也是接触式密封结构设计的重点和难点。本文首先扼要介绍了接触力学的发展历程,然后回顾了近年来在接触式密封结构泄漏模型研究中常用的方法,最后总结了未来可能成为该领域研究热点的一些思路和研究方法,为研究接触式密封结构的泄漏机理和密封结构的设计提供参考。

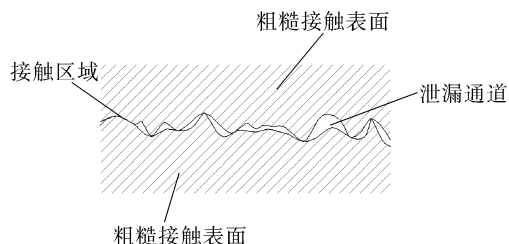


图1 粗糙表面接触示意

Fig.1 Schematic diagram of rough surface contact

1 粗糙表面接触问题研究进展

1.1 Hertz 接触力学模型

对于接触问题的研究最早可追溯至1781年法国物理学家查尔斯·库仑所提出的库伦摩擦定理,之后,德国物理学家HERTZ^[4]在发表的文章中首次提出关于弹性接触的理论模型,至此,拉开了研究接触力学的序幕^[1]。Hertz 接触理论是其它经典接触模型的基础^[5],对进一步研究接触问题具有重要的理论研究价值^[6-7]。但 Hertz 接触模型只适用于光滑且无摩擦的纯弹性变形,实际工程表面并不符合 Hertz 理论的应用条件,当接触应力超过弹性极限后,发生接触的微凸体将会发生弹塑性或完全塑性变形。

1.2 统计学接触模型

由于 Hertz 接触力学理论应用范围有限,所以对接触问题研究方法的改进和创新从未停止。其中 GREENWOOD 等^[8]于1966年在 Hertz 接触理论基础,结合统计学方法建立了一种粗糙表

面法向接触模型,即经典的 GW 接触模型。该模型将两粗糙表面的接触简化为刚性光滑表面和粗糙表面的接触,如图2所示。

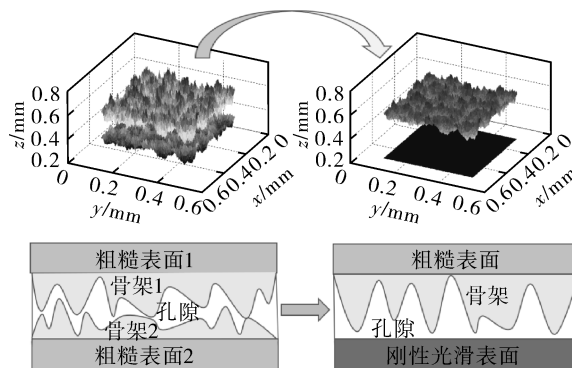


图2 粗糙表面接触简化模型

Fig.2 Simplified contact model of rough surface

GW 模型作为统计学模型的代表,此后半个多世纪,不断有学者对 GW 模型进行修正和改进^[3]。GREENWOOD 等^[9-10]在 GW 接触模型的基础上,相继推导出了球形粗糙表面之间和两粗糙平面之间的接触模型。CHANG 等^[11]利用微凸体塑性变形时体积不变原理将 GW 模型适用范围扩展至塑性变形阶段,形成了弹塑性接触模型(CEB 模型)。ZHAO 等^[12]在 CEB 模型的基础上,考虑了弹性和塑性变形之间的弹塑性过渡阶段,建立了 ZMC 模型。之后又有学者^[13]将弹塑性接触变形阶段进行细分得到前弹塑性变形、中弹塑性变形和后弹塑性变形,建立了连续临界点处粗糙度的弹塑性接触模型。ZHAO 等^[14]建立了考虑微凸体相互作用的统计学接触模型。上述这些模型在不同方面对 GW 模型进行了改进,使模型精度不断提高。但是文献^[15]表明,这些表征模型的统计学参数都会不可避免的受到测量仪器分辨率和采样长度的影响,在不同观察尺度下会出现不同的结果。这种利用统计学参数来表征粗糙表面接触情况的模型其预测结果并非唯一、确定的,即具有尺度相关性。

1.3 分形接触模型

分形理论的出现很好地解决了模型存在的尺度相关问题^[16]。利用尺度无关的分形参数替代尺度相关的统计学参数来表征粗糙表面。粗糙表面的分形特征与观察尺度无关,可以提供存在于分形表面上所有尺度范围内的全部表面形貌信息^[15]。在不同的观测尺度下粗糙表面具有自相似特性,如图3所示。

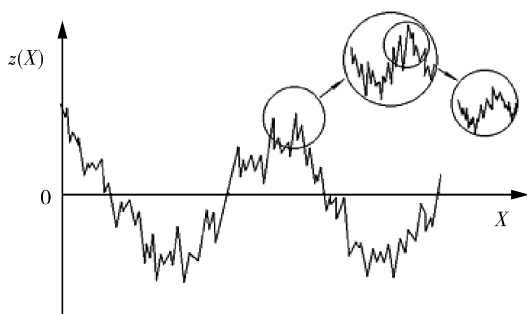


图3 粗糙表面分形特性

Fig.3 Fractal characteristics of rough surface

数学家 Weierstrass 推导出了傅里叶级数形式的 Weierstrass 函数, 之后 Mandelbrot 将 Weierstrass 函数应用至分形领域, 获得了 WM 函数。MAJUMDAR 等^[17]基于 WM 函数建立了首个应用于实际工程表面的分形接触模型, 即 MB 弹塑性接触模型, 这是分形模型的代表。该模型认为临界接触面积只是分形维数和尺度参数的函数, 与材料等无关。该模型首先根据 WM 函数给出了微凸体满足的余弦函数, 图 4 示出微凸体接触示意。

$$Z(x) = G^{D-1} l^{(2-D)} \cos\left(\frac{\pi x}{l}\right), -\frac{1}{2} < x < \frac{1}{2} \quad (1)$$

式中 G ——特征尺度参数, mm;

D ——分形维数;

l ——接触长度, mm。

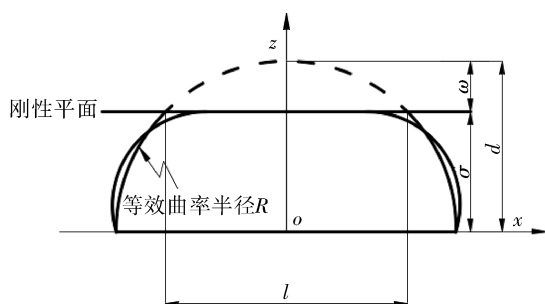


图4 微凸体接触变形

Fig.4 Microconvex contact deformation

由式(1)可求得曲率半径 R , 进一步求出微凸体临界接触面以及单个微凸接触面积和接触载荷, 通过对微凸体接触面积和接触载荷进行分段积分, 即可得到整个粗糙表面弹性和塑性变形接触载荷和接触面积。

PERSSON^[18]基于分形理论和频域变换等数学方法, 提出了考虑多尺度效应的统计接触力学理论。该理论模型能够得到不同观测尺度下载荷

与接触面积之间的变化规律, 更加准确地描述了微凸体的几何形貌。

近年来, 国内研究学者在分形接触领域也开展了大量的研究, 魏龙等^[19]基于分形理论, 建立了机械密封摩擦副端面接触模型, 得到真实接触面积和接触载荷之间的变形关系。丁雪兴等^[20]认为以往对微凸体表征时过于理想化, 没有考虑单个微凸体中还含有很多空隙, 实际随着变形量的增加, 不仅单个微凸体接触长度在增加, 该接触长度对应的微凸体幅值及其体积均在增大, 且接触长度越大, 微凸体中包含的空隙越多, 在计算接触面积时使计算结果偏大, 对此提出了一个消除空隙误差后的等效接触长度代替原有理论上的接触长度, 进一步提高了模型精度。

此外, 成雨等^[21-24]在分形接触力学建模方面也做了大量工作, 刘鹏等^[25]基于分形理论建立了改进的分形接触刚度模型。

2 接触界面密封泄漏模型

泄漏造成的负面影响不仅会使设备的性能大幅下降, 甚至会造成设备失效, 同时还伴随有环境污染等问题。对密封面泄漏机理进行研究是解决密封失效问题的关键, 泄漏率或泄漏量作为衡量密封结构密封性能的最直接的定量指标, 能够较为准确的描述泄漏程度。下面是几种较为常见的泄漏率模型的计算方法。

2.1 基于分形接触理论密封泄漏模型

HEINZE 和 MAYER 是最早开展机械密封泄漏模型研究的学者之一, HEINZE^[26]首先建立了理想光滑平面的机械密封模型, 随后 MAYER^[27]在此基础上, 假设两密封面间隙为平行缝隙, 对模型进行了泄漏率的计算。上述模型都是假定接触面的表面形貌和工况条件恒定不变, 并没有考虑设备在运行过程中密封面微观形貌的随机性变化对密封性能的影响, 所得到的泄漏率与真实值之间存在偏差。

孙见君等^[28]对锥形密封端面的泄漏率进行了推导, 认为流过单位面积的体积流量即为泄漏率, 并假设流体在密封间隙的流动状态为黏性不可压缩层流流动, 根据流体力学相关知识, 径向流动速度满足:

$$w(y) = -\frac{1}{2\eta} \frac{dp}{dz} y(h-y) \quad (2)$$

则泄漏率:

$$Q = \int_A w(y) dy dx \quad (3)$$

式中 η ——流体流动黏度;

h ——间隙高度;

A ——泄漏通道横截面积;

dx, dy ——密封间隙流体的微元长度。

图 5 示出流体中的一个微元在密封间隙中的流动情况。

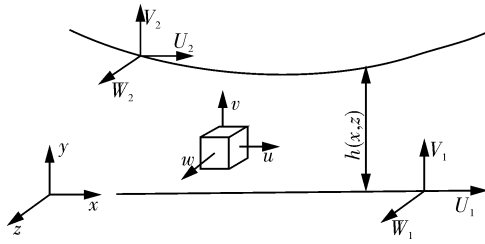


图 5 密封间隙流动速度^[28]

Fig.5 Flow velocity of seal clearance

进一步得到单个泄漏通道的泄漏率:

$$\begin{aligned} q &= \int_A w(y) dy dx = \int_A \left[-\frac{1}{2\eta} \frac{dp}{dz} y(h-y) \right] dy dx \\ &= -\frac{1}{12\eta} \frac{dp}{dz} \int_{-1/2}^{1/2} h^3 dx \end{aligned} \quad (4)$$

根据 M-B 分形接触理论, 将式(1)替换式(4)中的 h , 便可对接触式机械密封的泄漏模型进行分形表征, 经过化简为:

$$q = -\frac{1}{9\pi\eta} G^{3(D-1)} a^{\frac{7-3D}{2}} \frac{dp}{dz} \quad (5)$$

整个密封端面的泄漏率为:

$$Q = \int_0^{a_i} qn(a) da = \frac{p_1 - p_2}{9\pi\eta(r_2 - r_1)} \times G^{3(D-1)} \frac{D}{7-4D} a_i^{\frac{7-3D}{2}} \quad (6)$$

式中 r_1, r_2 ——泄漏通道内、外径;

p_1, p_2 ——泄漏通道两侧的压力。

通过上述推导可知, 泄漏率和流体的黏度、分形参数有关。

冯秀等^[29]基于 WM 分形函数建立了与上述结果类似的螺栓-法兰-金属垫片密封系统密封泄漏模型。孙见君等^[30]和李小彭等^[31]利用分形理论和 Navier-Stokes 方程(N-S 方程)建立了机械密封泄漏率预测模型, 获取了分形参数(D 和 G)、端面比载荷和材料特性对泄漏率的影响规律。

上述这些模型均未考虑密封界面微动磨损对密封性能的影响因素, 进而造成泄漏模型精度不高的弊病。近年来, 相继有学者^[32-33]基于 Archard 黏着磨损理论^[34], 针对不同的接触式密封结构, 建立了考虑磨损的密封模型。李小彭等^[35]基于分形理论建立了机械密封界面的磨损模型, 分析了密封界面分形参数、材料参数以及工作参数对磨损率的影响, 可为后续建立更高精度的密封模型提供指导。

然而, 基于分形理论的泄漏模型, 对接触模型进行了简化, 并且实际接触表面并不一定满足分形特性, 而具有分形特性的接触表面也可能只存在于有限个尺度, 这些问题均会造成泄漏预测模型与实际值之间的偏差。

2.2 基于多孔介质理论的密封泄漏模型

多孔介质是由固相部分的骨架和非固相部分所占的空间组成, 气体、液体或者多相流体可以通过这些孔隙空间形成流动通道。流体在多孔介质中的流动现象和密封界面的渗流现象极为相似, 因此, 许多学者将密封端面视为多孔介质模型, 建立了基于多孔介质理论的密封泄漏模型。

多孔介质模型最早是由 FATT^[36]提出的, 认为多孔介质是由不同直径的管子组成的。顾伯勤^[37]认为气体流过多孔介质的流动过程是分子传递和层流过程的耦合, 并假设多孔介质各向同性、孔隙空间所形成的流体流道是大量不同半径的弯曲毛细管束, 根据 Hagen-Poiseuille 定律并引入弯曲度系数 c 得到层流流率公式为:

$$L_L = \sum_{i=1}^n \frac{\pi r_i^4}{16zcl_m} (p_1^2 - p_2^2) \quad (7)$$

式中 n ——毛细管数目;

r_i ——毛细管半径;

z ——气体黏度;

l_m ——毛细管的平均长度;

p_1, p_2 ——毛细管两端压力。

再由 Knudsen 公式得到分子流率:

$$L_M = \sum_{i=1}^n \frac{4r_i^4}{3cl_m} \left(\frac{2\pi RT}{M} \right)^{1/2} (p_1 - p_2) \quad (8)$$

式中 R ——通用气体常数;

T ——绝对温度;

M ——气体的分子量。

将式(7)(8)相加即可得到总的流率, 即泄漏率。

文献[38]将密封界面看作多孔介质模型,假设密封端面的介质流动为薄膜流动,在多孔介质模型基础上,对连续性方程和动量方程进行重新推导,得到了用于机械密封端面的流体流动的控制方程,进一步推出静态密封径向泄漏率的解析公式。之后,又有多位学者基于多孔介质模型并结合流体力学理论,对刷式密封系统的流体泄漏特性进行了研究^[39-42]。研究表明^[43]多孔介质具有分形特性,将分形理论与多孔介质输运特性的研究相结合,来研究多孔介质的流动特性及多孔界面的密封性能成为一种可能。黄晓明等^[44]基于分形理论建立了金属垫片泄漏率的预测模型,该模型将泄漏通道视为一束孔径不同的毛细管束,由孔隙率计算得到分形维数,再由分形维数计算出毛细管束的数量,再结合 Hagen - Poiseuille 方程便可得单个泄漏通道的泄漏量,进一步通过积分即可计算出总的泄漏率

综上所述,基于多孔介质思想的泄漏模型研究,多是将泄漏通道视为一束毛细管束来模拟流体流动现象,没有考虑这些毛细管之间的相互作用力影响,并且忽略了接触界面微孔的随机分布特性。同时不能保证所有横截面处的微孔其泄漏通道都始终贯穿形成完全的泄漏通道,这会使得计算值总体大于真实值。

2.3 基于逾渗理论的密封泄漏模型

逾渗理论是一种适用于强随机和强无序系统的理论方法^[45]。该理论的提出,对研究多孔密封界面这类高度随机且复杂的对象提供了一种新的思路。该理论方法的研究内容是:当系统中的某种成分变化达一定值(逾渗阈值)时,系统的一些物理量会出现急剧变化。

TRIPP 等^[46]于 1981 年首次利用逾渗理论来解决密封接触问题,认为接触面积占比达到 0.44 即为逾渗阈值,低于该临界值,气体泄漏通道将被堵塞,密封良好。PERSSON 等^[47-48]提出了单枢组密封理论,利用逾渗理论将接触界面划分为小的栅格,认为密封界面的孔隙会随着放大倍数增大而变多,如图 6 所示,定义黑色方格为实际接触区域,白色方格为孔隙单元,可以看到在较大观察尺度下,图 6(a)中不存在逾渗通道,不会发生泄漏;图 6(b)中随着观察尺度变小,孔隙不断增多,直到某一临界观察尺度时,密封界面出现至少一条贯穿界面两端的泄漏通道,流体流经这些通道发生泄漏或渗漏。



图 6 二维网格逾渗示意

Fig.6 Schematic diagram of percolation in two-dimensional grids

PERSSON 等^[49]提出发生逾渗时,泄漏率大小取决于泄漏通道最窄的地方即喉部,通过临界放大倍数求得逾渗点尺寸来建立泄漏率的数学模型。目前,绝大多数基于逾渗理论的泄漏率计算模型都是以 Persson 模型为基础开展的。

BOTTIGLIONE 等^[50]基于 Persson 接触力学模型和逾渗理论提出了一种新的泄漏率的计算方法,为了准确的估计密封接触面积以及描述粗糙表面,文中还引入了经典的 GW 接触模型与 Persson 模型^[51]进行对比,得到了相似的规律,验证了模型的正确性。针对目前多数研究对象只是各向同性粗糙表面的问题,文献[52]基于共轭梯度 - 快速傅里叶变换法确定各向异性粗糙表面的逾渗阈值,并分析了各向异性对逾渗阈值的影响。

近年来,国内学者在基于逾渗思想的接触式密封界面泄漏机理研究方面也开展了大量工作。对于未考虑密封界面有限尺寸效应的问题,史建成等^[53]提出了一种栅格渗透模型,考虑了真实密封界面的尺寸有限性问题,对密封机理和状态演变特性进行研究,通过逾渗特性分析得到不同栅格尺寸和不同接触面积对逾渗概率的影响。李曼利等^[54]对不同纹理形状和方向对逾渗特性的影响进行了研究。王衍等^[55]基于 WM 函数对机械密封界面进行了分形形貌表征,结合逾渗理论建立了密封界面泄漏通道模型,揭示了端面比压、分形参数对泄漏率的影响规律。为了使研究对象更接近三维实际,嵇正波等^[56]将密封界面在高度方向上也进行了网格划分,研究了不同网格层数对逾渗阈值影响,计算了喉部尺寸,得到泄漏率的数学模型。崔颖等^[57]采用了正交实验法,在较少试验次数的前提下拟合接触面积比,根据逾渗理论和自动寻径算法,得到了密封界面泄漏特性规律。

3 研究趋势

随着计算机网络技术的快速发展,人工神经网络也逐渐被应用于泄漏率模型的预测。文献[58]中提出了一种基于因子分析和小波-BP神经网络的天然气管道阀门内泄漏率预测方法。该方法首先通过因子分析实现了阀声发射信号的降维,然后利用小波分解对样本特征集进行分解,最后建立误差反向传播(BP)神经网络模型,对阀门内泄漏率进行定量预测。

同时,数值模拟与仿真技术近年来也得到了大量应用,特别是在分析流体流动特性等方面优势明显,已有文献[59]证明了数值法在计算泄漏率时比推导出来的经验公式更接近于真实值。近年来,许多学者开始将有限元法和计算流体力学结合^[42,60-61],用于预测密封结构的泄漏率。

随着新兴交叉学科的发展,用于研究多孔介质渗流问题的格子玻尔兹曼(Lattice Boltzmann Method, LBM)方法也备受关注,该方法具有介于微观分子动力学和宏观连续性模型的介观模型的特点,能够处理边界条件复杂的非线性流动问题。对比传统的数值研究方法,LBM法对于研究微观密封泄漏通道这类具有高度复杂性和随机性的结构具有明显的优势,并且可以处理多相或者非混相流体流动问题。格子玻尔兹曼方法的提出,构成了联系宏观和微观、连续与离散之间的桥梁,这种介观模型没有对流体介质进行连续性的假设,可对宏观流体参数分布和微观流动细节进行描述^[62],LBM法可以很好地用于分析接触式密封介质的输运特性,未来该方法可能会成为研究密封泄漏机理的一种有效手段和方法。

4 结论

(1) 作为泄漏模型的基础和重要组成部分,介绍了 Hertz 接触模型、统计学接触模型以及分形接触模型等 3 种经典接触力学模型,对 3 种模型优劣势进行了阐述。

(2) 归纳整理了基于分形理论、多孔介质理论以及逾渗理论等 3 种常见的接触式密封结构泄漏模型研究方法。

(3) 针对传统经验公式计算方法所存在的弊病,总结了基于人工神经网络、数值仿真计算和格

子玻尔兹曼等 3 种用于泄漏计算和研究的新方法和新理论,这些总结和探索能够为进一步开展密封性能分析和密封结构设计提供参考。

参考文献:

- [1] 史建成. 基于逾渗理论的静密封建模方法与泄漏机理研究[D]. 北京:北京理工大学,2015.
SHI J C.Study on static Seal modeling method and leakage mechanism based on percolation theory [D]. Beijing:Beijing Institute of Technology, 2015.
- [2] ROBERT W C.The contact sport of rough surfaces [J]. Science,2018,359 (6371):38.
- [3] 刘勇,夏天,陈志英,等. 粗糙表面统计接触模型的提出与发展[J]. 摩擦学报,2020,40(3):395-406.
LIU Y,XIA T,CHEN Z Y,et al.The presentation and development of statistical contact models for rough surfaces [J].Journal of Tribology,2020,40(3):395-406.
- [4] HERTZ H.On the contact of elastic solids [J].Math, 1882,92:156-171.
- [5] 魏龙,顾伯勤,冯飞,等. 粗糙表面接触模型的研究进展[J]. 润滑与密封,2009,34(7):112-117.
WEI L,GU B Q,FENG F,et al.Research progress of rough surface contact model [J].Lubrication Engineering,2009,34(7):112-117.
- [6] VIOLANO G,AFFERRANTE L.Contact of rough surfaces:modeling adhesion in advanced multiasperity models [J].Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers,Part J:Journal of Engineering Tribology,2019,233(10):1585-1593.
- [7] WANG T J,WANG L Q,GU L,et al.Stress analysis of elastic coated solids in point contact [J].Tribology International,2015,86.
- [8] GREENWOOD J A,WILLIAMSON J B P.Contact of nominally flat surfaces [J].Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences,1966,295(1442):300-319.
- [9] GREENWOOD J A,TRIPP J H.The elastic contact of rough spheres [J].Journal of Applied Mechanics, 1967,34(1):153.
- [10] GREENWOOD J A,TRIPP J H.The contact of two nominally flat rough surfaces [J].Proc. Instn. Mech. Engrs.,1971,185(1):625-633.153-159.
- [11] CHANG W R,ETSION I,BOGY D B.An elastic-plastic model for the contact of rough surfaces [J]. Asme J Trib,1987,109(2):257-263.
- [12] ZHAO Y W,MAIETTA D M,CHANG L.An asperity microcontact model incorporating the transition from elastic deformation to fully plastic flow [J].Journal of Tribology,Transactions of the ASME,2000,122(1):

- 86-93.
- [13] ZHAO G, LI S X, XIONG Z L, et al. Han Qingkai A statistical model of elastic-plastic contact between rough surfaces [J]. Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering, 2019, 43 (1): 38-46.
- [14] ZHAO Y, CHANG L. A model of asperity interactions in elastic-plastic contact of rough surfaces [J]. Journal of Tribology, 2001, 123 (4): 857-859.
- [15] MAJUMDAR A, BHUSHAN B. Role of fractal geometry in roughness characterization and contact mechanics of surfaces [J]. Journal of Tribology, 1990, 112 (2): 205-216.
- [16] MANDELBROT B. How long is the coast of Britain? statistical self-similarity and fractional dimension [J]. Science (New York), 1967, 156 (3775): 636-638.
- [17] MAJUMDAR A, BHUSHAN B. Fractal model of elastic-plastic contact between rough surfaces [J]. ASME J Tribology, 1991, 113: 1-11.
- [18] PERSSON B N J. Elastoplastic contact between randomly rough surfaces [J]. Physical Review Letters, 2001, 87 (11): 22-29.
- [19] 魏龙, 顾伯勤, 冯秀, 等. 机械密封摩擦副端面接触分形模型 [J]. 化工学报, 2009, 60 (10): 2543-2548.
WEI L, GU B Q, FENG X, et al. Fractal model for end contact of friction pair of mechanical seal [J]. CIESC Journal, 2009, 60 (10): 2543-2548.
- [20] 丁雪兴, 严如奇, 贾永磊. 基于基底长度的粗糙表面分形接触模型的构建与分析 [J]. 摩擦学学报, 2014, 34 (4): 341-347.
DING X X, YAN R Q, JIA Y L. Construction and analysis of fractal contact mechanics model for rough surface based on base length [J]. Journal of Tribology, 2014, 34 (4): 341-347.
- [21] 成雨, 原园, 甘立, 等. 尺度相关的分形粗糙表面弹性接触力学模型 [J]. 西北工业大学学报, 2016, 34 (3): 485-492.
CHENG Y, YUAN Y, GAN L, et al. The elastic-plastic contact mechanics model related scale of rough surface [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2016, 34 (3): 485-492.
- [22] YUAN Y, CHENG Y, LIU K, et al. A revised majumdar and Bushan model of elastoplastic contact between rough surfaces [J]. Applied Surface Science, 2017: 425-429.
- [23] YUAN Y, XU K, ZHAO K. A fractal model of contact between rough surfaces for a complete loading-unloading process [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 2020, 234 (14): 1047-1063.
- [24] 孙见君, 嵇正波, 马晨波. 粗糙表面接触力学问题的重新分析 [J]. 力学学报, 2018, 50 (1): 68-77.
- SUN J J, JI Z B, MA C B. Reanalysis of the contact mechanics for rough surfaces [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2018, 50 (1): 68-77.
- [25] 刘鹏, 陈奇, 樊浩, 等. 考虑摩擦的球面切向接触刚度分形模型研究 [J]. 中国机械工程, 2016, 27 (20): 2773-2778.
LIU P, CHEN Q, FAN H, et al. Research on fractal model of tcs between spherical surfaces considering friction factors [J]. China Mechanical Engineering, 2016, 27 (20): 2773-2778.
- [26] HEINZE E. Über gleitring dichtungen, mit besonderer berücksichtigung ihrer verwendung im kältemaschinenbau [J]. Kältetechnik, 1949, 1 (2): 26-32.
- [27] MAYER E. 机械密封 [M]. 第六版. 姚兆生, 等译. 北京: 化学工业出版社, 1981.
MAYER E. Mechanical seal [M]. 6th ed. YAO Z S, et al. trans. Beijing: Chemical Industry Press, 1981.
- [28] 孙见君, 顾伯勤, 魏龙. 基于分形理论的接触式机械密封泄漏模型 [J]. 化工学报, 2006 (7): 1626-1631.
SUN J J, GU B Q, WEI L. Leakage model of contacting mechanical seal based on fractal geometry theory [J]. CIESC Journal, 2006 (7): 1626-1631.
- [29] 冯秀, 顾伯勤. 金属垫片泄漏模型理论研究 [J]. 润滑与密封, 2006 (8): 78-80.
FENG X, GU B Q. Research on leakage model of metallic gasket seal [J]. Lubrication Engineering, 2006 (8): 78-80.
- [30] SUN J J, WEI L, FENG X, et al. Leakage prediction method for contacting mechanical seals with parallel faces [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2010, 23 (1): 7-15.
- [31] 李小彭, 杨泽敏, 王琳琳, 等. 基于分形理论的接触式机械密封端面泄漏模型 [J]. 东北大学学报 (自然科学版), 2019, 40 (4): 526-530.
LI X P, YANG Z M, WANG L L, et al. Leakage model of contacting mechanical seal based on fractal theory [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2019, 40 (4): 526-530.
- [32] 董书娜, 杜春华, 崔亚辉, 等. 基于 Archard 模型的刷式密封单边磨损特性 [J]. 航空动力学报, 2020, 35 (7): 1437-1446.
DONG S N, DU C H, CUI Y H, et al. Unilateral wear characteristics of brush seal based on archard model [J]. Journal of Aerospace Power, 2020, 35 (7): 1437-1446.
- [33] 惠玉祥, 刘莹, 王悦昶, 等. 考虑磨损的接触式端面密封模型及实验 [J]. 摩擦学学报, 2021, 41 (3): 316-324.

- HUI Y X, LIU Y, WANG Y C, et al. Study of contact end face seals considering wear: modelling and experiments [J]. *Tribology*, 2021, 41 (3): 316–324.
- [34] LI Q, POPOV V L. On the possibility of frictional damping with reduced wear: a note on the applicability of archard's law of adhesive wear under conditions of fretting [J]. *Physical Mesomechanics*, 2018, 21 (1): 94–98.
- [35] 李小彭, 杨泽敏, 潘五九, 等. 接触式机械密封端面的分形磨损模型 [J]. *振动. 测试与诊断*, 2020, 40 (5): 841–846.
- LI X P, YANG Z M, PAN W J, et al. Fractal wear model of contact mechanical seal [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2020, 40 (5): 841–846.
- [36] FATT I. The network model of porous media [J]. *Transactions of the AIME*, 1956, 207 (1): 41–46.
- [37] 顾伯勤. 多孔介质气体流动模型在垫片密封中的应用 [J]. *南京化工大学学报 (自然科学版)*, 1999 (1): 3–5.
- GU B Q. Application of gas flow model in porous media to gasket seal [J]. *Journal of Nanjing Tech University (Natural Science Edition)*, 1999 (1): 3–5.
- [38] 包超英, 孟祥铠, 李纪云, 等. 基于多孔介质模型的机械密封静压泄漏特性分析 [J]. *润滑与密封*, 2015, 40 (3): 57–63.
- BAO C Y, MENG X K, LI J Y, et al. The leakage performance analysis of mechanical seals under hydrostatic pressures based on porous media model [J]. *Lubrication Engineering*, 2015, 40 (3): 57–63.
- [39] SUN D, LIU N N, FEI C W, et al. Theoretical and numerical investigation on the leakage characteristics of brush seals based on fluid–structure interaction [J]. *Aerospace Science and Technology*, 2016, 58: 207–216.
- [40] 孙丹, 丁海洋, 李国勤, 等. 基于流固耦合的刷式密封泄漏特性理论与实验 [J]. *航空动力学报*, 2019, 34 (7): 1519–1529.
- SUN D, DING H Y, LI G Q, et al. Theory and experiment on the leakage characteristics of brush seals based on fluid–structure interaction [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2019, 34 (7): 1519–1529.
- [41] MA D Q, LI J, ZHANG Y Q, et al. Application of blade tip shroud brush seal to improve the aerodynamic performance of turbine stage [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 2020, 234 (6): 777–794.
- [42] 马钰虎, 李双喜, 张山雨, 等. 柔性丝刷式密封泄漏特性的数值与试验研究 [J]. *流体机械*, 2020, 48 (6): 6–13.
- MA Y H, LI S X, ZHANG S Y, et al. Numerical and experimental investigation on leakage characteristics of flexible bristle brush seal [J]. *Fluid Machinery*, 2020, 48 (6): 6–13.
- [43] HUANG Y P, YAO F, ZHOU B, et al. Numerical study on permeability characteristics of fractal porous media [J]. *Chinese Physics B*, 2020, 29 (5): 054701.
- [44] 黄晓明, 姚博, 许国良, 等. 基于分形多孔介质运输的金属垫片泄漏研究 [J]. *华中科技大学学报 (自然科学版)*, 2016, 44 (10): 1–5.
- HUANG X M, YAO B, XU G L, et al. Research on leakage of metallic gasket based on fractal porous seepage [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2016, 44 (10): 1–5.
- [45] BROADBENT S R, HAMMERSLEY J M. Percolation processes [J]. *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 1957, 53 (3): 629–641.
- [46] TRIPP J H, GARTE S M. The gas-tightness of separable base metal electric contacts [J]. *IEEE Transactions on Components Hybrids & Manufacturing Technology*, 2003, 4 (1): 85–92.
- [47] PERSSON B N J, ALBOHR O, CRETON C, et al. Contact area between a viscoelastic solid and a hard, randomly rough, substrate [J]. *The Journal of Chemical Physics*, 2004, 120 (18): 8779–8793.
- [48] PERSSON B N J, ALBOHR O, TARTAGLINO U, et al. On the nature of surface roughness with application to contact mechanics, sealing, rubber friction and adhesion [J]. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2005, 17 (1): R1–R66.
- [49] PERSSON B N J, YANG C. Theory of the leak-rate of seals [J]. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2008, 20 (31): 315011.
- [50] BOTTIGLIONE F, CARBONE G, MANTRIOTA G. Fluid leakage in seals: An approach based on percolation theory [J]. *Tribology International*, 2009, 42 (5): 731–737.
- [51] PERSSON B N J. Theory of rubber friction and contact mechanics [J]. *Journal of Chemical Physics*, 2007, 115 (8): 3840–3861.
- [52] YANG Z M, LIU J H, DING X Y, et al. The Effect of anisotropy on the percolation threshold of sealing surfaces [J]. *Journal of Tribology*, 2019, 141 (2): 022203.
- [53] 史建成, 刘检华, 杨志猛, 等. 基于栅格渗漏模型的静密封界面状态演变特性研究 [J]. *机械工程学报*, 2016, 52 (7): 104–113.
- SHI J C, LIU J H, YANG Z M, et al. On the phase transition characteristic of static sealing interface based on lattice leakage model [J]. *Journal of Mechanical*

- Engineering, 2016, 52 (7): 104–113.
- [54] 李曼利. 表面形貌逾渗参数分析及数值模拟[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2016.
- LI M L. Numerical simulation and analysis of percolation parameters of surface topography [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2016.
- [55] 王衍, 王达, 曹彬, 等. 基于逾渗理论的接触式机械密封泄漏特性分析[J]. 润滑与密封, 2018, 43 (5): 76–80.
- WANG Y, WANG D, CAO B, et al. Leakage characteristics analysis of contacting mechanical seal based on percolation theory [J]. Lubrication Engineering, 2018, 43 (5): 76–80.
- [56] 嵇正波, 孙见君, 陆建花, 等. 基于逾渗理论的机械密封界面静态泄漏预测方法[J]. 摩擦学学报, 2017, 37 (6): 734–742.
- JI Z B, SUN J J, LU J H, et al. Predicting method for static leakage of contacting mechanical [J]. Tribology, 2017, 37 (6): 734–742.
- [57] 崔颖, 孙唯一, 于颖嘉, 等. 基于正交实验的粗糙表面接触密封性能预测方法[J]. 大连海事大学学报, 2019, 45 (3): 53–58.
- CUI Y, SUN W Y, YU Y J, et al. Prediction method of contact sealing performance of rough surface based on orthogonal experiments [J]. Journal of Dalian Maritime University, 2019, 45 (3): 53–58.
- [58] ZHAO H X, LI Z L, ZHU S B, et al. Valve internal leakage rate quantification based on factor analysis and wavelet-BP neural network using acoustic emission [J]. Applied Sciences, 2020, 10 (16): 5544.
- [59] 张鹏, 李双喜, 王梁, 等. 基于流固耦合的接触式机械密封端面泄漏率的研究[J]. 流体机械, 2017, 45 (7): 17–21.
- ZHANG P, LI S X, WANG L, et al. Study on the fluid-solid coupled of the leakage rate of seal face for contacting mechanical seal [J]. Fluid Machinery, 2017, 45 (7): 17–21.
- [60] 李伟平, 贾占举, 路茜, 等. 金属封严环泄漏率预测方法[J]. 航空动力学报, 2019, 34 (2): 368–375.
- LI W P, JIA Z J, LU X, et al. Method to predict leakage rate of metal seal ring [J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 34 (2): 368–375.
- [61] 胡廷勋, 周坤, 力宁, 等. 指尖密封泄漏特性数值计算与试验研究[J]. 推进技术, 2020, 41 (5): 1089–1096.
- HU T X, ZHOU K, LI N, et al. Numerical calculation and experimental study on leakage characteristic of finger seal [J]. Journal of Propulsion Technology, 2020, 41 (5): 1089–1096.
- [62] 刘洋. 复杂通道内流体微流动的 LBM 法模拟研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2018.
- LIU Y. Simulation of fluid flow in complex channels by LBM method [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2018.

作者简介: 闫国华 (1964), 男, 教授, 硕士研究生导师, 博士, 主要从事航空发动机噪声与排放、飞机噪声适航等方面的研究。

通信作者: 刘勇 (1989), 男, 讲师, 硕士研究生导师, 博士, 主要从事航空发动机结构强度振动与密封等方面的研究, 通信地址: 300300 天津市东丽区津北公路 2898 号中国民航大学航空工程学院, E-mail: liuyongyb@126.com。

本文引用格式:

闫国华, 武松, 刘勇, 等. 接触式密封结构泄漏模型研究现状及发展[J]. 流体机械, 2022, 50 (10): 61–69.

YAN G H, WU S, LIU Y, et al. Research status and development of leakage model of contact seal structure [J]. Fluid Machinery, 2022, 50 (10): 61–69.

(上接第 15 页)

- [14] 夏莉, 杨卫波, 徐瑞. 参数对横流闭式冷却塔冷却效率的影响[J]. 扬州大学学报 (自然科学版), 2018, 21 (4): 27–32.
- XIA L, YANG W B, XU R. Study on the effect of different parameters on cooling efficiency of cross-flow cooling tower [J]. Journal of Yangzhou University (Natural Science Edition), 2018, 21 (4): 27–32.
- [15] 孙念心. 风冷蒸发复合型横流闭式冷却塔换热性能的理论及实验研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2021.
- SUN N X. Theoretical and experimental research on heat exchange performance of air-cooled evaporative compound type cross-flow closed cooling tower [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2021.
- [16] 方修睦, 姜永成, 张建利. 建筑环境测试技术 (第二版) [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- FANG X M, JIANG Y C, ZHANG J L. Testing technology for building environment (2nd edition) [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008.

作者简介: 杨卫波 (1975), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事建筑节能与可再生能源利用方面的研究, 通信地址: 225127 江苏省扬州市扬州大学电气与能源动力工程学院, E-mail: yangwb2004@163.com。

本文引用格式:

杨卫波, 张钰, 孙念心, 等. 风冷蒸发复合型横流闭式冷却塔冷却性能的试验研究[J]. 流体机械, 2022, 50 (10): 8–15.

YANG W B, ZHANG Y, SUN N X, et al. Experimental investigation on the cooling performance of an air-cooled evaporative composite cross flow closed cooling tower [J]. Fluid Machinery, 2022, 50 (10): 8–15.