

DOI: 10.3901/JME.2022.19.166

多孔储液介质自润滑机理研究进展*

秦红玲¹ 徐行² 舒现维² 张小龙² 李响²

(1. 福州大学机械工程及自动化学院 福州 350116;

2. 三峡大学水电机械设备设计与维护湖北省重点实验室 宜昌 443000)

摘要: 多孔储液介质是启发自关节软骨的仿生摩擦材料, 因具有良好的自润滑性能, 在工业生产中发挥着重要作用。早期多孔储液介质多是针对不同基体材料及骨架结构进行优化设计, 或是根据单因素理想边界建立润滑数值模型, 对多孔储液介质的润滑机理缺乏系统的理论描述, 限制了其大规模的工业应用。根据不同的结构形式和润滑机理, 将多孔储液介质分为有限直孔储液介质和随机多孔储液介质, 总结了有限直孔储液介质中空化现象、流体运动、惯性效应、气-液耦合对润滑性能的影响, 论述了基于渗流力学、流-固耦合作用的随机多孔储液介质自润滑理论的发展, 以及多孔储液介质的应用现状。分析和讨论了多孔储液介质自润滑机理研究的难点问题, 对推动多孔储液介质润滑机理的研究和工程实践应用具有重要的参考意义。

关键词: 多孔介质; 润滑机理; 流-固耦合; 渗流特性; 模拟仿真

中图分类号: TH117

Research Progress on the Self-lubrication Mechanism of Liquid-porous Medium

QIN Hongling^{1,2} XU Xing² SHU Xianwei² ZHANG Xiaolong² LI Xiang²

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350116;

2. Hubei Key Laboratory of Hydroelectric Machinery Design & Maintenance, China Three Gorges University, Yichang 443000)

Abstract: The liquid-porous medium is a type of biomimetic tribological material, which inspired by articular cartilage and plays a significant role in industrial production due to its good self-lubricating properties. Early designs of the porous liquid storage media are mostly based on different matrix materials and framework structures. The lubrication numerical models of the porous liquid storage media were established based on the ideal single-factor boundaries and lacked a systematic theoretical description, which limits the large-scale industrial application of the liquid-porous medium. According to the different structures and lubrication mechanisms of the liquid-porous medium, they are classified into the finite straight pore liquid storage media and the random porous liquid storage media. On this basis, the effects of cavitation, fluid motion, inertia effect, and fluid-solid interaction on the lubrication performances of the finite straight pore liquid storage media are summarized. And the development of the random porous liquid storage medium lubrication theory related to seepage mechanics, fluid-solid coupling, and the application status of the liquid-porous medium are also summarized. The problems that existed in studying the lubrication mechanism of the liquid-porous medium are analyzed and discussed, which have important reference significance for promoting the study of the lubrication mechanism and the application in engineering practice of the liquid-porous medium.

Key words: porous medium; lubrication mechanism; fluid-solid interaction; seepage characteristic; simulation

* 国家自然科学基金(51975325)和三峡大学学位论文培优基金项目资助。
20210905 收到初稿, 20220323 收到修改稿

0 前言

摩擦学是研究摩擦、磨损与润滑的学科。摩擦引起能量消耗, 磨损导致零件表面损伤、材料转移, 而润滑则是降低摩擦、控制磨损的技术。提升润滑效果对节约能源, 延长机械设备使用寿命以及提高设备可靠性有着重要意义^[1-2]。人类很早就开始了对润滑机理的探求, 早在牛顿将“摩擦”作为一项科学来研究之前, 古埃及的劳动人民就已把润滑知识运用在金字塔的修建上^[3]。我国也在西汉时期刘安编纂《淮南子·原道训》中出现了“润滑”一词。宋代黄庭坚在《好事近·潇洒荐冰盘》写道“画堂饮散已归来, 清润转更惜”、明代的方孝孺《游清泉山记》也曾提到“蹶而升, 润滑不可停足”, 都表明古代劳动人民直观地掌握了用液体润湿固体表面, 减小运动阻力的技艺。而在 20 世纪 90 年代提出的仿生摩擦学将这一探求推向了新的高度^[4]。

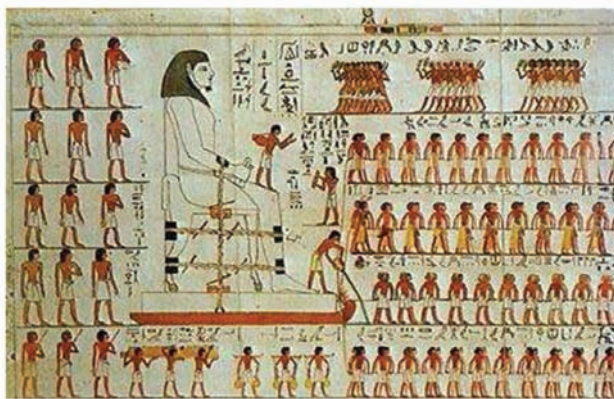


图1 金字塔的修建中采用润滑技术移动巨型石像

生物体的捕食、运动、繁衍等生命活动都有赖于润滑^[5], 其体内的多孔储液介质保证了润滑效果的优异性, 同时也蕴藏着独特的润滑机理。人骨关节软骨就是典型的多孔储液介质, 其固-液耦合承载能够大幅度减小摩擦因数降低磨损。生物血管内皮糖萼层的超微弹性多孔结构与体液构成的多孔储液介质, 在受压变形后会导致摩擦间隙的流体升力大幅提升, 使得生物体具有天然灵活性与耐久性^[6-7]。人体颅骨与大脑间的蛛网膜下隙是天然的多孔结构, 其与脑脊液形成的多孔储液介质会使得当头部受到冲击时, 孔隙中的脑脊液受压流出, 大脑相对颅骨做“0”摩擦运动^[8-9]。此类生物体中的多孔储液介质优秀润滑性能背后的原理, 可为工程中开发并运用相应的润滑技术时, 提供新的设计思路及创新方法。目前, 对多孔储液介质自润滑机理的研究主

要有两种方法: 其一针对有限直孔储液介质, 基于雷诺方程, 借鉴表面织构润滑理论的研究方法, 同时考虑多维度因素对多孔储液介质自润滑性能的影响, 甚至加入非稳态气相边界条件进行求解; 其二针对随机多孔储液介质, 基于渗流力学进行流-固耦合作用下液相承载力的建模求解。本文从有限直孔和随机多孔储液介质的自润滑机理研究, 以及多孔储液介质的应用等 3 个方面进行综述, 以期多孔储液介质自润滑机理研究及创新应用提供参考; 同时, 探讨与分析多孔储液介质自润滑理论现阶段面临的主要问题, 以便对今后相关的研究工作进行重点突破。

1 有限直孔储液介质自润滑机理研究

有限直孔储液介质多采用电子束和激光加工、微机械刻蚀、反应离子刻蚀、增材制造等技术制备^[10-12], 在摩擦副上加工出与织构类似的多孔微结构, 在孔隙中注入润滑液, 形成固-液双相复合体。与表面织构减摩擦降磨效应类似, 有限直孔储液介质也通过微孔吸纳磨屑和微孔喉道对流体的泵送作用来降低摩擦磨损, 只是其孔隙相对更深, 且常因孔隙中润滑介质并未充满, 导致其中的气相分布对润滑状态的影响不能忽略。

1966 年, HAMILTON 等^[13]发现轴承表面的微小不规则结构能够产生流体动压润滑效应, 从而具备一定的承载能力。随后人们对这一发现进行了深入研究, 发现构造表面微结构对于提高摩擦副的润滑性能有着重要意义。表面微结构首先被商用于内燃机气缸套, 通过珩磨工艺在缸套表面制备的微槽结构能够产生流体动压效应并截留磨屑, 从而延长设备的使用寿命^[14-16]。ETSION 等^[17]假定流体不可压缩, 基于二维雷诺方程, 对具有球形凹坑结构的机械密封件产生的润滑升力进行了理论分析, 他们发现表面微结构使流体承载能力增加是因为产生了局部空化, 而微结构尺寸的选择对于这种有益现象的产生至关重要。其实验数据也表明相较于光滑表面, 具有表面微结构的摩擦副磨损寿命可提高 3 倍^[18], 与理论结算结果相符。自此之后, 构造表面微结构以提高机械装备的摩擦学性能受到广泛关注。

表面微结构可作为润滑剂贮存器, 在乏油的情况下为接触面提供润滑剂^[19-20]。在其如何助力表面润滑方面, 学术界主流的观点是微结构促进了流体润滑升力的产生, 在混合润滑和流体动压润滑的情

况下, 微结构增强了流体动压润滑效应^[21]。

对于表面微结构如何影响润滑升力大小的最早解释是, 表面微结构导致了局部空化, 使得微结构内流体压力分布不均, 使润滑升力发生改变^[22-24], 如图 2 所示。若只考虑单个微结构单元中典型压力的分布状况, 空化现象的出现具有以下情况^[25]。

(1) 当空化产生的负压远小于承载力时, 空化现象很难出现。

(2) 当空化产生的负压小于承载力时, 可以采用基于非质量守恒的算法分析空化现象。

(3) 当空化产生的负压大于承载力时, 可以采用基于质量守恒的算法分析空化现象。

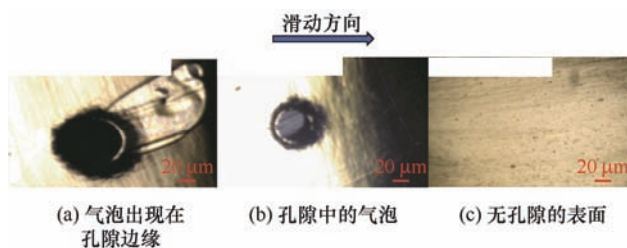


图 2 不同位置的润滑液膜空化现象

流体运动是多孔储液介质产生润滑升力的根本原因之一, 流体运动一般由质量守恒方程(连续性方程)和粘性不可压缩流体动量守恒方程(Navier-Stokes 方程)控制。润滑理论中更为常用的 Reynolds 方程是基于 Navier-Stokes(N-S)方程导出的, 推导过程中忽略了惯性效应、重力、油膜方向压力变化等因素^[26-28]。N-S 方程通常用商业的 CFD 软件或简化的算法求解, 而 Reynolds 方程通常开发专门的代码程序来实现求解。与 N-S 方程相比, Reynolds 方程计算工作量相对较低, 但由于在推导过程中所作的假设, Reynolds 方程难以描述三维流动现象(如微孔隙内部的流体再循环), 会导致计算结果的误差增大; N-S 方程则在瞬态条件下的模拟、微结构参数研究或考虑表面粗糙度、气相填充、小纹理结构的摩擦副表面的流体压力分布时是无解的^[29-31]。DOBRICA 与 FILLON 等^[32-33]基于具备微结构的摩擦副, 比较了采用 Reynolds 和 N-S 模型计算的有效性, 认为有效性取决于两个参数: 雷诺数和纹理结构的长宽比, 当模拟浅凹微结构和低雷诺数流动, 雷诺方程仍然适用, 而深纹理可能导致流体再循环, 建议使用 N-S 方程。对于高雷诺数流体的运动状态, 特别是表面纹理的深度较大时, 惯性和再循环效应对压力分布都有着重要影响, 应采用完整的 N-S 方程。尽管如今的计算能力能够求解

理想边界条件下的 N-S 方程, 但在大多数情况下 Reynolds 方程仍然是最有吸引力的选择, 特别是对于各种复杂状况下的求解, 例如瞬态条件, 粗糙表面或混合润滑, Reynolds 方程能够有效简化计算模型, 提高计算效率。

表面微结构诱导流体产生的惯性效应是影响润滑升力大小的另一要素。润滑膜具有两种惯性效应, 液膜弯曲产生的离心惯性力以及流体加速产生的对流惯性力, 在对有限直孔储液介质润滑性能的研究中一般只考虑对流惯性力, 这也是近 30 年来微结构表面润滑机理研究的热点之一。惯性效应最早由 ARGHIR 等^[34-36]提出, 其针对不同尺度下的微结构单元, 求解了完整的 N-S 方程, 认为惯性效应会增强高雷诺数流体的承载能力, 但其数值模型中微结构单元的长宽比远大于典型润滑理论中的长宽比, 也会导致流体具有明显的惯性效应。SAHLIN 等^[26,37-38]利用 CFD 方法进一步的研究了表面微结构中流体的惯性效应, 认为惯性效应与承载力间具有较强的相互作用关系, 当微结构深度接近出现回流现象(凹坑内流动循环)的深度时, 润滑膜具有最大承载力, 如图 3 所示。KRAKER 等^[39]发现惯性效应既能导致承载能力的增加也能导致承载能力的减少, 具体取决于局部微结构中流体的速度、黏度等条件。CUPILLARD 等^[40-41]基于 CFD 对表面具有微结构的滑动轴承的润滑性能进行了研究, 发现惯性效应并不一定对承载能力产生积极影响, 只有孔隙深度到一定值时才会观察到积极作用, 这与 SAHLIN 等的研究结果相似。MENG 等^[42]考虑流体惯性效应, 数值模拟了微孔隙结构参数对滑动轴承摩擦学性能的影响, 发现微孔隙能够促进流体动压润滑效应, 从而提供更大的润滑承载力, 但具体效果取决于孔隙参数的设计, 孔隙过深会诱导流体再循环从而削弱流体动压润滑效应, 如图 4 所示。

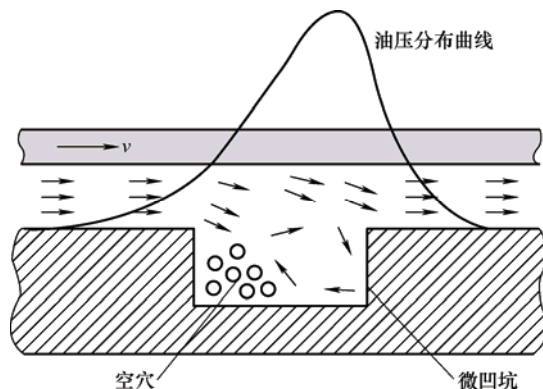


图 3 表面微结构中液膜的对流惯性作用机理

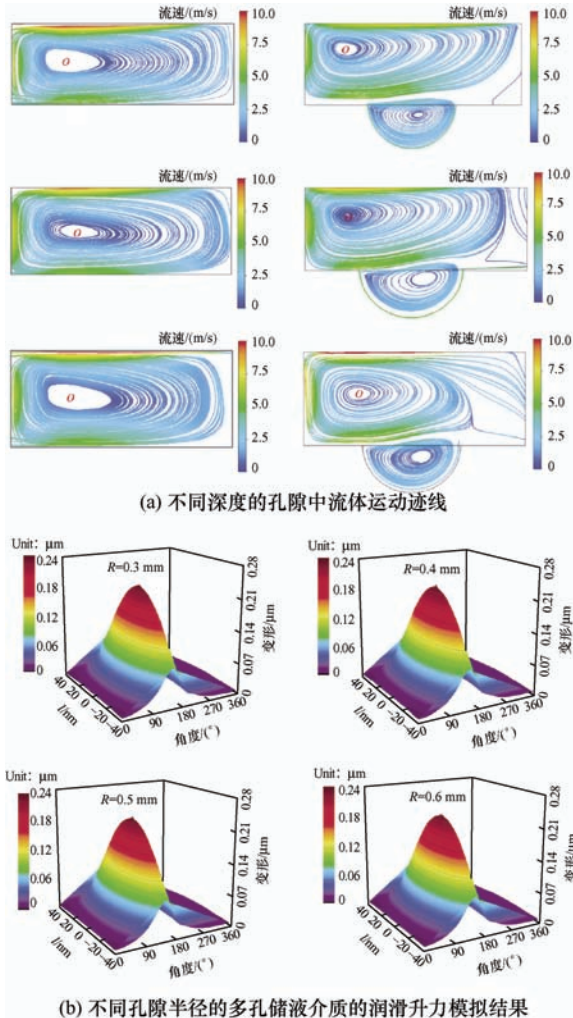


图4 孔隙参数对多孔储液介质摩擦学性能的影响

非饱和有限直孔储液介质中的气泡会因压力的变化而逃逸至摩擦副表面, 其存在状态会影响滑动阻力的大小。当气泡在孔隙中稳定存在时, 气体受压承载, 增强流体润滑效果; 当气泡进入润滑液膜后, 会促使润滑液黏度提高, 滑动阻力变大, 因而捕捉分析有限直孔多孔储液介质摩擦过程中气泡的分布状态, 是研究该类润滑机理的重点与难点^[43-45]。RAYLEIGH 和 PLESSET^[46]基于气泡的演化特征, 推导出了奠定气-液动力学基础的 R-P 方程, 以模拟流体中的气体运动。而针对于球形气泡在粘性流体中的萌发与溃灭, SINGHAL^[43]、SCHNERR 等^[47]推导出了气泡生成和气泡破裂的演化模型。CAMNIPRASART 等^[48]假定气-液混合相为非牛顿流体, 利用连续介质理论对 Reynolds 方程进行推导, 研究表明液膜的含气率严重影响多孔储液介质的润滑性能, 但气泡半径的影响很小。韩中领等^[49]研究了有限直孔多孔储液介质的微孔隙中气-液二相作用对润滑性能的影响, 基于 Gibbs 自由能与弯月面

力的耦合作用, 提出了表达气泡压力与介质承载力间关系的数值模型, 该模型揭示了有限直孔储液介质孔隙结构参数对润滑介质与气泡相互作用的影响机理。如图 5 所示, CHEN 等^[50]研究了微观孔隙中气泡的生长状态, 阐述了孔隙结构参数与气泡状态间的耦合联系。

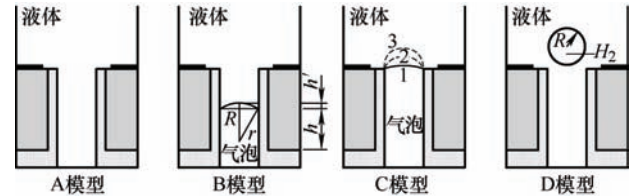


图5 孔隙中气-液界面变化模型示意图

- (1) 随着固相压力的增加与界面滑移, 孔隙中出现气泡形成气-液界面(凹形弯月面), 界面形态主要由气泡高度与曲率半径来定义。
- (2) 随着固相压力与界面滑移速度的不断增加, 当气泡仍在孔隙中时, 气泡高度不断增加, 曲率半径几乎保持不变。
- (3) 当气泡高度达到孔隙深度时, 气泡高度开始保持不变并等于孔隙深度, 但曲率半径开始减小, 直到等于孔径。
- (4) 随着压力与滑移速度的不断变化, 气泡离开孔隙进入润滑液膜。

为了获得更优的减磨、润滑效果, 有限直孔储液介质中大量的试验及理论研究的最终目的, 是设计合理的孔隙结构以实现流体润滑。但受结构限制, 有限直孔储液介质的储液量、持液能力等相关性能, 仍然难以满足极端工况下表面防护要求, 无法满足高可靠性, 长寿命的自润滑界面防护要求。随机多孔储液介质可在参考有限直孔储液介质的基础上, 优化表面孔隙参数及内部孔隙形态而提升润滑性能, 其作为一种固-液双相复合体还具备高孔隙率、储液率与超微弹性结构等摩擦学特征, 能够提供更大的润滑升力, 有望实现储液自循环状态下的流体润滑。

2 随机多孔储液介质自润滑机理研究

随机多孔储液介质锥形的出现可追溯到 20 世纪初, 研究人员基于仿生学原理采用粉末冶金的方法制备了含油率在 10%~40% 的多孔含油轴承^[51]。1975 年 BEAR^[52]给出了较为完整的多孔储液介质定

义后, 研究人员开始对多孔储液介质的孔隙率、孔隙形状、润滑膜的形成进行研究, 指导了多孔含油轴承的开发和优化, 使之逐渐成为了汽车、家电、农业机械、精密仪器等各种工业制品中不可或缺的基础零部件。

对于随机多孔储液介质自润滑机理的研究, 有学者认为其析出液在多孔表面铺展成膜同样遵循牛顿流体模型, 液膜压力分布也可由 N-S 方程组或 Reynolds 方程组求解^[53-54]。SKOTHEIM 和 MAHADEVAN 等^[55-56]在 2004 年还发表了著名的 S-M 理论, 主要考虑界面变形与流体压力的相互作用对润滑性能的影响, 该理论存在着两个假设: (1) 多孔储液介质摩擦间隙填充有连续流体; (2) 多孔储液介质内部骨架结构中流体的运动忽略不计。基于上述假设, 他们认为针对任何不同材料的骨架结构, 弹性骨架与粘性流体运动间的相互作用都会导致切向力与法向压力的耦合(流体压力使固相变形产生法向压力)。采用柔软度 $\eta(\eta = P/K = Y/h_x)$ 来度量流-固耦合效应, 并给出了流-固耦合不同程度下 η 变化特性; 式中 P 为流体压力, K 为骨架弹性刚度, Y 为表面挠度, h_x 为润滑膜厚。基于该理论, Reynolds 方程仍可用于流体间隙中计算流体压力, 而多孔储液介质中固相骨架所产生的承载力则可基于弹性理论计算。

但实际上对随机多孔储液介质自润滑机理的研究, 不能忽略微孔隙中的流体运动, 多孔储液介质是一种固-液双相复合体, 其润滑性能主要取决于孔道中润滑液的析出量, 而析出量受控于其孔隙率、微孔结构形态、固相的接触变形程度以及流-固耦合效应。此外, 润滑膜不连续时摩擦副固-液双相承载; 工况变化时, 多孔表面的微孔喉道对润滑介质存在“泵送”与“回收”作用, 使润滑介质在孔道和摩擦界面间循环流动, 在这些方面若只考虑基本的 Reynolds 方程乃至 N-S 方程解析流体运动, 都难以建立恰当的润滑数值模型。

对随机微孔隙中的流体运动研究可追溯到 1856 年, DARCY^[57]基于在砂土中进行的渗流试验提出了 Darcy 定律, 一般形式如下

$$Q = K \cdot A \cdot J \text{ 或 } u = K \cdot J \quad (1)$$

式中, Q 为渗透流量; A 为渗透断面面积; J 为水力坡度; K 为渗透系数; u 为介质流速。Darcy 定律从宏观上描述了流体在随机多孔储液介质中流动过程的统计学规律, 解释了流量、流体运动速度、

水力坡度间的作用关系, 但 Darcy 定律由于理想化的边界条件, 需要假定渗流介质连续流动且为低雷诺数牛顿流体、流体为单相流、忽略流体惯性、不考虑气体作用等, 其适用性与可靠性亟待提高^[58]。

BRINKMAN^[59]考虑流体在润滑膜层微孔中的滑移剪切效应同时, 引入解释 Darcy 定律中粘滞阻尼效应的参数, 提出了著名的 Brinkman-Darcy 定律, 进一步拓展了 Darcy 定律的适用范围。BOUBENDIR^[60]和 ABDALLAH^[61]分别基于 Darcy 定律和 Brinkman-Darcy 定律研究了多孔储液介质的弹流润滑效应, 其假定变形结构为线性弹性体, 通过简化的薄层模型来计算变形量, 认为结构的变形对润滑效果有着重要影响。BEAVERS 等^[62]在多孔轴承表面和流体层的接触界面间引入 slip-flow 边界滑移条件, 并通过试验验证了边界条件引入的有效性, 但其模型中所引入的 slip-flow 系数需要通过实验才能确定, 不同材料以及不同渗透率的多孔结构的 slip-flow 系数均各不相同, 虽在一定程度上拓展了 Darcy 定律, 但也使得该模型求解极为繁琐。许多学者也从不同的角度出发建立了随机多孔储液介质自润滑模型, 如许友生等^[63]基于 Boltzmann 微观方程导出了 N-S 方程, 采用了 Irmay 平均算法^[64]从而避免了液体对流项对 Darcy 定律的影响, 建立了稳态多孔介质模型。SAKIM 等^[65]则基于 Darcy 定律和 Winkler 模型^[66]考虑非牛顿流体及固相弹性变形对润滑性能的影响, 建立了非线性流体在多孔介质中的流动模型, 进一步发展了多孔储液介质自润滑理论。MACKAY 等^[67]研究了多孔弹性介质中 Poiseuille 流体动力学模型^[68], 发现在有限渗流区域内流体黏度会不断增加, 推导了有关流量以及孔隙结构参数的 Darcy 定律拓展多孔储液介质模型。

关于流-固耦合作用下的多孔储液介质自润滑机理的研究, 目前广泛使用的模型是 MOW 等^[69-70]在 20 世纪 80 年代基于混合理论建立的本构方程, 一般形式如下

$$\sigma = Ce - pI \quad (2)$$

式(2)中 σ 为骨架应力, C 为固相基质的弹性矩阵, 由弹性模量 E 与泊松比 ν 构成; e 为应变矩阵, Ce 为固相应力, p 为孔隙压力, I 为 Kronecker 符号, pI 为液相应力, 该理论模型考虑了多孔储液介质固相基质 (Ce) 与间隙流动 (pI) 的耦合作用。TERZAGHI^[71]在研究土力学时, 观察到饱和土体中的变形与有效应力存在着密切联系, 提出了有效应

力原理, 并建立了一维固结模型。因其在本构方程中引入孔隙率来体现流-固耦合变形对系统应力场的影响, 使之在求解流-固耦合问题上更具优势。BIOT^[72-73]在其基础上引入 Darcy 定律来控制多孔储液介质中液体流动, 考虑固结过程中液体压力的消散与骨架变形间的耦合作用, 提出了完善的三维固结理论, 其张量形式如下

$$\sigma_{ij} = \sigma'_{ij} - \alpha \delta_{ij} \sigma \quad (3)$$

式中, σ_{ij} 为总应力(增量); σ'_{ij} 为骨架平均应力; σ 为水压增量; α 为固相力学参数。目前多孔储液介质中流-固耦合理论研究主要围绕 BIOT 的三维固结理论开展, 只是所选择的边界条件或关注的要素有所不同。例如, FENG 与 WEINBAUM^[74]根据人体血管内皮糖萼层的高承载能力, 考虑流体在弹性超微结构内部的流动特性, 提出了随机多孔储液介质自润滑理论方程, 即 F-W 理论, 该理论表明: (1) 多孔储液介质滑动界面上液膜的压力分布遵循 $\alpha = H / K_p^{1/2}$, 式中 α 为 Brinkman 无量纲渗透参数, H 为随机多孔储液介质的孔层厚度, K_p 为 Darcy 渗透率; (2) 考虑渗流作用的流体运动所产生的升力相比经典润滑理论($\alpha = 0$)能够大四个数量级乃至更多; (3) 多孔储液介质固相瞬时受压变形, 固相孔隙边界截留流体, 流体压力增大以提高承载能力。WU 等^[75]将此理论进一步拓展到高山滑雪的力学承载模型, 该模型综合考虑了气体和固相变形产生的承载升力, 发现孔隙气体压力对总承载力的贡献从 30% 到 70% 不等, 具体取决于滑行速度等外部条件。F-W 和前述 S-M 的理论相比有以下不同: (1) 在 F-W 理论中, 摩擦副与多孔储液介质的固相结构直接接触, 而在 S-M 理论中, 摩擦副通过润滑膜与固相分离, Reynolds 方程仍旧适用; (2) 在 S-M 理论中认为, 通过多孔结构的流体流量远小于通过摩擦副间隙的流量, 因而忽略了孔隙内部流体与固体间的作用力。而 F-W 理论则认为所有流体都流过多孔结构, 与固相孔隙相互作用。二者都考虑了流-固耦合效应对多孔储液介质自润滑性能的影响, 只是侧重点有所不同。

基于流-固耦合效应, 随机多孔储液介质的 Darcy 渗透率是动态变化的, 实际上大多数润滑材料本身的渗透率也是各向异性的^[76-78], 影响渗透率的主要因素是孔隙尺度、孔隙形状、孔隙率以及分布状态, 考虑流-固耦合效应的动态渗透率模型还有

待进一步发展。BUJURKE 等^[79]引入各向异性渗透率的研究表明, 润滑油膜的承载力会随着孔隙率的提高而降低。TOLL 等^[80]考虑了固相压缩, 推导出随机孔隙受压过程中的动态孔隙率模型, 为动态渗透率模型的准确建立奠定了基础; 房营光等^[81-82]比较了 Kozeny-Carman 模型和 Irmay 模型^[83]发现, Kozeny-Carman 模型针对球形相互贯通的孔隙通道准确度更高, 并给出了渗透率与孔隙半径的关联式。BIOT^[84]与 CAMERON 等^[85]基于渗流力学, 提出了基于流-固耦合作用的动态渗透率数值模型, 并推导了考虑动态渗透率的多孔储液介质的流体控制方程。

对于随机多孔储液介质而言, Brinkman 数、孔隙率、渗透率、固相压缩比等参数的变化都会影响流-固耦合作用下的形变特征, 进而影响润滑介质的析出成膜。在对随机多孔储液介质自润滑机理的研究中发现^[86-88], 当摩擦副滑过多孔储液介质表面时, 由于多孔储液介质的弹性骨架压缩使 Darcy 渗透率降低, 多孔储液介质中流体运动产生的润滑升力将承担大部分外载荷, 固相孔隙结构主要通过诱导液体流动来参与润滑。ZHU 等^[89]试验研究了不同孔隙尺度下的多孔介质的润滑性能, 建立了多孔介质承载模型, 并表明 Brinkman 数、固相压缩系数与固相承载力正相关。WANG 等^[87]考虑了多孔介质的非均匀压缩、骨架结构排布以及多尺度超微结构, 分析了多孔介质的渗透率、孔隙率、固相压缩系数对外部负载的响应, 建立了多孔介质固相压力响应模型。GACKA 等^[90]研究了聚酯多孔材料不同压缩比下, 瞬时截留的流体对润滑升力的贡献, 发现有超过 68% 的润滑升力是由孔隙中的流体提供, 孔隙流体升力的产生是由 Brinkman 数而非雷诺数控制, 固相结构受压变形会阻碍流体运动。LANG 等^[8,91]数值分析了多孔储液介质润滑模型, 发现孔隙层数的提高以及渗透率的降低会有效提升润滑升力, 其认为多孔储液介质在保持良好润滑性能的同时, 拥有谋求高承载能力的巨大潜力。ROBERT 等^[92]基于三种不同材料的多孔储液介质, 针对性的研究了微观结构、固相硬度、渗透率以及孔隙率的关联性, 认为低渗透率的弹性微孔能够产生更大的润滑升力。

此外, 也有部分学者研究了随机多孔储液介质的表面微孔隙结构、材料性质等因素对介质成膜性能的影响。CHEN 等^[93-94]基于分子动力学模拟分析

了孔隙参数对聚酰亚胺基多孔储液介质成膜效果的影响,发现润滑介质的回流机制是毛细管渗透作用,而回流速度与孔隙直径以及渗透率正相关;润滑介质的析出则取决于外部环境的刺激,较大的孔隙直径有利于润滑介质的析出,但孔隙直径过大则会加快润滑介质的外流,从而难以形成持续性的润滑油膜,如图6所示。

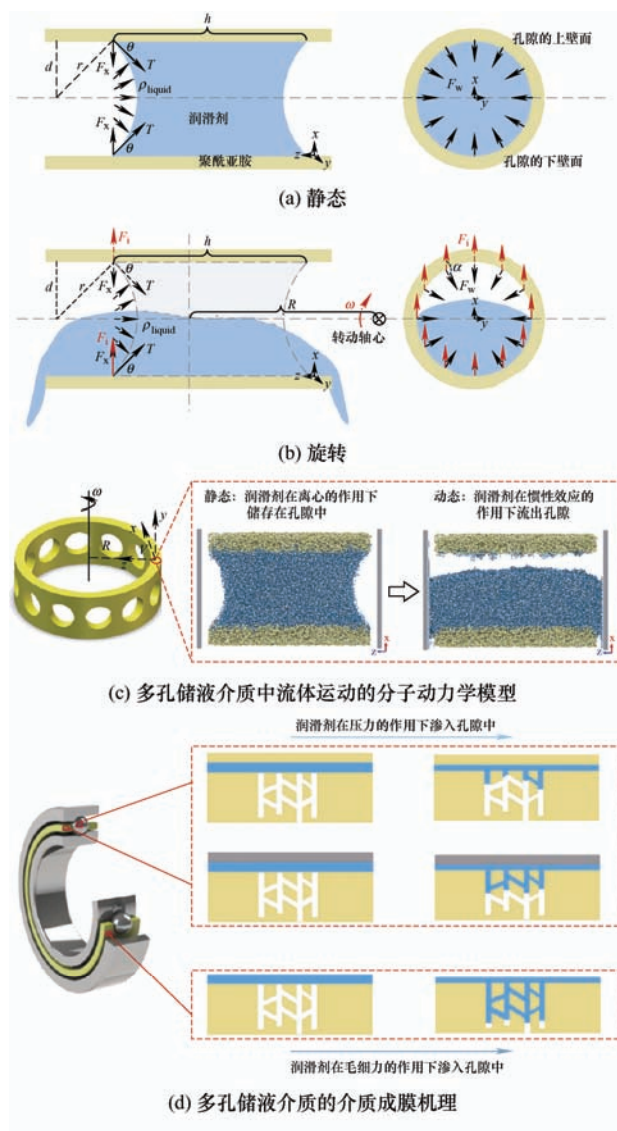


图6 多孔储液介质的孔隙中介质受力示意图

YE 等^[95]通过激光扫描扩大多孔储液介质的表面孔隙直径,以及细粉铺展来缩小表面孔隙直径的方法,研究了表面孔径对多孔储液介质摩擦学性能的影响,发现增大表面孔径使油易于挤出,但会降低流体动压润滑效应,导致摩擦因数增大;缩小表面孔隙直径有利于提高固相骨架承载力从而降低摩擦因数,但减少介质析出,不利于形成稳定持续的润滑油膜,如图7所示。ZHANG 等^[96]

通过化学改性的方法将多孔聚酰亚胺骨架的润湿性从亲水性变为疏水性,改性后的聚酰亚胺基多孔储液介质具有更高的含油保持率以及更为稳定的成膜性,从而获得长期稳定的润滑效果,如图8所示。

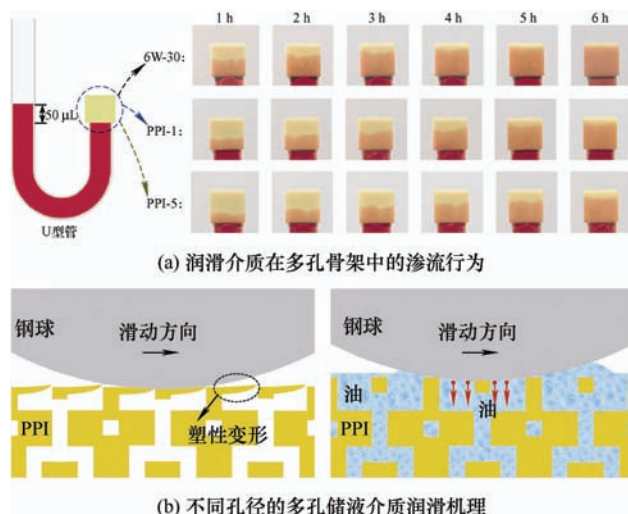


图7 表面孔径对多孔储液介质摩擦学性能的影响

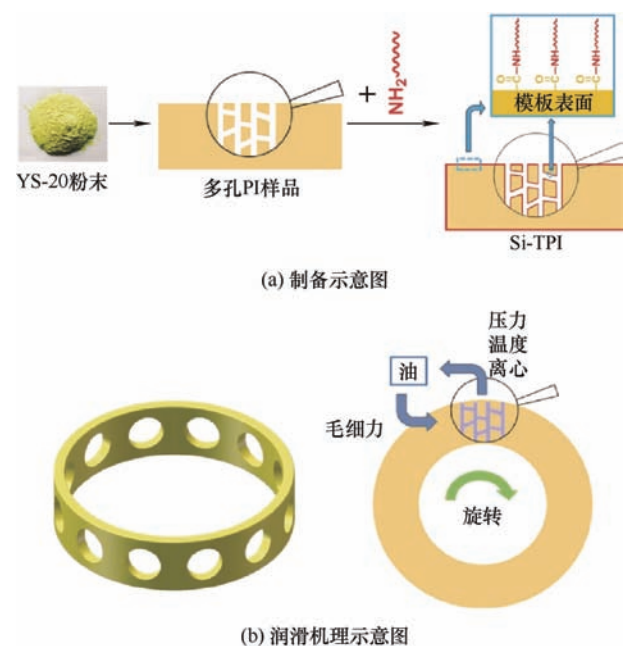


图8 聚酰亚胺基多孔储液介质的制备示意图及其润滑机理示意图

可见,多孔储液自润滑介质的润滑性能受固相材料(弹性模量,泊松比,压缩系数)、孔隙形态(尺寸,形状,分布)及液相在挤压作用下的渗流特性等多参数的影响。与常规摩擦界面(非多孔)润滑机理的求解存在很大的不同。如何厘清润滑状态与固-液相材料参数、多孔结构形态、摩擦表面形貌及工况环境间的定量关系,建立恰当的

润滑状态分析模型, 对于指导多孔储液自润滑介质的设计制备, 实现极端环境下的长寿命、高可靠性摩擦副国产化具有重要的理论意义与工程价值。

3 多孔储液介质的应用现状

多孔储液介质启发自关节软骨, 作为一种兼备固-液双相特征的功能材料已开始在生物医学、机械装备制造等多领域应用^[97-98]。

人体关节常承受数倍于人体体重的载荷, 通常在短时间内历经数百万次的往复摩擦, 容易发生疲劳破坏。关节软骨是关节两端组成滑膜的弹性负重组织, 是一种固-液双相复合体, 具有润滑、吸收振动冲击的作用, 如何仿生该种多孔储液介质是学术界和工程界的热点问题。ZHANG 等^[99]以水凝胶为基体, 以 NaCl 颗粒为造孔剂, 采用模板法制备多尺度的多孔储液介质, 表现出优异的润滑与耐磨损性能, 有望在软骨替代、组织工程等领域发挥应用, 如图 9 所示。马志杰等^[100]通过高温烧结多孔碳化硅制备具有完全连通的三维孔隙结构材料, 与人骨关节具有相近的力学指标, 具有理想的骨植入材料的潜质。范望喜等^[101]通过在超高分子量聚乙烯(UHMWPE)中添加不同含量的功能化纳米活性炭, 以 NaCl 为造孔剂, 通过热压成型工艺制备出具有天然软骨力学性能的多孔仿生骨材料。JASON 等^[102]研究表明基于聚氨酯泡沫和磷酸盐缓冲液所制备的多孔储液介质具有良好的摩擦学性能, 已被广泛认可为半月板软骨替代材料。MAYR 等^[103]研究了多孔磷酸三钙支架修复软骨组织的可行性, 结果表明该多孔支架能够在组织中建立生物力学稳定的软骨, 并具有很强的生物活性。人工关节的设计研究多从材料角度出发, 多采用金属^[104](钛合金、不锈钢、钴铬钼合金等)、高分子材料^[105](硅橡胶、聚乙烯、超高分子量聚乙烯等)、复合陶瓷等^[106-107]材料制备, 更多关注材料的生物相容性以及材料本身的摩擦磨损性能。而多孔储液介质自润滑机理的研究, 能在选用合适的固相材料基础上, 指导开发适合生物医疗领域的力学结构与润滑模型, 从而进一步地提高人造关节耐磨性、减小摩擦因数, 同时也为医用弹性护膝、多孔载药缓释垫、复合纱布等医用材料的设计带来新思路。

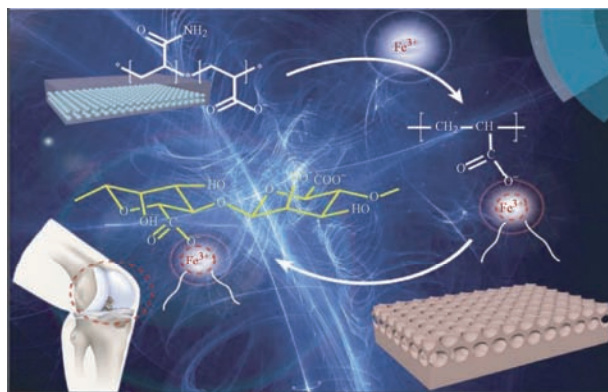


图 9 多孔水凝胶软骨材料

在机械装备制造领域, 机械设备关键部件的长寿命、特殊环境适应能力对极端工况下的设备可靠性有着重要影响^[108]。根据多孔储液介质所开发的含油轴承、航空航天保持架、轴承密封圈等基础零部件, 其优秀的摩擦学性能以及环境适应能力, 对提高我国高端装备制造能力意义重大^[109]。ZHANG 等^[110-111]利用粉末冶金技术制备的铁基多孔含油轴承具有很高机械强度, 在高压重载环境下仍保持良好的自润滑特性。燕松山等^[112]基于微孔金属陶瓷基体二次复合润滑剂制备了自润滑滚子轴承, 在 600 °C 的温度下能够形成完整高温的润滑膜, 从而保证了较低的滚阻系数。SHAO 等^[12]针对精密机械油液污染问题, 利用 SiO₂ 和聚酰亚胺所制备的多孔储液介质在保持高储液量的同时, 能够智能响应外部刺激调节油液循环速度, 如图 10 所示。

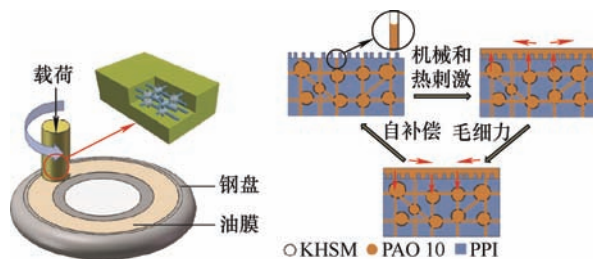


图 10 智能微循环多孔储液介质的润滑机理

邱优香等^[113]针对航空航天等极端环境下的界面防护问题, 基于聚酰亚胺通过引入微孔隙储存润滑液形成多孔储液介质, 结果表明合理的孔隙设置有助于降低界面摩擦因数, 形成长效稳定的润滑油膜。吴海勇等^[114]利用聚四氟乙烯粉末模压、烧结制备了定向孔隙多孔储液介质, 试验表明制备压力与多孔骨架硬度间呈线性正效应关系, 多孔介质内部孔隙具有纤维化组织结构有利于调节润滑油渗流速度, 提高摩擦学性能。多孔储液介质自润滑机理的研究强调提高材料的摩擦磨损性能的同时, 还兼顾

多孔结构的力学性能以及由此而导致的润滑状态工况的转变,能建立基质材料、内部孔隙结构与润滑状态间的耦合联系,其良好的界面润滑液循环特性,能指导开发满足各极端工况下,免维护要求的关键部件。

4 结 论

多孔储液介质自润滑机理研究的热点与难点是基于摩擦学的三个公理,考虑多维度的外部环境刺激建立起准确有效的润滑模型。

有限直孔储液介质在分析空化效应、惯性效应、流体运动、多相流等因素对流体动力润滑的影响方面已取得了丰硕的成果,基于 Reynolds 方程或 N-S 方程的拓展模型,能够通过数值分析耦合理想边界条件的润滑模型,从而计算流体压力分布。但有限直孔储液介质润滑模型多是根据特定工况而建立,而实际上摩擦学问题是多因素耦合作用的结果,工程界很难直接应用。如果在现有的基础上,开发出可靠性强、能耦合多种非理想边界条件的润滑模型,从而避免传统的试错法优化方案,将极大地促进有限直孔储液介质的工业适用范围。

随机多孔储液介质自润滑机理的研究更为关注孔隙中的液体流动,其润滑性能受固相材料、孔隙结构及流体渗流特性的影响,多采用流-固耦合方法与渗流力学基于微观结构参数来建立状态模型。但还需针对工程应用中的高接触强度要求,考虑微孔在载荷和速度作用下的形变和流体在微孔中流变特性,建立固-液耦合作用下多孔储液介质的动力学模型,研究微孔形态参数(孔径,深度,分布等)对多孔储液介质渗透率及析出特性的影响规律。同时也可借助增材制造等技术,试验研究微孔形态参数对多孔储液介质接触性能,润滑状态的影响规律,检验理论分析模型的可靠性和适用性,进一步地探索多孔储液介质结构设计方法,并最终指导多孔储液介质的开发应用。

参 考 文 献

- [1] 温诗铸. 润滑理论研究的进展与思考[J]. 摩擦学学报, 2007, 27(6): 497-503.
WEN Shizhu. Study on lubrication theory-progress and thinking-over[J]. Tribology, 2007, 27(6): 497-503.
- [2] 周峰, 吴杨. “润滑”之新解[J]. 摩擦学学报, 2016, 36(1): 132-136.
- [3] ZHOU Feng, WU Yang. A novel insight into "Lubrication" [J]. Tribology, 2016, 36(1): 132-136.
- [4] FALL A, WEBER B, PAKPOUR M, et al. Sliding friction on wet and dry sand[J]. Physical Review Letters, 2014, 112: 175501-175502.
- [5] 戴振东, 佟金, 任露泉. 仿生摩擦学研究及发展[J]. 科学通报, 2006, 51(20): 2353-2359.
DAI Zhendong, TONG Jin, REN Luquan. Researches and developments of biomimetics in tribology[J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(20): 2353-2359.
- [6] 张嗣伟. 发展仿生摩擦学的展望[J]. 润滑与密封, 2018, 43(1): 1-2.
ZHANG Siwei. Prospects for the development of biomimetic tribology[J]. Lubrication Engineering, 2018, 43(1): 1-2.
- [7] LIN C, KAPER H J, LI W, et al. Role of endothelial glycocalyx in sliding friction at the catheter-blood vessel interface[J]. Sci Rep, 2020, 10(1): 11855.
- [8] ZHU Z H, NATHAN R, WU Q. An experimental study of the lubrication theory for highly compressible porous media, with and without lateral leakage[J]. Tribology International, 2018, 127: 324-332.
- [9] LANG J, NATHAN R, WU Q. Theoretical and experimental study of transient squeezing flow in a highly porous film[J]. Tribology International, 2019, 135: 259-268.
- [10] SABOORI P, GERMANIER C, SADEGH A. Mechanics of CSF flow through trabecular architecture in the brain[C]// Southern Biomedical Engineering Conference, Berlin Heidelberg. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010, 32: 440-443.
- [11] YANG C, JIANG P, QIN H, et al. 3D printing of porous polyimide for high-performance oil-impregnated self-lubricating[J]. Tribology International, 2021, 160: 107009.
- [12] QIN H, XU R, LAN P, et al. Wear performance of metal materials fabricated by powder bed fusion: A literature review[J]. Metals, 2020, 10(3): 304.
- [13] SHAO M, LI S, DUAN C, et al. Cobweb-like structural stimuli responsive composite with oil-warehouse and transportation system for oil-storage and recyclable smart-lubrication[J]. Acs Applied Materials & Interfaces, 2018, 10(48):41699-41706.
- [14] HAMILTON D, WALOWIT J, ALLEN C. A theory of lubrication by microirregularities[J]. Journal of Basic

- Engineering, 1966, 88(1): 177.
- [14] KLIGERMAN Y, ETSION I, SHINKARENKO A. Improving tribological performance of piston rings by partial surface texturing[J]. *Journal of Tribology*, 2005, 127(3): 632-638.
- [15] GRABON W, KOSZELA W, PAWLUS P, et al. Improving tribological behaviour of piston ring-cylinder liner frictional pair by liner surface texturing[J]. *Tribology International*, 2013, 61: 102-108.
- [16] HUA X, SUN J, ZHANG P, et al. Research on discriminating partition laser surface micro-texturing technology of engine cylinder[J]. *Tribology International*, 2016, 98: 190-196.
- [17] ETSION I, BURSTEIN L. A model for mechanical seals with regular microsurface structure[J]. *Tribology Transactions*, 1996, 39(3): 677-683.
- [18] ETSION I. State of the art in laser surface texturing[J]. *Advanced Tribology*, 2010: 761-762.
- [19] YAMAKIRI H, SASAKI S, KURITA T, et al. Effects of laser surface texturing on friction behavior of silicon nitride under lubrication with water[J]. *Tribology International*, 2011, 44(5): 579-584.
- [20] WAN Y, XIONG D. The effect of laser surface texturing on frictional performance of face seal[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, 197(1): 96-100.
- [21] KOVALCHENKO A, AJAYI O, ERDEMIR A, et al. The effect of laser surface texturing on transitions in lubrication regimes during unidirectional sliding contact[J]. *Tribology International*. 2004, 38(3): 219-225.
- [22] ZHANG J, MENG Y. Direct observation of cavitation phenomenon and hydrodynamic lubrication analysis of textured surfaces[J]. *Tribology Letters*, 2012, 46(2): 147-158.
- [23] QIU Y, KHONSARI M M. Experimental investigation of tribological performance of laser textured stainless steel rings[J]. *Tribology International*, 2011, 44(5): 635-644.
- [24] WANG J H, YAN Z J, FANG X, et al. Observation and experimental investigation on cavitation effect of friction pair surface texture[J]. *Lubrication Science*, 2020, 32(8): 404-414.
- [25] GROPPER D, LING W, HARVEY T. Hydrodynamic lubrication of textured surfaces: A review of modeling techniques and key findings[J]. *Tribology International*, 2016, 94: 509-529.
- [26] 温诗铸, 黄平. 摩擦学原理[M]. 4 版. 北京: 清华大学出版社, 2012.
- WEN Shizhu, HUANG Ping. Principles of tribology [M]. 4th Edition. Beijing: Tsinghua University Press, 2012.
- [27] 黄平. 润滑数值计算方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2012.
- HUANG Ping. Numerical calculation method of lubrication[M]. Beijing: Higher Education Press, 2012.
- [28] DOWSON D. A generalized Reynolds equation for fluid-film lubrication[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*. 1962, 4(2): 159-170.
- [29] GAO L, YANG P, DYMOND I, et al. Effect of surface texturing on the elastohydrodynamic lubrication analysis of metal-on-metal hip implants[J]. *Tribology International*, 2010, 43(10): 1851-1860.
- [30] 刘应中, 缪国平. 高等流体力学[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2000.
- LIU Yingzhong, MIAO Guoping. Advanced fluid mechanics[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2000
- [31] ORON A, DAVIS S H, BANKOFF S G. Long-scale evolution of thin liquid films[J]. *Reviews of Modern Physics*, 1997, 69(3): 931-980.
- [32] DOBRICA M B, FILLON M. About the validity of Reynolds equation and inertia effects in textured sliders of infinite width[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 2009, 223(1): 69-78.
- [33] DOBRICA M B, FILLON M, MASPEYROT P. Mixed elastohydrodynamic lubrication in a partial journal bearing—comparison between deterministic and stochastic models[J]. *Journal of Tribology*, 2006, 128(4): 778-788.
- [34] BILLY F, ARGHIR M, PINEAU G. Navier-Stokes analysis of two-dimensional roughness pattern under turbulent flow regime[C]//ASME/STLE 2004 International Joint Tribology Conference, 2004: 559-568.
- [35] ARGHIR M, ROUCOU N, HELENE M, et al. Theoretical analysis of the incompressible laminar flow in a macro-roughness cell[J]. *Journal of Tribology*, 2003, 125(2): 309-318.
- [36] HELENE M, ARGHIR M, FRENE J. Numerical three-dimensional pressure patterns in a recess of a turbulent and compressible hybrid journal bearing[J]. *Journal of Tribology*, 2003, 125(2): 301-308.
- [37] SAHLIN F, GLAVATSKIH S, ALMQVIST T, et al. Two-dimensional CFD-analysis of micro-patterned surfaces in hydrodynamic lubrication[J]. *Journal of*

- Tribology, 2005, 127(1): 96-102.
- [38] SABLIN F. CFD-analysis of hydrodynamic lubrication of textured surfaces[D]. Luleå: Luleå Tekniska Universitet, 2003.
- [39] DEKRAKER A, VANOSTAYEN R, RIXEN D. Development of a texture averaged Reynolds equation[J]. Tribology International, 2010, 43(11): 2100-2109.
- [40] CUPILLARD S, CERVANTES M, GLAVATSKIH S. Pressure buildup mechanism in a textured inlet of a hydrodynamic contact[J]. Journal of Tribology, 2008, 130(2): 1-10.
- [41] CUPILLARD S, GLAVATSKIH S, CERVANTES M J. Inertia effects in textured hydrodynamic contacts[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2010, 224(8): 751-756.
- [42] MENG F, ZHANG L, LIU Y, et al. Effect of compound dimple on tribological performances of journal bearing[J]. Tribology International, 2015, 91: 99-110.
- [43] SINGHAL A K, ATHAVALE M M, LI H, et al. Mathematical basis and validation of the full cavitation Model[J]. Journal of Fluids Engineering, 2002, 124(3): 617-624.
- [44] WANG J, HAN Z, CHEN H, et al. Drag Reduction by Dimples on Surfaces in Plane - Plane Contact Lubrication[J]. Tribology, 2009, 31(3): 159-166.
- [45] 朱效谷, 李勇, 李文平. 电解水式驻留微气泡减阻技术及其可行性分析[J]. 船舶力学, 2014, 18(10): 1165-1174.
- ZHU Xiaogu, LI Yong, LI Wenping. Electrolyzed water retention microbubble drag reduction technology and its feasibility analysis[J]. Ship Mechanics, 2014, 18(10): 1165-1174.
- [46] PLESSET M S, PROSPERETTI A. Bubble dynamics and cavitation[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 1977, 9(1): 145-185.
- [47] HABIL S I. Physical and numerical modeling of unsteady cavitation dynamics[C]// ICMF-2001, 4th International Conference on Multiphase Flow. 2001.
- [48] CHAMNIPRASART K, AL-SHARIF A, RAJAGOPAL K R, et al. Lubrication with binary mixtures: Bubbly oil[J]. Journal of Tribology, 1993, 115(2): 253-260.
- [49] 韩中领, 汪家道, 陈大融. 凹坑表面形貌在面接触润滑状态下的减阻研究[J]. 摩擦学学报, 2009, 29(1): 10-16.
- HAN Zhongling, WANG Jiadao, CHEN Darong. Drag reduction by dimples on surfaces in plane-plane contact lubrication[J]. Tribology, 2009, 29(1): 10-16.
- [50] CHEN H, LI J, CHEN D. Study of drag forces on a designed surface in bubbly water lubrication using electrolysis[J]. Journal of Fluids Engineering, 2006, 128(6): 1383-1389.
- [51] 渡边侑尚, 韩凤麟. 烧结含油轴承[J]. 粉末冶金技术, 2002, 20(3): 120-127.
- TERUHISA Watanabe, HAN Fenglin. Porous sintered bearings[J]. Powder Metallurgy Technology, 2002(3): 120-127.
- [52] BEAR J. Dynamics of fluids in porous media[J]. Soil Science, 1975, 120(2): 162-163.
- [53] NONG K, ANDERSON D M. Thin film evolution over a thin porous layer: Modeling a tear film on a contact lens[J]. Siam Journal on Applied Mathematics, 2010, 70(7): 2771-2795.
- [54] TICHY J A. A porous media model for thin film lubrication[J]. Journal of Tribology, 1995, 117(1): 16-21.
- [55] SKOTHEIM J M, MAHADEVAN L. Soft lubrication[J]. Physical Review Letters, 2004, 92(24): 245509.
- [56] SKOTHEIM J M, MAHADEVAN L. Soft lubrication, lift and optimality[C]// APS Division of Fluid Dynamics Meeting, 2006.
- [57] STEPHEN W. Flow in porous media I: A theoretical derivation of Darcy's law[J]. Transport in Porous Media. 1986, 1(1): 3-25.
- [58] VAFAI K, KIM S J. On the limitations of the Brinkman-Forchheimer-extended Darcy equation[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 1995, 16(1): 11-15.
- [59] BRINKMAN H C. A calculation of the viscous force exerted by a flowing fluid on a dense swarm of particles[J]. Flow, Turbulence and Combustion, 1949, 1(1): 27.
- [60] BOUBENDIR S, LARBI Salah, BENNACER R. Elastic Deformation Effects on the Thermo-Hydrodynamic Aspect of Porous Journal Bearings[J]. Defect and Diffusion Forum, 2014, 353: 275-279.
- [61] ABDALLAH A E, LOTFI H G. Hydrodynamic lubrication of porous journal bearings using a modified Brinkman-extended Darcy model[J]. Tribology International, 2001, 34(11): 767-777.
- [62] BEAVERS G S, JOSEPH D D. Boundary conditions at a naturally permeable wall[J]. Journal of Fluid Mechanics. 1967, 30(1): 197-207.
- [63] 许友生, 刘慈群, 林机. Darcy 渗流定律的微观界定及

- 其应用[J]. 应用数学和力学, 2004, 25(3): 253-261.
- XU Yousheng, LIU Ciqun, LIN Ji. Microcosmic bound theorem of Darcy's law and its application[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2004(3): 253-261.
- [64] IRMAY S. On the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Transactions, American Geophysical Union, 1954, 35(3): 463-467.
- [65] SAKIM A, NABHANI M, ELKHLIFI M. Non-Newtonian effects on porous elastic journal bearings[J]. Tribology International, 2018, 120: 23-33.
- [66] WINKLER E. Die Lehre von Elastizität und Festigkeit [M]. 1867.
- [67] MACKAY F, TONER J, MOROZOV A, et al. Darcy's law without friction in active nematic rheology[J]. Physical Review Letters, 2020, 124(18): 187801.
- [68] SUTERA S P, SKALAK R. The history of Poiseuille's law[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 1993, 25: 1-20.
- [69] GUILAK F, MOW V C. The mechanical environment of the chondrocyte: A biphasic finite element model of cell-matrix interactions in articular cartilage[J]. Journal of Biomechanics, 2000, 33(12): 1663-1673.
- [70] MOW V C, KUEI S C, LAI W M, et al. Biphasic creep and stress relaxation of articular cartilage in compression: Theory and experiments[J]. Journal of Biomechanical Engineering, 1980, 102(1): 73-84.
- [71] TERZAGHI K T. Theoretical soil mechanics[M/OL]. December 2007. <https://www.wiley.com/en-us/export-product/pdf/9780470172766>.
- [72] 丁洲祥. 渗透力概念的力学分析及广义化探讨[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(11): 2088-2101.
- DING Zhouxiang. Mechanical fundamentals of seepage force concept and its generalization[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(11): 2088-2101.
- [73] BIOT M A, MAURIC A. General theory of three-dimensional consolidation[J]. Journal of Applied Physics, 1941, 12(2): 155-164.
- [74] FENG J, WEINBAUM S. Lubrication theory in highly compressible porous media: The mechanics of skiing, from red cells to humans[J]. Journal of Fluid Mechanics. 2000, 422: 281-317.
- [75] WU Q, ANDREPOULOS Y, XANTHOS S, et al. Dynamic compression of highly compressible porous media with application to snow compaction[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2005, 542(-1): 281-304.
- [76] 李传亮, 杜志敏, 孔祥言, 等. 多孔介质的流变模型研究[J]. 力学学报, 2003, 35(2): 230-234.
- LI Chuanliang, DU Zhimin, KONG Xiangyan, et al. A study on the rheological model of porous media[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2003, 35(2): 230-234.
- [77] 李培超, 李贤桂, 卢德唐. 饱和土体一维固结理论的修正——饱和多孔介质流固耦合渗流模型之应用[J]. 中国科学技术大学学报, 2010, 40(12): 1273-1278.
- LI Peichao, LI Xiangui, LU Detang. A modified form for the uniaxial consolidation theory in saturated soils: an application of mathematical models for flow-deformation coupling in saturated porous media[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2010, 40(12): 1273-1278.
- [78] 李培超, 孔祥言, 卢德唐. 饱和多孔介质流固耦合渗流的数学模型[J]. 水动力学研究与进展(A 辑), 2003(4): 419-426.
- LI Peichao, KONG Xiangyan, LU Detang. Mathematical modeling of flow in saturated porous media on account of fluid-structure coupling effect[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2003, 18(4): 419-426.
- [79] BUJURKE N M, PATIL H P. The effects of variable permeability and roughness of porous bearings[J]. Pergamon. 1992, 34(5): 355-362.
- [80] STAFFAN T. Packing mechanics of fiber reinforcements[J]. Polymer Engineering & Science. 1998, 38(8): 1337-1350.
- [81] 房营光, 陈建, 谷任国, 等. 基于有效比表面积修正的 Kozeny-Carman 方程在黏土渗透中的适用性研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(8): 2547-2554.
- FANG Yingguang, CHEN Jian, GU Renguo, et al. Applicability of clay permeability based on modified Kozeny-Carman equation by effective specific surface area[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020(8): 1-8.
- [82] PATEL J R, DEHERI G. Shliomis model-based magnetic squeeze film in rotating rough curved circular plates: A comparison of two different porous structures[J]. International Journal of Computational Materials Science & Surface Engineering, 2014, 6(1): 29-49.
- [83] IRMAY S. On the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Transactions, American Geophysical Union, 1954, 35: 463.
- [84] BIOT M A. General solutions of equations of elasticity and consolidation for a porous material[J]. Journal of Applied Mechanics, American Society of Mechanical Engineers, 1956, 78: 91-96.

- [85] CAMERON A, MORGAN V, STAINSBY A. Critical conditions for hydrodynamic lubrication of porous metal bearings[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 1962, 176: 761-770.
- [86] ZHU Z, NATHAN R, WU Q. On the gravity-driven sliding motion of a planar board on a tilted soft porous layer[J]. Tribology Letters, 2019, 67(4): 126.
- [87] WANG Q, ZHU Z, NATHAN R, et al. On the study of fluid flow in a soft porous media using a scaled-up indenter[J]. European Journal of Mechanics-B/Fluids, 2019, 76: 332-339.
- [88] SAINTYVES B, JULES T, SALEZ T, et al. Self-sustained lift and low friction via soft lubrication[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2016, 113(21): 201525462.
- [89] ZHU Z, NATHAN R, WU Q. Multi-scale soft porous lubrication[J]. Tribology International, 2019, 137: 246-253.
- [90] GACKA T, ZHU Z, CRAWFORD R, et al. From red cells to soft lubrication, an experimental study of lift generation inside a compressible porous layer[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2017, 818: 5-25.
- [91] LANG J, SANTHANAM S, WU Q. Exact and approximate solutions for transient squeezing flow[J]. Physics of Fluids, 2017, 29: 103606.
- [92] ROBERT C, GERARD F J, LIDAN Y, et al. Compression-dependent permeability measurement for random soft porous media and its implications to lift generation[J]. Chemical Engineering Science, 2011, 66(3): 294-302.
- [93] CHEN W, ZHU P, LIANG H, et al. Molecular dynamics simulations of lubricant recycling in porous polyimide retainers of bearing[J]. Langmuir, 2021, 37(7): 2426-2435.
- [94] CHEN W, WANG W, LIANG H, et al. Molecular dynamics simulations of lubricant outflow in porous polyimide retainers of bearings[J]. Langmuir, 2021, 37(30): 9162-9169.
- [95] YE J, LI J, QING T, et al. Effects of surface pore size on the tribological properties of oil-impregnated porous polyimide material[J]. Wear, 2021, 484-485: 204042.
- [96] ZHANG D, WANG T, WANG Q, et al. Selectively enhanced oil retention of porous polyimide bearing materials by direct chemical modification[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2017, 134(29): 45106.
- [97] LIN P, ZHANG R, WANG X, et al. Articular cartilage inspired bilayer tough hydrogel prepared by interfacial modulated polymerization showing excellent combination of high load-bearing and low friction performance[J]. ACS Macro Letters, 2016, 5(11): 1191-1195.
- [98] GUO J, DU H, ZHANG G, et al. Fabrication and tribological behavior of Fe-Cu-Ni-Sn-Graphite porous oil-bearing self-lubricating composite layer for maintenance-free sliding components[J]. Materials Research Express, 2021, 8(1): 15801-15810.
- [99] ZHANG R, LIN P, YANG W, et al. Simultaneous superior lubrication and high load bearing by the dynamic weak interaction of a lubricant with mechanically strong bilayer porous hydrogels[J]. Polymer Chemistry, 2017, 8: 7102-7107.
- [100] 马志杰, 李京育, 曹放, 等. 多孔碳化硅涂覆生物活性钽新型生物医用材料的影响因素及生物学性能[J]. 中国组织工程研究, 2021(4): 558-563.
- MA Zhijie, LI Jingyu, CAO Fang, et al. Influencing factors and biological property of novel biomedical materials: porous silicon carbide coated with bioactive tantalum[J]. Chinese Journal of Tissue Engineering Research, 2021(4): 558-563.
- [101] 范望喜. 多孔 UHMWPE 仿生骨材料的制备和性能研究[J]. 化工新型材料, 2020, 48(9): 86-90.
- FAN Wangxi. Study on preparation and properties of porous bionic bone materials based on UHMWPE[J]. New Chemical Materials, 2020, 48(9): 86-90.
- [102] JASON P G, STEPHEN B D, RUSSELL F W, et al. Analysis of frictional behavior and changes in morphology resulting from cartilage articulation with porous polyurethane foams[J]. Journal of Orthopaedic Research, 2010, 28(10): 1292-1299.
- [103] MAYR H O, KLEHM J, SCHWAN S, et al. Microporous calcium phosphate ceramics as tissue engineering scaffolds for the repair of osteochondral defects: Biomechanical results[J]. Acta Biomaterialia, 2013, 9(1): 4845-4855.
- [104] 胡海波, 刘会群, 王杰恩, 等. 生物医用多孔钛及钛合金的研究进展[J]. 材料导报, 2012, 26(S1): 262-266.
- HU Haibo, LIU Huiqun, WANG Jieen, et al. Research progress of biomedical porous titanium and titanium alloys[J]. Materials Review, 2012, 26(S1): 262-266.
- [105] 吴刚, 王成焄, 张文光. 仿生人工软骨材料的摩擦磨损性能及润滑机理研究[J]. 摩擦学学报, 2009, 29(2): 157-162.
- WU Gang, WANG Chengtao, ZHANG Wenguang.

- Study on the friction and wear performance and lubrication mechanism of bionic artificial cartilage materials[J]. *Acta Tribology*, 2009, 29(2): 157-162.
- [106] MCKELLOP H, CLARKE I, MARKOLF K, et al. Friction and wear properties of polymer, metal, and ceramic prosthetic joint materials evaluated on a multichannel screening device[J]. *Journal of Biomedical Materials Research*, 1981, 15(5): 619-653.
- [107] SHARKEY P F, HOZACK W J, ROTHMAN R H, et al. Why are total knee arthroplasties failing today?[J]. *Journal of Arthroplasty*, 2014, 29(9): 1774-1778.
- [108] 轩福贞, 朱明亮, 王国彪. 结构疲劳百年研究的回顾与展望[J]. *机械工程学报*, 2021, 57(6): 26-51.
- XUAN Fuzhen, ZHU Mingliang, WANG Guobiao. Review and prospect of centennial research on structural fatigue[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2021, 57(6): 26-51.
- [109] WANG J Q, ZHAO H J, HUANG W, et al. Investigation of porous polyimide lubricant retainers to improve the performance of rolling bearings under conditions of starved lubrication[J]. *Wear*, 2017, 380-381: 52-58.
- [110] ZHANG G T, YIN Y G, XU M, et al. Tribological properties and mechanism of the bilayer iron based powder metallurgy materials[J]. *Industrial Lubrication and Tribology*, 2018, 70(9): 1642-1648.
- [111] 张国涛, 尹延国. 铁基含油轴承材料表面硫化改性及摩擦学性能[J]. *中国有色金属学报*, 2020, 30(2): 348-354.
- ZHANG Guotao, YIN Yanguo. Surface sulfurization modification and tribological properties of iron-based oil bearing materials[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2020, 30(2): 348-354.
- [112] 燕松山, 杨威然, 解芳, 等. Sn-Ag-Cu/金属陶瓷自润滑轴承滚子高温滚阻特性研究[J]. *润滑与密封*, 2020, 45(2): 12-16.
- YAN Songshan, YANG Weiran, XIE Fang, et al. Study on high temperature rolling resistance characteristics of Sn-Ag-Cu /metal ceramic self-lubricating bearing rollers[J]. *Lubrication Engineering*, 2020, 45(2) : 12-16.
- [113] 邱优香, 王齐华, 王超, 等. 多孔聚酰亚胺含油材料的储油性能及摩擦学行为研究[J]. *摩擦学学报*, 2012, 32(6): 538-543.
- QIU Youxiang, WANG Qihua, WANG Chao, et al. Study on oil storage performance and tribological behavior of porous polyimide oil-containing materials[J]. *Tribology*, 2012, 32(6): 538-543.
- [114] 吴海勇, 林清容, 陈志雄, 等. 定向孔隙多孔储油介质的制备与评价[J]. *润滑与密封*, 2020, 45(9): 94-101.
- WU Haiyong, LIN Qingrong, CHEN Zhixiong, et al. Preparation and evaluation of porous oil storage medium with oriented pores[J]. *Lubrication Engineering*, 2020, 45(9): 94-101.

作者简介: 秦红玲, 女, 1978 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为摩擦学及表面工程。

E-mail: qhl@ctgu.edu.cn

李响(通信作者), 男, 1979 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为多孔结构拓扑优化。

E-mail: lixiangcfy@ctgu.edu.cn