

# 第1章

## 绪论

### 1.1 摩擦学与摩擦学实验

1966年,英国教育科研部发布的《关于摩擦学教育和研究的报告》(Jost 报告)中首次提出“摩擦学”(Tribology)一词,将其定义为研究摩擦过程的科学。随着研究的发展,摩擦学目前主要是指研究相对运动或有相对运动趋势的相互作用表面间的摩擦、润滑和磨损,以及三者间相互关系的基础理论和技术。

摩擦学实验,顾名思义是为进行摩擦学研究而实施的实验原理、测试方法和分析手段等。摩擦学作为一门实践性很强的学科,其实验和分析方法与理论研究密不可分。

摩擦学基础理论的发展往往来自摩擦学实验中的发现。这样的例子贯穿了摩擦学研究的发展过程,从古埃及建造金字塔采用的浇水减摩到当今的水润滑理论,从古希腊的摩擦起电现象到现代的电控摩擦和电流变理论,可以说摩擦实验中的发现推动了摩擦学理论的建立和完善。此外,摩擦学基础理论上的进展也往往得益于摩擦学实验和分析方法的进步,例如,扫描电子显微镜的出现为分析磨损的微观机理提供了检测方法,而原子力显微镜的发明则极大地促进了摩擦表面的相互作用机理及微纳摩擦学的发展。

另外,摩擦学基础理论的研究也推动了摩擦学实验方法和技术的发展。在早期的摩擦学理论研究中,为测量干摩擦的滑动摩擦系数,达·芬奇、库仑等设计了水平牵拉滑块实验。当在摩擦模型中需要考虑粗糙表面对摩擦系数的影响时,机械式、光学式的表面形貌仪等被发明从而实现了表面形貌的测量。当摩擦机理的研究进一步向微纳尺度发展时,原子力显微镜和表面力仪在摩擦实验中得以大量应用。在流体润滑理论的研究方面,随着流体动压润滑理论的提出,大量实验研究集中于润滑膜厚的测量,X射线法、电容法及光干涉法等被设计出来进行膜厚的测量,其中光干涉法应用最为广泛,并为后续弹性流体润滑和边界润滑的研究提供了有力的实验手段。此外,随着热效应、流体黏弹性效应等在流体动压润滑模型中的引入,在润滑实验中也逐渐加入了对温度及流体黏弹性的测量。

然而,在目前的摩擦学教学科研中,往往将摩擦学理论和摩擦学实验,尤其是摩擦学的实验装置与测试原理分开讲述,实际上,测试方法和测试仪器是密不可分的。对于选修摩擦学课程的研究生或是从事摩擦学研究的专业人员,仅了解测试方法和实验原理还不足以具备解决摩擦学实际测试问题的能力。以摩擦磨损测量为例,摩擦磨损实验机根据其接触方式和运动方式的不同就有十几种之多,而同一种实验机根据不同的温度和载荷范围又可以

分为不同的型号。对于摩擦学的初学者而言,针对所需要测量的参数该采用什么样的实验仪器,以及如何使用这些仪器完成所需要的测量是其遇到的最普遍的问题。因此,本书的目的即为补足摩擦学教学在实验和分析方法上的缺失,对相应的摩擦学测试仪器进行系统性介绍。

## 1.2 摩擦学实验的发展历史

摩擦学实验的起源和发展是与摩擦学研究紧密相伴的,参考摩擦学发展的历史,摩擦学实验的研究可以划分为图 1-1 所示的四个典型阶段。

最早的摩擦学实验可以追溯到古代人类在日常生活中发现的摩擦学实践活动。例如,据历史记载,古埃及人在建造金字塔时采用了浇水铺沙的方式减少摩擦阻力,在我国则采用了利用冰道浇水的减摩方式来运输建造明朝故宫的巨石。约公元前 1500 年,我国出现了轮子,将滑动摩擦转为滚动摩擦以减少摩擦阻力,如图 1-1(a)所示<sup>[1-3]</sup>。

从 15 世纪开始,科学的方法,尤其是实验在科学研究中的作用日益受到重视,因而对摩擦学研究中相关摩擦理论进行了实验验证和定量分析。达·芬奇最早设计了测量滑动摩擦系数的滑块实验,而库仑进一步进行了干摩擦表面摩擦系数的实验研究。在随后的工业革命中,齿轮和轴承的应用带来了更多的摩擦学问题,极大地推动了摩擦学实验的发展。同时,从 19 世纪到 20 世纪早期,流体润滑的研究推动了润滑膜厚测量技术的发展,其中代表性的技术为光干涉法,如图 1-1(b)所示。1966 年,随着 Jost 报告的问世,摩擦学开始了它作为专门学科的发展阶段。在此后的几十年中,摩擦学实验的典型特征是实验标准和规范的逐步制定和完善,并出现了一批标准化的摩擦磨损实验机及润滑剂评定设备,其中以环块实验机和四球实验机为代表,如图 1-1(c)所示。

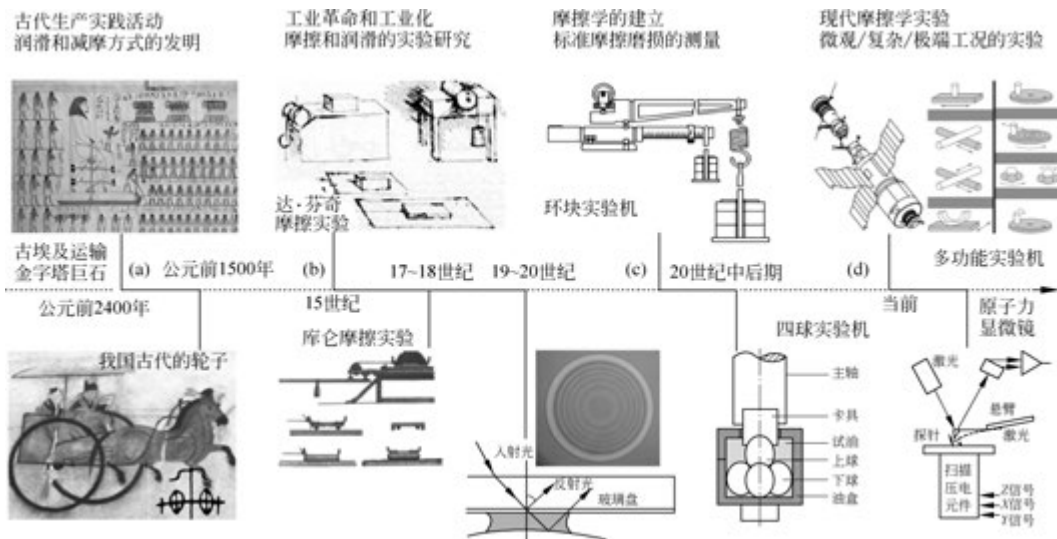


图 1-1 摩擦学实验发展的典型阶段

- (a) 古代生产实践活动中产生的润滑和减摩方式；(b) 工业革命和工业化中开展摩擦理论的定量实验；  
(c) 摩擦磨损测量标准化；(d) 现代摩擦学实验内容和方法

近年来,越来越多的实验方法和实验仪器被用于摩擦现象和摩擦机理的研究。在摩擦机理研究方面,摩擦学实验注重探索摩擦现象的微观机制,原子力显微镜、纳米划痕仪、扫描电子显微镜等微观实验和分析仪器被大量使用;在应用方面,摩擦学实验关注高速、高温、真空、腐蚀等多工况和极端工况下的摩擦性能研究,如图 1-1(d)所示。

### 1.3 摩擦学实验方法和标准

根据所处实验工况的不同,摩擦学实验方法可以分为三大类:实验室试样实验、模拟台架实验及实际工况实验。表 1-1 给出了三种常用的摩擦磨损实验方法的特点和适用范围。

表 1-1 常用的摩擦磨损实验方法

实验方法	特 点	用 途	实验规范
实验室试样实验	实验重复性好; 实验条件选择范围广; 可评估单因素的影响; 易于发现其规律性; 周期短、成本低	机理研究; 对比实验; 性能评价	国家标准; 国际标准; 行业标准; 自行制定实验规范
模拟台架实验	通常试件尺寸与实际部件相同或接近; 比标准实验机实验更接近实际使用条件; 实验数据可靠性高; 比实际实验更易控制实验条件; 可强化实际实验条件,进行加速实验; 比实际实验的周期短、成本低	作为实际实验的前级实验; 对比实验; 性能评价	自行制定实验规范
实际工况实验	实验条件真实、数据可靠; 费用高,周期长; 不易进行影响因素考察,不易分析产生问题的原因	作为零部件实际应用前的考核实验; 对比实验	自行制定实验规范

(1) 实验室试样实验,即在实验室环境下,根据测试需要及实验机的安装要求设计试样,并在标准实验机上进行摩擦学实验。例如,在发动机高温耐磨涂层的评定中,选择实际零件的材料,并根据实验室高温摩擦磨损实验机对试样尺寸的要求制备含有高温涂层的试样,并将该试样安装到摩擦磨损实验机中,在指定的工况温度和速度下进行耐磨性测试。实验室试样实验的参数容易控制、实验周期短;其缺点是受到实验室条件的限制,实验结果往往与实际使用结果有所差别,多用于摩擦材料的筛选和摩擦磨损机理的研究。

(2) 模拟台架实验,即采用具有实际尺寸和功能的零部件作为摩擦试样,构建模拟实验台架模拟实际使用工况,在模拟实验台架上对零部件进行摩擦学实验。例如,发动机高温耐磨涂层在经历实验室评定后,可进行模拟台架实验。此时,需要在实际零件表面制备高温涂层,并安装到发动机模拟台架中,在发动机工作时的转速和压力条件下进行耐磨性测试。模拟台架实验可以在更接近实际使用条件的工况下对试样的摩擦磨损性能进行评价,使实验结果更加可靠;同时,模拟台架可以在受控实验条件下和较短的实验时间内获得实验结果,便于对零件的实际使用性能进行预测。

(3) 实际工况实验,即采用真实的零部件作为实验对象,并在实际使用的系统中和实际使用的工况中对该零部件进行摩擦学实验。还是以发动机高温耐磨涂层的评定为例,在实际零件表面制备高温涂层,并安装到某型号发动机中,在实际工作条件下进行耐磨性测试。实际工况实验最能反映摩擦结果的真实性和可靠性,但是实验周期长、费用高,多用于摩擦学实验的最后校验和评估。

在选择合适的实验方法之前,首先要明确实验的目的和要求。根据摩擦磨损实验的目的分类,比较常见的摩擦磨损实验包括研究性实验、性能评价实验和验证实验。

研究性实验的目的包括但不限于:探索摩擦学系统的行为规律,发现新的摩擦磨损实验现象,解释摩擦磨损机理,开发具有减摩、增摩、抗摩功能的新材料和新结构等。开展研究性实验通常选择标准实验机或者通过对标准实验机进行适当改进的摩擦磨损实验装备,自行研制实验装置也很普遍。对于研究性实验,可以根据已有的标准开展实验,寻求规律。但大多数情况下是根据需要自行制定实验规范,这种情况下可以自行定义实验变量,包括摩擦副材料、润滑材料、实验参数、实验环境等。

性能评价实验的目的是在实际工作中对已有的或新的材料或技术进行性能评价,或与其他材料或技术进行对比,以便为其选择和应用提供实验依据。例如,为特定的应用需求,评价所设计的摩擦学系统的性能和适用性,选择和对比摩擦副材料、润滑材料及其添加剂等。这类实验通常采用标准实验机进行,有时也采用模拟台架实验的方法进行。

验证实验更多用于工程实际。一般而言,对于一台给定装备的摩擦学系统,其摩擦副材料和润滑方案设计的有效性和可靠性最终要通过实际装备的使用考核才能定型。由于实际实验通常有费用高、周期长的特点,对于以实际应用为目的的性能评定实验、对比实验等,有时也会根据需要先安排标准实验机实验和台架实验,经过考核和筛选后再进行实际验证实验,从而节约实验成本、缩短实验周期和提高实验效率。

无论采用何种摩擦学实验方法,都要遵循相应的实验规范。摩擦学实验按实验标准的等级可以分为国家标准、行业标准、企业标准和实验室标准。

我国对摩擦学实验方法制定了相应的国家标准,表 1-2 列出了节选的部分标准。我国国家标准不仅对通用的摩擦学实验方法制定了相应的实验标准,如四球法、环块法等,还对汽车、纺织、材料等行业中有关摩擦磨损的实验也制定了标准,如汽车制动器摩擦性能评价的实验方法等。由于行业的多样性和实际使用工况的复杂性,摩擦学实验的国家标准也在不断补充和完善。

表 1-2 我国有关摩擦学实验的国家标准(节选)

标准号	标准名称
GB/T 17754—2012	摩擦学术语
GB/T 5766—2023	摩擦材料洛氏硬度试验方法
GB/T 3142—2019	润滑剂承载能力的测定 四球法
GB/T 11144—2007	润滑液极压性能测定法 梯姆肯法
GB/T 12444—2006	金属材料 磨损试验方法 试环-试块滑动磨损试验
GB/T 3481.1—2025	齿轮 轮齿的磨损和损伤 第 1 部分:术语和特性
GB/T 5478—2008	塑料 滚动磨损试验方法
GB/T 15141—2009	湿式离合器摩擦元件试验方法
GB/T 17469—2024	汽车制动器衬片摩擦性能评价 小样台架试验方法
GB/T 22895—2008	纸和纸板 静态和动态摩擦系数的测定 平面法

续表

标准号	标准名称
GB/T 3960—2016	塑料 滑动摩擦磨损试验方法
GB/T 10006—2021	塑料 薄膜和薄片 摩擦系数的测定

世界各国对于摩擦磨损实验方法也有各自的国家标准,表 1-3 列出了节选的有关摩擦磨损实验及润滑油评定的美国 ASTM 标准。

表 1-3 有关摩擦学实验的 ASTM 标准(节选)

标准号	标准名称
ASTM G65—16	用干砂/橡胶轮试验仪测量磨损的试验方法
ASTM G99—23	用销盘或球盘装置进行磨损和摩擦试验的标准试验方法
ASTM D2266—23	润滑脂防磨损特性的标准试验方法(四球法)
ASTM D2509—20ae1	润滑油承载能力测量标准试验方法
ASTM D2596—20	润滑油极压性能测试标准试验方法(四球法)
ASTM D2670—25	测量液体润滑剂磨损特性的标准试验方法
ASTM D2782—20	测量润滑液极压特性的标准测试方法
ASTM D2783—25	测量润滑液极压特性的标准试验方法(四球法)
ASTM D4172—25	润滑液防磨损特性的标准试验方法(四球法)
ASTM D5707—25	用高频线性振荡试验机测量润滑脂摩擦磨损性能的标准试验方法
ASTM G77—17	用环块磨损试验评定材料抗滑动磨损等级的标准试验方法

除了通用的摩擦和润滑材料的摩擦磨损实验方法外,对于特定的产品或零部件摩擦学性能的评定也有相应的国家标准或行业标准,例如,表 1-4 中节选了对于不粘锅表面涂层耐磨性能进行评价的国家标准。其中,国家标准 GB 4806.10 规范了对不粘锅材料和表面涂层材料的卫生标准,GB/T 32388 规定了铝合金不粘锅的材质,GB/T 32095 规定了对涂层摩擦学性能的评价方法。标准 GB/T 32095 又分为 4 部分,分别对涂层的通用性能要求、不粘性及耐磨性测试规范、耐腐蚀性测试规范及食物模拟测试规范做了相应的规定。

表 1-4 有关不粘锅表面涂层的国家标准(节选)

标准号	标准名称
GB 4806.10—2016	食品容器内壁聚四氟乙烯涂料卫生标准
GB/T 32388—2015	铝及铝合金不粘锅
GB/T 32095.1—2015	家用食品金属烹饪器具不粘表面性能及测试规范 第 1 部分:性能通用要求
GB/T 32095.2—2015	家用食品金属烹饪器具不粘表面性能及测试规范 第 2 部分:不粘性及耐磨性测试规范
GB/T 32095.3—2015	家用食品金属烹饪器具不粘表面性能及测试规范 第 3 部分:耐腐蚀性测试规范
GB/T 32095.4—2015	家用食品金属烹饪器具不粘表面性能及测试规范 第 4 部分:食物模拟测试规范及评价方法

行业标准是在没有对应的国家标准,而又需要在某个行业范围内统一相关的技术要求时所制定的标准。以航空发动机某零部件表面高温耐磨涂层的摩擦学性能评价为例,在没有对应的国家标准进行相关的摩擦磨损实验时,可以采用航空标准进行相关的摩擦学实验。

航空标准的代号为 HB,由中国航空工业总公司组织制定,国防科学工业委员会批准发布。行业标准在相应的国家标准发布后不再施行。

除了上述的国家标准和行业标准外,对于研究性质的摩擦学实验还有实验室标准。这种实验室标准主要是针对某些特殊的或是正在研发中的摩擦材料、摩擦副及润滑材料,尚无相关的国家标准可以依据,而实验室或研究机构在此研究中已有长期的经验积累。在此条件下,为了规范类似的摩擦实验过程及评价方法,可以根据已具备的研究经验和测试规范制定相关的实验室标准。此类实验室标准会随着在实际使用中的推广,并通过行业内的鉴定而进一步完善并上升为行业标准。

在制定研究性摩擦学实验标准时,一般可遵循以下方式:

(1) 针对被测对象的摩擦学性能选定相关的测试装置,并参考类似测试项目的行业标准或国家标准制定测试项目和测试内容。

(2) 根据所选择的测试装置确定测试过程和操作规范。

(3) 针对被测对象的材料特性及使用工况确定测试参数,如载荷、速度、循环周期等。

(4) 针对被测对象的测试指标对测试结果进行检测和评定,并参考行业标准或国家标准中的相关内容制定评价标准。

(5) 结合实验室测试条件和测试内容,说明该测试结果和性能指标的适用范围。

(6) 形成最终的测试报告后,将测试内容、测试方法、测试参数及评价方法等进行整理,并形成相关的实验室标准。

## 1.4 摩擦学分析方法和仪器

摩擦学分析方法是通过对摩擦实验的结果进行检测和分析,以此对摩擦表面的减摩、耐磨及润滑等性能进行评价。摩擦学分析方法所涉及的相关研究手段和仪器有很多种,按照不同的分类方法分别介绍如下:

(1) 按照检测对象,摩擦学分析方法可以分为与固体有关的摩擦磨损测量、表面形貌检测和表面显微分析等(第2~4章),与流体有关的润滑/润湿、流动阻力和流变性能等的检测(第5~8章),以及与生物有关的检测(第9章)。摩擦磨损测量主要包括称重法、测长法、同位素法、光谱法、铁谱法等,其中铁谱或光谱法是通过磨粒尺寸外观的测量及组分结构的分析判断磨损状态。表面形貌检测是利用接触式形貌仪或非接触式光干涉轮廓仪进行表面形貌测量。表面显微分析是利用电子束、离子束或光束等检测摩擦表面的组织结构变化,例如摩擦对材料晶粒大小和取向性的改变,以及产生的孪晶结构等,同时进行摩擦表面的成分分析,例如检测摩擦副表面产生的材料转移,或是摩擦表面产生的氧化物等。流体润滑状态的分析主要是通过光干涉等方法测量润滑膜的厚度分布,润湿状态的分析主要通过吊片法、悬滴法等测量液体的表面张力,以及通过光学法测量液体在固体表面的接触角。流动阻力的分析主要是通过压力传感器结合流速测量得到固-液界面上的摩擦阻力,流变特性的分析主要通过流变仪测量流体的黏度等流变参数。生物及生物材料的摩擦磨损分析则需要通过专用设备和方法进行。

(2) 按照检测手段,摩擦学分析方法可以分为光学检测、声学检测、电磁检测、应力应变及温度检测等。光学检测主要是利用光学显微镜和光干涉的方法等对摩擦磨损区的表面形

貌、磨粒形态及润滑膜厚等进行观测和测量。声学检测主要是利用声场探测设备或者声发射装置检测摩擦副表面和亚表面的损伤和裂纹,以及摩擦过程中的摩擦噪声、空蚀噪声等。电磁检测主要是利用电磁效应对摩擦磨损的结果进行检测和评价,例如在铁谱分析中通过对铁磁性磨粒在磁场中的分布来评价磨损程度,利用电涡流传感器对摩擦过程中的裂纹和损伤进行检测等。此方法中还包括使用电子显微镜如扫描电子显微镜、透射电镜等对摩擦表面的显微组织结构和成分进行分析。应力应变是最为常用的力学检测方法,如利用应变片的变形检测摩擦力的大小、利用天平对磨损质量进行称重等。温度检测主要是利用如温度计、热敏电阻或是红外测温等装置对摩擦过程中的温度变化进行测量。

(3) 按照检测的实时性,摩擦学分析方法可以分为在线检测和离线检测。在线检测是在摩擦磨损实验的进行过程中对其进行光、声、电及温度的分析,例如,采用在线轮廓仪对摩擦过程中的表面形貌进行检测,以及利用温度计对摩擦过程中的温度进行监测等;离线检测是在摩擦磨损实验结束后对摩擦磨损结果进行测量和分析,例如,对摩擦产生的磨粒和磨损表面进行电镜分析,以及对磨损量进行称重等。

## 1.5 摩擦学实验和分析方法的发展

随着摩擦学在微观机理研究方面的深入、研究对象和应用领域的拓展,其研究范畴越来越多地超出了传统的机械领域,更多地与其他学科进行交叉和融合。相应地,摩擦学实验的研究也有相应的发展趋势。

### 1.5.1 在微观摩擦机理研究上的深入

为探索摩擦磨损的机理,近年来摩擦学的研究越来越关注微观摩擦磨损的发生机制,大量微观分析和检测方法被应用于摩擦学实验。在摩擦磨损实验方面,原子力显微镜大量应用于微观摩擦磨损实验的分析,利用原子力显微镜探针对待测表面进行摩擦磨损性能评价。原子力显微镜具有高精度的位移和作用力检测能力,在揭示微观摩擦磨损机理方面有着其他设备无可比拟的优势<sup>[4-5]</sup>。此类微观摩擦磨损实验的另一项代表工作是对超精表面的检测和分析。高精度的光学器件和半导体晶圆具有超高的表面光洁度,在对超精表面抛光的材料去除机理研究和随后的表面检测中,均大量采用扫描电子显微镜和透射电子显微镜、X射线光电子能谱等显微分析手段<sup>[6]</sup>。此外,在涂层的耐磨减摩实验方面,采用纳米硬度和纳米划痕等实验方法和仪器,将压入深度控制在几十纳米,从而实现薄膜涂层摩擦磨损性能的评价<sup>[7]</sup>。在润滑状态和润滑膜厚测量方面,随着润滑膜厚的减小和边界润滑研究的需要,传统的光学测量和电容法已无法满足测量的要求,而利用光干涉法结合荧光光强方法可以实现纳米级润滑膜厚的测量。

另外,在微观摩擦机理的研究中越发关注表面力和表、界面效应的影响,相应的表面力和界面效应测量和分析方法在摩擦学实验中也日益受到重视。以微机电系统为例,由于微观器件在微尺度下比表面积的增大,运动部件的表面力会导致表面黏着的产生而发生部件失效。图1-2(a)显示了一种梳齿式加速度计的梳齿结构,相邻的梳齿由于间隔很小,往往会在静电力或范德华力的作用下黏附在一起,难以进行相对运动从而发生器件失效。这种由于表面力产生的黏着现象是微纳摩擦学研究中不可忽略的问题。除了固体表面的相互作用

外,还有更加复杂的固-气-液三相界面的相互作用,其中最为典型的的就是超疏水表面。超疏水表面是在一定的微结构表面上,气体取代了部分固体与液体相接触,从而形成了固-气-液三相复合的接触界面,如图 1-2(b)所示。由于部分固-液界面被气-液界面所取代,液体在超疏水表面流动时的摩擦阻力会有所降低<sup>[8]</sup>。

以上表界面效应的研究需要相应的摩擦学实验和分析方法。对于固体间表面力的测量,一般通过原子力显微镜或表面张力仪实现;而对于更加复杂的三相界面间的相互作用,目前采用表面张力仪或具有液相模块的原子力显微镜等进行测量;对于固-液界面上的流动力和减阻效应的测量可以通过微流场分析设备检测流速和壁面剪切率加以实现;对于固-液边界滑移的测量则可以通过原子力胶体探针技术和基于表面张力仪的纳米流变方法进行检测。相关的实验和分析方法在本书第 7~9 章分别详述。

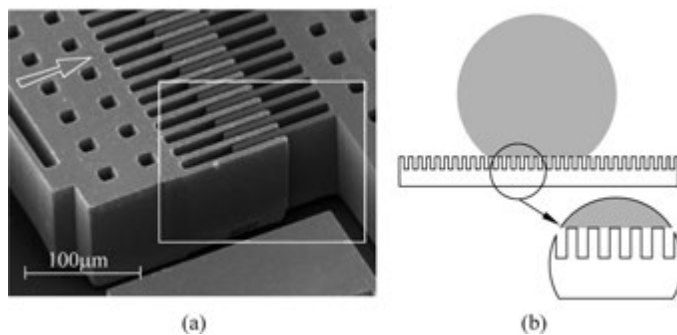


图 1-2 摩擦学表/界面效应的研究

(a) 微机电系统中梳齿结构部件表面的黏附<sup>[9]</sup>; (b) 液滴在超疏水表面示意图

### 1.5.2 在复杂和极端摩擦工况下的拓展

极端环境工况是指以高速、高温、高载荷等为代表的摩擦副工作环境。随着我国近年来在航空航天、远洋深海、高速轨道运输及空间探测领域的发展,相应装备中的摩擦副将运行在更加复杂和极端环境工况中,如图 1-3(a)所示。摩擦学实验也需要满足这种复杂和极端摩擦工况的要求。

近年来,在空间摩擦研究方面,建立了空间环境摩擦实验台<sup>[10]</sup>,实验台中的真空室可模拟太空极限真空,真空室上方有原子氧源、紫外源等,用以模拟多种空间辐照条件。在航空领域,研发了航空发动机高温摩擦磨损实验台<sup>[11]</sup>,用于航空发动机各关键部件的摩擦磨损实验和性能评价,如主轴承腔密封装置的耐久性及磨损寿命等。在海洋摩擦磨损研究方面,建立了海洋腐蚀空蚀实验台<sup>[12]</sup>,在实验台中通入模拟海水并控制水流速度,研究在海水腐蚀和空蚀联合作用下的金属表面损伤。在高速轨道运输方面,研发了高速重载高铁轴承实验台<sup>[13]</sup>,用以模拟高速重载工况下的高铁轴承磨损。

除了上述的极端工况,摩擦学实验还需要兼顾多种复杂条件下的摩擦性能检测,摩擦实验系统的设计也面临着从单一功能到多功能评价的需求,即在一个摩擦学实验系统中集成多种摩擦实验和检测功能。例如,实验系统不仅需要实时测量摩擦系数和磨损量,还要监测摩擦温度、振动、噪声等,如图 1-3(b)所示。此外,将两种或两种以上的实验系统集成从而实现更复杂的摩擦实验功能也成为当前摩擦测试系统的发展趋势,如原子力显微镜与扫描

电镜联用系统可以实现微观摩擦磨损实验并对磨损区域进行实时显微分析,是研究摩擦磨损微观机理的有力工具。

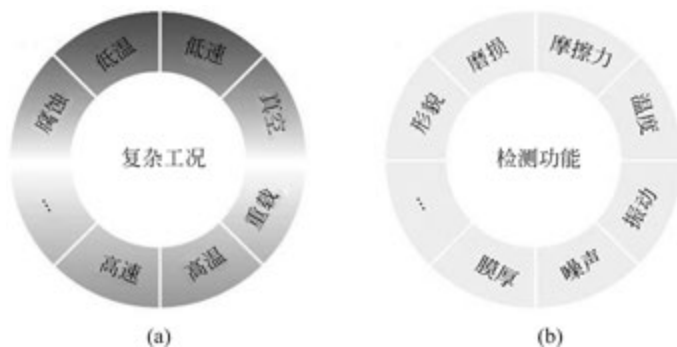


图 1-3 复杂和极端工况下的摩擦学实验和分析方法

(a) 复杂和极端的摩擦工况; (b) 摩擦实验系统上集成多种检测功能

### 1.5.3 在生物医学及其他学科上的交叉研究

随着摩擦学研究的发展,其研究对象和研究范畴不断扩大,从机械学科逐渐扩展到生物、化学和电子等其他学科,学科之间的交叉成为摩擦学发展的一个典型特征。其中,与生物有关的摩擦学研究被称为生物摩擦学。生物摩擦学具有强烈的学科交叉特点,目前具有代表性的生物摩擦学研究方向包括人工关节摩擦磨损、牙齿摩擦学、皮肤摩擦学等<sup>[14]</sup>。相应地,摩擦学实验方法也需要模拟生物组织和生物环境开展生物摩擦实验,如图 1-4(a)所示的关节摩擦磨损实验等。

相对于较为成熟和具有对应评价标准的传统摩擦学实验,生物摩擦学实验在其实验原理、实验方法及实验装置的研究方面还有待完善。首先,在实验原理上,生物组织的接触应力计算、摩擦磨损方式均有别于机械摩擦磨损模型,尚未有标准的生物摩擦学模型。其次,在实验方法上,生物摩擦实验的设计需要兼顾生物环境的特殊性及生物-机械界面的兼容性。例如,目前对心脏瓣膜及血管支架等表面的摩擦学性能研究中,不仅需要考虑其表面在血流冲刷作用下的耐磨性能,还要考虑血液环境对表面的腐蚀及血液成分的黏附。最后,在实验装置上,需要根据所研究的生物组织和器官进行专门的实验装置设计,而目前对于不同生物组织和器官的体外摩擦实验装置并没有相应的标准,不同实验装置的测试结果之间往往难以进行比较。因此,生物摩擦实验的研究还有待进一步发展。

除了生物领域外,摩擦学研究还在微电子、航空航天、微纳米材料、化学和化工等多个领域有交叉。以微电子领域为例,射频芯片微机电开关具有体积小、转换速度快、高断态隔离等优点,在包括 5G 移动通信在内的射频芯片中有着巨大的发展潜力,但其高频的开关运动将加速微硅器件开关接触表面的磨损和悬臂结构的疲劳,如图 1-4(b)所示。为预测微机电开关的寿命和优化其性能,就需要对其关键运动部件,如开关接触表面进行摩擦学实验,分析在高频接触条件下的磨损机理和进行疲劳寿命预测。除了射频芯片微机电开关外,微电子领域的另一项重要摩擦学实验就是晶圆和集成电路的化学机械抛光。如图 1-4(c)所示,晶圆表面需要在抛光机上进行材料的去除和表面抛光,控制抛光垫和晶圆表面的摩擦,以及抛光液中的纳米颗粒与晶圆表面的摩擦是实现晶圆表面材料去除和保证表面抛光质量的重

要手段。因此,摩擦学实验在微电子领域研究中有着大量的应用。

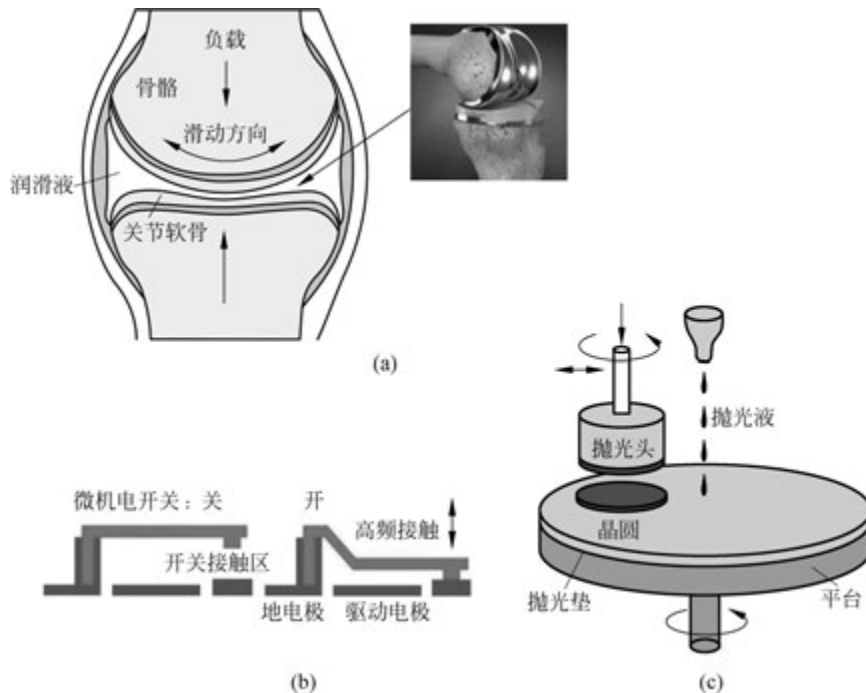


图 1-4 摩擦学实验与其他学科领域研究的交叉

(a) 人工关节表面的摩擦磨损; (b) 射频芯片微机电开关; (c) 晶圆表面化学机械抛光

## 参考文献

- [1] DOWSON D. History of Tribology[M]. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 1998.
- [2] 温诗铸. 摩擦学原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 1991.
- [3] LI J, CHEN H, STONE H A. Ice lubrication for moving heavy stones to the Forbidden City in 15th- and 16th-century China [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2013, 110 (50): 20023-20027.
- [4] 钱林茂, 田煜, 温诗铸. 纳米摩擦学[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [5] 林世权. 水对摩擦过程中电荷转移行为的影响研究[D]. 北京: 清华大学, 2018.
- [6] 温家林. 化学机械抛光原子尺度材料去除机理研究[D]. 北京: 清华大学, 2017.
- [7] 黄立业, 徐可为, 吕坚. 类金刚石薄膜的表面纳米划擦性能评价[J]. 无机材料学报, 2001(5): 1004-1008.
- [8] 王宝, 汪家道, 陈大融. 基于微空泡效应的疏水性展向微沟槽表面水下减阻研究[J]. 物理学报, 2014, 63(7): 214-220.
- [9] ACAR C, SHKEL A M. Structurally decoupled micromachined gyroscopes with post-release capacitance enhancement[J]. Journal of Micromechanics & Microengineering, 2005, 15(5): 1092-1101.
- [10] 孙晓军, 刘维民. 固体材料的空间环境摩擦试验[J]. 航天器环境工程, 2010, 27(3): 295-299, 263.
- [11] 林基恕. 航空发动机动力传输航空科技重点实验室正式运行[J]. 航空发动机, 1999(2): 59-61.
- [12] 刘诗汉. 空化微射流冲击作用下材料表面破坏机理研究[D]. 北京: 清华大学, 2008.
- [13] 张亨飏. 高速动车轴承试验台的开发与研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
- [14] 王成焘. 人体生物摩擦学[M]. 北京: 科学出版社, 2008.