

国家自然科学基金(51505479)资助
江苏省自然科学基金(BK20150184)资助
中国博士后基金(2014M551686)资助

宏微观纹理表面的 润滑及摩擦设计

韩 静 著

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

国家自然科学基金(51505479)资助

江苏省自然科学基金(BK20150184)资助

中国博士后基金(2014M551686)资助

宏微观纹理表面的润滑及 摩擦设计

韩 静 著

中国矿业大学出版社

内 容 摘 要

本书针对纹理表面改善摩擦副润滑和摩擦学性能这一当前摩擦学领域的研究热点,基于作者多年的研究基础,并总结近年来国内外研究成果编写而成。本书针对纹理表面润滑计算理论和数值方法、油膜动压润滑形成机理、纹理拓扑结构和几何参数对动压润滑性能的影响规律、纹理表面的优化及纹理轴承的优化设计进行了详细阐述。

本书为表面的纹理设计提供了理论依据和指导方向,可供摩擦学领域的教学、科研工作者、学生以及企业研发人员阅读,也可供从事摩擦学研究的科技工作者参考。

图书在版编目(CIP)数据

宏微观纹理表面的润滑及摩擦设计 / 韩静著. —徐
州: 中国矿业大学出版社, 2017. 11
ISBN 978 - 7 - 5646 - 3741 - 5

I. ①宏… II. ①韩… III. ①表面摩擦—研究 IV.
①O313.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 264500 号

书 名 宏微观纹理表面的润滑及摩擦设计
著 者 韩 静
责任编辑 李 敬 章 毅
出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司
(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)
营销热线 (0516)83885307 83884995
出版服务 (0516)83885767 83884920
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com
印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司
开 本 787×1092 1/16 印张 7.75 字数 198 千字
版次印次 2017 年 11 月第 1 版 2017 年 11 月第 1 次印刷
定 价 30.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前言

摩擦学是研究相对运动的表面上摩擦、磨损与润滑现象的产生、变化与发展的规律及其控制与应用的科学与技术。摩擦无处不在,从我们日常生活中的咀嚼、步行、抓取东西,到火车、飞机、航天器等设备的正常运转,都离不开摩擦。从古老的“钻木取火”、“埃及金字塔的建造”到现代的“人工关节”、“纳米轴承”,摩擦学在人类科技发展史中留下了深深的印记,伴随着科学技术与人类社会的发展,每一时期的摩擦学都具有显著的时代特征,使这一古老的科学永远年轻,永远处于科学发展的前沿领域。

传统摩擦学理论基于粗糙度的考虑认为相互接触的表面越光滑摩擦性能越好,当表面达到原子光滑,将有可能实现超滑甚至零摩擦。一般的工业实际应用支持了这一理论,在过去的几个世纪中,人类一直致力于通过各种途径来降低摩擦副表面的粗糙度,收到了良好的效果。但是受材料性质和加工精度的影响,即使是先进的化学机械平坦化(Chemical-Mechanical Planarization, CMP)技术目前也不能实现原子级的光滑表面。另外,当考虑到润滑和磨损时,情况将会发生改变,粗糙的表面有利于润滑油膜的形成和储存磨屑,在流体润滑、薄膜润滑、边界润滑和固体接触等状态下,一定条件下表面粗糙度可以对摩擦和润滑性能产生积极的影响。通过对自然界的长期观察研究,人们意识到自然界中的动物和植物在其体表形成了各种精巧奇妙的非光滑微结构以适应复杂多变的生存环境,比如著名的“荷叶效应”、壁虎脚掌上的刚毛结构、穿山甲的皮肤甚至人类自己的指纹。大自然的选择启迪人们非光滑表面具有更丰富的功能性。基于以上两方面的考虑,人们萌生了通过主动的表面设计来提高表面摩擦磨损性能的想法,这促使了纹理表面或者表面织构的提出和研究。纹理表面就是利用物理、化学或机械的方法人为地在摩擦副表面加工出按一定规则分布的微几何特征。相对于粗糙度,纹理表面无疑是人为设计表面的深层次发展,使得从局部到整体的表面形貌的精细设计、控制成为可能。2005年,第三届世界摩擦学大会上纹理表面成为涉及环境、节能和可持续发展的研究热点,由此推动了纹理表面在国内外的迅速发展。

虽然早在20世纪60年代,Hamilton等已经认识到微凸起能够形成附加的动压润滑效果,从而改善表面的摩擦学性能,使纹理表面这一概念首次面世,但是对于纹理表面改善摩擦学性能的广泛研究至今仅仅20年左右的时间,尤其是最近15年。社会的发展和工业技术的进步,尤其是经济、环保、精确的先进加工技术的成熟应用,为纹理表面的实验研究提供了很大的契机,促进了纹理表面的蓬勃发展。近年来,关于纹理表面的研究文章日趋增加,其摩擦学性能已经得到学术界和工业界的广泛重视,显然已成为当下摩擦学领域的研究热点之一。

近年来作者在纹理表面的润滑设计方面,围绕纹理表面润滑计算理论和数值方法、油膜动压润滑形成机理、纹理拓扑结构和几何参数对动压润滑性能的影响规律、纹理表面及纹理

轴承的优化设计等方面,开展了广泛的研究,并取得了一些成果。本书首先基于 Reynolds 方程和 Navier-Stokes 方程,讨论了纹理表面动压润滑的计算理论和数值方法。通过理论分析和数值模拟方法提出了决定 Reynolds 方程有效性的两个关键因素,建立了 Reynolds 方程有效性的评价准则;提出了单个微坑和整体轴承两个层面的纹理表面动压润滑形成机理,分析了纹理参数和工况条件对润滑形成机理的影响规律,绘制了纹理表面润滑机理“相图”。而后,基于动压润滑形成机理,分析了纹理几何参数和工况条件对纹理表面润滑性能的影响规律,研究了提高润滑性能对纹理形状的需求,由此设计了具有优异润滑性能的楔形纹理表面,并对其进行了参数优化设计;进一步构建了楔形微坑的多纹理轴承,分析了几何参数对其动压润滑性能的影响规律。最后,本书采用分子动力学方法探索了纳米纹理表面的纳米力学和摩擦学行为。

由于作者水平及时间的限制,书中缺点和错误在所难免,恳请读者批评指正。

作 者

2017 年 9 月

目 录

1 绪论	1
1.1 研究背景、意义及来源	1
1.2 纹理表面的研究现状	2
1.3 存在的问题	13
1.4 研究内容及方法	14
2 Reynolds 方程在纹理表面动压润滑计算中的有效性验证	16
2.1 引言	16
2.2 Reynolds 方程的推导	17
2.3 Reynolds 方程和 Navier-Stokes 方程的数值求解方法	20
2.4 Reynolds 方程的有效性	23
2.5 本章小结	32
3 纹理表面流体动压润滑形成机理	33
3.1 引言	33
3.2 单个微坑层面的动压润滑机理	34
3.3 整体轴承层面的动压润滑形成机理	44
3.4 本章小结	45
4 纹理形状及几何参数对润滑性能的影响	46
4.1 引言	46
4.2 矩形沟槽纹理几何参数对润滑性能影响的理论研究	46
4.3 矩形沟槽纹理几何参数对润滑性能影响的数值研究	49
4.4 三维球冠形凹坑纹理几何参数对润滑性能的影响	57
4.5 二维矩形沟槽纹理与三维球冠微坑纹理表面对比	66
4.6 纹理表面改善摩擦性能的实验验证	67
4.7 提高纹理表面动压润滑的方法	71
4.8 本章小结	71
5 纹理表面的优化设计	73
5.1 引言	73
5.2 单纹理的优化设计	73
5.3 几何参数对楔形纹理表面动压润滑性能的影响	78

5.4	多纹理轴承的优化设计.....	82
5.5	本章小结.....	89
6	纳米尺度纹理表面的摩擦学性能.....	90
6.1	引言.....	90
6.2	单晶硅纳米薄膜纹理表面的摩擦行为.....	90
6.3	单晶硅纳米薄膜光滑表面的纳米力学性能.....	95
6.4	本章小结	103
7	总结及展望	104
7.1	总结	104
7.2	创新点	105
7.3	展望	106
	参考文献.....	107

1 绪 论

1.1 研究背景、意义及来源

摩擦学是主要研究相对运动的表面上摩擦、磨损与润滑现象的产生、变化与发展的规律及其控制与应用的科学与技术^[1]。摩擦无处不在,从我们日常生活中的咀嚼、步行、抓取东西,到火车、飞机、航天器等设备的正常运转,都离不开摩擦。从古老的“钻木取火”、“埃及金字塔的建造”到现代的“人工关节”、“纳米轴承”,摩擦学在人类科技发展史中留下了深深的印记,伴随着科学技术与人类社会的发展,每一时期的摩擦学都具有显著的时代特征,使这一古老的科学永远年轻,永远处于科学发展的前沿领域。

在工业实际中摩擦磨损一般被认为是一种有害无益且增加能耗的过程,减小摩擦、开发新型耐磨材料和润滑介质始终是研究热点。随着能源危机的加剧,美国摩擦学家和机械工程协会的一些摩擦学专家通过研究和分析认为对环境和能源的考虑将是未来摩擦学研究的主要驱动力^[1,2]。考虑到当前我国资源环境矛盾日趋尖锐,节能减排形势十分严峻的情况,我国学者认为摩擦学在解决我国国民经济和社会发展所面临的严重问题中具有重要的战略地位,是节能、降耗、减排的重要手段,必将对我国建设可持续发展的资源节约型和环境友好型社会发挥出独特的不可替代的作用^[3],并提出绿色摩擦学的术语和概念^[1],由此促成了国内外在减摩和耐磨材料、表面镀层、超低摩擦、高强度 DLC 薄膜、抗磨损薄膜及应用润滑油和添加剂等方面的巨大进展^[4-6],相对而言,摩擦副表面的织构化拓扑形貌的设计及相关研究仍是其中的薄弱环节。在过去的 15 年间,研究者意识到表面织构化对改善摩擦副表面摩擦学性能的重要意义,已开始在这个领域开展相关研究^[7]。

传统摩擦学理论基于粗糙度的考虑认为相互接触的表面越光滑摩擦性能越好,当表面达到原子光滑,将有可能实现超滑甚至零摩擦。一般的工业实际应用支持了这一理论,在过去的几个世纪中,人类一直致力于通过各种途径来降低摩擦副表面的粗糙度,收到了良好的效果。20 世纪 90 年代,Hirano 等^[8,9]通过理论计算发现当两个晶面在某些特定的表面和方向上运动时,摩擦力会消失,实现了超滑。但是受材料性质和加工精度的影响,即使是先进的化学机械平坦化(Chemical-Mechanical Planarization, CMP)技术目前也不能实现原子级的光滑表面。另外,当考虑到润滑和磨损时,情况将会发生改变,粗糙的表面有利于润滑油膜的形成和储存磨屑,在流体润滑、薄膜润滑、边界润滑和固体接触等状态下,一定条件下表面粗糙度可以对摩擦和润滑性能产生积极的影响^[10-12]。通过对自然界的长期观察研究,人们意识到自然界中的动物和植物在其体表形成了各种精巧奇妙的非光滑微结构以适应复杂多变的生存环境,比如著名的“荷叶效应”,壁虎脚掌上的刚毛结构,穿山甲的皮肤甚至人类自己的指纹。大自然的选择启迪人们非光滑表面具有更丰富的功能性。基于以上两方面的考虑,人们萌生了通过主动的表面设计来提高摩擦磨损性能的想法,这促使了纹理表面或者表面织构(surface texture)的提出和研究。纹理表面就是利用物理、化学或机械的方法人

为在摩擦副表面加工出按一定规则分布的微几何特征。相对于粗糙度,纹理表面无疑是人为设计表面的深层次发展,使得从局部到整体的表面形貌的精细设计、控制成为可能。2005年,第三届世界摩擦学大会上纹理表面成为涉及环境、节能和可持续发展的研究热点,由此推动了纹理表面在国内外的迅速发展。作为改变机械摩擦学性能的有效手段,纹理表面的几何形貌与结构设计、加工方法、摩擦学试验的现象分析,及其作用机理的数值模拟日益成为研究热点。

本书成果来源于国家重点基础研究发展计划(国家 973 计划)项目“苛刻环境下润滑抗磨材料的基础研究”的子课题之一“材料表面/界面结构的润滑抗磨性能及其控制”和国家自然科学基金项目“结构化粗糙表面的减摩机理与润滑计算模型研究”。

1.2 纹理表面的研究现状

早在 20 世纪 60 年代,Hamilton 等已经认识到微凸起能够形成附加的动压润滑效果,从而改善表面的摩擦学性能,使纹理表面这一概念首次面世。但是对于纹理表面改善摩擦学性能的广泛研究至今仅仅 20 年左右的时间,尤其是最近 15 年,随着社会的发展和工业技术的进步,尤其是经济、环保、精确的先进加工技术的成熟应用,为纹理表面的实验研究提供了很大的契机,促进了纹理表面的蓬勃发展。近年来,关于纹理表面的研究文章日趋增加,其摩擦学性能已经得到学术界和工业界的广泛重视,显然已成为当下摩擦学领域的研究热点之一。

1.2.1 纹理表面在工程中的应用

1.2.1.1 纹理表面在磁头磁盘中的应用

磁头磁盘界面(Head Disk Interface, HDI)的特征尺寸一般在微米级别,这一特征尺度上,大的表面体积比导致表面黏着力、摩擦力等表面力的作用显著增强,成为影响 HDI 功能、使用寿命和可靠性的关键因素。为了降低表面力的作用,人们自然想到通过降低接触表面面积的方法来降低表面力,由此萌生了在 HDI 上制造微小隆起或凹陷状纹理表面用以改善摩擦学性能的想法。Ranjan 等^[13]在磁盘的启停区采用激光技术加工了凹坑状纹理,成功地降低了盘片与磁头的黏附力,减小了摩擦,延长了使用寿命。随后大量的实验和理论研究证实了这一结果^[14-19]。另外,纹理的存在还能够改善 HDI 润滑性能,降低润滑剂的分解^[20,21]。目前,纹理表面已经成为改善 HDI 摩擦学性能的有效的方法。

1.2.1.2 纹理表面在内燃机中缸套-活塞环上的应用

内燃机中摩擦损耗是决定节约燃油和车辆发动机动力行为的最重要因素。内燃机摩擦损失的 50% 归因于缸套-活塞环系统,其中的 70%~80% 来源于活塞环^[22-25]。纹理表面在内燃机中的最早应用要追溯到缸套珩磨^[26,27],其已经被证明是一种改善内燃机缸套-活塞系统润滑性能、提高内燃机效率、减少碳排放的有效途径。Etsion 等^[28]提出将激光纹理表面应用于缸套-活塞系统中,通过理论研究证实了微纹理在流体润滑情况下可以产生附加的油膜压力,通过对纹理表面的尺寸-深度和单元面积占有率的优化,能够有效改善润滑情况。Kligerman 等^[29]提出了部分纹理表面的概念(图 1-1),所谓部分或局部纹理即是在高压区的邻近区域加工高密度分布的纹理,而其余部分没有加工纹理。他们通过理论研究发现,与

全纹理表面相比,部分纹理表面的平均摩擦力对于窄环可降低约 30%,对于宽环则降低达 55%。Ryk 等^[30]采用激光技术在活塞环上加工了微凹坑局部纹理,摩擦实验结果表明相对于全纹理表面,局部纹理表面最大可以降低摩擦 25%。Etsion 等^[31]进行了激光局部纹理的燃料利用试验,试验发现激光纹理表面使发动机系统燃料消耗降低约 4%。

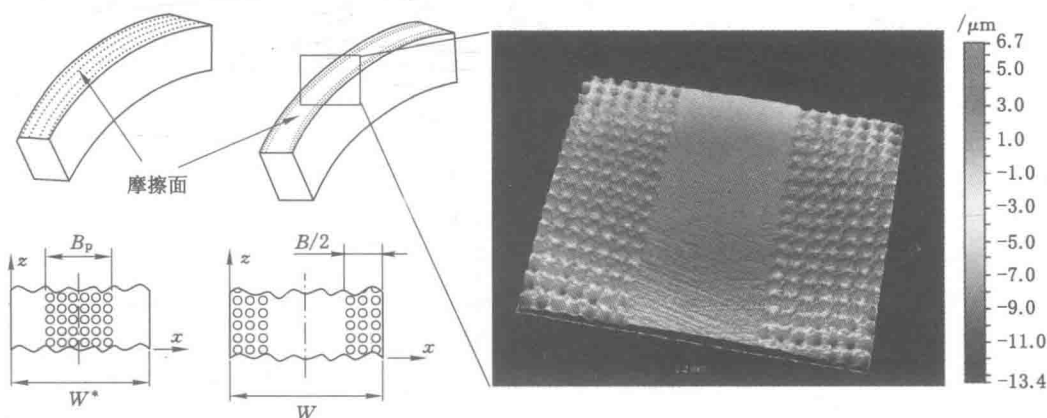


图 1-1 全纹理表面与部分纹理表面形貌

1.2.1.3 纹理表面在密封中的应用

纹理表面的机械密封环如图 1-2 所示。Etsion 等^[32,33]率先建立了激光纹理表面机械密封的物理模型,研究了微凹坑深径比等参数对机械密封密封面间流体膜平均无量纲压力的影响,并分析了密封面之间的压差对平均无量纲压力的影响,结果显示当其中一个表面均匀分布半球状微坑时,可显著提高密封性能。进一步的实验研究发现纹理密封器械在水中实际运行时可以降低高达 65% 的摩擦力矩和达到较低的表面温度 20 °C^[34,35]。Kligerman 等^[36]研究密封环激光纹理表面的影响,发现采用微孔结构的配套密封面可以产生较大的动压影响,以维持旋转轴和固定密封环之间较小的间隙。激光纹理表面的动压作用是依赖于每一微坑内的局部空化作用,因此动压作用会在高密封压力下逐渐消失。为了克服该问题,发展了局部纹理来提高高压密封中的流体静压影响^[37]。局部纹理的存在使得局部纹理区域两表面间隙较大从而在压力降低方向形成收敛间隙,因而建立了流体静压力。实验结果表明局部 LST 能大幅降低高压液体密封件的摩擦力矩,增加密封压力的极限^[37]。Pride 等^[38]研究了全激光纹理表面和局部激光纹理表面的密封件,结果表明局部纹理能够很好地降低静摩擦力矩,减少碳石墨机械密封表面的起泡现象。Feldman 等^[39]采用数值模拟研究了静压气体密封中纹理表面的摩擦性能。研究发现激光纹理表面的集中效应能与 Rayleigh 阶梯提供相似的承载力,但是局部激光纹理表面润滑油泄漏远远小于与之相应的阶梯状密封。局部激光纹理表面流体静压气体密封性能主要依赖于微坑的面积密度,而与微坑的直径无关,其最优的面积密度达到 0.65。纹理的实际深度对局部激光纹理表面密封的性能影响甚小。Etsion^[40]进行了纹理表面的机械密封环的工业试用,使其置于实际工况中运行,周期达到 38 个月,超过 10 000 h,磨损量低于 1 μm,使用寿命比无纹理密封环提高了 3 倍,而无纹理密封环在相同运行工况和周期中需要更换 4 次。

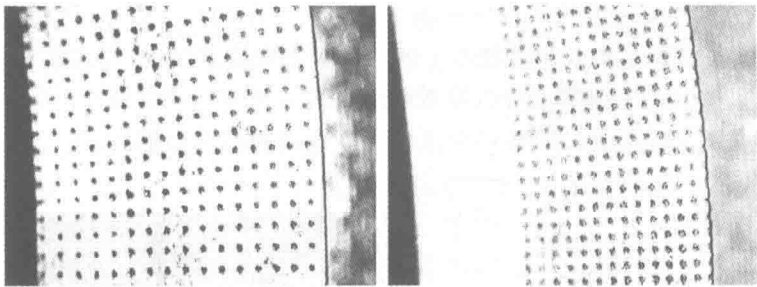


图 1-2 纹理表面的机械密封环

1.2.1.4 纹理表面在轴承上的应用

纹理表面提高轴承的性能已经得到许多实验的验证^[41-43]。图 1-3 给出了一个典型的纹理表面推力轴承盘面。Brizmer 等^[41]验证了规则微坑状激光纹理表面是提高平行推力轴承的一种潜在的方法。发展了纹理面平行滑块的模型,通过分析纹理表面对承载能力的影响,得到了具有最大承载力的微坑最优几何参数。指出微坑的“集中效应”能够产生实质性的承载能力。Etsion 等^[44]通过实验验证了 Brizmer 的理论模型及结论。实验结果显示,与无纹理的轴承相比,具有局部激光纹理表面的轴承产生的膜厚(平面间隙)将增加约 3 倍,摩擦系数将降低约 50%。Wang 等^[45-47]通过反应离子刻蚀方法在平行推力轴承 SiC 表面设计纹理,实验验证了在水润条件下通过纹理表面可以显著提高其承载能力。由反应离子刻蚀在轴承的其中一个配合面加工微坑,可以使得从动压润滑向混合润滑转变的临界承载力提高 2 倍。Tala 等^[48]、Lu 等^[49]则分别研究了表面织构对滑动轴承的摩擦学状态和 Stribeck 曲线的影响,说明了表面织构的有效性。

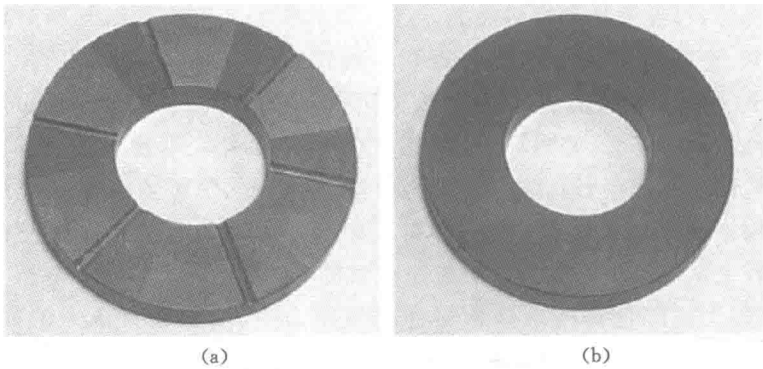


图 1-3 具有纹理表面的轴承

1.2.2 纹理表面制备技术

纹理表面的制备是纹理表面研究及应用的先决条件,是推动纹理表面实用化、工业化的关键。纹理制备技术的发展是工业发展和社会需求的必然产物。每一种制备方法都具有其固有属性,根据其物理学原理将其分为四类,即材料的添加、去除、迁移和自成形。

添加材料技术即通过在所期望的表面上添加材料以产生所需的小面积浮凸特征的纹理,主要加工技术又分为化学反应和沉积过程、物理沉积两大类,其中以化学气相沉积

(Chemical Vapor Deposition, 简称 CVD)^[50]、电解涂层(包括阳极氧化^[51]和电沉积^[52,53])、聚焦离子束(Focused Ion Beam, 简称 FIB)^[54]、物理气相沉积(Physical Vapor Deposition, 简称 PVD)^[55]、多晶薄膜自组装^[56]等方法使用较广。化学和物理气相沉积过程必须加入掩膜步骤才能最终制备出所需的纹理表面。聚焦离子束方法可以精确地控制表面膜的厚度($<100\text{ nm}$),但是其加工过程较慢。在多晶膜的生成过程中,自组装的影响会产生具有柱状微结构的涂层,也会导致 100 nm 范围内的表面褶皱^[57],所以涂覆之前的表面清理过程至关重要,并且需要相当复杂的沉积设备。为了保证柱状结构的生长,沉积参数的选取必须非常小心。

去除材料即部分去除表面的材料以形成微凹坑特征的纹理,主要加工方法可以分为化学刻蚀、机械加工和高温去除。化学刻蚀方法制备纹理即将材料进行掩膜后浸入到化学腐蚀剂中去除材料的方法,其化学试剂的选择和掩膜技术非常重要。其作用机理与化学腐蚀或金属的化学溶解过程相同,即微电化学电池反应。其主要技术有反应离子刻蚀(Reactive Ion Etching, 简称 RIE)^[45-47]、电子束(Electrical Beam Texturing, 简称 EBT)^[58]、光化刻蚀(Photo Chemical Etching, 简称 PCE)^[59]、无掩膜电化学刻蚀^[51,60]等方法。机械加工方法是目前操作较简单的加工方法,包括数控超声加工(CNC ultrasonic machining)^[51,61]、机械微加工[如珩磨(mechanical honing)^[62,63]、微切削^[64,65]]。高温加工方法有激光加工技术(LST)^[66-69]和电火花加工(Electrical Discharge Machining, 简称 EDM)。

材料的迁移技术即材料塑性成形和材料的再分配引起的材料表面结构从一区域变化到另一区域,其主要机械加工方法有喷丸^[70]和压印技术(图案压印模具^[71-76]和振动碾轧技术)。化学反应也可以通过迁移材料来完成纹理表面的制备。Dos Santos 等^[77]通过紫外激光束作用,用光驱动分子迁移机制加工出纳米结构的格栅纹理。紫外光固化会使光聚合过程中出现收缩现象,只要在 UV 光源和液体单体之间放金属掩膜,聚合物表面就会因为局部收缩现象而形成纹理,即 UV 光刻技术^[78,79]。

自成形即材料表面存在耐磨区,表面经过磨损工程后使耐磨区凸显出来,即不同区域的力学特性存在梯度,使区域间磨损率不同,自己形成纹理。主要的方法有定位扩散(localized diffusion)、软硬相结合(热植入硬质相^[80,81]、嵌入软质相^[82])等。

另外, LIGA 技术被公认为一种全新的微细加工技术^[83],是德文 Lithographie、Galvanoformung 和 Abformung 三个词,即光刻、电铸和注塑的缩写。LIGA 工艺是一种基于 X 射线光刻技术的 MEMS 加工技术,主要包括 X 光深度同步辐射光刻、电铸制模和注模复制三个工艺步骤。相对于其他微细加工工艺,其加工精度较高且可用材料的种类较多,但其得到的形状是直柱状的,且成本较高。文献^[83]对 LIGA 和 UV 光刻技术进行了简单的比较。

纹理表面是一种工业应用技术,适用于纹理表面的加工技术要求精度高、加工效率高、加工形貌及参数可控、成本低廉并且能够在复杂表面上制备纹理。因此,目前电化学沉积、激光加工技术、离子刻蚀技术是目前关于纹理的试验研究中采用最多的加工技术。从目前的研究来看,激光纹理加工技术是最有应用潜力的一种纹理加工技术。即便如此,激光纹理加工技术也存在表面形貌可控性不高、加工效率低的缺点。因此,开发新的适用于大规模工业化生产的纹理表面加工技术依然是未来研究的热点。

1.2.3 纹理表面改善摩擦学性能研究进展

经过多年对纹理的形状、排列及几何参数的实验和理论研究,关于纹理的摩擦学作用已经得到统一的认识,即一定的工况条件匹配适合的纹理形貌才能得到最优的摩擦学性能。纹理表面的摩擦学性能研究大致可以分为三个方面:对各种加工方法制备出来的纹理表面的实验研究,纹理表面改善摩擦学性能的机理以及纹理表面形状、几何参数对摩擦学性能的影响。其最终的目的是提出适用于大规模工业应用的纹理表面加工技术,获得不同工况条件下最优的纹理结构和几何尺寸以最大程度地降低摩擦。

1.2.3.1 纹理形状、方向、几何参数对摩擦性能的影响

并不是所有的纹理都能够改善摩擦学性能,不合适的纹理几何参数反而不利于摩擦学性能的改善。Yu 等^[84]利用往复式摩擦磨损实验研究了微坑深度和面积率对电解加工的圆形、正方形和椭圆形微坑摩擦性能的影响,结果发现当圆形微坑的深度为 14~18 μm 时,面积率为 2.6%、15.5% 和 22.9% 的纹理表面都在一定程度上增加了摩擦,只有面积率为 10.4% 的纹理表面有一定的减摩作用。Nakano 等^[85,86]采用销-盘实验对比研究了槽状纹理、网状纹理和点状纹理的摩擦学性能,结果发现只有点状纹理可以降低摩擦,槽状纹理和网状纹理的摩擦系数都高于光滑表面的摩擦系数。所以寻找最优的参数组合最大程度地改善表面摩擦学性能一直以来都是纹理表面研究的重点。

早在 20 世纪 60 年代,Hamilton 对比研究了圆形和正方形微凸起的摩擦性能,结果发现流体动压润滑性能对微凸起的几何形状不敏感。

Stephens^[87]理论研究了正方形、圆形、正六边形、正三角形和菱形截面形状的微凸体和微凹坑的流体动压润滑性能,结果表明几何形状和朝向对承载能力的影响较大,而对摩擦系数几乎没有影响。微构成的面积率对摩擦系数的影响非常大,所有的几何形状都存在一个最优的面积率。漏损量和油膜厚度不依赖于微构型的形状、尺寸和朝向。随后 Stephens 采用 LIGA 技术在不锈钢推力轴承表面制备了直径 550 μm 、间距 165 μm 、不同深度的六边形凹微坑阵列纹理表面,如图 1-4 所示。摩擦实验表明,在全膜润滑状态下存在一个最优的微坑深度使得摩擦系数最低可以降低 14%~22%。

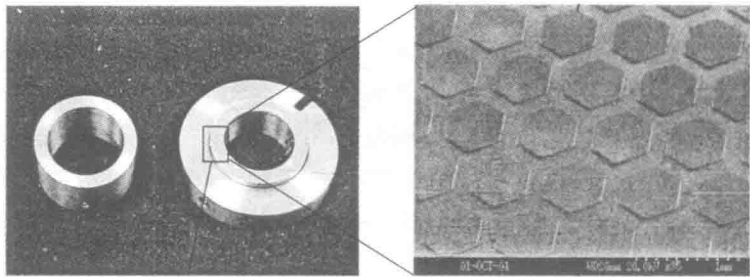


图 1-4 采用 LIGA 技术在推力轴承上加工的六边形微坑

Etsion 等^[29]建立了缸套-平面活塞环摩擦副的动压润滑模型,研究了球冠状微坑深径比、面积率对摩擦力的影响。研究结果表明:面积率在 5%~20% 变化时摩擦力的最大变化仅为 7%;相反,深径比对摩擦的影响比较大,存在一个最优的深径比 0.1~0.18 使得摩擦力最小。相对于光滑表面,最优的微坑纹理表面可以降低磨损 30%。进一步的实验验证了

这一结果^[88]。类似的结果也出现在球冠状微坑纹理表面的机械密封上^[32,33],但是最优的深径比降低到 0.05 以下;面积率的作用同样比较小,较优的面积率约为 0.2。

Kovalchenko 等^[89]对比研究了激光纹理表面、光滑表面和粗糙表面的润滑状态转变。实验获得的 Stribeck 曲线如图 1-5 所示。从图可以看出纹理表面在整个测试区域都处于摩擦系数较低的动压润滑阶段,而粗糙表面和光滑表面则出现了明显的润滑状态转变,由此认为纹理表面的存在使得润滑状态从动压润滑转为混合润滑发生在更高的载荷和更低的速度,也就是说其扩大了动压润滑的区域。研究还发现,低面积率的纹理表面更有利于润滑状态的转变。

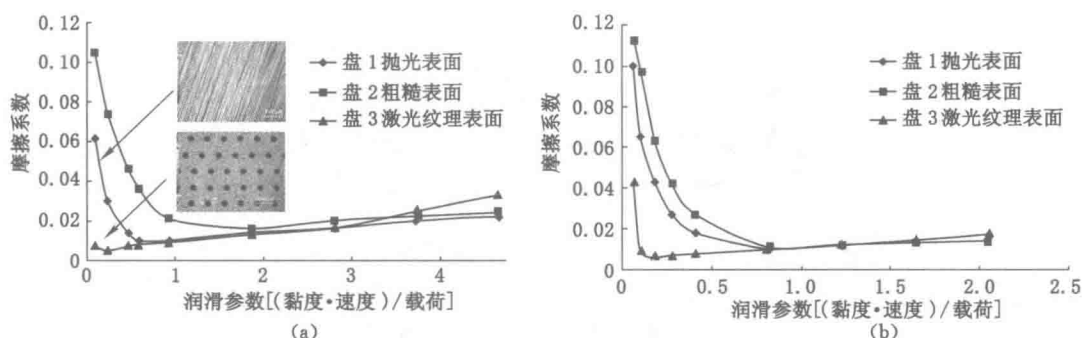


图 1-5 Stribeck 曲线
(a) 高黏度润滑油;(b) 低黏度润滑油

王晓雷等^[45,46,90-92]利用反应离子刻蚀技术、激光表面纹理技术在 SiC 表面加工了圆柱形的微坑阵列,在水润滑的条件下研究了微坑深径比和面积率对其承载力的影响。如图 1-6 所示,微凹坑深径比在 0.01~0.02 之间,微凹坑面积率为 5% 时,能够产生最大的润滑膜承载力。采用优化的面积率和深径比可以使得承载力相对于未织构表面最大提高 1.5 倍左右。王晓雷等^[93]进一步在 SiC 表面加工了 350 μm 圆形大微坑与 40 μm 矩形小微坑组成的混合形纹理表面。实验研究结果表明,混合模式的纹理表面可以进一步将动压润滑向混合润滑转化的临界载荷相对未织构表面提高 2.3 倍左右。

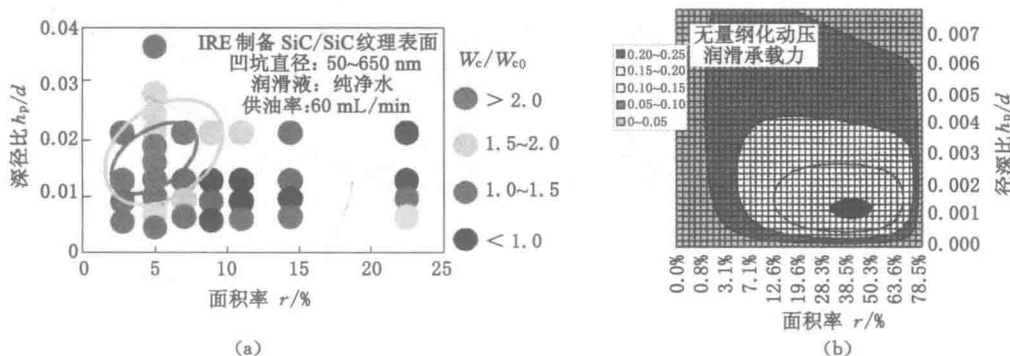


图 1-6 SiC 推力轴承水润滑承载能力图谱
(a) 实验结果;(b) 理论结果

于海武等^[94]建立了单个微坑的数值模型,分析了微坑的形状(椭圆形、圆形、三角形)和朝向对动压润滑的影响,结果表明微坑的形状和朝向对承载力有重要的影响;当椭圆凹坑的长轴垂直于运动方向时,能够获得最大的承载能力,相对于圆形微坑在速度为 0.2 m/s 时承载能力提高了 26.3%。随后,于海武等^[84,95]采用化学刻蚀的方法在商用发动机缸套用硼铜合金铸铁上加工了圆形、正方形、椭圆形 3 种微坑纹理表面(图 1-7),采用往复式摩擦磨损试验机研究了微坑形状对摩擦性能的影响。实验表明椭圆微坑具有最小的摩擦系数,其次是矩形,圆形微坑的减摩效果最弱;每一种微坑都存在一个最优的微坑深度和面积率使得摩擦最小。圆形、正方形、椭圆形最优的面积率分别为 15.5%、10.4%和 10.4%;对应的最优的微坑深度均为 8~10 μm。但是随着载荷的增加,织构形状对润滑减摩的影响逐渐减弱。实验结果基本上证明了前期的理论研究结果。

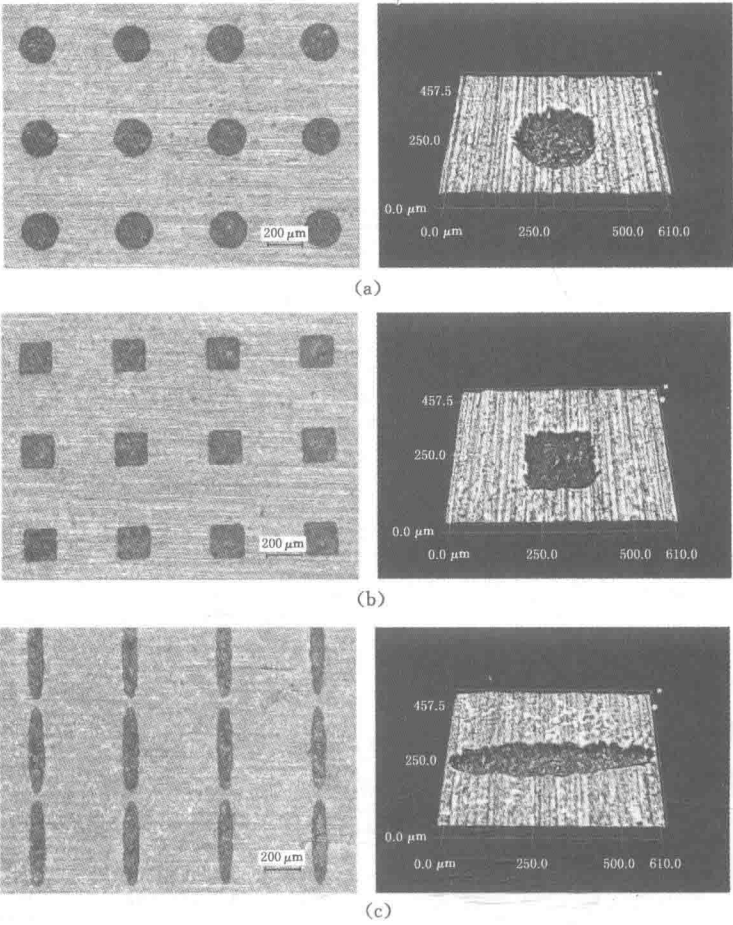


图 1-7 不同形状的微坑纹理表面
 (a) 圆形;(b) 正方形;(c) 椭圆形

彭旭东等^[96]建立了基于 Reynolds 方程的激光加工多孔端面机械密封的润滑模型,并用限元方法求解了该模型,获得了矩形面、球缺面、抛物面和椭圆面四种纹理的多孔端面机械密封特性参数,发现具有矩形截面或圆柱形微坑表现了最好的性能。彭旭东等^[97]进一步

对比研究了凹、凸两种纹理端面机械密封性能,结果表明,在端面开启力与闭合力平衡的状态下,凹型纹理的综合密封性能好于具有相同工况和面积比的凸型纹理;彭旭东等建议工程实践中优先选择三角形凹形纹理。随后,白少先等^[98]研究椭圆形激光微坑对干气体密封器械的动压力的影响并发展了理论模型,研究了不同工况条件下(旋转速度、密封气压和间隙)纹理几何参数的影响,研究发现椭圆形微坑可以显著提高微孔气体密封面的动压效果。当椭圆形纹理的倾角为 50° ,面积率 $S_p=0.3$ 时,其动压开启力比静压开启力大 22%。

纹理的底部形状对纹理摩擦性能也有一定的影响。Wakuda 等^[99]使用销-盘实验对比研究了如图 1-8 所示两种不同底部形状纹理面的摩擦性能,结果表明两种微坑的摩擦性能差别不大。Toshikazu 等^[100]研究了不同底部形状纹理面的弹流润滑性能,结果表明织构底部形状具有微楔或微阶梯形时能产生较厚的油膜。

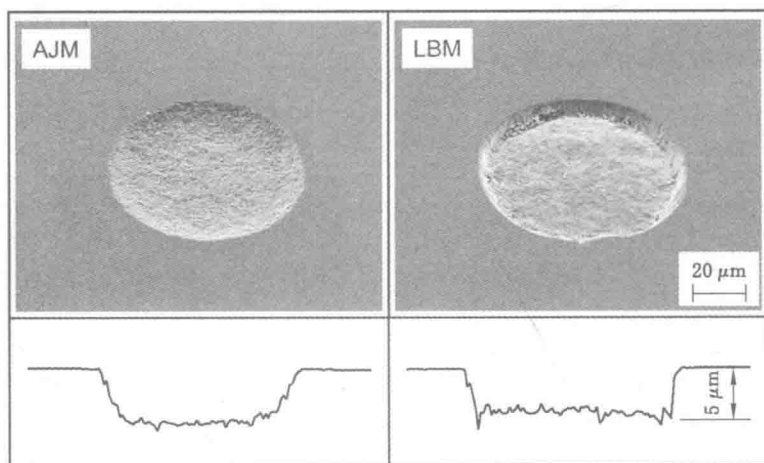


图 1-8 具有弧形底部形状的微坑和平的底部形状的微坑

王霄等^[101]基于 Reynolds 方程采用多重网格法求解了球冠形、六角形、三角形、锥形、正方形截面微坑纹理表面动压润滑问题,分析了几何形貌对润滑性能的影响,结果发现球冠微坑的油压形成区域是截面为圆形的微造型中最大的。相比较而言,在相同面积占有率和深度下,正三角形微坑形成的有效油膜压力区域是最大的,形成的油膜间隙大,摩擦系数小。

除了以上介绍的微坑和微凸起纹理表面外,槽状纹理表面是另一类研究比较多的纹理。文献中常见的槽状纹理如图 1-9 所示。Costa 等^[102]建立了圆柱与平面接触摩擦的实验装置,利用油膜承载力评价了圆形凹坑、凹槽和 V 形凹槽的流体动压润滑性能;结果表明 V 形凹槽能最有效地增大动压润滑膜的厚度,凹槽纹理的最差。在低载时,凹坑纹理和垂直于滑动方向的凹槽纹理对润滑膜的厚度几乎没有影响,甚至在最低的载荷下垂直于滑动方向的凹槽纹理具有最低的油膜厚度;在中载时,凹槽的朝向对润滑膜的厚度没有影响;在高载时,当凹槽的方向垂直于滑动方向时,油膜厚度达到最大。面积率对纹理的动压润滑性能也有重要的作用,对于凹坑纹理,当面积率为 0.11 时润滑膜厚度达到最大;凹槽纹理的润滑膜厚度则随着面积率的增加而增加。Yuan 等^[103]研究了凹槽的朝向对其润滑性能的影响,得到了与 Costa 相反的研究结果,即在较低的载荷下垂直于运动方向的凹槽具有更好的减摩作用。大多数情况下,与运动方向成一定夹角的凹槽具有更好的减摩效果。Suh 等^[104]采用

销-盘实验,在石蜡润滑条件下考察了交叉形槽状纹理的混合和弹流润滑性能,研究结果显示通过在接触面上加工网状微槽纹理可以有效地控制摩擦,且发现纹理的每一个几何参数都会对摩擦性能产生影响,特别是降低槽状纹理的深径比,增加槽的滑移长度,都会降低摩擦。Fu 等^[105]数值分析了凹槽的深度、角度、宽度、面密度对动压润滑性能的影响,结果发现平均的无量纲压力随着面密度的增大而增大;凹槽宽度对无量纲压力的影响较小;存在使得无量纲压力最大的最优坑深;存在使得无量纲压力最大的最优局部化织构比值。

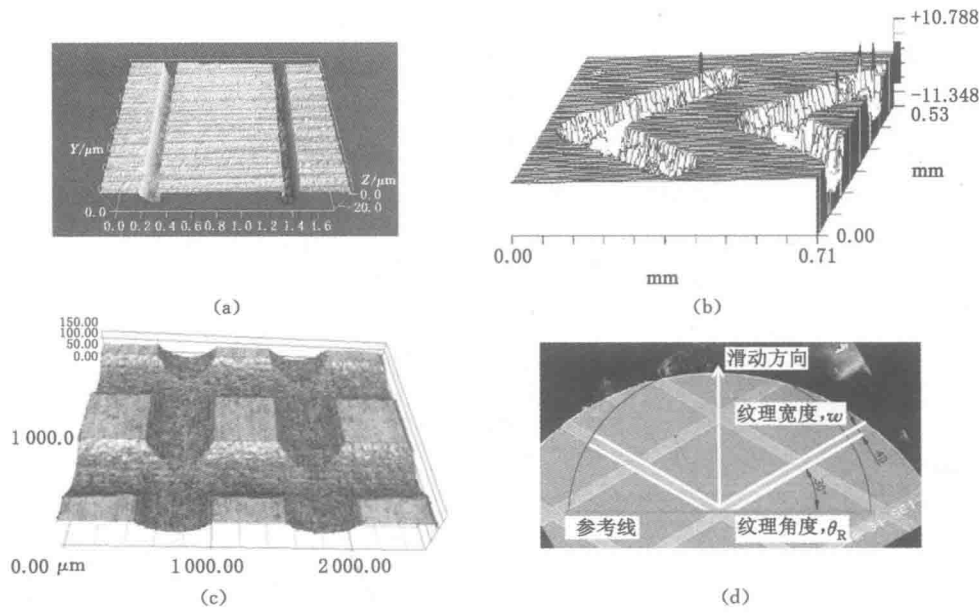


图 1-9 槽状纹理
 (a) 直线形槽状纹理;(b) V 形槽状纹理;(c) 垂直交叉槽状纹理;(d) 交叉槽状纹理

1.2.3.2 纹理表面动压润滑理论研究进展

作为一项应用性技术,纹理表面研究的最终目的是在具体的工况下使用纹理技术最大可能地降低摩擦和磨损。流体动压润滑是一种摩擦最小的形式,因此工业应用中尽可能地使设备处于流体动压润滑状态。实验研究已经表明纹理表面能够扩大动压润滑的区域,降低动压润滑向混合润滑和边界润滑的轴承数^[89],因此人们期望通过在表面制备特定几何的纹理来尽可能地使设备运行在动压润滑状态下。人们面临最大的困难在于纹理的几何形貌和参数有无限种可能,加之纹理制备手段和实验条件的限制,通过实验方法找到不同工况下减摩效果最好的纹理形貌和几何参数的努力几乎是不可能的。数值模拟技术弥补了实验研究方法的不足。通过数值模拟技术,人们试图找到纹理面动压润滑形成的机理,建立合适的数学或者物理模型,分析纹理形貌及其几何参数对纹理表面动压润滑效果的影响规律,反过来指导纹理形貌和几何参数的优化设计,再通过实验方法对最优的有限的纹理形貌和几何参数组合进行验证。这一研究方法已经在过去获得了很好的应用效果,比如 Etsion 等^[29,88]成功地实现了内燃机缸套-活塞环摩擦副表面激光纹理的优化设计。这一思想与 Wang 等^[106]提出的虚拟织构化的设计方法是一致的,如图 1-10 所示。为此,有必要对纹理表面动压润滑性能进行深入的理论探讨。