

表面强化及功能化

织构化表面改性及其在生物材料上的应用

秦立果^{a,b}, 杨浩^{a,b}, 刘斌^c, 张辉^{a,b}, 冯新安^{a,b}, 张雅利^d, 董光能^{a,b}

(西安交通大学 a.设计科学与基础部件研究所 b.现代设计及转子轴承系统教育部重点实验室
c.机器人与智能系统研究所 d.生物医学信息教育部重点实验室, 西安 710049)

摘要: 表面织构化 (Surface texturing) 改性是指根据材料属性选择合适的加工手段, 在相对运动的摩擦副表面引入具备特定形状、尺寸、分布和排列的微观结构阵列, 从而实现摩擦副摩擦学性能的调控。随着生物材料的迅速发展, 生物界面的摩擦学问题是制约其服役安全与寿命的关键因素。表面改性 (如合理的表面织构化设计) 因强大的润滑优化功能, 由此受到科研工作者的广泛关注。在生物材料服役寿命需求日益增加的背景下, 首先分析和总结了典型生物材料产品——人工关节在人体服役过程中的失效原因, 并将其分为了摩擦学和生物学问题, 由此提出了通过表面织构化技术改进人工关节材料的耐磨性和增强其生物相容性, 最终达到实现长寿命人工关节服役的目的。详细地论述了近年来表面织构在生物材料上的研究进展, 分析了表面织构化参数, 如形状、尺寸及排布等对摩擦学性能的影响, 考察了不同织构对摩擦副在不同运动工况下承载力及耐磨性的影响, 阐述了表面织构的减摩耐磨机理。最后讨论了表面织构对细胞接触引导生长的调控, 如对细胞的粘附状态、形态、增殖和分化能力的影响, 尽管利于细胞生长的尺寸小于润滑优化的尺寸, 但通过多层次或复合设计可望实现生物相容性与摩擦学性能改善相兼具的目标。最后在现有人工关节材料表面改性的研究基础上, 对延长人工关节服役寿命的研究方向、发展趋势和应用领域进行了展望。

关键词: 生物材料; 表面织构化; 摩擦; 磨损; 接触引导; 生物相容性

中图分类号: TH117 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)09-0001-11

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.09.001

Surface Texturing Modification and Its Effect on Biomaterials

QIN Li-guo^{a,b}, YANG Hao^{a,b}, LIU Bin^c, ZHANG Hui^{a,b}, FENG Xin-an^{a,b},
ZHANG Ya-li^d, DONG Guang-neng^{a,b}

(a.Institute of Design Science and Basic Component, b.Key Laboratory of Education Ministry for Modern Design & Rotary-Bearing System, c.Institute of Robotics & Intelligent Systems, d.Key Laboratory of Biomedical Information Engineering of Ministry of Education, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

ABSTRACT: Surface texturing modification refers to selection of proper processing methods to introduce regular micro-structured patterns (specific shape, dimension, distribution and orientation) on relatively moving surfaces of friction pairs

收稿日期: 2018-06-21; 修订日期: 2018-08-26

Received: 2018-06-21; **Revised:** 2018-08-26

基金项目: 国家自然科学基金 (51605370, 51475358); 博士后基金 (2017BSHEDZZ122); 陕西省博士后基金 (2016M602802); 陕西省自然科学基金 (2017JQ5009); 中央高校基本科研业务费专项资金资助

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51605370 and 51475358), Postdoctoral Science Foundation of Shaanxi Province (2017BSHEDZZ122), China Postdoctoral Science Foundation Funded Project (2016M602802) and the Natural Science Fund of Shaanxi Province (2017JQ5009), the Fundamental Research Funds for the Central University

作者简介: 秦立果 (1986—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为生物摩擦学。

Biography: QIN Li-guo (1986—), Male, Doctor, Lecturer, Research focus: biotribology.

通讯作者: 董光能 (1965—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为摩擦学材料。

Corresponding author: DONG Guang-neng (1965—), Male, Doctor, Professor, Research focus: tribo-materials.

based on physical properties of materials. The surface texturing modification aims to control/improve tribological properties of friction pairs. With the rapid development of biomaterials, tribological problem in biological interfaces is the key factor restricting its service safety and life span. Optimizing parameters of surface texture can significantly increase lubricating performance, which has aroused extensive attention of scientific researchers. In the context of increasing service life demands of biomaterials, the work firstly analyzed and summarized failure causes of typical biomaterial products-artificial joints in the service process. The causes were divided into tribological and biological problems. Surface texturing technology was proposed to improve wear resistance and enhance biocompatibility of artificial joint materials, and ultimately achieve the aim of long artificial joint service. Research progress of surface texture on biomaterials in recent years was discussed in detail. The effects of surface texturing parameters such as shape, size, and arrangement on the tribological properties were analyzed. The effects of different textures on bearing capacity and wear resistance of friction pairs under different moving conditions were investigated. Friction-reducing and wear-resisting mechanism of the surface texture was described. Last part of the paper discussed the effects of surface texture on growth of cell-contact-guided cells, such as their effects on adhesion state, morphology, proliferation, and differentiation capabilities of the cells. Although the size facilitating cell growth was smaller than the optimal size for lubrication, multi-layered or composite design was expected to achieve improvement of both biocompatibility and tribological performance. Finally, based on the research on surface modification of existing artificial joint materials, research fields, development trend and application fields of prolonging service life of artificial joints were prospected.

KEY WORDS: biomaterials; surface texture; friction; wear; contact guidance; biocompatibility

随着人类寿命的延长及老龄化比例的增加,越来越多的患者饱受骨性关节炎或创伤、畸变的折磨,有很大一部分患者需要接受人工关节置换术,以实现病变或损伤关节的替换功能。全世界因各类关节疾病需接受关节置换手术者高达 4000 万~6000 万人,其中每年需人工髋关节置换治疗者达 100 多万例^[1]。我国每年需要关节置换手术的患者也以 15%~20% 的比例增加^[2-3]。面对如此庞大的市场需求,对人工关节的可靠性提出了越来越高的要求。当前使用的人工关

节材料主要有陶瓷材料、高分子材料、金属材料及复合材料等^[4-8]。人工关节的配副材料中使用较多的是金属,人工关节的缓冲杯多由高分子材料构成,如超高分子量聚乙烯(UHMWPE)。图 1 是不同公司生产的几种常见人工关节产品。虽然人工关节的设计制造及临床的置换手术较以前有了大幅度的提升,如全同 CoCrMo 合金关节的寿命可达 15 年以上,然而人工关节的体内服役性能依然是制约其使用寿命的关键因素。

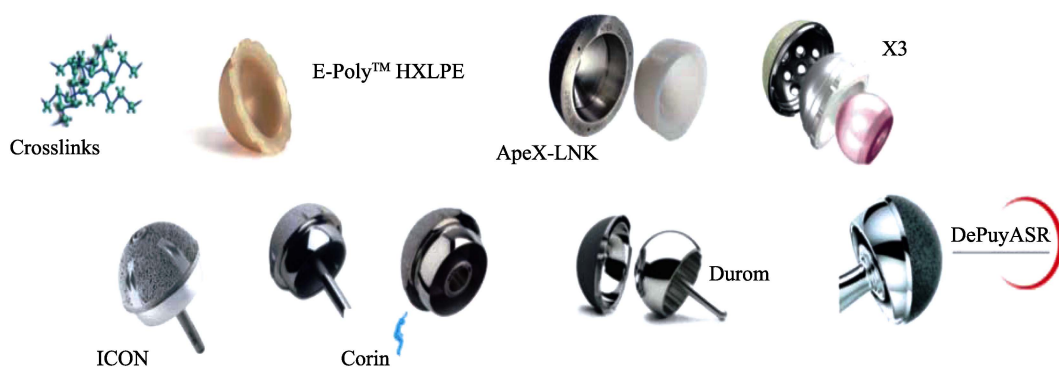


图 1 各种人工关节产品
Fig.1 Various artificial joint products

1 人工关节服役问题

运动时,人体正常关节的摩擦系数在 10^{-3} 数量级,在毕生服役过程中几乎不会发生磨损,但到目前为止,人工关节还无法具有像天然关节那样优异的性能。随着摩擦学与材料学的不断发展,人工关节取得

了显著成就,然而随着我国人口老龄化社会形势加剧及各种创伤导致的不可恢复骨折病例逐渐增多,且接受关节置换手术的病人趋于年轻化,如何解决由于关节面间的摩擦磨损以及由于磨屑引发的“磨屑病”等生物相容性问题,是当前研究人工关节所面临的挑战(图 2 所示)。

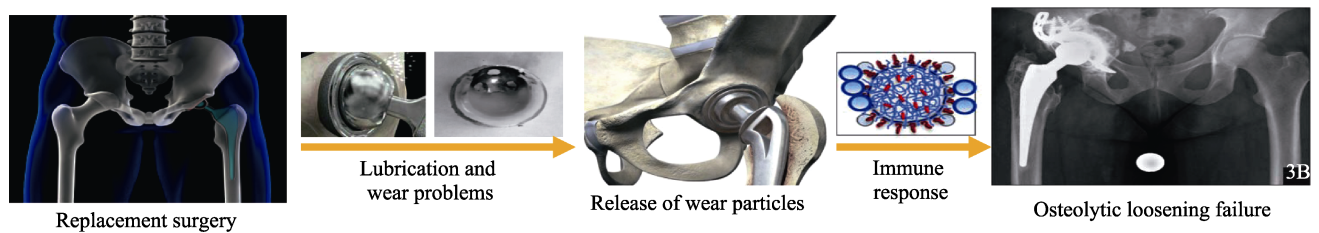


图 2 人工关节失效过程示意图
Fig.2 Failure process of artifial joints

1.1 人工关节的摩擦学问题

人工关节一年内要反复承受几百万次往复运动，且承受数倍于人体体重的载荷，关节材料极易发生疲劳磨损^[9]。人工关节中存在两类摩擦面：关节球头与髌臼组成的摩擦副界面以及关节构件与宿主骨之间的连接表面。根据关节配副的软硬程度，又可将人工关节分为两大类：第一类为“硬对软”组合，其材料为金属或陶瓷-聚合物型（MOP 型或 COP 型，典型的如钛合金-超高分子量聚乙烯）；第二类为“硬对硬”组合，主要有金属-金属型（MOM 型，典型的如钴铬钼合金-钴铬钼合金）和陶瓷-陶瓷型。各种类型的配

副材料在使用中均会产生一定量的磨屑，磨屑产生的多少与其润滑状态息息相关。例如，人工髋关节中的润滑状态为边界润滑和混合润滑，发生的磨损形式主要有磨粒、腐蚀及疲劳等。从假体植入到因磨损导致假体机械学功能丧失的使用周期定义为机械磨损寿命，可通过测试单位时间内材料的线磨损量或体积磨损量来评价。Fisher 等^[10-12]在人工关节模拟机上进行长期、大量的体外磨损试验，获得的基本磨损数据如表 1 所示。决定假体磨损寿命的核心要素是摩擦副材料的机械磨损性能。此外，髌臼与球头的表面质量、配合间隙及圆度对早期非正常磨损也具有重要的影响^[13-15]。

表 1 常用关节摩擦副基本磨损数据
Tab.1 Wear data of commonly used artifical joints

Material collocation	Annual wear (10 ⁶ times)			Abrasive size/ μm
	Average wear/mm	Average volume wear/mm	Number of abrasive (particle)	
CoCrMo/UHMWPE	0.10~0.20	40~100	4×10^{10}	2~5 (run-in period)
	0.5 (youth)			0.1~1.0 (after run-in)
CoCrMo/CoCrMo	0.0025~0.035 (run-in period)	1.0 (run-in period)	$(7\sim 70)\times 10^{12}$	1.0~3.0 (run-in period)
	0.005 (after run-in)	0.05~0.10 (after run-in)		0.030 (after run-in)

1.2 人工关节的生物相容性问题

体内服役条件下的人工关节在满足低摩擦与磨损的同时，还需兼顾良好的生物相容性。如当前使用的金属人工关节最终失效的原因在于体内环境中的腐蚀磨损（包括未受到任何机械应力发生的电化学腐蚀）导致形成金属离子和磨屑，并在肝、肾处积累，导致严重的生理反应（疼痛、炎症等），严重影响了植入体生物相容性及服役寿命。单位时间内材料磨损产物产生的对人体不良反应的生物毒性量是关节摩擦副材料磨损性能的生物学指标。早期的研究表明，不良反应主要是由磨屑所造成。近年来的研究则认为，关节磨损过程中的金属离子释放可能会有潜在的生物毒性，如 Cr 离子在肝肾处富集^[16]。金属-UHMWPE 配副人工髋关节按正常机械磨损寿命预测可以达到 40 年，但生物学磨损寿命最多为 15~20 年，后者是制约现今假体使用寿命的根源。在松动的假体-骨界面的结缔组织界膜中，发现了大量假体磨损微粒，如聚乙烯微粒、金属微粒、骨水泥微粒等。同时还发现了大量巨噬细胞、成纤维细胞和纤维基质、多核巨细

胞等，这表明这些具有一定尺度范围的微粒物质可能激发机体反应，产生过多的溶骨性介质，诱发假体周围骨溶解，使金属假体的支撑结构遭到破坏，从而造成假体松动。由此可见在人工关节产品设计中，在满足人工关节摩擦学性能的前提下，必须同时考虑其生物学指标。无论是金属/金属配副，还是金属/聚合物的人工关节，抑制磨屑的产生，避免人体产生免疫排斥反应，都是确保人工关节在体内长期、稳定、安全服役的关键。

1.3 人工关节的设计准则

现有的金属-超高分子量聚乙烯（UHMWPE）人工关节只有 15 年左右的寿命，而全同金属关节（Metal-on-Metal total hip replacement, MOM）的寿命虽可达 25 年以上，仍然不能保证年轻患者群体一生只需接受一次手术。同时现有的关节置换手术所造成的创伤巨大，往往导致再次手术的困难加大，甚至失去再次手术的机会。因此有理由要求随着人寿命延长而发展出免维护、长使用寿命（40 或 50 年以上）的关节，并且还要经得起针对年轻患者的生活特点，

如剧烈体育运动、健身活动等的考验,让患者有尊严地生活和工作。人工关节设计的最终目标是:(1)良好的生物力学及机械性能,植入体内后与生物组织弹性形变特性相匹配^[17];(2)生物摩擦学性能优良,具有低的摩擦系数与高的耐磨性,不产生或产生很少的磨屑^[18];(3)生物相容性良好,尽管材料-组织-体液等多交互界面发生一系列相互作用,但最终仍被人体组织所接受,因此要求材料对人体的正常生理功能不产生不良影响,不发生严重的免疫排斥和过敏反应等;(4)服役寿命长,在患者有生之年免维护。

如何延长人工关节的服役寿命,国内外的研究学者开展了广泛的研究,主要包括两个方面:(1)从材料本体出发,通过研制新型材料或加工工艺来满足人工关节材料的服役要求,但需要大量的经费支持与医学临床试验时间^[19];(2)不改变材料的本体属性,利用各种工艺对材料表面进行改性,如对关节材料表面采用离子注入强化^[20-21]、镀膜处理以及表面织构化等方法,以此来提升关节材料的摩擦学性能。其中,表面织构(Surface texture)设计作为解决工程中摩擦学问题的一个重要手段,引起了生物摩擦学学者的广泛关注。

2 表面织构化

表面织构化改性是指根据材料属性采用合适的加工方式,在相对运动的摩擦副表面引入具备特定形状、尺寸、分布和排列的微观结构阵列,从而实现摩擦副摩擦学性能的调控。合理的表面织构化设计展现出强大的润滑优化功能,由此受到科研工作者的广泛关注。表面织构的设计思想来源于自然界,如荷叶、芋头叶、壁虎足底、鲨鱼皮肤和蝉翼等,这些生物体的表面并非完全光滑,而是具备一定尺寸和规则排列的几何形貌,如图3所示^[22]。自然界生物体表面上的特殊构造给了我们无穷无尽的设计思想。在摩擦副表面上应用表面织构并积极探讨其对摩擦学性能的影响,已经成为一门新兴的学科。对表面进行减摩处理时,表面织构化表现出强大的润滑调控能力而得到迅速发展。表面织构技术已在机械密封、活塞环、计算机存储硬盘、推力轴承及重载齿轮等场合得到了广泛应用^[23-28]。随着生物材料的飞速发展,利用各种制造技术在材料表面引入表面织构,以改善材料的摩擦学性能及生物相容性,引起了越来越多学者的关注。

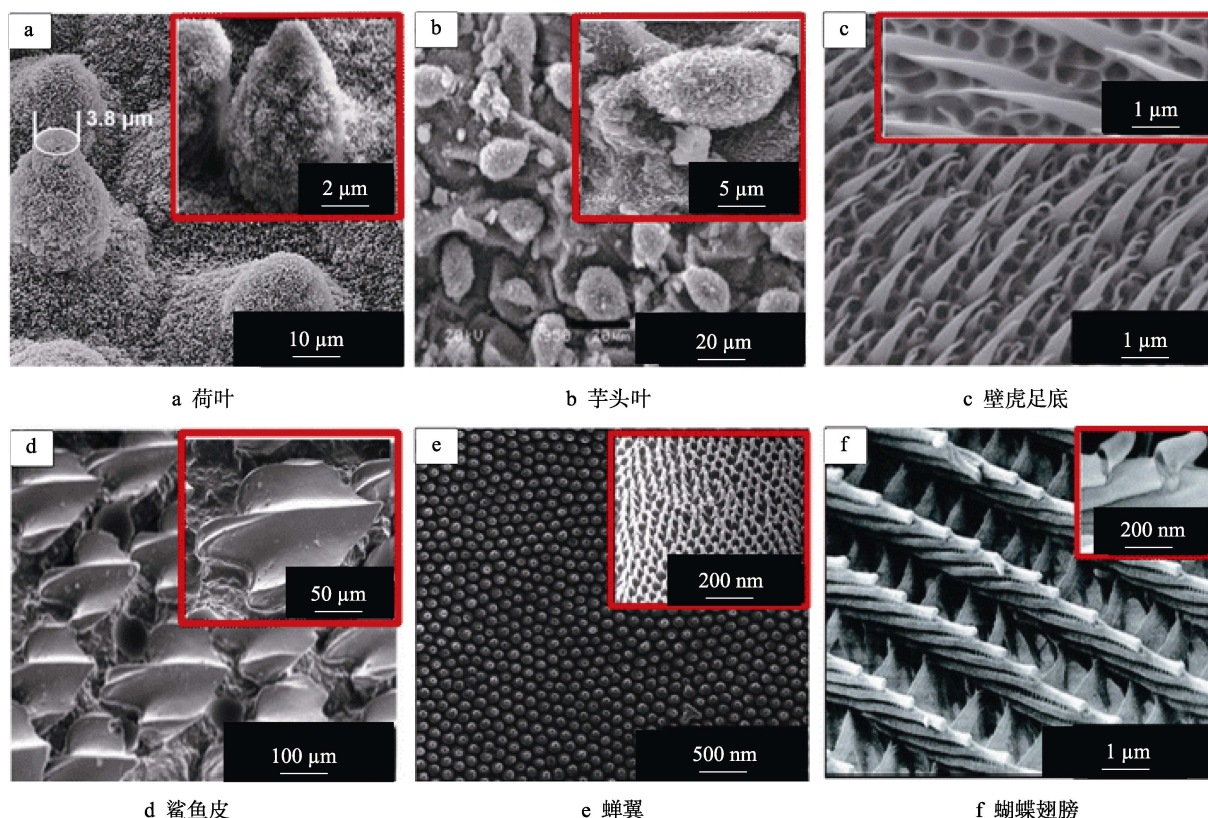


图3 自然界生物的表面织构^[29]

Fig.3 Surface texture oriented from natural phenomenon^[29]: (a) lotus leaf, (b) taro leaf, (c) gecko sole, (d) shark skin, (e) flap, (f) butterfly wings

2.1 表面织构对摩擦学性能的改善

1966年,Hamilton等人^[30]就开始尝试在表面加工出微细形貌,其研究结果表明,表面的微凸体形貌

能够充当微动压轴承,实现了表面润滑性能的改善。随着加工技术的发展,如激光织构化(LST)、LIGA、反应离子蚀刻(RIE)、压刻和电解加工等技术的应

用^[31-35], 使得各种精细组织的制造成为可能。之后有大量学者对组织改善润滑性能的理论 and 试验研究展

开了探索。图 4 是在目前已制备并成功应用在工程表面上的组织类型, 如网格、凹坑、沟槽和凸起等。

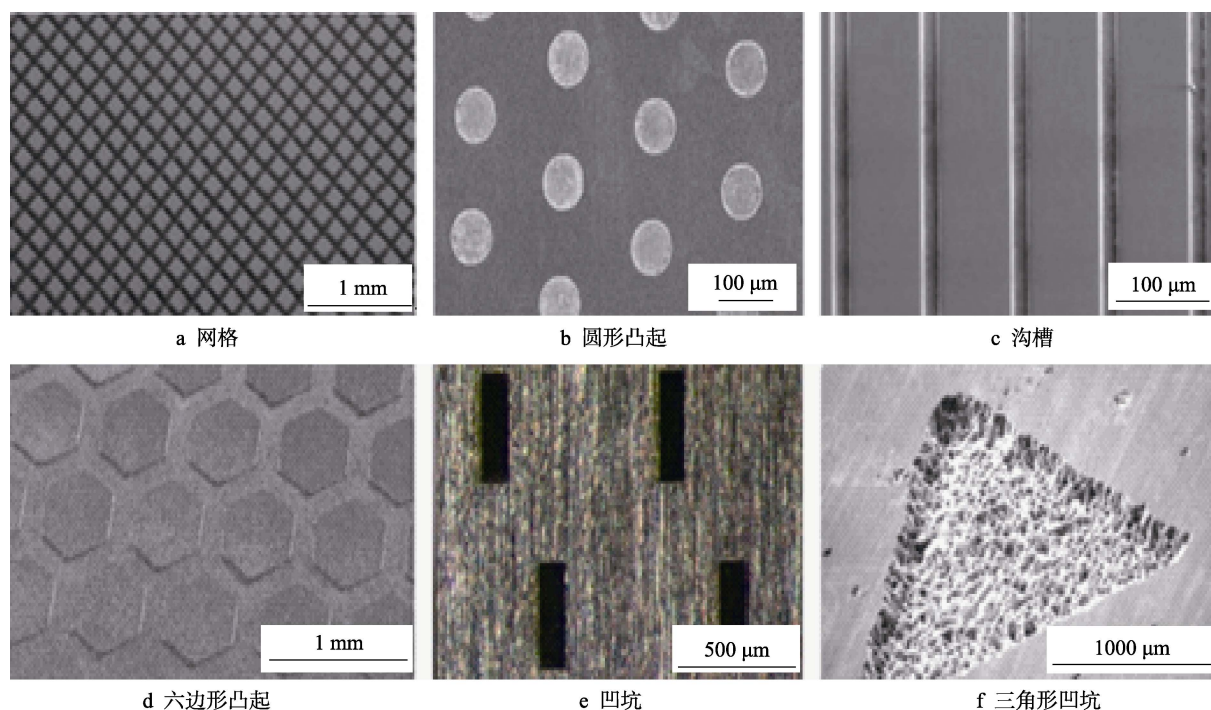


图 4 不同形状的组织化表面^[36-41]

Fig.4 Surface texture indifferent sharps^[36-41]: (a) grid; (b) round bulge; (c) groove; (d) hexagonal bulge; (e) pit; (f) triangular pit

关于表面组织改善润滑的机理分析主要有两个。一是组织的流体动压润滑增效机制, 即 Hamilton^[30]认为组织凸起的一侧与摩擦副之间形成收敛楔而产生流体动压力, 而组织凸起另一侧的发散楔, 由于负压的产生, 受到气穴 (Cavitation) 现象的限制, 由此在相对滑动的摩擦副表面获得了额外的承载能力。另一个机理为乏油条件下的“二次润滑效应”: 储存于凹坑组织中的润滑液可以充当润滑液的二次供给源, 在摩擦副表面的相对运动过程中, 这部分润滑液可以渗入摩擦副的接触区, 实现润滑液的补充, 达到降低摩擦和防止咬合的作用。此外, 越来越多的学者认为, 组织在干摩擦条件下还可以吸纳磨损颗粒, 避免了由于磨粒的犁沟作用而产生高摩擦^[42]。因此, 组织化作用机理的材料无关性, 也适用于人工关节的摩擦配副。尽管组织表面在人工关节产品上有成熟应用报道还较少, 但采用组织化技术对关节植入材料, (如 Ti 合金和 CoCrMo 合金等) 摩擦学性能改善的研究报道有逐年上升的趋势^[43-45]。

西安交通大学董光能等^[46-48]采用激光组织化技术在 TiNi 合金表面构造了规则的微凸表面形貌, 通过销-盘摩擦试验机评价了组织化表面在不同载荷和速度下的摩擦学性能, 结果表明, 具有组织化 TiNi 合金的摩擦系数可降至 0.1 以下, 在载荷 0.21 MPa、速度 0.25 m/s 的作用下, 低密度微凸表面使摩擦系数下降了 44.6%, 而高密度的凸起组织的抗磨效果最

好。董光能等^[43,49]在 CoCrMo 合金上通过激光加工的方法引入了不同形状的表面组织, 如三角形、正方形和圆形组织, 在模拟体液润滑条件下, 考察了表面接触角的稳定性, 评价了磨合期的长短, 研究表明组织化表面具有稳定的润湿性, 在不同组织形状中, 圆形组织表现出超稳定的润湿接触角。相较于其他组织图案, 圆形组织表面具有最短的磨合期和最小的摩擦系数。他们进一步地在 CoCrMo 合金表面通过飞秒激光干涉法加工出了具有层状结构的花瓣形组织^[44], 实验研究证明了花瓣形组织可以有效减小平均摩擦系数和启动摩擦力, 这克服了润滑剂在运行过程中损失的问题, 从而延长了润滑剂起作用的时间。在一定条件下, 通过更细微加工方法, 实现多级组织的储油和“二次润滑”增效作用, 从而调控摩擦副的润滑行为。

Nakano 等^[50]的研究表明, 沟槽型组织和网格状组织有着比平表面更高的摩擦系数, 而凹坑表面的摩擦系数较小。吕文斐等^[51]在摩擦副表面制备了点、槽和网格等组织, 在不同润滑状态下对摩擦学性能进行了考察, 研究结果表明, 网格状组织相对于点和槽形组织表现出更好的摩擦学性能。Manabu Wakuda 等人^[52]联用喷砂加工和激光加工的方法, 在陶瓷摩擦副表面制备出具有一定形状和尺寸的微凹坑, 结果表明, 在边界润滑和混合润滑状态下, 合适的表面微组织参数能够显著降低摩擦且提高耐磨性。杨本杰等^[53]在摩擦副表面加工了规则圆形凹坑和沟槽组织, 发现在液

体润滑工况下,圆形凹坑表面的摩擦系数明显低于单向沟槽表面。日本香川大学的 Yuji Ohue^[54]系统性地研究了五种类型的织构,根据 Reynolds 方程和 Hamrock and Dowson 公式,计算了不同织构类型的承载能力和油膜厚度,计算结果显示,凹坑状织构是具有最优润滑性能的织构图案,同时凹坑排布方式与运动方向或油液运动平行时将有助于表面的润滑。王晓雷等^[41]研究了动压润滑下圆形、三角形和椭圆形表面织构形状对承载能力的影响,结果表明,滑动方向垂直于三角形织构在其中一边或是椭圆形长轴时可获得最大的承载力,这与他们前期的试验研究结果一致^[55]。同时, Raeymackers 等人^[56]也报道了类似的结果。

熊菲^[57]根据无润滑的平面接触理论,模拟了不同间距、直径以及深度时织构化表面的等效应力。结果表明,凹坑在一定尺寸范围内,对 UHMWPE 表面的等效应力要大于其在不锈钢表面的等效应力。张博、王晓雷等^[58]通过实验方法,优化了 UHMWPE 面织构的深度以及面积率等参数,结果发现直径为 100 μm 、面积率为 23%、深度为 15 μm 的表面织构明显提高了 UHMWPE 的摩擦性能。董光能、李健等^[59]通过方形织构化处理 UHMWPE 表面后,并结合数值模拟温度场和实验研究生物摩擦学性能,结果表明,增加载荷和频率,试样磨损量增大。同时还发现表面织构的排布方式可改善表面温度的分布,随着摩擦时间的延长,织构化表面可以显著减缓热效应对 UHMWPE 黏弹性的影响,避免了 UHMWPE 力学性能的恶化。

Sawano^[60]通过水射流技术获得了深度为 0.25~4.4 μm 的凹坑,发现在凹坑深为 1 μm 时可以有效地降低磨损量。据证实,在金属表面制造微坑,配副的 UHMWPE 型人工关节寿命可望达到 33 年以上。类似地, Kustandi^[60]在摩擦副表面引入 1 μm 深的沟槽织构时,发现织构显著降低了摩擦系数和磨损量。与 UHMWPE 表面制造织构的方法相反,在 CoCr 合金股关节头放电蚀刻得到直径 0.5 mm、间距 1.2 mm、深度 0.1 mm 的凹坑,减小了聚乙烯人工髋关节的磨损量^[14]。这些成果显示织构化可以有效地延长 UHMWPE 髋白的寿命。郑显良等^[62-63]在考虑表面粗糙度影响的情况下,建立了织构化表面的流体润滑模型,仿真研究表明,当微凹坑织构化表面的深径比在 0.005~0.01 之间时,织构化表面的润滑性能较好,而微凹坑的直径和深度对摩擦学性能的影响不大。王晓雷等^[64-65]发现织构化可以降低陶瓷摩擦副的摩擦力矩,使承载能力得到提高,产生最大润滑膜承载力的微凹坑深径比为 0.001,相对应的面积率为 30%~50%。

以上研究主要集中在织构化参数的优化(如寻求合适的织构形状、尺寸、面积占有率及分布形式)以及织构化润滑的理论研究,不同学者评价了织构形状对摩擦学性能的影响,得到的结果也不尽相同,但圆

形凹坑织构由于制造的可行性是目前应用最多的织构类型。

表面织构化技术在改善摩擦副润滑性能等方面展现出了强大的优势,这必将极大地提高人工关节材料的耐磨性,为长寿命关节的抗磨设计提供了更多的可能性。

2.2 表面织构对生物相容性的改善

植人体成功与否取决于植人体与骨组织之间的界面相互作用。为促进生物材料上细胞的附着,需积极探讨表面规则形貌(织构)的作用,这就是所谓的接触引导^[66],也被称为形貌引导,具体表现是细胞的取向、定位进而成膜生长的过程,如图 5 所示。

Harrison^[68]运用蜘蛛网拓扑结构的表面考察了织构对细胞的运动行为、生理过程和功能的影响。随着表面织构技术的快速发展,关于织构尺度对细胞行为调控的研究由毫米级转向微米甚至纳米级别。另外,织构对细胞生长行为的调控也由单一细胞转向多个细胞甚至多种细胞。在生物材料表面接触引导生成细胞膜或组织,对于构建具有高度取向的细胞群存在应用价值,如神经、肌腱的修复和再生,骨组织正常形态的发生等方面。此外,接触引导可调节生物材料和细胞及组织之间的相互作用,实现细胞特定生理功能的响应,其在组织工程的应用引起了越来越多学者的关注。

Whitesides 等^[69]评价了几何尺寸对细胞凋亡的影响,发现当细胞的可粘附面积受到限制时,细胞活动会产生影响,如发生凋亡。Chen 等^[70]发现干细胞在较大接触面积的基材上倾向于向成骨分化,而在较小接触面积的基材上倾向于向成脂分化。成软骨分化和向平滑肌分化上也观察到类似现象^[71]。骨植入物的成功整合离不开植入物表面与周围骨组织间的相互作用。关于钛合金植人体,已经证实成骨细胞的细胞膜与 Ti 氧化物表面之间的接触分两步建立:首先,成骨细胞的细胞膜可能由于静电而形成非特异性接触(起源于带负电的表面和带正电的蛋白质之间的库仑相互作用);然后,进行特异性结合。Kabaso 等^[72]发现成骨细胞样细胞与 Ti 表面植入物的粘附是通过与细胞外基质和细胞内基质相互作用而驱动的动态过程。一方面,伴随着成骨细胞与 Ti 表面的结合,植人体材料表面的自由能减少;另一方面,接触区域的强烈相互作用可以捕获膜并增加局部侧膜张力,从而导致细胞膜自由能的增加。研究还发现,膜结合蛋白复合物(PC)增加了成骨细胞和钛(Ti)表面上的凹槽纹理之间的膜突起生长,从而促进了成骨细胞对 Ti 表面的粘附。以上结果表明,通过织构化处理可以明显改善细胞与基底的相互作用。

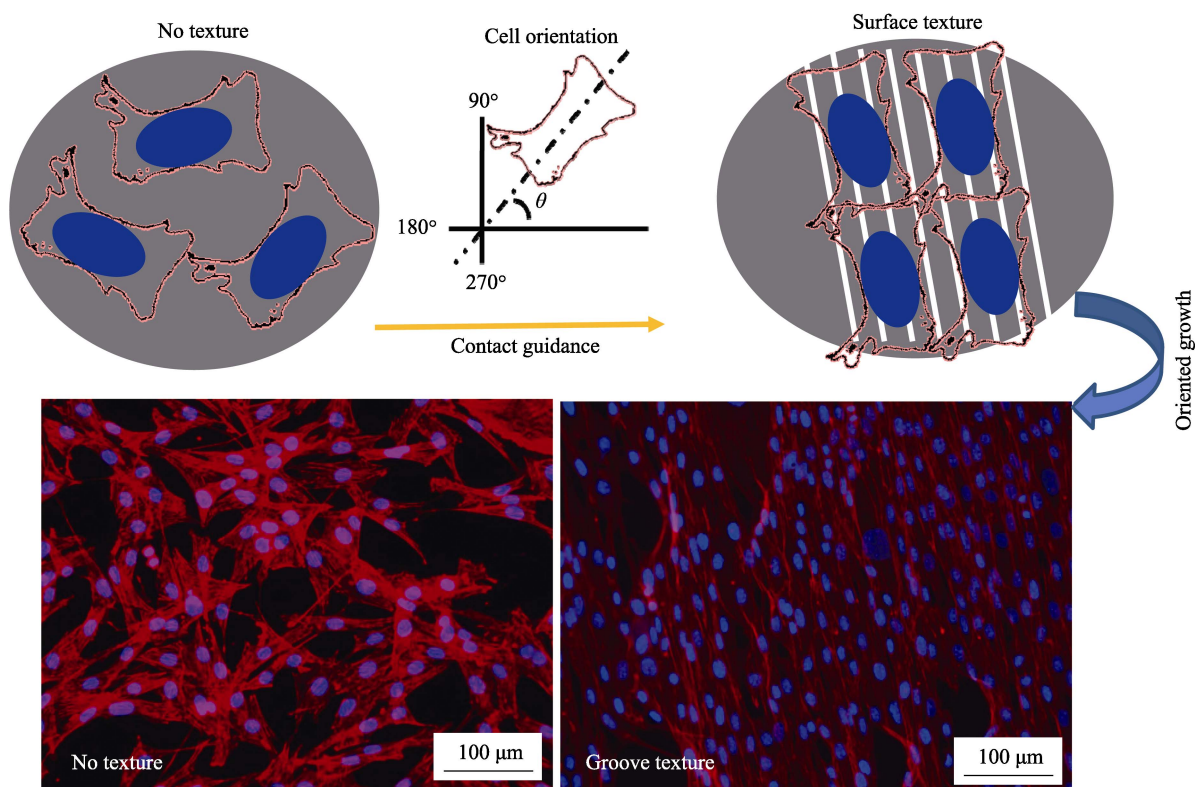


图 5 表面织构对细胞的引导生长作用^[67]
Fig.5 Effect of surface texture on cell contact guidance^[67]

不同的织构形状产生的生物学相互作用也不尽相同。秦立果等^[45]采用织构化 CoCrMo 合金与 MC3T3-E1 成骨细胞共培养的方法, 考察 MC3T3-E1 成骨细胞在织构化表面的生长状态, 通过评估成骨细胞的形态、粘附、增殖及分化能力, 探讨织构化表面对成骨细胞生物学行为的影响。通过织构化技术在生物医用 CoCrMo 合金构造微环境, 极大地改善了其生物相容性。Karp 等^[73]评价了玻璃和聚合物支架上不同织构类型对骨细胞的影响, 发现 5 d 后骨细胞在织构化区域增殖明显, 并且快速磷化和矿化, 68~99 μm 宽的沟槽织构显示出明显的心肌钙表达, 即沟槽织构对于组织生长是有利的。

Vernon^[74]认为当沟槽深度小于 1 μm 时不利于细胞取向, 而沟槽深度提高到 2 μm 以上时则出现了积极的作用。大多数学者认为大于 10 μm 的微粗糙表面会影响种植体与组织界面的应力分布和传递方式, 并且会影响其生物相容性^[75]。10 nm~10 μm 范围内的表面微粗糙度对界面的机械特性影响较弱^[76], 而这样的尺寸范围与细胞及生物大分子的尺寸范围相当, 可以显著影响生物相容性。

Chen 等^[77]在钛合金表面采用激光织构化技术制备了纵向和横向沟槽 (间隔 20 μm , 宽 12 μm , 深 10 μm), 结果显示, 细胞在横向沟槽上比在纵向沟槽上更易于附着。Charest 等人^[78]发现, 在深度为 5.1 μm 时, 原代成肌细胞“接触引导”的发生程度随聚碳酸酯沟槽脊宽的增大而下降, 这与其他学者发现在一定

范围内细胞发生接触引导的程度与脊宽度呈反比的报道相一致^[79]。嵇伟平等^[80]发现纳米多孔织构化表面促进了成骨的贴壁性能, 利于早期融合, 由此提出了人工关节等植入器械领域的新方向 (织构化骨融合)。

以上关于细胞在织构表面的生长仅限于生物学范畴, 已有的研究成果对改良早期骨整合、降低假体松动均具有参考价值, 但想从根本上解决外科植入的长效性难题, 实现生物材料与机体组织的生物相容性仍面临巨大挑战。织构起着增强润滑及促进与生物分子、细胞相容的双重功能, 这二重功能作用的尺度并不兼容。如何相互匹配、发挥协同作用, 关系到织构设计的原则, 对其探讨仍有待深化研究。

3 总结与展望

人工关节材料在生物相容性、生物摩擦学性能、抗腐蚀及耐疲劳性能、制备工艺和服役寿命等方面有着非常严格的要求。随着表面织构化技术的发展, 将其应用到人工关节上有着巨大的前景。然而以下几个方面仍面临着重大的挑战:

(1) 如何深入研究织构设计的设计准则及织构的制备工艺, 以快速、精确获得更加丰富的表面织构, 为开发长寿命人工关节提供更多的可能性。

(2) 需针对成人的关节活动特征, 设计制造模拟其动力学服役条件的原型装置, 来真实模拟人体运动状态 (跑步、骤停、登高、跳远等) 及关节润滑状态,

以此评价人工关节的摩擦学性能。

(3) 对材料生物活性功能表界面的构建, 探讨材料基体与机体组织的生物力学, 尤其是耦合了复杂的人体服役工况的条件下, 表面织构技术面临新的挑战。

(4) 关节滑液是关节低摩擦和磨损的关键因素之一, 开发高效的仿生滑液是未来人工关节发展的必经之路。

(5) 向自然界学习, 探究是否能够通过表面织构接触引导细胞或是组织生长实现人体关节功能的重建, 使之具备在服役条件下磨损界面自修复的特点。

参考文献:

- [1] SKINNER J, KAY P. Commentary: Metal on metal hips[J]. BMJ british medical journal, 2011, 342(7807): 1123-1123.
- [2] 葛世荣, 王成焘. 人体生物摩擦学的研究现状与展望[J]. 摩擦学学报, 2005, 25(2): 186-191.
GE Shi-rong, WANG Cheng-tao. State-of-the-art and prospect of biotribology in human body[J]. Tribology, 2005, 25(2): 186-191.
- [3] 刘亚军, 池迎春. 国产人工关节产品新进展[J]. 中国医疗设备, 2015, 30(10): 18-19.
LIU Ya-jun, CHI Ying-chun. New progress in domestic artificial joint products[J]. Chinese medical devices, 2015, 30(10): 18-19.
- [4] 李建. 纳米羟基磷灰石及其生物复合材料的研究[D]. 天津: 天津大学, 2005.
LI Jian. Research on nano-hydroxyapatite and its biocomposites[D]. Tianjin: Tianjin University, 2005.
- [5] 刘剑敏. 氧化锆制备及氧化锆和 Co-Cr-Mo 合金烧结行为研究[D]. 长沙: 中南大学, 2014.
LIU Jian-min. The preparation of ZrO₂ and Co-Cr-Mo alloy/ZrO₂ sintering behavior research[D]. Changsha: Central South University, 2014.
- [6] 马立峰, 郭艾. 金属对金属膝关节表面置换术的研究进展[J]. 中华损伤与修复杂志(电子版), 2014, 9(5): 537-540.
MA Li-feng, GUO Ai. Progress in metal-on-metal hip arthroplasty[J]. Chinese journal of injury repair and wound healing (Electronic edition), 2014, 9(5): 537-540.
- [7] 孟昭琴. 人工关节材料的仿生性能及临床应用[J]. 中国组织工程研究与临床康复, 2010, 14(22): 4101-4104.
MENG Zhao-qin. Bionics of artificial joint materials and the clinical application[J]. Journal of clinical rehabilitative tissue engineering research, 2010, 14(22): 4101-4014.
- [8] 祝云利, 吴海山. 陶瓷材料在人工关节置换术中的应用现状[J]. 国际骨科学杂志, 2009, 30(2): 70-73.
ZHU Yun-li, WU Hai-shan. Application of ceramic materials in artificial joint replacement[J]. International journal of orthopedics, 2009, 30(2): 70-73.
- [9] 戴振东, 弓娟琴. 人工关节摩擦学的研究[J]. 生物医学工程学杂志, 2006, 23(3): 669-673.
DAI Zhen-dong, GONG Juan-qin. The development of research in tribology of artificial joints[J]. Journal of biomedical engineering, 2006, 23(3): 669-673.
- [10] 王成焘. 人体生物摩擦学[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 69-73.
WANG Cheng-tao. Human biotribology[J]. Beijing: Science Press, 2008: 69-73.
- [11] TIPPER J, INGHAM E, HAILEY J, et al. Quantitative analysis of polyethylene wear debris, wear rate and head damage in retrieved charnley hip prostheses[J]. Journal of materials science: Materials in medicine, 2000, 11: 117-124.
- [12] ELFICK A P, HALL R M, PINDER I M, et al. Wear in retrieved acetabular components: effect of femoral head radius and patient parameters[J]. The journal of arthroplasty, 1998, 13: 291-295.
- [13] DPWSON D, JIN Z. Metal-on-metal hip joint tribology[J]. Journal of engineering in medicine, 2006, 220: 107-118.
- [14] 王成焘. 天然与人工关节中的摩擦学问题[J]. 医用生物力学, 2009, 24(5): 317-325.
WANG Cheng-tao. Tribology problems in natural and artificial joint[J]. Journal of medical biomechanics, 2009, 24(5): 317-325.
- [15] 葛世荣, 王庆良. 人工关节改性材料的生物摩擦学研究[J]. 医用生物力学, 2009, 24(5): 326-342.
GE Shi-rong, WANG Qing-liang. Investigation on the biotribology of the modified artificial joint materials[J]. Journal of medical biomechanics, 2009, 24(5): 326-342.
- [16] ROGERS S, HOWIE D, GRAVES S, et al. In-vitro human monocyte response to wear particles of titanium alloy containing vanadium or niobium[J]. Journal of bone & joint surgery-british volume, 1997, 79: 311-315.
- [17] 苗惊雷. 多孔钽铌合金的制备与生物相容性研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013.
MIAO Jing-lei. Fabrication and biocompatibility evaluation of a novel porous tantalum-niobium alloy[D]. Changsha: Central South University, 2013.
- [18] FISHER J, DOWSON D. Tribology of total artificial joints[J]. Journal of engineering in medicine, 1991, 205(2): 73-79.
- [19] 陈烜, 戴建平, 刘金龙, 等. 人工关节材料及其改性研究[J]. 淮阴工学院学报, 2010, 19(5): 10-14.
CHEN Yu, DAI Jian-ping, LIU Jin-long, et al. The materials and modification of artificial joint[J]. Journal of Huaiyin Institute of Technology, 2010, 19(5): 10-14.
- [20] PARK W W, KIM E K, JEON J H, et al. Wear of

- UHMWPE against nitrogen-ion-implanted and NbN-coated Co-Cr-Mo alloy formed by plasma immersion ion implantation and deposition for artificial joints[J]. *Applied surface science*, 2012, 258: 8228-8233.
- [21] GAN J, BERNDT C. Plasma surface modification of metallic biomaterials[J]. *Surface coating and modification of metallic biomaterials*, 2015, 301: 103-157.
- [22] CHOI K S. Turbulent drag-reduction mechanisms: strategies for turbulence management[M]. Berlin: Springer, 2001.
- [23] 赵文杰, 王立平, 薛群基. 织构化提高表面摩擦学性能的研究进展[J]. *摩擦学学报*, 2011(6): 622-631.
ZHAO Wen-jie, WANG Li-ping, XUE Qun-ji. Development and research progress of surface texturing on improving tribological performance of surface [J]. *Tribology*, 2011(6): 622-631.
- [24] 纪敬虎, 符永宏, 魏龙, 等. 激光表面织构机械密封润滑特性的试验研究[J]. *排灌机械工程学报*, 2011, 29(5): 427-431.
JI Jing-hu, FU Yong-hong, WEI Long, et al. Experiment research on lubrication properties of laser surface texturing mechanical seal[J]. *Journal of drainage and irrigation machinery engineering*, 2011, 29(5): 427-431.
- [25] 刘一静, 袁明超, 王晓雷. 表面织构对发动机活塞/缸套摩擦性能的影响[J]. *中国矿业大学学报*, 2009(6): 866-871.
LIU Yi-jing, YUAN Ming-chao, WANG Xiao-lei. Influence of the surface texture on the tribological performances of piston skirt/liner[J]. *Journal of china university of mining & technology*, 2009(6): 866-871.
- [26] 马晨波, 朱华, 历建全. 摩擦副不同表面织构化的润滑减摩性能试验研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2010(2): 244-248.
MA Chen-bo, ZHU Hua, LI Jian-quan. Experimental study of tribological properties of texture on different surfaces of friction pairs[J]. *Journal of china university of mining & technology*, 2010(2): 244-248.
- [27] 马晨波, 朱华, 张文谦, 等. 往复条件下织构表面的摩擦学性能研究[J]. *摩擦学学报*, 2011(1): 50-55.
MA Chen-bo, ZUA Hua, ZHANG Wen-qian, et al. Tribological property of textured surface under reciprocating motion [J]. *Tribology*, 2011(1): 50-55.
- [28] 于海武, 袁思欢, 孙造, 等. 微凹坑形状对试件表面摩擦特性的影响[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2011(1): 106-123.
YU Hai-wu, YUAN Si-huan, SUN Zao, et al. Effect of micro-dimple shapes on tribological properties of specimen surfaces[J]. *Journal of South China University of Technology(Natural science edition)*, 2011(1): 106-123.
- [29] JAGGESSAR A, SHAHALI H, MATHEW A, et al. Bio-mimicking nano and micro-structured surface fabrication for antibacterial properties in medical implants[J]. *Nanobiotechnol*, 2017, 15(1): 64.
- [30] HAMILTON D, WALOWIT J, ALLEN C. A theory of lubrication by microirregularities[J]. *Journal of fluids engineering*, 1966, 88: 177-185.
- [31] KORTIKAR S, STEPHENS L, HADINATA P. Manufacturing of micro asperities on thrust surfaces using ultraviolet photolithography[J]. *Proc ASPE*, 2003, 28: 148-153.
- [32] ZHAO W, YU Z. Self-cleaning effect in high quality percussion ablating of cooling hole by picosecond ultra-short pulse laser[J]. *Optics & lasers in engineering*, 2018, 105: 125-131.
- [33] LIU Bin, JIANG Ge-dong, WANG Wen-jun, et al. Porous microstructures induced by picosecond laser scanning irradiation on stainless steel surface[J]. *Optics and lasers in engineering*, 2016, 78: 55-63.
- [34] LIU Bin, WANG Wen-jun, JIANG Ge-dong, et al. Formation of porous structure with subspots size under the irradiation of picosecond laser pulses[J]. *Journal of nanomaterials*, 2013(2): 11.
- [35] MITCHELL S J, CLARE A T. Electro Chemical jet machining of titanium: Overcoming passivation layers with ultrasonic assistance[J]. *Procedia CIRP*, 2016, 42: 379-383.
- [36] WAHL R, SCHNEIDER J, GUMBSCH P. Influence of the real geometry of the protrusions in micro textured surfaces on frictional behaviour[J]. *Tribol lett*, 2012, 47: 447-453.
- [37] WAKUDA M, YAMAUCHI Y, KANZAKI S, et al. Effect of surface texturing on friction reduction between ceramic and steel materials under lubricated sliding contact[J]. *Wear*, 2003, 254(3-4): 356-363.
- [38] PETERSSON U, JACOBSON S. Friction and wear properties of micro textured DLC coated surfaces in boundary lubricated sliding[J]. *Tribol lett*, 2004, 17: 553-559.
- [39] KORTIKAR S N, STEPHENS L S, HADINATA P C, et al. Manufacturing of microasperities on thrust surfaces using ultraviolet photolithography[C]//*Proceedings of ASPE Winter Topical Meeting*. Raleigh: NC, 2003: 148-154.
- [40] MENG F, DAVIS T, CAO J, et al. Study on effect of dimples on friction of parallel surfaces under different sliding conditions[J]. *Applied surface science*, 2010, 256: 2863-2875.
- [41] YU H, WANG X, ZHOU F. Geometric shape effects of surface texture on the generation of hydrodynamic pressure between conformal contacting surfaces[J]. *Tribol lett*, 2010, 37: 123-130.
- [42] SUH N P, MOSLEL M, HOWARD P S. Control of friction[J]. *Wear*, 1994, 175: 151-158.
- [43] QIN L, LIN P, ZHANG Y, et al. Influence of surface wet-

- tability on the tribological properties of laser textured Co-Cr-Mo alloy in aqueous bovine serum albumin solution[J]. *Applied surface science*, 2013, 268: 79-86.
- [44] ZHANG H, QIN L G, HUA M, et al. A tribological study of the petaloid surface texturing for Co-Cr-Mo alloy artificial joints[J]. *Applied surface science*, 2015, 332: 557-564.
- [45] QIN L, ZENG Q, WANG W, et al. Response of MC3T3-E1 osteoblast cells to the microenvironment produced on Co-Cr-Mo alloy using laser surface texturing[J]. *J mater sci*, 2014, 49: 2662-2671.
- [46] 董光能, 张俊锋, 杨华斌, 等. 激光微凸化超弹 TiNi 合金表面摩擦学性能[J]. *稀有金属材料与工程*, 2008, 37(3): 444-447.
DONG Guang-neng, ZHANG Jun-feng, YANG Hua-bin, et al. Study on tribological properties of pseudoelastic Ti-Ni alloys with laser surface micro-convexes[J]. *Rare metal materials and engineering*, 2008, 37(3): 444-447.
- [47] 董光能, 张宇军, 毛军红, 等. 超低摩擦的理论与实践[J]. *材料保护*, 2008(4): 44-49.
DONG Guang-neng, ZHANG Yu-jun, MAO Jun-hong, et al. Theory and practice of super-low friction [J]. *Material protection*, 2008(4): 44-49.
- [48] 董光能, 张俊锋, 张东亚, 等. 超弹性 TiNi 合金表面模压微坑织构的摩擦学性能研究(英文)[J]. *稀有金属材料与工程*, 2011(3): 1334-1338.
DONG Guang-neng, ZHANG Jun-feng, ZHANG Dong-ya, et al. Tribological performances of molded micro-cratered surface of superelasticity TiNi alloy(In english)[J]. *Rare metal materials and engineering*, 2011(3): 1334-1338.
- [49] GUO J, LI Y, LU H, et al. An effective method of edge deburring for laser surface texturing of Co-Cr-Mo alloy[J]. *The international journal of advanced manufacturing technology*, 2018, 94: 1491-1503.
- [50] NAKANO M, KORENAGA A, KORENAGA A, et al. Applying micro-texture to cast iron surfaces to reduce the friction coefficient under lubricated conditions[J]. *Tribology letters*, 2007, 28: 131-137.
- [51] 吕文斐, 方亮. 润滑条件下激光加工纹理的摩擦磨损[J]. *摩擦学学报*, 2009(2): 1-4.
LV Wen-fei, FANG Liang. Tribological properties of steel surface textured by laser under lubrication [J]. *Tribology*, 2009(2): 1-4.
- [52] WAKUDA M, YAMAUCHI Y, KANZAKI S, et al. Effect of surface texturing on friction reduction between ceramic and steel materials under lubricated sliding contact[J]. *Wear*, 2003, 254: 356-363.
- [53] 杨本杰, 刘小君, 董磊, 等. 表面形貌对滑动接触界面摩擦行为的影响[J]. *摩擦学学报*, 2014(5): 553-560.
YANG Ben-jie, LIU Xiao-jun, DONG Lei, et al. Effect of surface topography on the interface tribological behavior of sliding contact[J]. *Tribology*, 2014(5): 553-560.
- [54] OHUE Y, TANAKA H. Effect of surface texturing on lubricating condition under point contact using numerical analysis[J]. *Engineering*, 2013, 5(4): 379.
- [55] WANG X L, HSU S M. An integrated surface technology for friction control: A new paradigm effects of geometric shapes on friction[C]//The 4th China international symposium on tribology. Xi'an: [s. n.], 2004: 12-20.
- [56] QIU M, DELIC A, RAEYMAEKERS B. The effect of texture shape on the load-carrying capacity of gas-lubricated parallel slider bearings[J]. *Tribol lett*, 2012, 48: 315-27.
- [57] 熊菲. 基于不同表面纹理的 UHMWPE 磨损仿真研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2006.
XIONG Fei. UHMWPE wear simulation study based on different surface textures[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2006.
- [58] 张博, 王晓雷, 马国亮, 等. 利用表面织构改善超高分子量聚乙烯(UHMWPE)摩擦性能的研究[J]. *摩擦学学报*, 2009(5): 80-85.
ZHANG Bo, WANG Xiao-lei, MA Guo-liang, et al. Study on the improvement of the frictional properties of UHMWPE using surface texture [J]. *Tribology*, 2009(5): 80-85.
- [59] DONG G N, HUA M, LI J, et al. Temperature field and wear prediction for UHMWPE acetabular cup with assumed rectangular surface texture[J]. *Materials & design*, 2007, 28: 2402-2416.
- [60] SAWANO H, WARISAWA S, ISHIHARA S. Study on long life of artificial joints by investigating optimal sliding surface geometry for improvement in wear resistance[J]. *Precision engineering*, 2009, 33: 492-498.
- [61] KUSTANDI T S, CHOO J H, LOW H Y, et al. Texturing of UHMWPE surface via NIL for low friction and wear properties[J]. *Journal of physics D: Applied physics*, 2010, 43: 015301.
- [62] 马晨波, 朱华, 历建全. 摩擦副不同表面织构化的润滑减摩性能试验研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2010, 39(4): 244-248.
MA Chen-bo, ZHU Hua, LI Jian-quan. Experimental study of tribological properties of texture on different surfaces of friction pairs [J]. *Journal of china university of mining & technology*, 2010, 39(4): 244-248.
- [63] 郑显良. 表面织构化活塞环的摩擦学性能研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2010.
ZHENG Xian-liang. Study on tribological properties of surface texturing piston rings[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2010.
- [64] WANG X, KATO K. Improving the anti-seizure ability of SiC seal in water with RIE texturing[J]. *Tribology letters*, 2003, 14: 275-280.

- [65] 王晓雷, 韩文非. 碳化硅陶瓷的水润滑特性及其表面微细结构的优化设计[J]. 中国机械工程, 2008(1): 457-460.
- WANG Xiao-lei, HAN Wen-fei. Surface texture optimal design for silicon carbide under water lubrication[J]. China mechanical engineering, 2008(1): 457-460.
- [66] KIM D H, LIPKE E A, KIM P, et al. Nanoscale cues regulate the structure and function of macroscopic cardiac tissue constructs[J]. Proceedings of the national academy of sciences, 2010, 107: 565-570.
- [67] QIN L, WU H, GUO J, et al. Fabricating hierarchical micro and nano structures on implantable Co-Cr-Mo alloy for tissue engineering by one-step laser ablation[J]. Colloids and surfaces B: Biointerfaces, 2018, 161: 628-635.
- [68] HARRISON R G. The cultivation of tissues in extraneous media as a method of morpho-genetic study[J]. The anatomical record, 1912, 6: 181-193.
- [69] CHEN C S, MRKSICH M, HUANG S, et al. Geometric control of cell life and death[J]. Science, 1997, 276: 1425-1428.
- [70] MCBEATH R, PIRONE D M, NELSON C M, et al. Cell shape, cytoskeletal tension, and RhoA regulate stem cell lineage commitment[J]. Developmental cell, 2004, 6: 483-495.
- [71] GAO L, MCBEATH R, CHEN C S. Stem cell shape regulates a chondrogenic versus myogenic fate through Rac1 and N-Cadherin[J]. Stem cells, 2010, 28: 564-572.
- [72] KABASO D, GONGADZE E, PERUTKOVA Š, et al. Mechanics and electrostatics of the interactions between osteoblasts and titanium surface[J]. Computer methods in biomechanics and biomedical engineering, 2011, 14: 469-482.
- [73] KARP J M, YEO Y, GENG W, et al. A photolithographic method to create cellular micropatterns[J]. Biomaterials, 2006, 27: 4755-4764.
- [74] VERNON R B, GOODEN M D, LARA S L, et al. Micro-grooved fibrillar collagen membranes as scaffolds for cell support and alignment[J]. Biomaterials, 2005, 26: 3131-3140.
- [75] SUWAIDI J A, BERGER P B, JR D R H. Coronary artery stents[J]. Postgraduate medical journal, 2000, 284(14): 1828-1836.
- [76] ZHOU F, YUAN L, HUANG H, et al. Phenomenon of “contact guidance” on the surface with nano-micro-groove-like pattern and cell physiological effects[J]. Chinese science bulletin, 2009, 54: 3200-3205.
- [77] CHEN J, ULERICH J, ABELEV E, et al. An investigation of the initial attachment and orientation of osteoblast-like cells on laser grooved Ti-6Al-4V surfaces[J]. Materials science and engineering: C, 2009, 29: 1442-1452.
- [78] CHAREST J L, GARCIA A J, KING W P. Myoblast alignment and differentiation on cell culture substrates with microscale topography and model chemistries[J]. Biomaterials, 2007, 28: 2202-2210.
- [79] CLARK P, CONNOLLY P, CURITS A, et al. Topographical control of cell behaviour: II multiple grooved substrata[J]. Development, 1990, 108: 635-644.
- [80] 嵇伟平, 韩培, 赵常利, 等. 钛合金表面纳米结构对成骨细胞黏附的促进作用[J]. 科学通报, 2008, 53(1): 83-88.
- JI Wei-ping, HAN Pei, ZHAO Chang-li, et al. Promotion of nanostructure on osteoblast adhesion on titanium alloy surface[J]. Science bulletin, 2008, 53(1): 83-88.