

基于 MATLAB 分析不同形貌对 金属表面润湿性能的影响

鲁畅^{a,b}, 但斌斌^{a,b}, 付婷^{a,b}, 容芷君^{a,b}, 朱珣灯^a, 李宽^a, 刘凯^a

(武汉科技大学 a.机械传动与制造工程湖北省重点实验室

b.装备及其控制教育部重点实验室, 武汉 430081)

摘要: **目的** 研究不同形貌的微结构表面对金属表面润湿性能的影响。**方法** 首先在金属材料表面建立一级与二级微结构模型, 然后整理得出不同微结构模型评定参数的公式, 最后利用 Matlab 对不同形貌表面相关公式进行模拟计算, 绘制得到不同形貌表面润湿特性三维曲线。**结果** 一级微结构中, 球形微结构模型表面表观接触角 θ 皆为定值, 即完全润湿 $\theta_c=74.443^\circ$, 不完全润湿 $\theta_w=131.720^\circ$ 。其余微结构模型利用 Matlab 模拟计算, 均可以得到光滑的三维曲线, 其中在铜基表面设计制备三维方柱阵列微结构, 可获得超疏水特性。二级微结构中, 比较完全润湿状态, 不完全润湿状态粗糙因子 f 远小于 Y 。在不完全润湿状态中, 粗糙因子 f 趋近于 0, 与完全润湿状态模拟的表观接触角结果相比, 不完全润湿状态下, 采用三维阵列微结构研究金属表面微结构对表观接触角的影响最为合适。**结论** 模拟条件相同的情况下, 改变金属表面微观形貌会引起润湿性能的改变。金属表面润湿性能与表面微细结构以及微结构参数均存在映射关系, 但是表面微结构的维度并非越高越好, 一级微结构同样也可以得到所需疏水性能。在外在影响因素相同的条件下, 若要研究分析金属表面微结构参数的改变对表观接触角的影响, 采用三维阵列微结构最为合适。

关键词: 微观形貌; Matlab; 完全润湿表面; 不完全润湿表面; 表面粗糙度; 表观接触角

中图分类号: O647.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2019)08-0068-09

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.08.010

Analysis of Influence of Different Morphologies on Wettability of Metal Surfaces Based on MATLAB

LU Chang^{a,b}, DAN Bin-bin^{a,b}, FU Ting^{a,b}, RONG Zhi-jun^{a,b}, ZHU Yu-deng^a, LI Kuan^a, LIU Kai^a

(a.Hubei Key Laboratory of Mechanical Transmission and Manufacturing Engineering, b.Key Laboratory of Metallurgical Equipment and Control Technology, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China)

ABSTRACT: The work aims to study the effects of microstructure surface with different morphologies on the wettability of metal surface. Firstly, the first-level and second-level microstructure models were established on the surface of metal materials, and then the formulas for evaluating parameters of different structure models were worked out. Finally, the relevant formulas of

收稿日期: 2018-10-28; 修订日期: 2019-04-23

Received: 2018-10-28; Revised: 2019-04-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51605345, 51475340); 湖北省高价值专利培育、转化和产业化项目 (201801060A)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (51605345, 51475340) and Hubei High-value Patent Cultivation, Transformation and Industrialization Project (201801060A)

作者简介: 鲁畅 (1993—), 男, 硕士生, 主要研究方向为金属表面微纳加工、微纳传热传质。

Biography: LU Chang (1993—), Male, Master, Research focus: micro-nano processing on metal surface, micro-nano heat and mass transfer.

通讯作者: 但斌斌 (1970—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为冶金机械、现代制造。邮箱: danbinbin@163.com

Corresponding author: DAN Bin-bin (1970—), Male, Doctor, Professor, Research focus: metallurgical machinery, modern manufacturing. E-mail: danbinbin@163.com

different morphologies were simulated by Matlab to draw 3D curves of surface wetting characteristics of different morphologies. In first-level microstructure, the apparent contact angle θ on spherical structure was constant, $\theta_c=74.443^\circ$ in complete wetting state and $\theta_w=131.720^\circ$ in incomplete wetting state. For remaining microstructure models, smooth three-dimensional curves could be obtained by Matlab simulation. The three-dimensional square-column array microstructure could be designed and fabricated on the copper-based surface to obtain super-hydrophobic characteristics. In secondary microstructure, compared with relatively complete wetting state, incomplete wetting roughness factor f was far less than Y completely. The roughness factor f was almost close to zero in the incomplete wetting state. Compared with the apparent contact angle results simulated by the complete wetting state, the three-dimensional array microstructure was most suitable for studying the effect of the metal surface microstructure on the apparent contact angle. Changing the microscopic morphology of the metal surface causes a change in the wetting property under the same simulation conditions. The wetting property of the metal surface has a mapping relationship with the surface microstructure and microstructure parameters, but the dimension of the surface microstructure is not as high as possible, and the first-level microstructure can also obtain the desired hydrophobic properties. When the external factors are the same, if the influence of the change of the microstructure parameters on the surface of the metal on the apparent contact angle is required to be studied, the effect of the three-dimensional array microstructure is the most suitable.

KEY WORDS: surface micro-topography; Matlab; completely wetted surface; incomplete wetted surface; surface roughness; apparent contact angle

润湿性是指液体在固体表面铺展的能力,是固体表面的重要特征之一^[1]。随着时代的发展,表面科学领域技术的不断进步,在各类行业对特殊表面性能材料的需求越来越多样化的背景下,文中在金属材料表面建立了一级及二级粗糙微结构模型,提出了一种利用 Matlab 对形貌表面粗糙度评定参数进行计算,分析不同形貌对其表面润湿性能影响的方法。

自 1805 年以来,关于固体表面润湿性的理论与实验研究,各国研究者一直难以得到明显的进展。直到 Wenzel 和 Cassie 发表了诸多关于表面润湿性的文章,大量的理论、研究成果被不断提出,人们对润湿性可控表面的研究具有里程碑的意义^[2]。R. H. Dettre^[3]等和 P. G. De Gennes^[4]先后于 1964 年和 1985 年对固体表面的润湿性在理论上进行了补充和完善,为后续推导出在固体表面可产生自洁效应条件的结论提供了理论基础。紧接着 S. Tephon Herminghaus^[5]和 Alexander Otten^[6]在研究自然界植物叶子表面润湿性能的过程中,发现植物叶子微观结构表面是一种具有多种微观尺度的表面。直到 2004 年, Neelesh A. Patanka^[7]提出了双重(或多重)表面几何微结构,从几何角度上对双重粗糙微结构超疏水表面润湿性进行了理论分析和计算,获得粗糙微结构表面的科学几何参数。

以美国科学家 Nosonovsky 为首的研究者认为,超疏水效应不只是一种由宏观效应引起的现象,而是由微观效应、微米效应、分子效应等所产生的多尺度效应^[8]。有研究者模拟出了二维和三维微纳米微结构模型,对此研究分析得出微纳米微结构表面的凸起与凹槽部分能够有效地固定液滴,从而阻止各种因温度等引起的扰动,超疏水表面的稳定性由此获得^[9]。其理论成果为该论文研究不同形貌以及不同润湿性对

超疏水性能的影响提供了必要的理论依据。

近年来,亲水与疏水表面虽已被广泛应用于日常生活和工农业方面,但关于亲水与疏水表面的实际应用距离实现产业化还有很长一段路要走^[10]。从理论分析角度考虑微观形貌与金属表面润湿性的研究还不够完善,许多问题还有待解决。

固体表面润湿性能与其表面微细结构以及微结构参数均存在映射关系,微观形貌的选取以及微结构参数的最优取值组合也是今后金属表面润湿性能研究的重要方面。然而现有的研究中,利用 Matlab 软件图像处理功能分析金属表面润湿性能较少^[11-12]。Matlab 有丰富的数值运算函数能力,在同类型编辑计算软件中,使用 Matlab 的编程不仅使工作量大大减少,而且其操作更为简单,能快速精确地得出结果。因此文中提出了利用 Matlab 模拟分析不同形貌对金属表面润湿性能影响的一种方法。

1 数值模拟方法

文中基于 Matlab 模拟计算的是二维和三维状态下不同形貌对金属表面润湿性能的影响,在模拟过程中,本征接触角为常数,即 $\theta_\gamma=78^\circ$ 。在恒温、恒压平衡状态下,1936 年 Wenzel 在 Young 方程的基础上提出 Wenzel(湿接触)模型方程^[13]:

$$\cos \theta_c = \gamma \cos \theta_\gamma \quad (1)$$

式中: θ_c 为 Wenzel 模型中的表观接触角,称为 Wenzel 接触角; θ_γ 为本征接触角, γ 为完全润湿表面的粗糙度因子。

当固体表面为复合润湿表面时, Wenzel 方程是不适用的。Cassie 和 Baxter^[14]建立了一种新模型——

Cassie (复合接触) 模型, 以描述液滴在复合固体表面的润湿状态, 即不完全润湿状态。在恒温、恒压平衡状态下, Cassie 在 Wenzel 方程的基础上得到如下方程:

$$\cos \theta_w = f \cos \theta_s + f - 1 \quad (2)$$

式中: θ_s 为本征接触角; f 为不完全润湿表面的粗糙因子^[12]。

基于现有金属材料表面的微/纳阶级结构, 为便于分析不同润湿机制, 本文设计了具有规范化的两种阶级的金属微结构表面^[15]。在固体表面模拟一种大

方柱微米级微结构, 即一级微结构; 而后其上以同样的比例关系设计小方柱纳米二级微结构, 即为二级微结构^[16]。

受蝉翼和硅片表面一级柱形微结构形貌的启发, 对不同微结构表面, 本文分别设计了二维平行光栅微结构模型、三维圆形凹槽微结构模型、三维方柱阵列微结构模型以及球形微结构模型, 模拟不同形貌的金属表面, 讨论不同形貌表面与表面润湿性能的关系, 如图 1 所示。

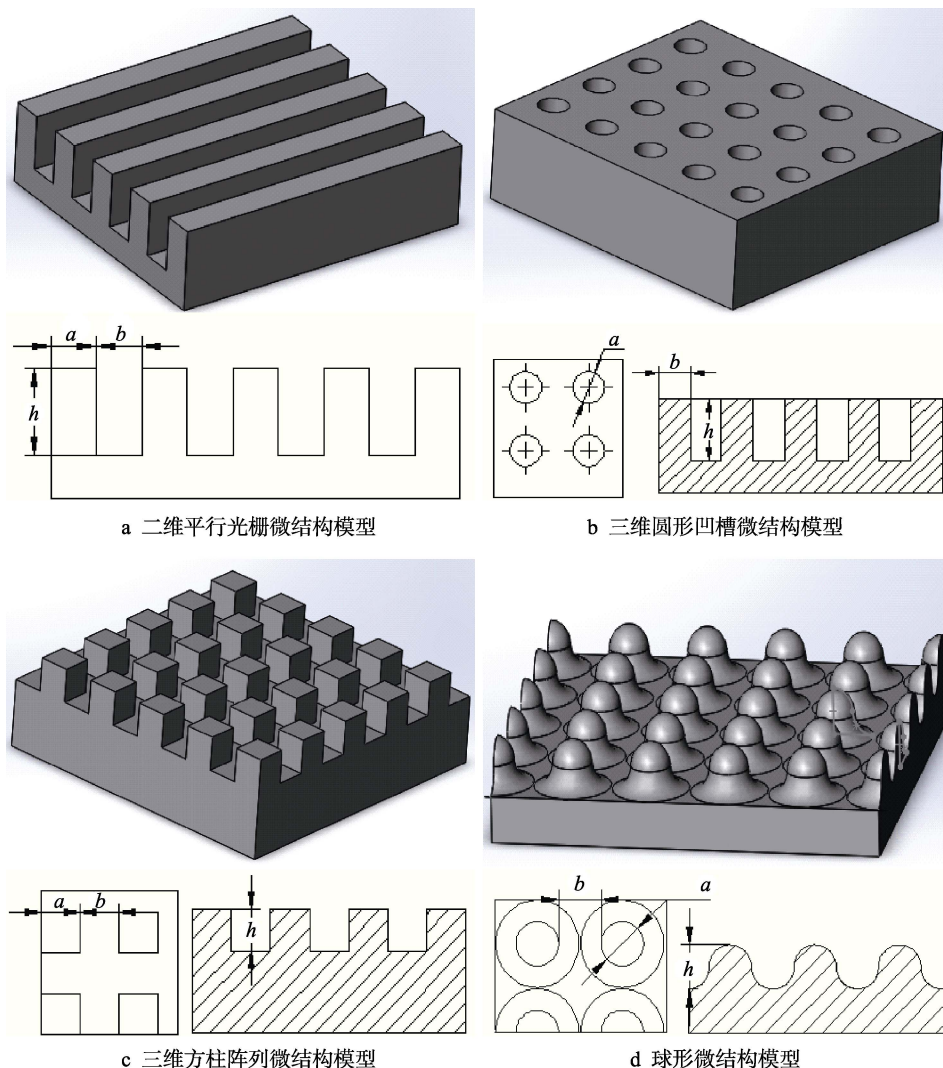


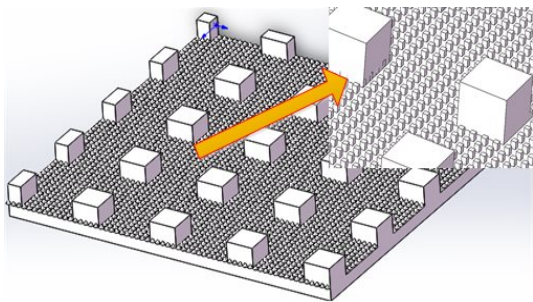
图 1 一级微结构模型

Fig.1 First-level microstructure model: a) two-dimensional parallel grating structure; b) three-dimensional circular groove microstructure; c) three-dimensional square column array microstructure; d) spherical microstructure

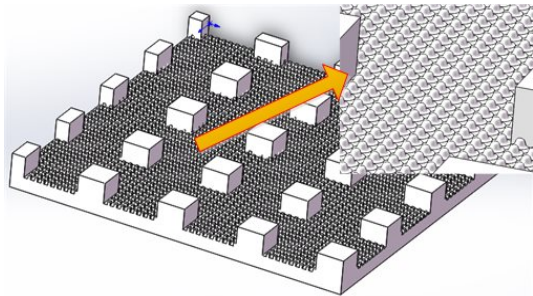
鉴于固体表面的润湿性能受表面微结构形貌的影响, 理论模型与实际亲疏水表面之间存在差异性, 文中设计出了三维方柱阵列与三维方柱阵列微结构、三维方柱阵列与球形微结构作为二级微结构模拟对象。将复合微结构分两级进行模拟: 固体表面微米级微结构和其表面方柱上的纳米级微结构, 如图 2 所示。

图 1 所示微结构表面柱形的宽度、间距和高度分

别为 a 、 b 、 h ^[12], 其数值范围分别为 30~50 μm 、30~200 μm 、50~100 μm 。定义 Y 为非复合即完全润湿特性与表面微结构参数的关系, f 为复合即不完全润湿特性与表面微结构参数的关系。当金属表面形貌轮廓为完整球形时, 固体分数与圆形的半径无关, 即粗糙因子与宽度、间距和高度均无关。故除球形微结构外, 各微结构方程显示, 粗糙因子大小主要由表面微方柱宽度、间距和高度决定。



a 三维方柱阵列与三维方柱阵列微结构



b 三维方柱阵列与球形微结构

图 2 二级微结构模型

Fig.2 Second-level microstructure model: a) three-dimensional square column array and three-dimensional square column array microstructure; b) three-dimensional square column array and spherical microstructure

选择以纯铜为模拟材料，测量其表面本征接触角 $\theta_s=78^\circ$ 。根据图形的几何特征和曲面积分（数值计算仅针对复合态和非复合态展开，并忽略重力的影响，不讨论外界条件的变化）^[17]，得到不同微结构表面的公式，见表 1。

表 1 一级微结构表面
Tab.1 Primary microstructure surface

Microstructure	Formula	Serial number
Two-dimensional parallel grating structure	$Y = 1 + \frac{2h}{a+b}$	(3)
	$f = \frac{a}{a+b}$	(4)
Three-dimensional circular groove structure	$Y = 1 + \frac{\pi a}{(a+b)^2}$	(5)
	$f = 1 - \frac{\pi a}{4(a+b)^2}$	(6)
Three-dimensional square column array structure	$Y = 1 + \frac{4h}{(a+b)^2}$	(7)
	$f = \frac{a}{(a+b)^2}$	(8)
Spherical structure	$Y = 1.29$	
	$f = \frac{2\pi(1 - \cos \theta_s)}{2\pi(1 - \cos \theta_s) + 16 - \pi \sin^2 \theta_s} = 0.2769$	(9)

在二级微结构金属表面，其固体份数可表示为微结构表面两个层次对应部分固体份数的乘积。由表 1 可推导出二级微结构在不同润湿表面粗糙因子相关公式，见表 2。

表 2 二级微结构表面
Tab.2 Secondary microstructure surface

Microstructure	Formula	Serial number
Three-dimensional square column array structure and three-dimensional square column array structure	$Y = \left(1 + \frac{4h}{(a+b)^2}\right)^2$	(10)
	$f = \left(\frac{a}{(a+b)^2}\right)^2$	(11)
Three-dimensional square column array structure and spherical microstructure	$Y = \left(1 + \frac{4h}{(a+b)^2}\right) \times 1.29$	(12)
	$f = \frac{a}{(a+b)^2} \times 0.2769$	(13)

2 模拟结果与分析

2.1 一级粗糙结构

2.1.1 表面粗糙因子

联立公式（1）、（2）以及表 1 相关公式，发现球形微结构模型表面存在特殊现象：由表 1 可知，在球形微结构表面， $Y=1.29, f=0.2769$ ，均为定值。在 Matlab 中编辑程序进行过计算，得到在不完全润湿表面表观接触角 $\theta_w=131.720^\circ$ ，完全润湿表面表观接触角 $\theta_c=74.443^\circ$ 。由此得出在球形微结构模型表面表观接触角皆为定值，与其表面的湿润状态无关。在微结构表面形貌的宽度、间距和高度三种微结构参数中，由于宽度对润湿性能的影响不明显^[12]，且在表 1 中粗糙因子 Y 受 $a、b、h$ 三个自变量的影响，三维曲线已经不能表达，故文中在合理的取值范围内取 $a=30、40、50\text{ }\mu\text{m}$ 进行模拟。同时由表 1 可以看出，不完全润湿微结构表面粗糙因子 f ，均与高度无关，无需考虑高度的变化，就可以模拟出光滑的三维曲线，模拟结果如图 3 所示。

利用 Matlab 编辑程序进行模拟计算，得到铜基表面微结构参数与粗糙因子的三维曲线关系。在完全润湿微结构表面，三维圆形凹槽微结构模型与三维方柱阵列微结构模型在合理的范围内，当间距 b 一定时，粗糙因子 Y 皆随高度 h 的增大而增大。二维平行光栅微结构模型在 $b、h$ 的范围区间内，粗糙因子 Y 的极大值为 4.333，极小值为 1.4。当间距 b 一定时，比较其余两种微结构模型，随高度 h 的增大，粗糙因子 Y 增大的速率明显更快。

在不完全润湿微结构表面，二维平行光栅微结构模型与三维方柱阵列微结构模型在允许的范围内，当

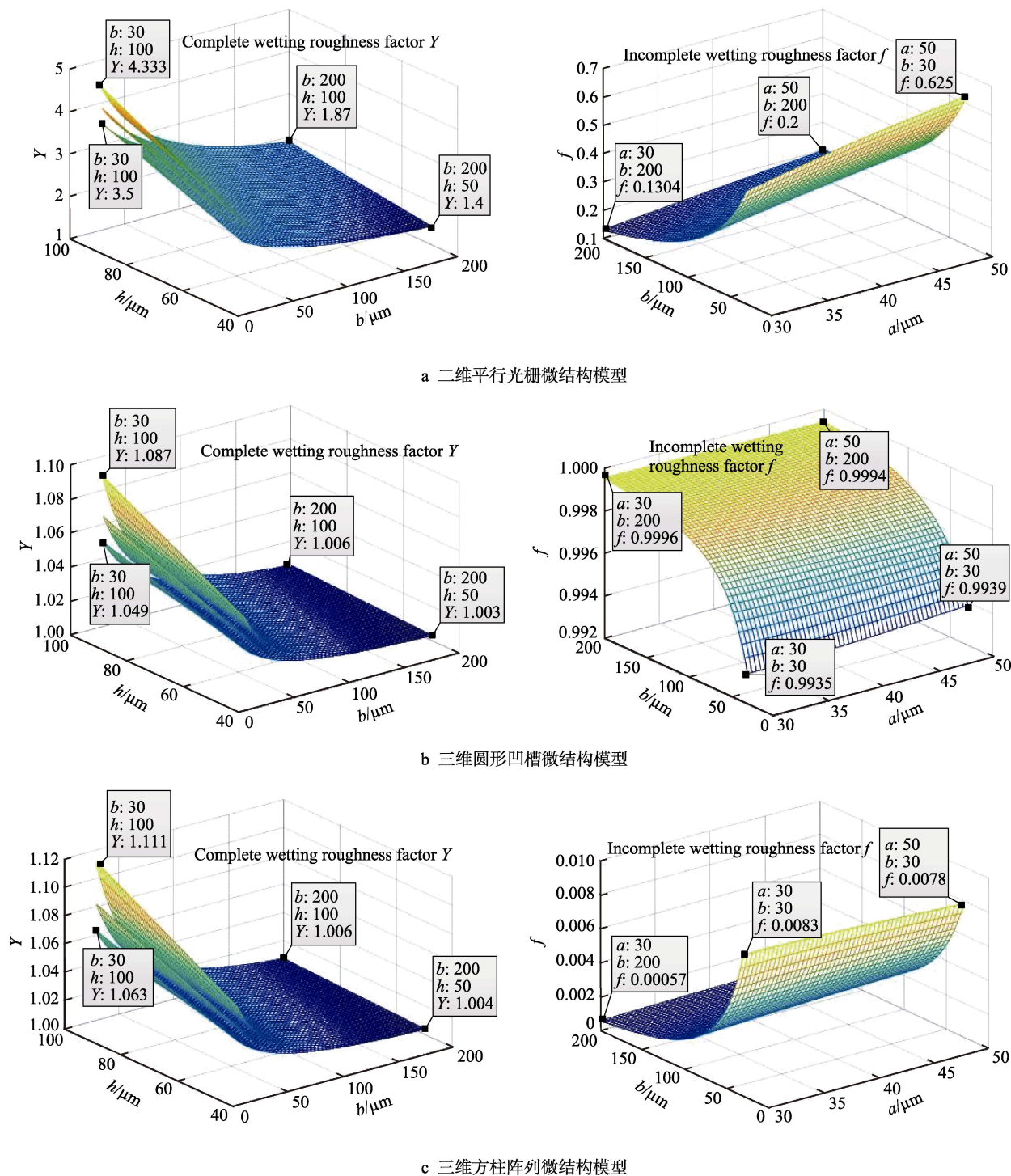


图3 一级微结构润湿表面粗糙因子

Fig.3 Wetting surface roughness factor on the first-level microstructure: a) two-dimensional parallel grating microstructure; b) three-dimensional circular groove microstructure; c) three-dimensional square column array microstructure

间距 b 一定时, f 均随高度 h 的增大而减小。对于三维圆形凹槽微结构模型, 当间距 b 一定时, f 随高度 h 的增大而增大。与此同时, 与完全润湿状态相比, 不完全润湿微结构表面粗糙因子明显较小, 这与现有的研究相符合。

2.1.2 表观接触角

由图4可知, 在完全润湿微结构表面, 在合理的

范围内, 三维圆形凹槽微结构模型与三维方柱阵列微结构模型表观接触角的起始点均约为 $\theta_c = 77^\circ$, 表现为亲水性。当间距 b 一定时, 在允许的范围内, 两种微结构模型的曲线随高度 h 的变化不明显, 最大值皆不超过 78° 。二维平行光栅微结构的三维曲线起伏较为明显, 在 b 、 h 的范围区间内, 表观接触角 θ_c 的极大值为 73.08° , 极小值为 25.72° , 整体变化较大。

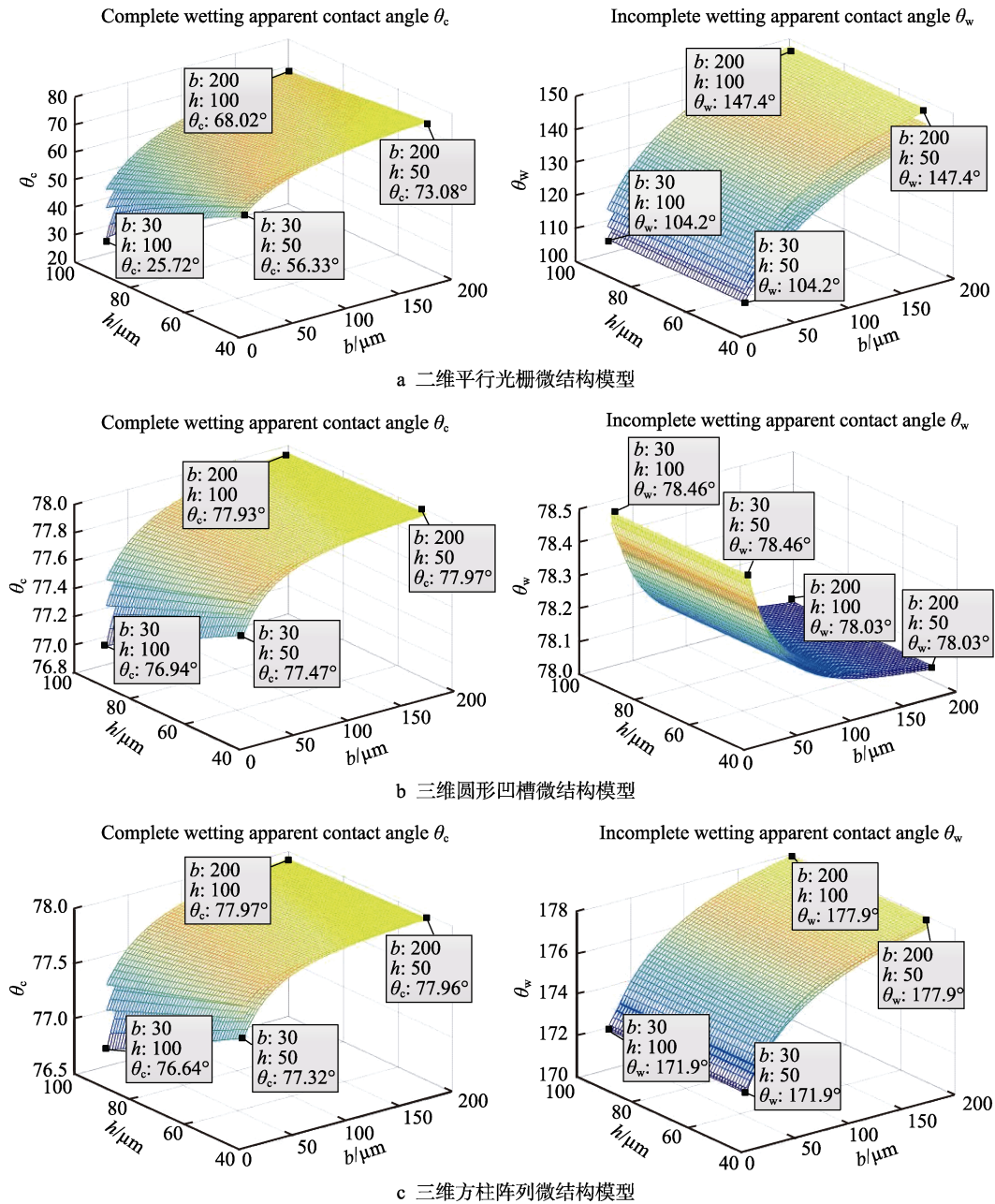


图 4 一级微结构润湿表面表观接触角

Fig.4 Apparent contact angle on wetting surface in the first-level microstructure: a) two-dimensional parallel grating microstructure; b) three-dimensional circular groove microstructure; c) three-dimensional square column array microstructure

在不完全润湿微结构表面,在允许的范围内,当间距 b 一定时,随高度 h 的变化,三维圆形凹槽微结构模型表观接触角的变化趋势与三维方柱阵列微结构模型、二维平行光栅微结构模型相反。与此同时,三维圆形凹槽微结构模型表观接触角约为 78° ,表现为亲水性。三维方柱阵列微结构模型、二维平行光栅微结构模型表观接触角均大于 90° ,表现为疏水性,且在三维方柱阵列微结构模型表面,表观接触角极小值 $\theta_w=171.9^\circ$,表面形成超疏水特性。由此可见,当改变金属表面微观形貌,表观接触角均产生明显变化,其中三维方柱阵列微结构表观接触角变化最为明显,铜基表面由亲水性转变成超疏水特性。

根据 Matlab 模拟发现,各一级微结构金属表面,除球形微结构模型中不完全湿润表面与完全润湿表面粗糙因子以及表观接触角皆为定值外,在所设计的三种微结构模型中,完全润湿状态下,当间距 b 一定时,表观接触角 θ_c 随高度 h 的增大,均呈现一种下降的趋势。三维圆形凹槽微结构模型在不同润湿状态下,其粗糙因子的变化以及表观接触角的变化完全相反。由图 4 可知,外部扰动因素相同时,在铜基表面制备一级粗糙微结构,在完全润湿状态下,当间距 b 一定,随着高度 h 的增大,其亲水性更甚;而不完全润湿状态下,除三维圆形凹槽微结构模型外,其余微结构模型皆由亲水变为疏水。其中三维方柱阵列微结

构模型微结构表面亲疏水性能的变化最为明显。

由式(1)、(2)可知, Wenzel 模型方程与 Cassie 模型方程均为余弦函数, 文中设计的微结构中, 在完全润湿的条件下, 三维圆形凹槽微结构模型、三维方柱阵列微结构模型相关粗糙因子公式中, 均含有倍数相同的平方次幂, 且粗糙因子 Y 大小相差不大, 故其表观接触角曲线变化程度相似性较大。二维平行光栅微结构模型粗糙因子公式并没有此特点, 所以三维曲线变换程度明显与其余两种相差较大。在不完全润湿的条件下, 二维平行光栅微结构与三维方柱阵列微结构皆由润湿条件下的亲水性变为疏水性, 三维圆形凹槽微结构模型与完全润湿状态相比, 其亲水性减弱。同时, 在外部扰动条件相同的情况下, 在金属表面制备三维阵列微结构, 对改变金属表面亲疏水性能的效果最为明显。

2.2 二级粗糙结构

在金属表面设计规则的形貌, 其宽度、间距和高度三种微结构参数中, 前文提及在微结构表面, 柱形的宽度对润湿性能的影响不明显, 且在表 2 中, 粗糙因子 Y 受三个自变量影响, 三维曲线已经不能表达,

故在合理的取值范围内, 取 $a=30、40、50\ \mu\text{m}$ 进行模拟。联立式(1)、(2)以及表 2 相关公式, 模拟得到不同微结构表面微结构参数与微结构表面润湿性能的三维曲线关系。

2.2.1 表面粗糙因子

由图 5 可知, 在完全润湿微结构表面: 当间距 b 一定时, 随高度 h 的增大, 设计的两种二级微结构表面粗糙因子 Y 均呈现上升的趋势。其中三维方柱阵列与三维方柱阵列微结构模型在 $b、h$ 的范围区间内, 粗糙因子 Y 的极大值为 1.235, 极小值为 1.006; 三维方柱阵列与球形微结构模型在 $b、h$ 的范围区间内, 粗糙因子 Y 的极大值为 1.433, 极小值为 1.294。由此可以发现, 三维方柱阵列与三维方柱阵列微结构模型表面粗糙因子 Y 明显小于三维方柱阵列与球形微结构模型表面粗糙因子。

在不完全润湿微结构表面, 对于三维方柱阵列与三维方柱阵列微结构模型、三维方柱阵列与球形微结构模型, 当间距 b 一定时, 随高度 h 的增大, 两者粗糙因子 f 整体上均呈现下降的趋势, 且随着高度 h 的增大, 粗糙因子 f 下降程度较大。同时比较完全润湿

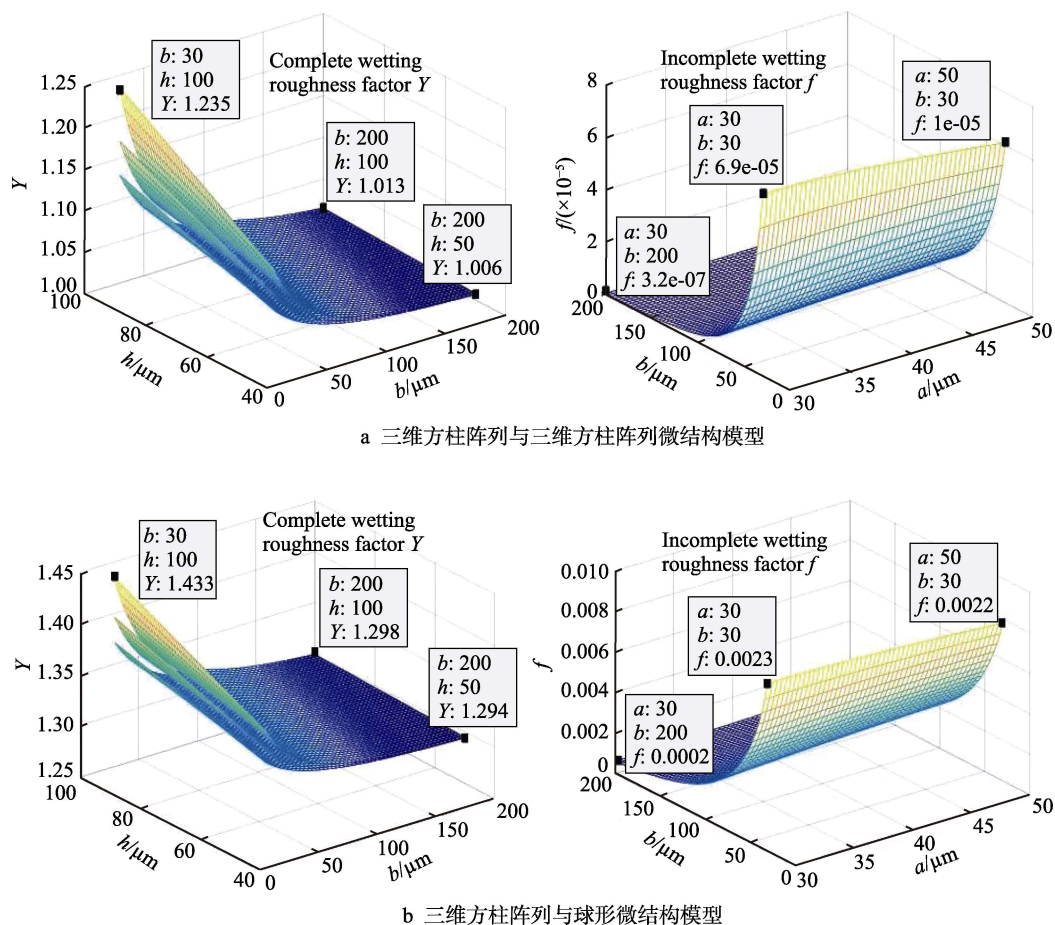


图 5 二级微结构润湿表面粗糙因子

Fig.5 Wetting surface roughness factor in the second-level microstructure: a) three-dimensional square column array and three-dimensional square column array microstructure; b) three-dimensional square column array and spherical microstructure

状态, 不完全润湿状态粗糙因子 f 远小于 Y 。在不完全润湿状态中, 粗糙因子 f 趋近于 0。

2.2.2 表观接触角

由图 6 可知, 在完全润湿微结构表面, 当间距 b 一定时, 随高度 h 的增大, 两种微结构模型的表观接触角整体上都呈现下降的趋势, 即亲水性增强。

在不完全润湿状态时, 三维方柱阵列与三维方

柱阵列微结构模型和三维方柱阵列与球形微结构模型皆由亲水性变为超疏水特性。其中三维方柱阵列与三维方柱阵列微结构在间距 b 、高度 h 取极大值时, 表观接触角 θ_w 约为 180° 。同时也可以看出, 在金属表面制备三维方柱阵列与三维方柱阵列微结构获得的超疏水特性明显优于三维方柱阵列与球形微结构。

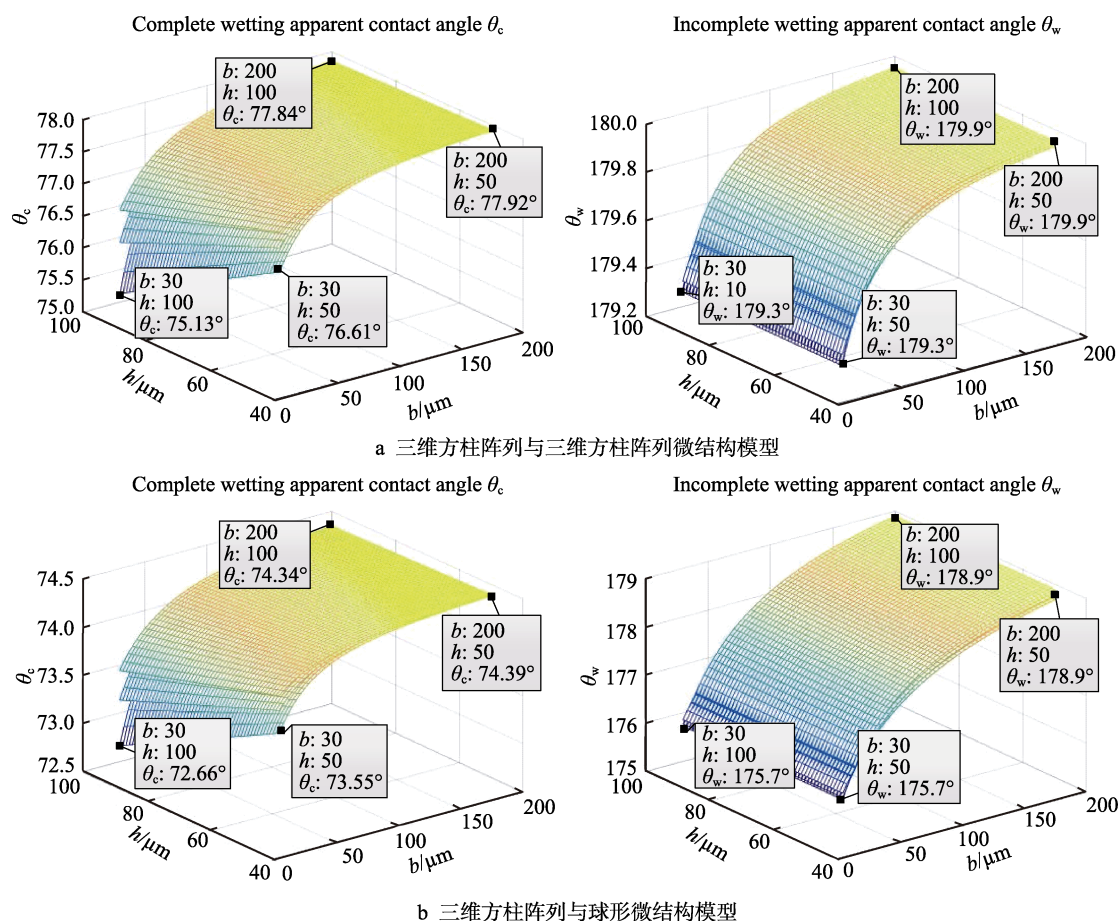


图 6 二级微结构润湿表面表观接触角

Fig.6 Apparent contact angle on wetting surface in the second-level microstructure:

a) three-dimensional square column array and three-dimensional square column array microstructure;
b) three-dimensional square column array structure and spherical microstructure

综上所述不难发现, 与三维方柱阵列与球形微结构模型相比, 在外在扰动相同的条件下, 金属表面制备三维方柱阵列与三维方柱阵列微结构, 获得的疏水性能更好。研究者若要研究在金属表面制备二级微结构表面形貌对亲疏水特性的影响, 选取三维方柱阵列与三维方柱阵列微结构模型研究效果最为明显。

2.3 不同阶层微结构

各一级微结构模型中, 除球形微结构模型外, 在相同的条件下, 三维方柱阵列微结构模型表面表观接触角明显大于二维平行光栅微结构模型、三维圆形凹槽微结构模型表面表观接触角, 且不完全润湿状态下, 在铜基表面制备三维方柱阵列微结构, 铜基表面

由亲水性转变成超疏水性。相比于一级微结构, 除去二维平行光栅微结构模型, 二级微结构表面固体份数比另外两种一级微结构得到提高。根据合理范围内表观接触角的变化程度不难发现, 粗糙度因子所起的放大作用得到较大提高。在复合润湿微结构表面, 变换相同程度的微结构参数, 二级微结构表面的疏水效果被放大更加明显。

3 结论

1) 模拟条件相同的情况下, 改变金属表面微观形貌会引起了润湿性能的改变。完全润湿状态下, 在铜基的亲水表面加工微/纳结构, 使其亲水性加强;

而在不完全润湿状态下,铜基的亲水表面加工微/纳结构,使其亲水性转变为疏水性。

2) 模拟条件相同的情况下,若要研究分析金属表面微结构参数的改变对表观接触角的影响,同时在金属表面获得较强的疏水性能,采用三维阵列微结构研究效果最为合适。

3) 虽然固体表面润湿性能与表面微结构以及微结构参数均存在映射关系,但是表面的微结构维度并非越高越好,一级微结构也可以得到所需疏水性能,即也可得到相应的表观接触角。

参考文献:

- [1] 王奔, 念敬妍, 铁璐, 等. 稳定超疏水性表面的理论进展[J]. 物理学报, 2013, 62(14): 370-384.
WANG Ben, NIAN Jing-yan, TIE Lu, et al. Theoretical progress in designs of stable superhydrophobic surfaces [J]. Acta physica sinica, 2013, 62(14): 370-384.
- [2] 付婷. 金属表面微/纳结构设计制造及传质传热性能研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
FU Ting. Study on design & manufacture and heat and mass transfer performance of micro/nanostructure for metal surface[D]. Gangzhou: South China University of Technology, 2015.
- [3] JR R E J, DETTRE R H. Contact angle hysteresis. III. study of an idealized heterogeneous surface[J]. Journal of physical chemistry, 1964, 68(7): 291-296.
- [4] GENNES P G D. Wetting: Statics and dynamics[J]. Review of modern physics, 1985, 57(3): 827-863.
- [5] HERMINGHAUS S. Roughness-induced non-wetting[J]. EPL, 2007, 52(2): 165-170.
- [6] OTTEN A, HERMINGHAUS S. How plants keep dry: A physicist's point of view[J]. Langmuir, 2004, 20(6): 2405-2408.
- [7] PATANKAR N A. Mimicking the lotus effect: Influence of double roughness structures and slender pillars[J]. Langmuir the ACS journal of surfaces & colloids, 2004, 20(19): 8209-8213.
- [8] 李保家. 仿生周期微结构表面设计制备及其润湿性能研究[D]. 江苏: 江苏大学, 2007.
LI Bao-jia. Design and fabrication of bionic periodic microstructured surfaces and study on their wettability[D]. Jiangsu: Jiangsu University, 2007.
- [9] 郭树虎, 于志家, 罗明宝, 等. 超疏水表面润湿理论研究进展[J]. 材料导报, 2012, 26(5): 74-78.
GUO Shu-hu, YU Zhi-jia, LUO Ming-bao, et al. Research progress in wetting theory of superhydrophobic surface[J]. Materials review, 2012, 26(5): 74-78.
- [10] 李昊原, 谷笑雨, 刘丽艳, 等. 超疏水表面的研究进展[J]. 应用化工, 2016, 45(12): 2347-2350.
LI Hao-yuan, GU Xiao-yu, LIU Li-yan, et al. Research progress of super-hydrophobic surfaces[J]. Applied chemical industry, 2016, 45(12): 2347-2350.
- [11] 仲进安. 基于 MATLAB 的表面三维微观形貌图像处理分析[J]. 光学技术, 2007(S1): 104-105.
ZHONG Jin-an. Surface 3D micro-topography analysis using image processing technology based on MATLAB[J]. Optical technique, 2007(S1): 104-105.
- [12] 张泓筠. 超疏水表面微结构对其疏水性能的影响及应用[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2013.
ZHANG Hong-yun. Influence of microstructure for superhydrophobic surfaces on superhydrophobicity and its application[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2013.
- [13] WENZEL R N. Resistance of solid surface to wetting by water[J]. Ind eng chem, 1936, 28(8): 988-994.
- [14] CASSIE A B D, BAXTER S. Wettability of porous surfaces[J]. Trans faraday soc, 1944, 40(1): 546-551.
- [15] 栗常红, 肖怡, 崔喆, 等. 一种多尺度仿生超疏水表面制备[J]. 无机化学学报, 2006(5): 785-788.
SU Chang-hong, XIAO Yi, CUI Zhe, et al. A simple way to fabricate multi-dimension bionic super-hydrophobic surface[J]. Chinese journal of inorganic chemistry, 2006(5): 785-788.
- [16] LIU Qiao-peng, TANG Yong, LUO Wen-jie, et al. Fabrication of superhydrophilic surface on copper substrate by electrochemical deposition and sintering process[J]. Chinese journal of chemical engineering, 2015, 23(7): 1200-1205.
- [17] 唐陶. 纳米多孔铜表面微结构制造及其强化沸腾性能分析[D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
TANG Tao. The manufacture of nanoporous copper surface structure and its pool boiling enhancement performance [D]. Gangzhou: South China University of Technology, 2015.