

# 表面粗糙度对水滴在方解石表面黏附的影响

朱张磊<sup>1</sup>, 印万忠<sup>2</sup>, 李振<sup>1</sup>, 杨斌<sup>2</sup>, 郭俊<sup>2</sup>, 赵旭<sup>2</sup>

1. 西安科技大学 化学与化工学院, 陕西 西安 710054;  
2. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819

中图分类号: TD91; TD923 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2022)01-0008-07  
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2022.01.002

**摘要** 以方解石为研究对象, 以表面粗糙度为切入点, 探讨了表面粗糙度对水滴在药剂作用前后方解石表面黏附的影响, 并比较了测量黏附力和计算黏附力。试验结果表明: 天然方解石表面为亲水性表面; 随着表面粗糙度的增加, 水滴在天然方解石表面的接触角减小, 基底直径和黏附力均增加。相反, 在 pH 值为 10 时, 与浓度为 30 mg/L 的油酸钠溶液作用后, 方解石表面变为疏水性表面; 随着表面粗糙度的增加, 水滴在药剂作用后的方解石表面的接触角增加、基底直径和黏附力均减小。同时, 测量黏附力和计算黏附力基本吻合。因而, 借助表面粗糙度调控可改变水滴在方解石表面的黏附特性, 从而可为表面粗糙度调控方解石的可浮性提供借鉴。

**关键词** 方解石; 表面粗糙度; 黏附力; 可浮性

## 引言

绝对光滑的表面是不存在的, 实际物体表面通常具有很大的粗糙度, 即使是高度抛光的硅晶片也具有亚纳米级的粗糙度<sup>[1]</sup>。粗糙度对发生在固体颗粒表面上的各种现象有着显著影响, 并将它们与不同的过程相关联<sup>[2]</sup>。因此, 表面粗糙度的研究不仅是基础研究的热点问题, 而且对许多工业过程也至关重要。近年来, 表面粗糙度对矿物加工过程的影响已经引起了人们的关注。

学者们很好地研究了表面粗糙度对矿物浮选的影响。Feng 等<sup>[3]</sup>发现, 干磨后黄铁矿颗粒具有相对粗糙的表面, 而湿磨后产生的黄铁矿颗粒具有更光滑的洁净表面, 干磨产生的样品表现出更稳定、更高负荷的泡沫和更快的浮选动力学。Güven 等<sup>[4]</sup>将光滑和粗糙的玻璃珠以 1:1 的比例混合浮选, 发现粗糙的玻璃珠优先从混合玻璃珠中上浮进入泡沫产品, 而光滑的玻璃珠大多留在了浮选槽中。Tong 等<sup>[5]</sup>发现, 粗糙的石墨表面提供了较多的药剂活性位点, 促进了煤油的吸收, 提高了石墨的可浮性。此外, 学者们也分析了表面粗糙度对水滴或气泡在矿物表面黏附的影响。Yang 等<sup>[6]</sup>发现, 气泡-煤表面靠近过程中, 排斥力随表面粗

糙度的增加而单调增加; 而气泡-煤表面脱离过程中, 吸引力随表面粗糙度的增加而单调降低。Xing 等<sup>[7]</sup>发现, 相比光滑亲水性颗粒, 粗糙亲水性颗粒与气泡之间的脱离力相对较小; 相反, 相比疏水性光滑颗粒, 粗糙疏水性颗粒与气泡之间的脱离力相对较大。在我们先前的研究中<sup>[8]</sup>也发现, 随着表面粗糙度的增加, 水滴在天然亲水性菱镁矿表面的黏附力增大。但是, 水滴在同捕收剂作用后的矿物表面上的黏附力研究鲜有报道, 然而浮选药剂在矿物加工过程中有着举足轻重的作用<sup>[9-13]</sup>。

因此, 本文借助微电子机械天平 DCAT21 测量了水滴在具有不同表面粗糙度的方解石表面的接触角、基底直径和黏附力, 比较了测量黏附力和计算黏附力的差异, 以期通过改变表面粗糙度调控矿物的可浮性提供借鉴。

## 1 试验样品和方法

### 1.1 试验样品

方解石的 X 射线衍射结果如图 1 所示, 其化学组 99.79%, 选取的矿样纯度满足试验要求。

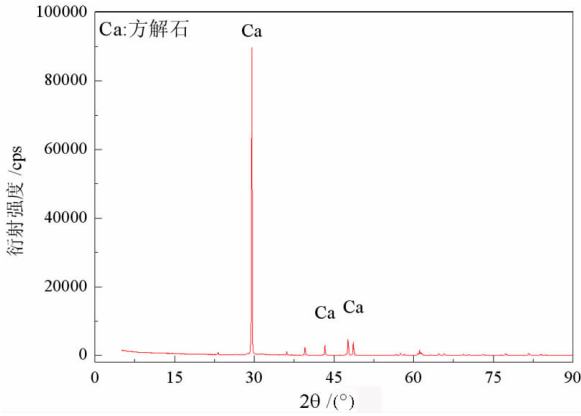


图 1 方解石 XRD 图谱

Fig. 1 X-ray diffraction spectrum of calcite

表 1 方解石化学多元素分析结果

/%

Table 1 The chemical element analysis results of calcite

成分	TFe	FeO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO
含量	0.01	-	0.04	0.01	-	55.88

采用金相切割机将块状方解石切成大小为 10 mm × 10 mm × 5 mm 的薄片。采用 120 目 (125 μm)、400 目 (38 μm) 和 1 200 目 (12.5 μm) 的砂纸,以及 6 μm 和 1 μm 的金刚石粉末对切割后的片状矿物表面进行抛光打磨,以期获得具有不同表面粗糙度的平面。抛光打磨时采用的抛光打磨介质顺序依次为 120 目砂纸、400 目砂纸、1 200 目砂纸、6 μm 金刚石粉末和 1 μm 金刚石粉末,直至获取所需要的矿物平面。同时,使用砂纸打磨的过程中添加了自来水,使用金刚石粉末打磨的过程中添加了润滑液,这有利于获得纳米级粗糙度<sup>[3]</sup>。为了避免晶体表面各向异性<sup>[14]</sup>对试验结果的影响,矿物沿相同方向进行切割和抛光打磨。将抛光的矿物样品置于超声波清洗机中用酒精和去离子水清洗数次,然后放置在空气中自然晾干。为了准备用于黏附力测量的样品<sup>[15]</sup>,首先,将方解石薄片用夹子悬挂(抛光打磨面方向朝下),将其抛光表面浸入 35 mL 去离子水。通过磁力搅拌器搅拌矿浆 2 min,然后添加 NaOH(或 HCl)以获得所需的 pH 值。6 min 后,加入 NaOL,再调浆 10 min。然后,将方解石薄片从烧杯中轻轻移出,用压缩空气吹干方解石表面残余的液体。

## 1.2 表面粗糙度表征

采用 MFP-3D Origin + 原子力显微镜(Oxford Corporation, 美国)表征方解石薄片的表面粗糙度,方解石薄片表面三至五个点被随机选择并进行测量。报告的粗糙度值包括均方根粗糙度 ( $R_q$ )、算术粗糙度 ( $R_a$ )、表面积比 ( $R_{SA}$ )、偏度 ( $R_{sk}$ ) 和峰度 ( $R_{ku}$ ),定义分别见公式(1) ~ (5):

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Z_i - \bar{Z})^2} \quad (1)$$

$$R_a = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |Z_i - \bar{Z}| \quad (2)$$

$$R_{SA} = \frac{S_a}{S_p} \quad (3)$$

$$R_{sk} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{Z_i - \bar{Z}}{\sigma} \right)^3 \quad (4)$$

$$R_{ku} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{Z_i - \bar{Z}}{\sigma} \right)^4 - 3 \quad (5)$$

其中,  $\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (Z_i - \bar{Z})^2}$ ,  $Z_i$  是给定像素  $i$  的高度,  $N$  是图像中像素的总数,而  $\bar{Z}$  是整个图像的平均高度,  $S_a$  和  $S_p$  分别是指实际表面积和投影表面积。

试验过程中发现样品的偏度 ( $R_{sk}$ ) 和峰度 ( $R_{ku}$ ) 值接近于零,抛光打磨后的矿物表面粗糙度呈对称分布,并遵循正态分布。较小的  $R_{sk}$  和  $R_{ku}$  表明粗糙度变化的均匀性,因此后续不再对偏度 ( $R_{sk}$ ) 和峰度 ( $R_{ku}$ ) 进行过多讨论。

## 1.3 黏附力测量和计算

在本研究中,使用了一种高灵敏度的微电子机械天平 DCAT 21(动态接触角仪和张力计, Dynamic Contact Angle Meter and Tensiometer instrument, Dataphysics, 德国)来测量水滴与矿物表面的黏附力(如图 2a 所示)<sup>[16]</sup>。图 2b 显示了水滴(约 4 μL)与矿物表面典型的黏附力曲线。力与距离(样品和水滴的距离)的关系包括五个不同的过程:(1)样品接近水滴而没有任何可记录的相互作用(从点 A 到 B);(2)水滴与矿物表面之间的吸附引起其在矿物表面的铺展(C 点);(3)机械压缩(从 C 点到 D 点);(4)水滴的拉伸(从 D 点到 E 点);(5)水滴与矿物表面的分离(F 点)。在水滴黏附到样品表面前后,带有矿物样品的移动平台的移动速度分别为 0.03 mm/s 和 0.01 mm/s。本研究关注于 C 点(铺展点)、E 点(最大力点)和 F 点(脱离点)的黏附力,并将 C 点、E 点和 F 点的黏附力定义为铺展力、最大力和脱离力,接触角定义为前进接触角、最稳定接触角和后退接触角<sup>[8]</sup>。

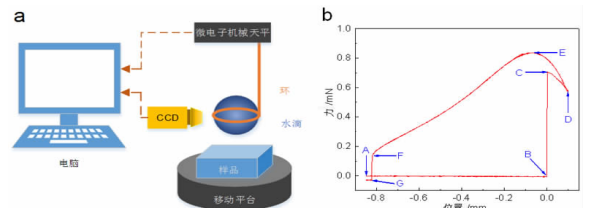


图 2 a, 试验系统; b, 典型的水滴在矿物表面的黏附力曲线  
Fig. 2 Experimental system(a); A typical force curve for a water droplet on mineral surface(b)

此外,本文也计算了理论黏附力,并与测量值进行了比较。水滴与平坦的固体表面之间的黏附力包括两个分量<sup>[17]</sup>,参见公式(6):表面张力( $F_T$ ,气体界面张力沿着三相接触线周长作用的竖直分量),以及拉普拉斯压力( $F_L$ ),该拉普拉斯压力( $F_L$ )由液-气界面上拉伸的水滴两侧的压差驱动。

$$F = F_T - F_L = 2\pi r\gamma\sin\theta - \pi r^2\Delta P \quad (6)$$

其中, $r$ 是与样品接触的水滴的基底半径, $\gamma$ 是液-气界面张力, $\theta$ 是接触角, $\Delta P$ 是拉普拉斯压力(凸面: $\Delta P = \gamma(1/D + 1/R)$ ;凹面: $\Delta P = \gamma(1/D - 1/R)$ ), $D$ 和 $R$ 是水滴-空气界面的曲率半径,如图3所示)。

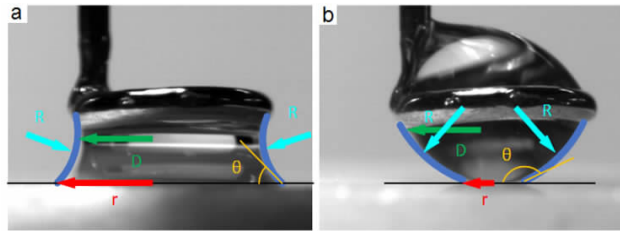


图3 两种不同形状液滴的曲率半径( $R$ 和 $D$ )、接触角( $\theta$ )和基底半径( $r$ ):a-凹面;b-凸面

Fig. 3 Radii of curvature ( $R$  and  $D$ ), contact angle ( $\theta$ ) and droplet base radius ( $r$ ) for two different shapes of the droplets: a, a convex shape; b, a concave shape

## 2 结果和讨论

### 2.1 方解石表面粗糙度分析

图4为抛光打磨后方解石表面的代表性三维AFM图像。表2概括了抛光打磨后方解石表面的表面粗糙度参数( $R_q$ 、 $R_a$ 和 $R_{SA}$ )的平均值,以及它们的标准偏差值。如表2所示,在用1200目砂纸抛光打磨后,方解石表面的 $R_q$ 和 $R_a$ 值分别从由120目砂纸抛光打磨的 $203 \pm 30$  nm和 $149 \pm 21$  nm降至 $27 \pm 2$  nm和 $20 \pm 1$  nm,且 $R_{SA}$ 值从 $1.092 \pm 0.039$ 降低至 $1.028 \pm 0.002$ 。用 $1 \mu\text{m}$ 金刚石粉末对方解石进行最终抛光打磨后, $R_q$ 为 $1.8 \pm 0.3$  nm, $R_a$ 为 $1.6 \pm 0.2$  nm, $R_{SA}$ 为 $1.002 \pm 0.001$ 。

表2 经过四个阶段的抛光打磨后方解石平面的表面粗糙度参数

Table 2 Surface roughness parameters for calcite surfaces after four stages of polishing and grinding

抛光打磨介质	$R_q$ /nm	$R_a$ /nm	$R_{SA}$
120 目砂纸	$203 \pm 30$	$149 \pm 21$	$1.092 \pm 0.039$
400 目砂纸	$125 \pm 20$	$99 \pm 14$	$1.065 \pm 0.015$
1 200 目砂纸	$27 \pm 2$	$20 \pm 1$	$1.028 \pm 0.002$
$1 \mu\text{m}$ 金刚石	$1.8 \pm 0.3$	$1.6 \pm 0.2$	$1.002 \pm 0.000$

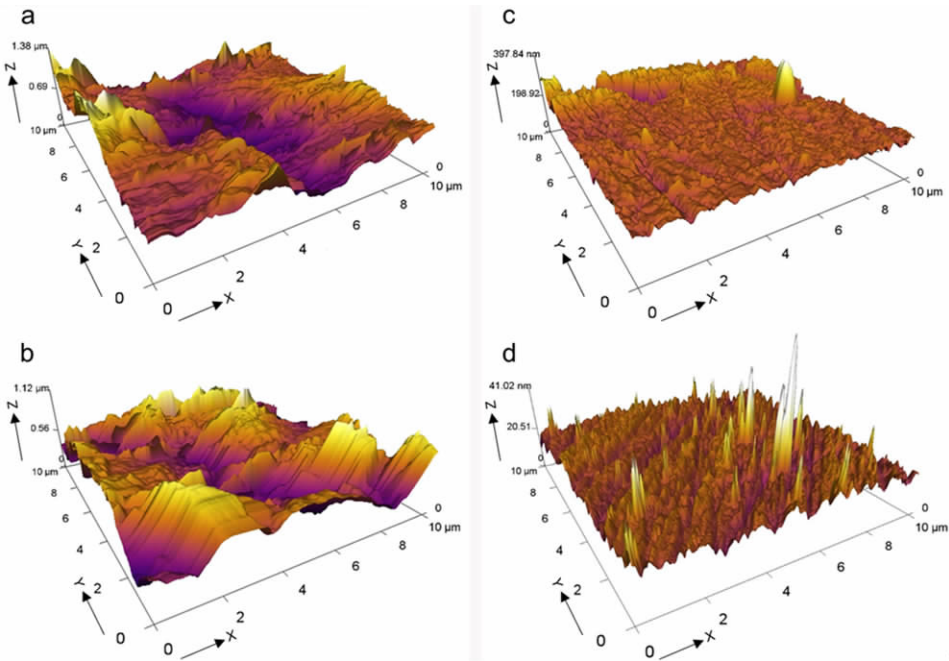


图4 抛光打磨后方解石表面的3维AFM图像示例:a,120目砂纸;b,400目砂纸;c,1200目砂纸;d, $1 \mu\text{m}$ 金刚石介质

Fig. 4 Examples of three dimensions AFM images of calcite surfaces after polishing and grinding with: a, 120 mesh sandpaper; b, 400 mesh sandpaper; c, 1200 mesh sandpaper; d,  $1 \mu\text{m}$  diamond media

增加砂纸网目和减小金刚石粉末的粒度有助于获取光滑的平面,经过抛光打磨处理后,可以得到一系列具有

不同表面粗糙度参数的方解石平面,这为探究表面粗糙度对水滴在方解石表面黏附的影响提供了可能。

## 2.2 表面粗糙度对水滴在方解石表面黏附的影响

### 2.2.1 表面粗糙度对水滴在天然方解石表面黏附的影响

水滴在天然方解石表面黏附时的接触角 ( $\theta$ )、基

底直径 ( $2r$ )、曲率半径  $R$  和  $D$  见图 5,水滴在光滑天然方解石表面上的计算接触角见表 3,水滴在天然方解石表面黏附时的测量力和计算力见表 4。

如图 5 所示,随着均方根粗糙度 ( $R_q$ ) 的增加,水滴在天然方解石表面的接触角呈减小趋势。根据 Wenzel 等式<sup>[18]</sup>,在光滑天然方解石表面上计算的接触角 ( $\theta_s$ )

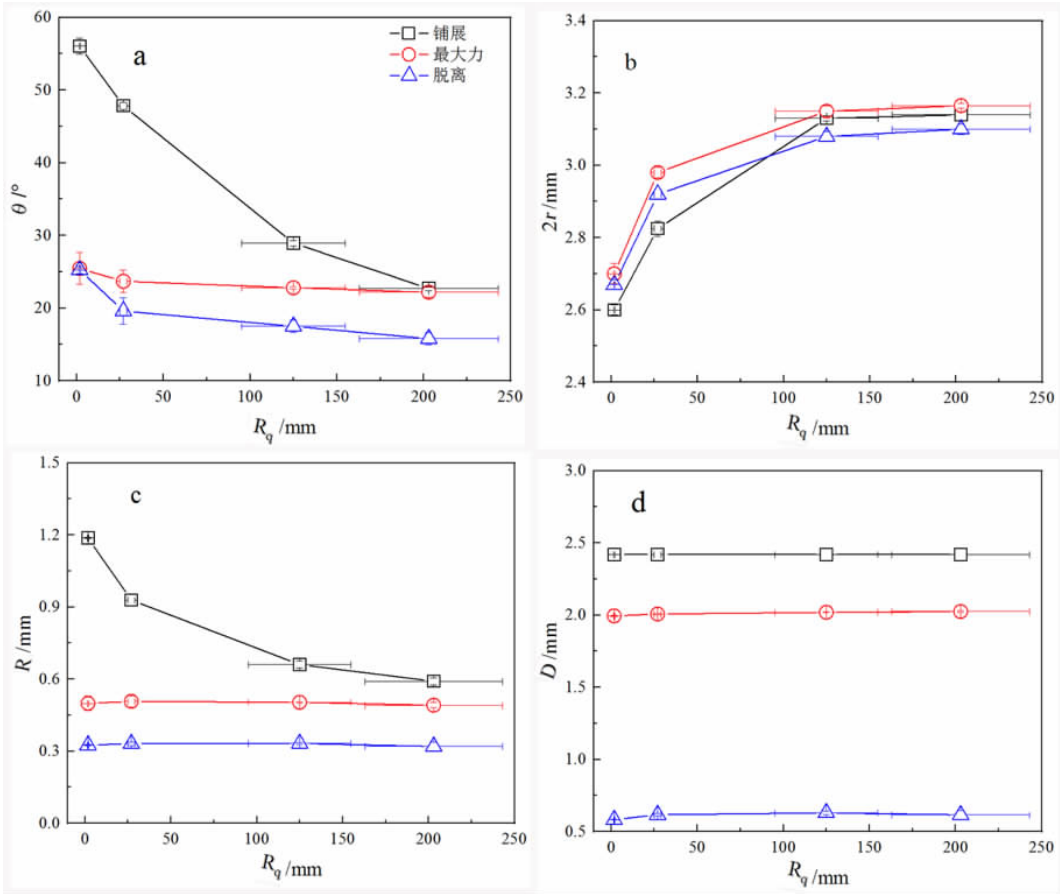


图 5 水滴在天然方解石表面黏附时的形状参数:a,接触角;b,基底直径;c,曲率半径  $R$ ;d,曲率半径  $D$   
**Fig. 5** The shape parameters of water droplet adhesion on natural calcite surfaces; a, contact angle; b, base diameter; c, curvature radius  $R$ ; d, curvature radius  $D$

分别为: $R_q$  为 203 nm 处的  $(32 \pm 3)^\circ$ ,  $R_q$  为 125 nm 处的  $(30 \pm 1)^\circ$ ,  $R_q$  为 27 nm 处的  $(27 \pm 2)^\circ$  和  $R_q$  为 1.8 nm 处的  $(25 \pm 2)^\circ$  (表 3)。当采用具有纳米级粗糙度的亲水性方解石表面时,接触角的变化范围约  $7^\circ$ ,为 Wenzel 模型提供了合理的支持。但是由于环的拖曳作用,该计算接触角高于天然方解石表面的真实接触角。随着均方根粗糙度的增加,水滴在天然方解石表面的基底直径呈增加趋势,这表明水滴在粗糙的亲水性方解石表面更易铺展和更难脱离。随着均方根粗糙度的增加,曲率半径  $R$  在铺展点呈现明显的减小趋势,在最大力点和脱离点的变化规律不明显。此外,随着均方根粗糙度的增加,曲率半径  $D$  在铺展点、最大力点和脱离点均基本保持不变。

表 3 光滑天然方解石表面上的计算接触角

**Table 3** The calculated contact angle on a smooth natural calcite surface

$R_q/\text{nm}$	$R_{SA}$	$\theta_w/^\circ$	$\theta_s/^\circ$
$203 \pm 40$	$1.092 \pm 0.039$	$22 \pm 2$	$32 \pm 3$
$125 \pm 30$	$1.065 \pm 0.015$	$23 \pm 0$	$30 \pm 1$
$27 \pm 2$	$1.028 \pm 0.002$	$24 \pm 2$	$27 \pm 2$
$1.8 \pm 0.3$	$1.002 \pm 0.000$	$25 \pm 2$	$25 \pm 2$

如表 4 所示,水滴在天然方解石表面的测量力和计算力基本吻合。随着均方根粗糙度 ( $R_q$ ) 从  $203 \pm 40$  nm 减小至  $1.8 \pm 0.3$  nm,测量铺展力(计算铺展力)从  $0.670 \pm 0.014$  mN ( $0.679 \pm 0.021$  mN) 减小至  $0.430 \pm 0.004$  mN ( $0.441 \pm 0.009$  mN),测量最大力

(计算最大力)从  $0.830 \pm 0.028$  mN ( $0.868 \pm 0.033$  mN) 减小至  $0.700 \pm 0.003$  mN ( $0.680 \pm 0.019$  mN), 测量脱离力(计算脱离力)从  $0.139 \pm 0.001$  mN ( $0.126 \pm 0.001$  mN) 减小至  $0.104 \pm 0.001$  mN ( $0.113 \pm 0.002$  mN)。这从微观力的角度直观表明了增加表面粗糙度促进了水滴在天然亲水性方解石表面的黏附。

表 4 水滴在天然方解石表面黏附时的测量力和计算力

Table 4 The measured and calculated forces for water droplet adhesion on natural calcite surfaces

点	$R_q/\text{nm}$	测量力/mN	计算力/mN
铺展	$203 \pm 40$	$0.670 \pm 0.014$	$0.679 \pm 0.021$
	$125 \pm 30$	$0.640 \pm 0.014$	$0.647 \pm 0.015$
	$27 \pm 2$	$0.530 \pm 0.004$	$0.524 \pm 0.006$
	$1.8 \pm 0.3$	$0.430 \pm 0.004$	$0.441 \pm 0.009$
最大力	$203 \pm 40$	$0.830 \pm 0.028$	$0.868 \pm 0.033$
	$125 \pm 30$	$0.800 \pm 0.001$	$0.839 \pm 0.009$
	$27 \pm 2$	$0.760 \pm 0.014$	$0.764 \pm 0.023$
	$1.8 \pm 0.3$	$0.700 \pm 0.003$	$0.680 \pm 0.019$
脱离	$203 \pm 40$	$0.139 \pm 0.001$	$0.126 \pm 0.001$
	$125 \pm 30$	$0.132 \pm 0.002$	$0.121 \pm 0.005$
	$27 \pm 2$	$0.114 \pm 0.002$	$0.115 \pm 0.007$
	$1.8 \pm 0.3$	$0.104 \pm 0.001$	$0.113 \pm 0.002$

## 2.2.2 表面粗糙度对水滴在 NaOL 作用后的方解石表面黏附的影响

为研究水滴在药剂作用后的方解石表面的黏附特性,在 pH 值为 10 时,将方解石薄片置于浓度为 30 mg/L 的 NaOL 溶液中处理 10 min(详见小节 1.1)。水滴与浓度为 30 mg/L 的 NaOL 溶液作用后的方解石表面黏附时的接触角( $\theta$ )、基底直径( $2r$ )、曲率半径  $R$  和  $D$  见图 6,其测量和计算黏附力见表 5。

如图 6 所示,在 pH 值为 10 时,同浓度为 30 mg/L 的 NaOL 溶液作用后,水滴在方解石表面铺展处( $C$  点)的前进接触角均超过  $90^\circ$ ;随着均方根粗糙度( $R_q$ )的增加,水滴在方解石表面的接触角呈增加趋势。粗糙表面接触角较大的原因有两个:(1)根据 Wenzel 模型和 Cassie 模型<sup>[18-19]</sup>,疏水性微观结构阻碍了水滴的铺展;(2)粗糙表面具有较强的 NaOL 吸附能力,有利于进一步提高矿物表面的疏水性<sup>[20]</sup>。水滴在方解石表面的基底直径呈减小趋势,这表明水滴在粗糙的疏水性方解石表面更难铺展和更易脱离;曲率半径在铺展点呈现明显的增加趋势,在最大力点和脱离点的变化规律不明显;此外,曲率半径在铺展点、最大力点和脱离点均有下降趋势。

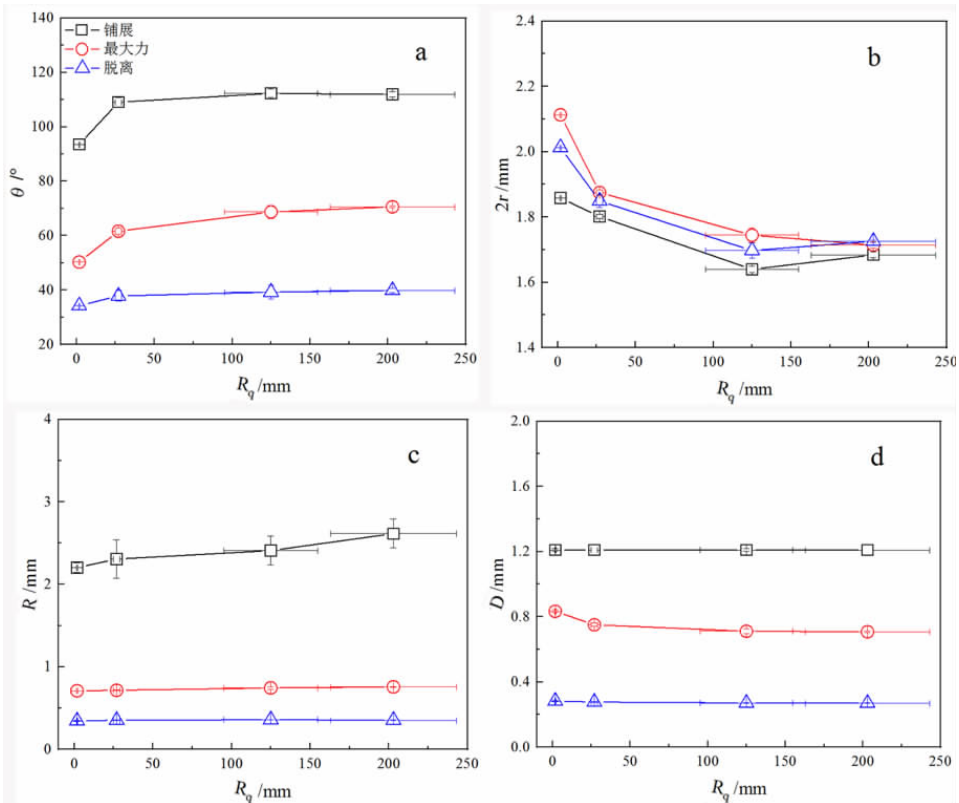


图 6 水滴与 30 mg/L NaOL 作用后的方解石表面黏附时的形状参数:a - 接触角;b - 基底直径;c - 曲率半径  $R$ ; d - 曲率半径  $D$   
Fig. 6 The shape parameters of water droplet adhesion on calcite surfaces after conditioning with 30 mg/L NaOL: a, contact angle; b, base diameter; c, curvature radius  $R$ ; d, curvature radius  $D$

如表 5 所示,在 pH 值为 10 时,与浓度为 30 mg/L 的 NaOL 溶液作用后,水滴在方解石表面的测量力和计算力基本吻合。随着均方根粗糙度 ( $R_q$ ) 从  $203 \pm 40$  nm 减小至  $1.8 \pm 0.3$  nm,测量铺展力(计算铺展力)从  $0.112 \pm 0.007$  mN ( $0.123 \pm 0.002$  mN) 增加至  $0.126 \pm 0.000 \pm 0.007$  mN ( $0.131 \pm 0.004$  mN),测量最大力(计算最大力)从  $0.344 \pm 0.008$  mN ( $0.352 \pm 0.001$  mN) 增加至  $0.442 \pm 0.001$  mN ( $0.422 \pm 0.003$  mN),测量脱离力(计算脱离力)从  $0.102 \pm 0.000$  mN ( $0.101 \pm 0.007$  mN) 增加至  $0.111 \pm 0.001$  mN ( $0.109 \pm 0.006$  mN)。这从微观力的角度直接表明了增加表面粗糙度阻碍了水滴在疏水性方解石表面的黏附。

表 5 水滴在同 30 mg/L NaOL 作用后的方解石表面黏附的测量力和计算力

Table 5 The measured and calculated forces for water droplet adhesion on calcite surfaces after conditioning with 30 mg/L NaOL

点	$R_q$ /nm	测量力/mN	计算力/mN
铺展	$203 \pm 40$	$0.112 \pm 0.007$	$0.123 \pm 0.002$
	$125 \pm 30$	$0.102 \pm 0.006$	$0.125 \pm 0.005$
	$27 \pm 2$	$0.121 \pm 0.002$	$0.118 \pm 0.004$
	$1.8 \pm 0.3$	$0.126 \pm 0.000$	$0.131 \pm 0.004$
最大力	$203 \pm 40$	$0.344 \pm 0.008$	$0.352 \pm 0.001$
	$125 \pm 30$	$0.346 \pm 0.004$	$0.359 \pm 0.003$
	$27 \pm 2$	$0.380 \pm 0.018$	$0.388 \pm 0.011$
	$1.8 \pm 0.3$	$0.442 \pm 0.001$	$0.422 \pm 0.003$
脱离	$203 \pm 40$	$0.102 \pm 0.000$	$0.101 \pm 0.007$
	$125 \pm 30$	$0.100 \pm 0.002$	$0.099 \pm 0.012$
	$27 \pm 2$	$0.110 \pm 0.000$	$0.107 \pm 0.007$
	$1.8 \pm 0.3$	$0.111 \pm 0.001$	$0.109 \pm 0.006$

### 3 结论

本文借助微电子机械天平 DCAT21 分析了水滴在具有不同表面粗糙度的方解石表面的黏附特性,主要发现如下:

(1) 增加表面粗糙度可以促进水滴在天然亲水性方解石表面的黏附,其接触角减小,基底直径和微观黏附力增加。

(2) 增加表面粗糙度可以阻碍水滴在疏水性方解石表面的黏附,其接触角增加,基底直径和微观黏附力减小。

表面粗糙度影响着水滴在矿物表面的黏附特性。在浮选过程中,矿物的可浮性与其表面的润湿性(水滴在矿物表面上的黏附特性)密切相关。因而,我们可以通过表面粗糙度调控来选择性地增强或减弱水滴在矿物表面的黏附,进而改变矿物表面的可浮性,从而为浮选调控提供借鉴。

### 参考文献:

- [1] SAMITSU Y. A study of silicon - wafer surface evaluation using atomic force microscopy[J]. Nanotechnology, 1993, 4(4): 236.
- [2] CROLL S G. Surface roughness profile and its effect on coating adhesion and corrosion protection: A review[J]. Progress in Organic Coatings, 2020, 148: 105847.
- [3] FENG D, ALDRICH C. A comparison of the flotation of ore from the Merensky Reef after wet and dry grinding[J]. International Journal of Mineral Processing, 2000, 60(2): 115 - 129.
- [4] GUVEN O, CELIK M S, DRELICH J W. Flotation of methylated roughened glass particles and analysis of particle - bubble energy barrier[J]. Minerals Engineering, 2015, 79: 125 - 132.
- [5] TONG Z Y, LIU L, YUAN Z T, et al. The effect of comminution on surface roughness and wettability of graphite particles and their relation with flotation[J]. Minerals Engineering, 2021, 169: 106959.
- [6] GUO Z M, YANG J G, WANG Y L. An investigation of continuous interaction process between air bubble and various roughness coal surfaces using microbalance[J]. Physicochemical Problems of Mineral Processing, 2020, 56(1): 11 - 23.
- [7] XING Y W, ZHANG Y F, DING S H, et al. Effect of surface roughness on the detachment between bubble and glass beads with different contact angles[J]. Powder Technology, 2020, 361: 812 - 816.
- [8] ZHU Z L, WANG D H, YANG B, et al. Water droplets and air bubbles at magnesite nano - rough surfaces: Analysis of induction time, adhesion and detachment using a dynamic microbalance[J]. Minerals Engineering, 2020, 155: 106449.
- [9] 朱诗曼,李怡霏,张喆怡,等.羧酚酸类捕收剂浮选金红石特性及其机理[J].矿产保护与利用,2021,41(4):59 - 63.  
ZHU S M, LI Y F, ZHANG Z Y, et al. Flotation characteristics and mechanism of rutile with hydroxamic acid collectors[J]. Conservation and utilization of mineral resources, 2021, 41(4): 59 - 63.
- [10] 王雯雯,马晓晓,王宇斌,等.助磨剂 EDTA 在超细石膏粉体制备过程中的作用机制[J].矿产保护与利用,2021,41(4):100 - 106.  
WANG W W, MA X X, WANG Y B, et al. Study on the effect mechanism of EDTA on the preparation of ultrafine gypsum powder[J]. Conservation and utilization of mineral resources, 2021, 41(4): 100 - 106.
- [11] 杨诚,张晨,李明明,等.有机抑制剂在铁矿石反浮选中的应用研究进展[J].矿产保护与利用,2021,41(4):141 - 149.  
YANG C, ZHANG C, LI M Y, et al. Research development of application of organic depressant in iron ore reverse flotation[J]. Conservation and utilization of mineral resources, 2021, 41(4): 141 - 149.
- [12] 印万忠,唐远,姚金,等.矿物浮选过程中的交互影响[J].矿产保护与利用,2018(3):55 - 60.  
YIN W Z, TANG Y, YAO J, et al. Interactive effects in mineral flotation process[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2018(3): 55 - 60.
- [13] 王纪镇,印万忠,程雅芝,等.白钨矿浮选中方解石对磷酸钠抑制性能的影响及机理研究[J].矿产保护与利用,2018(3):77 - 80.  
WANG J Z, YIN W Z, CHENG Y Z, et al. The mechanism and effect of calcite on the depressing effect of sodium phosphate in the scheelite flotation[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2018(3): 77 - 80.
- [14] GAO Y S, GAO Z Y, SUN W, et al. Adsorption of a novel reagent scheme on scheelite and calcite causing an effective flotation separation[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2018, 512: 39 - 46.
- [15] ZHU Z L, LI Z, YIN W Z, et al. Snap - in interactions between water droplets and hematite/quartz surfaces with various roughness after condi-

tioning with soluble starch and DDA using a dynamic microbalance[J]. Minerals Engineering, 2022, 177: 107358.

- [16] ZHU Z L, JIANG Y H, WANG D H, et al. Droplet Characteristics at the Maximum Adhesion on Curved Surfaces[J]. Langmuir, 2021, 37(7): 2532–2540.
- [17] WANG D H, ZHU Z L, YANG B, et al. Nano-scaled Roughness Effect on Air Bubble-Hydrophilic Surface Adhesive Strength[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects,

2020, 603: 125228.

- [18] WENZEL R N. Resistance of solid surfaces to wetting by water[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 1936, 28(8): 988–994.
- [19] CASSIE A, BAXTER S. Wettability of porous surfaces[J]. Transactions of the Faraday Society, 1944, 40(1): 546–551.
- [20] ZHU Z L, YIN W Z, WANG D H, et al. The role of surface roughness in the wettability and floatability of quartz particles[J]. Applied Surface Science, 2020, 527: 146799.

## Investigation on the Effect of Surface Roughness on the Adhesion of Water Droplets on Calcite Surface

ZHU Zhanglei<sup>1</sup>, YIN Wanzhong<sup>2</sup>, LI Zhen<sup>1</sup>, YANG Bin<sup>2</sup>, GUO Jun<sup>2</sup>, ZHAO Xu<sup>2</sup>

1. College of Chemistry and Chemical Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, Shaanxi, China;  
2. School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, Liaoning, China

**Abstract:** In this paper, calcite was selected as the research object, and surface roughness was taken as the key point, the effect of surface roughness on the adhesion of water droplets on calcite surface before and after conditioning with sodium oleate was investigated. In addition, the measured adhesive force and the calculated adhesive force were compared. Experimental results revealed that the surface of natural calcite was hydrophilic; with the increase of surface roughness, the contact angle of water droplets on the surface of natural calcite decreased while both the base diameter and the adhesive force increased. However, the surface of calcite after conditioning with 30 mg/L NaOL at pH value of 10 became hydrophobic; with the increase of surface roughness, the contact angle of water droplets on the conditioned surface increased while both the base diameter and the adhesive force decreased. Meanwhile, the measured adhesive force agreed well with the calculated force. Therefore, the adhesion characteristics of water droplets on calcite surface could be regulated by controlling surface roughness, which could provide a reference for the regulation of the floatability of calcite by surface roughness.

**Keywords:** calcite; surface roughness; adhesive force; floatability

引用格式: 朱张磊, 印万忠, 李振, 杨斌, 郭俊, 赵旭. 表面粗糙度对水滴在方解石表面黏附的影响[J]. 矿产保护与利用, 2022, 42(1): 8–14.

ZHU Zhanglei, YIN Wanzhong, LI Zhen, YANG Bin, GUO Jun, ZHAO Xu. Investigation on the effect of surface roughness on the adhesion of water droplets on calcite surface[J]. Conservation and utilization of mineral resources, 2022, 42(1): 8–14.

投稿网址: <http://kcbh.cbpt.cnki.net>

E-mail: [kcbh@chinajournal.net.cn](mailto:kcbh@chinajournal.net.cn)