



十二胺对气泡与疏水性滑石表面 三相接触线形成的影响

蒋昊, 罗汇丰, 谢佳辉, 韩文平

(中南大学 资源加工与生物工程学院, 长沙 410083)

摘要: 利用气泡碰撞测试、接触角测量、原子力显微镜(AFM)试验研究了十二胺(DDA)对气泡与疏水性滑石表面 TPC 形成的影响及作用机理。结果表明: 滑石在去离子水及 DDA 溶液中均能形成 TPC 三相接触线, 且 TPC 形成时间(t_{TPC})随着 DDA 浓度的升高而增加。气泡与滑石表面三相接触线形成时间(t_{TPC})为气泡与滑石碰撞-反弹所需时间(t_B)和气泡与滑石间液膜排液时间(t_D)之和。TPC 形成的必要条件是气泡与矿物之间液膜的破裂, 液膜的稳定性对 TPC 的形成至关重要, 气泡与矿物间液膜越稳定, t_D 越长, t_{TPC} 也越长。气泡与滑石间液膜的稳定性是由滑石表面的疏水作用力和气泡与滑石表面微纳米气泡之间的相互作用力等共同决定的。疏水作用力是引力, 随着 DDA 浓度的升高, 滑石的疏水性增强, 使得液膜的稳定性趋于减弱。气泡和微纳米气泡之间是斥力, 随着 DDA 浓度的升高, 液膜的稳定性逐渐增强。

关键词: 三相接触线; 滑石; 十二胺; 浮选

文章编号: 1004-0609(2022)-02-0545-10

中图分类号: TD923

文献标志码: A

引文格式: 蒋昊, 罗汇丰, 谢佳辉, 等. 十二胺对气泡与疏水性滑石表面三相接触线形成的影响[J]. 中国有色金属学报, 2022, 32(2): 545-554. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-36648

JIANG Hao, LUO Hui-feng, XIE Jia-hui, et al. Effect of dodecylamine on formation of three-phase contact line between bubbles and hydrophobic talc surface[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2022, 32(2): 545-554. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-36648

浮选是利用矿物表面物理化学性质差异, 特别是表面润湿性, 采用添加特定浮选药剂的方法来扩大矿物间润湿性的差别, 在固-液-气三相界面, 有选择性地富集原矿中一种或几种目的矿物, 从而达到与脉石矿物分离的一种选别技术^[1-2]。矿浆中的气泡-颗粒之间的相互作用是泡沫浮选的基本过程。浮选过程中, 气泡与矿物颗粒之间的黏附过程可分为三个阶段: 1) 颗粒-气泡间液膜薄化至临界厚度; 2) 气泡液膜破裂和液/气/固三相接触线(TPC)的形成; 3) TPC 的扩展与稳定^[2-4]。

矿物与气泡表面间的液膜破裂是形成三相接触线的必要条件。液膜的稳定性由液膜间多种作用力共同决定, 其主要影响因素有: 1) 矿物与气泡表

面液膜的吸附状态; 2) 溶液的组成与浓度; 3) 矿物的亲/疏水性; 4) 矿物的粗糙度等。而其中最重要的影响因素是矿物的亲/疏水性^[5-7]。三相接触线形成时间(t_{TPC})为气泡碰撞-反弹所需时间(t_B)与液膜排液时间(t_D)之和。 t_B 主要受到表面活性剂的组成与浓度的影响, 一般而言, 表面活性剂浓度越高, 气泡在溶液中的运动速度越低, 气泡与矿物的碰撞-反弹过程经历的时间越短, 即 t_B 越小^[3-4, 8-10]。而 t_D 根据矿物的亲/疏水性有较大差异: 当矿物具有很强的疏水性时, t_D 往往很短; 而当矿物呈现出较好的亲水性时, t_D 明显更长, 甚至不形成 TPC(如云母在纯水中便不形成 TPC)^[11-12]。加入特定表面活性剂后, 可以改变矿物表面的亲/疏水性, 进而改

变矿物与气泡间的相互作用。同时,气泡与矿物间液膜的稳定性也会因为表面活性剂在气-液界面及固-液界面的吸附状态的改变而改变^[13-14]。疏水性矿物进入液相时,其表面会夹带微纳米气泡,且矿物表面粗糙度越高,浸入液相时夹带的空气也越多,众多实验表明空气的存在和空气在疏水矿物表面的再分布促进了 TPC 的形成和气泡的附着^[5, 15-16]。滑石是一种典型的层状镁硅酸盐矿物,理论化学组成为 $MgO(31.72\%)$ 、 $SiO_2(64.12\%)$ 、 $H_2O(4.76\%)$ 。滑石的晶体结构是典型的 TOT 型层状结构,四面体化学成分比较稳定,类质同象代替现象比较少,层间电荷少,层间无大阳离子存在,层与层之间靠弱的范德华力连接^[17-18]。滑石极易沿着双层之间解离,暴露出(001)解离面,但这些面内部由其中的—Si—O—Si—连接而成,表面为非极性,表现出天然疏水性^[19-20]。此外,滑石的解离面平整,能够消除表面粗糙度对实验结果的影响。本文利用气泡碰撞测试、接触角测量以及 AFM 分析系统研究了十二胺(DDA)对气泡和疏水性滑石表面之间 TPC 形成的影响及作用机理,为矿物的浮选分离提供理论基础。

1 实验

1.1 材料和试剂

本文以滑石作为研究对象,滑石矿样取自辽宁宽甸。纯矿物试样经人工破碎、手选除杂、陶瓷球磨矿,干式筛分等工序后,取 $37\sim74\ \mu m$ 粒级作为试验试样。对单矿物进行化学元素以及 XRD 分析(见图 1 和表 1),结果显示其纯度在 99% 以上,满足试验要求。用作浮选实验捕收剂的十二胺(DDA)购于中国上海国药化学试剂有限公司。DDA 的分析纯度为 99.9%。在所有过程中均使用去离子水。

表 1 矿物的化学成分分析结果

Table 1 Mineral chemical composition analysis results (mass fraction, %)

Al_2O_3	SiO_2	MgO	H_2O
0.84	61.61	30.82	6.65

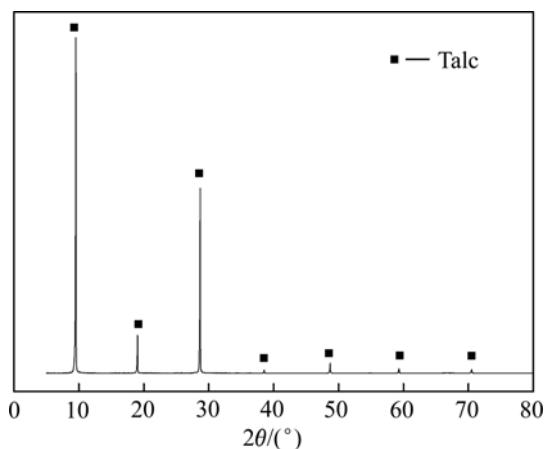


图 1 滑石的 X 射线衍射分析

Fig. 1 XRD analysis pattern of talc

1.2 气泡碰撞测试

本文用于测定气泡与矿物平面(液面)碰撞-反弹过程及 t_{TPC} 定量测定的装置如图 2 所示。主要由以下部分组成: 1) 内部横截面为 $120\ mm \times 60\ mm$ 的方形玻璃槽; 2) 出泡口内径为 $0.2\ mm$ 的毛细管, 用于产生单个气泡; 3) 可精确控制充气量的微型蠕动泵; 4) 配置显微镜头(Olympus SZ61)的高速摄影仪(Y3M, Integrated Design Tools, America); 5) 光源及滤光板, 保证光线充足, 布光均匀; 6) 安装有图像处理软件(Image J)的计算机, 用于图像处理及计算。高速摄影仪以 2000 帧/s(即两张照片的时间间隔为 2 ms)的速度对气泡进行拍摄记录, 每次实验时保持充气速率一致, 使毛细管口仅产生单个气泡, 保证上升气泡不受到新产生气泡的影响。

气泡与毛细管口分离后会立即向上运动, 当气泡与液面接触碰撞后反弹, 经历若干次碰撞-反弹过程后气泡将在液面下静止一段时间, 直至气泡破裂。

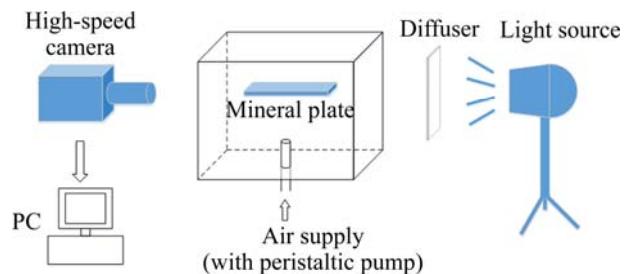


图 2 实验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of experimental device

定义气泡第一次与液面接触碰撞的时刻为时间原点, 即此时 $t=0$; 气泡碰撞-反弹后至动能耗散静止不动(碰撞气泡顶部不再离开液面)时所经历的时间定义为碰撞-反弹时间 t_B ; 气泡由静止至破裂消失的时间为排液时间 t_D , 气泡破裂时间为 t_p , 则 t_p 为 t_B 和 t_D 之和, 即 $t_p=t_B+t_D$ 。

气泡与疏水矿物表面的接触碰撞和气泡与自由液面的接触碰撞类似, 气泡与疏水矿物表面接触碰撞后反弹, 若干次碰撞-反弹后气泡将在疏水矿物表面静止一段时间, 随后气泡在疏水矿物表面发生黏附, 即三相接触线(TPC)形成。三相接触线形成时间 t_{TPC} 为气泡反弹时间 t_B 与液膜排液时间 t_D 之和, 即 $t_{TPC}=t_B+t_D$ 。

滑石薄片在每次测定前先用双面胶撕去表面层, 使新鲜表面暴露。实验中毛细管口距离液面(矿物表面)距离均为 15 mm。每个条件下重复测量 10 次, 最终结果取平均值。测量示意图如图 3。值得注意的是, Image J 软件是以气泡形心坐标进行速度测定的, 尽管气泡不再离开液面(矿物)表面, 即气泡已经静止, 气泡仍然存在一定的形变过程, 速率不为零。

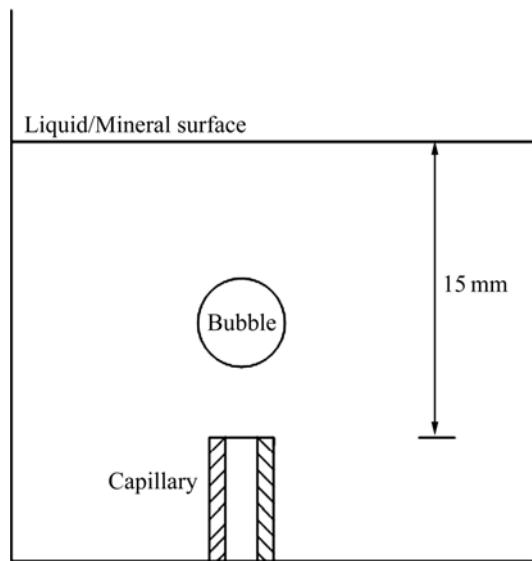


图 3 气泡破裂时间测定示意图

Fig. 3 Schematic diagram of bubble rupture time

1.3 接触角测量

使用 JY-82C 型接触角测量仪, 通过悬滴法对不同条件下滑石样品的接触角进行测量。使用胶带将矿物样品的旧表面剥离, 得到新鲜解离的滑石表

面。将滑石样品浸入装有一定浓度试剂的 100 mL 烧杯中 30 min, 使滑石表面和试剂彼此充分反应。然后, 将滑石样品洗涤三次以除去残留的表面杂质, 用氮气吹干。最后, 通过悬滴法测量接触角。每个试剂浓度在相同实验条件下重复至少 3 次, 并将平均值计算为最终结果。

1.4 原子力显微镜(AFM)成像

使用空气中的轻敲模式 AFM(NanoScope V, Bruker)对疏水性滑石表面中分子的吸附形态进行成像。在测量中使用具有约 1.5 Hz 的共振扫描频率的硅探针(RTESP-300 型)。所有图像($1.5 \mu\text{m} \times 1.5 \mu\text{m}$)均通过多项式函数展平, 以消除由于压电扫描管的移动而引起的图像弯曲和变形的影响。

首先, 将刚剥离的滑石浸入一定浓度的溶液中 30 min。然后, 用镊子取出浸没的滑石样品, 用去离子水冲洗残留在样品表面上的试剂, 并用高纯度氮气吹干, 进行吸附形态试验。AFM 实验室温度保持在 20 °C。

2 结果与讨论

2.1 气泡碰撞实验

2.1.1 气泡在去离子水中与自由液面和滑石的碰撞

利用高速摄影仪对气泡的运动过程进行记录。图 4 和 5 所示分别为去离子水中气泡与自由液面和滑石表面的碰撞过程。

气泡与界面的碰撞(反弹或附着)是中间液体薄膜变薄与气泡运动相关的动能转换为变形气泡和界面的表面能(在流体界面的情况下)之间竞争的

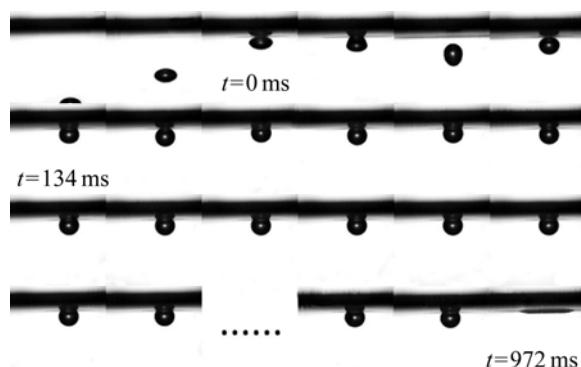


图 4 去离子水中气泡与自由液面碰撞过程

Fig. 4 Process of bubble colliding with free surface in deionized water

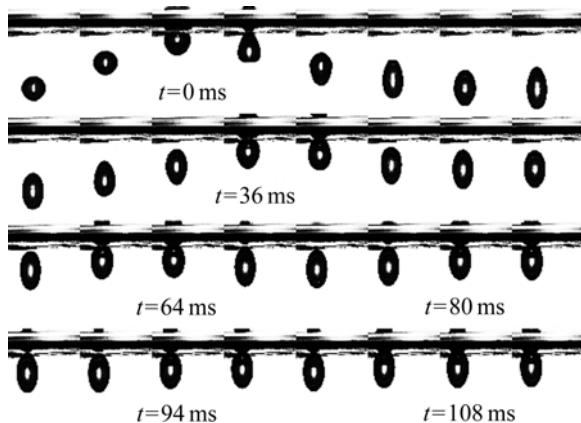


图5 去离子水中气泡与滑石碰撞过程

Fig. 5 Process of bubble colliding with talc in deionized water

结果。如果在达到临界破裂厚度之前,薄膜排水比能量转换快,则薄膜可能破裂,否则气泡会反弹。在上升的气泡碰撞期间,会发生与气泡运动相关的能量耗散,这将导致气泡形变与随后的每个碰撞反弹周期的幅度减小。

气泡与自由液面碰撞后其上升速度逐渐减小至零,而后在液面下发生反弹,远离自由液面,在流体阻力的作用下速度再次减为零,再次上升。经过多次碰撞-反弹后停留在液面,直至气泡破裂。从图4可以看出, $t=0$ 为气泡第一次碰撞到液面(太物表面)的时刻。气泡经过 134 ms 后,与自由液面的碰撞后不再反弹;经过 838 ms 后,气泡在液面下发生破裂,气泡破裂时间为 972 ms。由图5可以看出,气泡与滑石表面经过 6 次碰撞反弹后, $t=108$ ms 时在滑石表面发生黏附,形成了三相接触线。

去离子水中气泡与自由液面和滑石表面碰撞-反弹过程的上升速率变化如图6和7所示。从图6和7中可以看出,气泡每次与自由液面的碰撞反弹速度都比滑石的碰撞反弹速度小,说明气泡在自由液面体系中碰撞时的动能损耗越多。这是因为自由液面容易变形,体系的动能不仅要转换为气泡变形的表面能,还要转换为气-液界面变形的表面能。

气泡在去离子水中与自由液面碰撞和与滑石碰撞的碰撞次数分别为 7 次和 5 次。气泡与滑石碰撞时,液膜排液时间为零,即气泡与疏水性滑石之间的液膜迅速排开,气泡在动能尚未完全耗散时就已经黏附在滑石表面形成三相接触线,这是因为液膜排水速度比能量转换(动能转换为气泡形变的自由能)速度快,液膜在未达到临界破裂厚度时就发生

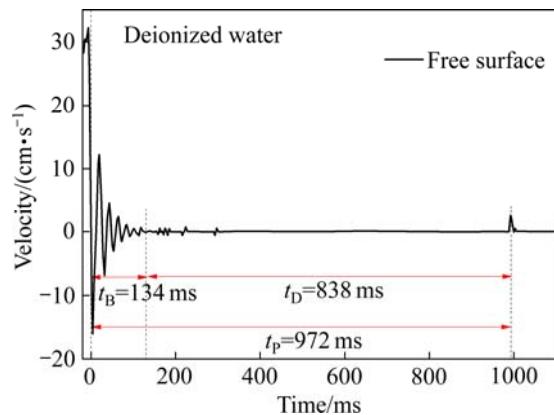


图6 去离子水中气泡与自由液面碰撞过程的速率变化

Fig. 6 Variation of bubble velocity in colliding with free surface in deionized water

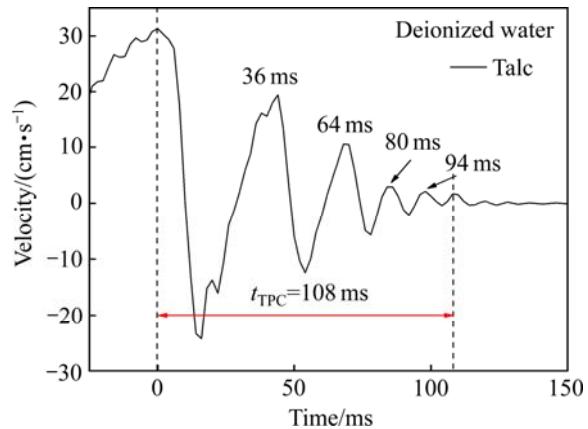


图7 去离子水中气泡与滑石表面碰撞过程的速率变化

Fig. 7 Variation of bubble velocity in colliding with talc in deionized water

破裂,此时气泡主要受到滑石疏水引力的作用。

2.1.2 气泡在不同浓度 DDA 溶液中与自由液面的碰撞

气泡在不同浓度 DDA 溶液中的破裂时间如图8所示,实验数据为测量十次取平均值得到的结果。

从图8可以看出,气泡在去离子水中与液面碰撞时破裂时间为 0.972 s,在加入表面活性剂 DDA 后,气泡破裂时间明显延长,当 DDA 浓度由 5×10^{-6} mol/L 增大到 1×10^{-3} mol/L 时,气泡的破裂时间由 2.772 s 增加到了 8.91 s。气泡破裂时间随着 DDA 浓度的升高而增加。

气泡破裂时间的关键在于液膜排液时间。在含有 DDA 的溶液中,DDA 会在上升气泡表面形成不均匀吸附,气泡底部吸附的 DDA 分子总是大于气泡顶部吸附的 DDA 分子。当气泡接近液面时,气

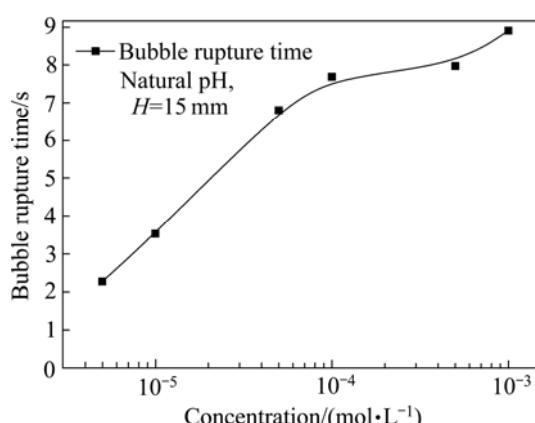


图 8 不同浓度 DDA 溶液中气泡破裂时间

Fig. 8 Bubble rupture time in different concentration of DDA solutions

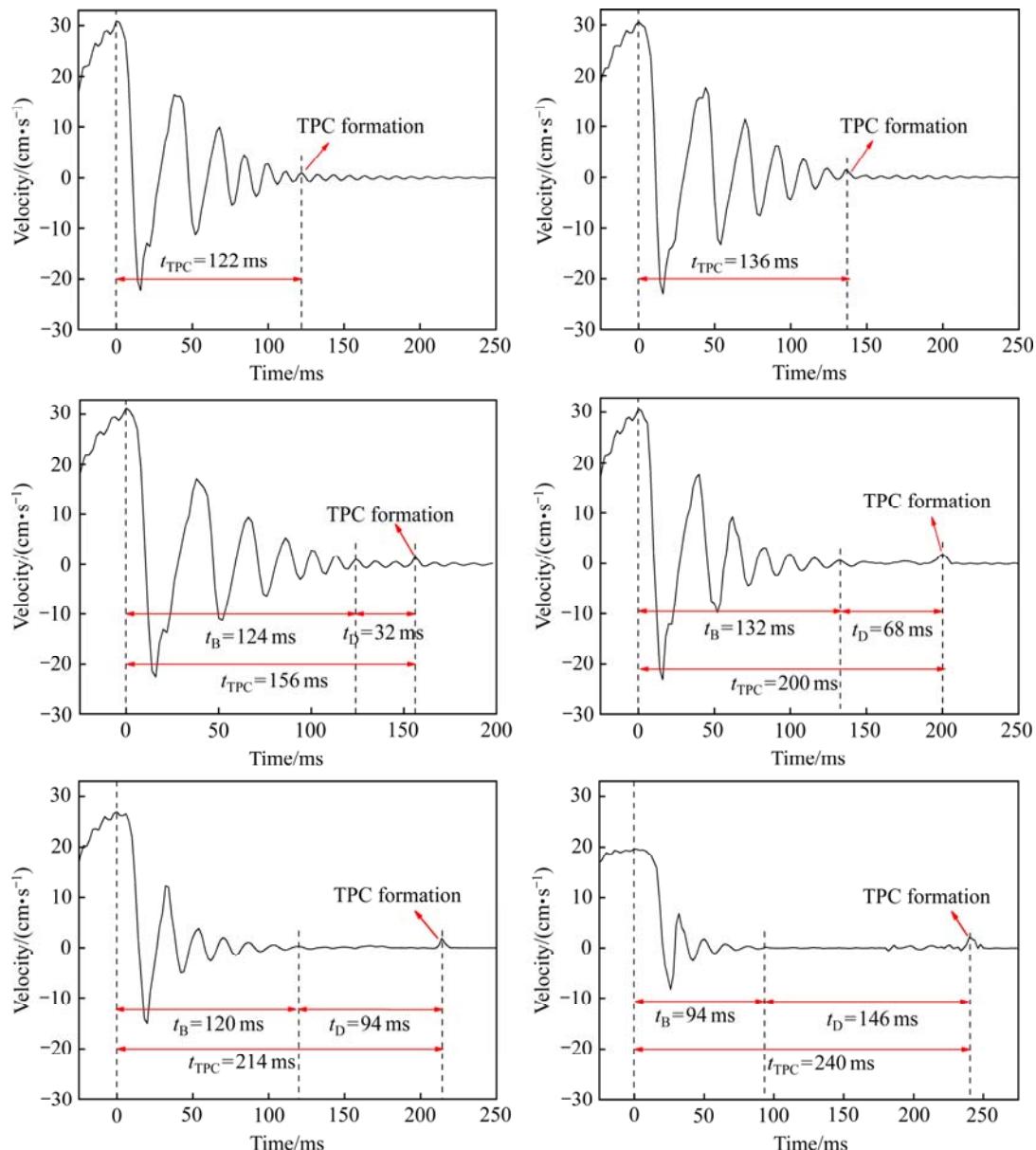


图 9 DDA 溶液中气泡与滑石碰撞-反弹过程的上升速率变化

Fig. 9 Variation of bubble rising velocity during bubble collision-rebound process with talc in solution with different DDA concentrations: (a) 5×10^{-6} mol/L; (b) 1×10^{-5} mol/L; (c) 5×10^{-5} mol/L; (d) 1×10^{-4} mol/L; (e) 5×10^{-4} mol/L; (f) 1×10^{-3} mol/L

泡运动和液面变形会引起表面张力梯度变化, 这种变化会导致 DDA 分子向气泡顶部移动, 即与泡沫膜(气泡与液面间的薄层液相)间流体的流动方向相反, 这增强了泡沫膜的稳定性, 减弱了气泡的形变, 延长了液膜排液时间, 气泡破裂时间因此增大。随着 DDA 浓度的增大, 泡沫膜的稳定性增强^[22], 气泡破裂时间也随之延长。

2.1.3 气泡在不同浓度 DDA 溶液中与滑石表面的碰撞

气泡在不同浓度 DDA 溶液中与滑石碰撞-反弹过程的上升速率变化如图 9 所示。气泡与滑石作用的 t_B 、 t_D 及 t_{TPC} 如图所示。

从图 9 可以看出, 气泡在 DDA 溶液中经历数次碰撞-反弹后动能耗散并静止在滑石表面, 一段时间后形成三相接触线。当浓度低于 $1 \times 10^{-5} \text{ mol/L}$ 时, 气泡极易在滑石表面发生黏附, 气泡在动能未完全耗散的情况下即在滑石表面发生了黏附, 在该浓度范围内 $t_D=0$, $t_{TPC}=t_B$ 。当浓度高于 $1 \times 10^{-5} \text{ mol/L}$ 时, 液膜排液时间 t_D 随浓度的升高而增加。当 DDA 浓度超过 $1 \times 10^{-4} \text{ mol/L}$ 时, 气泡上升速率发生了明显变化, 由 $1 \times 10^{-4} \text{ mol/L}$ 时的 30 cm/s 下降为 $1 \times 10^{-3} \text{ mol/L}$ 时的 20 cm/s , 气泡的碰撞反弹时间也由 132 ms 下降为 94 ms , 但气泡在滑石表面形成 TPC 的时间反而随浓度的升高而延长, 说明 t_{TPC} 主要由气泡与滑石间液膜排液时间决定。

从图 10 可以看出, 随着浓度的升高, 泡沫膜的稳定性增强, 液膜排液时间增加。当浓度低于 $1 \times 10^{-5} \text{ mol/L}$ 时, 碰撞气泡的液膜排液时间为零, 气泡在动能仍未耗散时已经形成三相接触线, 说明低浓度下液膜极不稳定, 三相接触线的形成时间随着浓度升高略微增加, 这归因于气泡碰撞反弹时间的增加(实际上是反弹次数的增加), 气泡在去离子水中碰撞了 5 次后形成三相接触线, 但加入表面活性剂溶液后, 碰撞次数增加到了 6 次, 这是由于表面活性剂的加入减弱了气泡的形变, 增强了泡沫膜的稳定性, 气泡更不易破裂。当浓度介于 $1 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-4} \text{ mol/L}$ 时, 反弹次数不变, 反弹时间只发生了微弱的变化。随着浓度超过 $1 \times 10^{-4} \text{ mol/L}$ 时, 气泡的初始碰撞速度明显减少, 气泡碰撞反弹

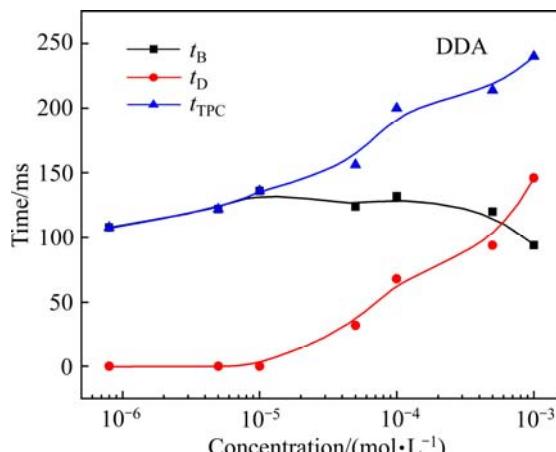


图 10 不同浓度 DDA 溶液中滑石的 t_{TPC} 、 t_B 及 t_D
Fig. 10 t_{TPC} , t_B and t_D of talc in solution with different DDA concentrations

次数与反弹时间也减少。在全浓度范围内, 液膜排液时间和三相接触线形成时间随着浓度的升高而增加。

2.2 滑石的疏水性实验

滑石是具有天然疏水性的硅酸盐矿物, 在去离子水中的接触角约为 67° 。图 11 所示为不同 DDA 浓度对滑石表面接触角的影响。由图 11 可看出, 随着 DDA 浓度的升高, 接触角逐渐增大, 滑石的疏水性逐渐增强。当 DDA 浓度为 $5 \times 10^{-4} \text{ mol/L}$ 时, 接触角达到最大值, 随后随着 DDA 浓度继续升高, 接触角反而出现略微下降。

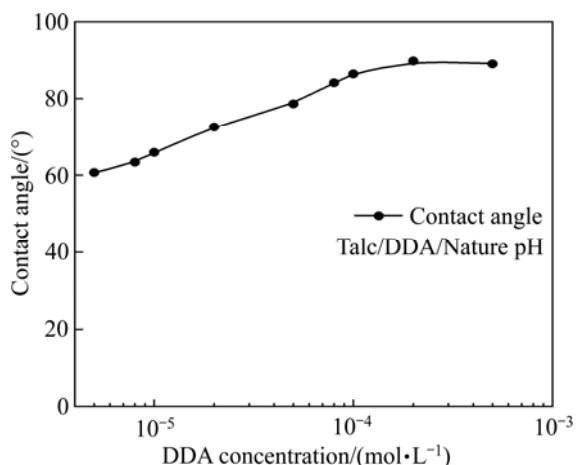


图 11 DDA 浓度对滑石接触角的影响

Fig. 11 Effect of DDA concentration on contact angles of talc

2.3 不同浓度 DDA 中的滑石表面形貌图

图 12 所示为 AFM 测得的不同 DDA 浓度下滑石表面形貌图($1.5 \mu\text{m} \times 1.5 \mu\text{m}$)和高度图。

由图 12(a) 可看出, 滑石的解离面比较完全, 表面相对平整, 其高度差小于 $\pm 0.24 \text{ nm}$ 。当 DDA 浓度为 $1 \times 10^{-5} \text{ mol/L}$ 时, DDA 与滑石表面相互作用十分微小, 呈现自然吸附状态, 吸附高度约为 1.9 nm 左右, 与 DDA 分子的理论长度吻合, 即当 DDA 浓度低时, DDA 在滑石表面形成单层吸附。当 DDA 浓度增加至 $1 \times 10^{-4} \text{ mol/L}$ 时, DDA 吸附更加紧密并开始出现约为 3.8 nm 的吸附高度, 表明此时开始形成了部分双分子层吸附。且随着 DDA 浓度的增加, 双层吸附的密度和面积显着增加, 如图 12(f) 所示。

从图 11 与 12 可以看出, DDA 分子吸附在滑石

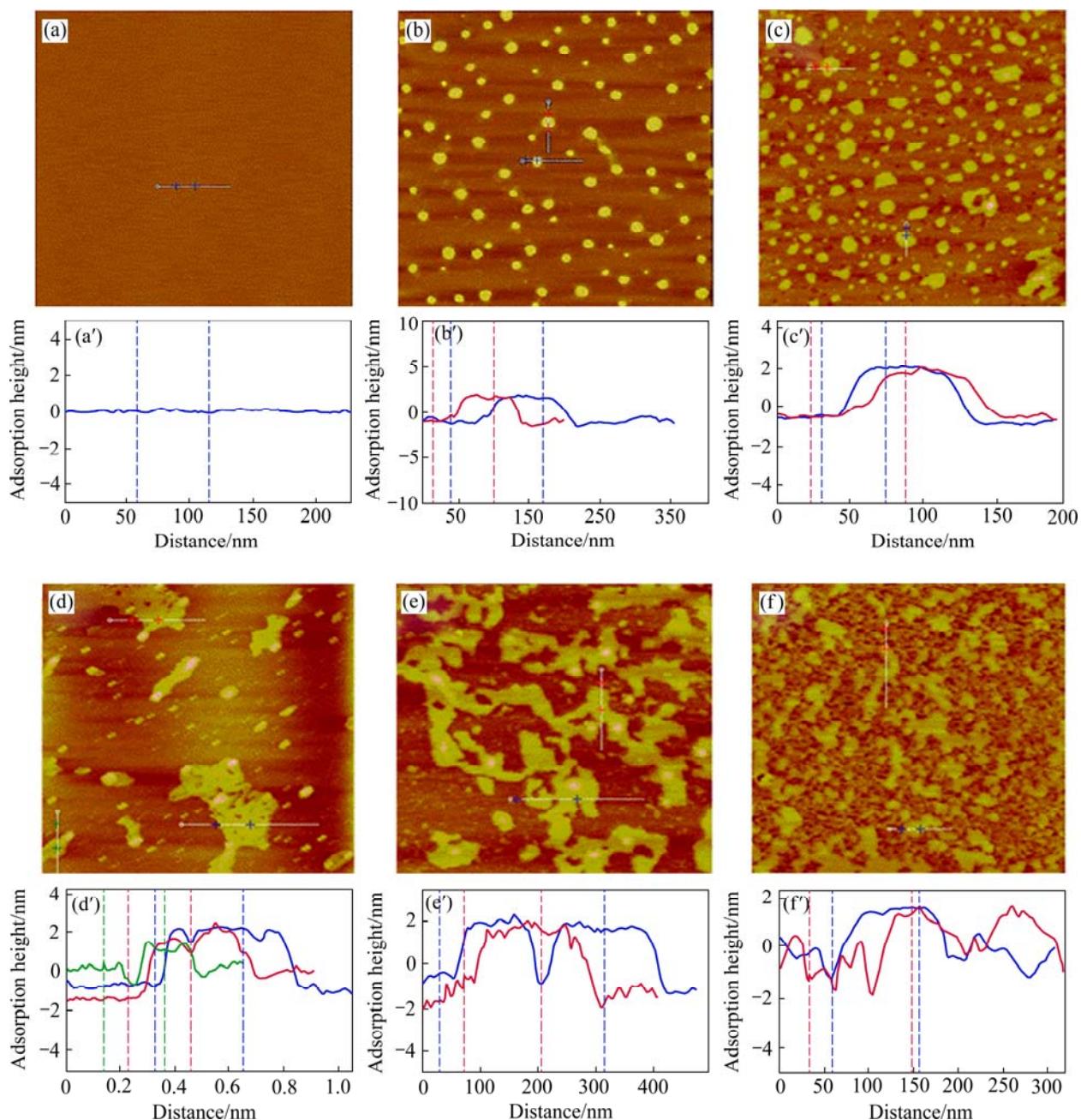


图 12 不同浓度 DDA 在滑石表面的吸附形貌图和吸附层高度

Fig. 12 Adsorption morphologies((a)–(f)) and adsorption height profiles((a')–(f')) of DDA on talc surface: (a), (a') Talc surface without DDA; (b), (b') 1×10^{-5} mol/L; (c), (c') 5×10^{-5} mol/L; (d), (d') 1×10^{-4} mol/L; (e), (e') 5×10^{-4} mol/L; (f), (f') 1×10^{-3} mol/L

表面, 改变了滑石的表面疏水性。已有研究表明, 矿物的最佳吸附浓度是药剂刚好以单分子层铺满整个表面, 此时疏水性最好^[21]。DDA 浓度为 5×10^{-4} mol/L 左右时, 滑石的疏水性最好, 随后随着 DDA 浓度的增加, DDA 双分子层吸附增多, 滑石的疏水性反而略微下降。

2.4 TPC 的影响因素分析

一般而言, 矿物表面越疏水, 矿物和气泡间的疏水吸引力越强, 气泡与矿物间的液膜越不稳定, 越容易破裂, 即 t_{TPC} 越短^[22–27]。对于疏水性矿物滑石而言, 随着 DDA 浓度的升高, 滑石的疏水性增强, 但 t_{TPC} 反而增加, 其原因如下。

疏水性滑石在进入液相中时,会带入一些气泡,这些微纳米气泡附着在滑石表面^[22]。当气泡接近滑石时,气泡与滑石间的液膜实际为泡沫膜(气-液-气),即气泡与滑石表面微纳米气泡之间局部形成的薄膜,如图13(a)所示。而非气泡与滑石表面之间的润湿膜(气-液-固),如图13(b)所示。气泡与滑石表面微纳米气泡之间桥接,泡沫膜破裂,随即在滑石表面形成TPC。

从图8和10可以看出,DDA能够增强气泡与滑石表面微纳米气泡之间泡沫膜的稳定性,且随着DDA浓度的升高,泡沫膜的稳定性增强。从图10和11可以看出,随着DDA浓度的增加,疏水性加强,当DDA浓度超过 1×10^{-4} mol/L时,滑石的疏水性几乎恒定。液膜的稳定性是气泡与微纳米气泡之间的相互作用与滑石的疏水作用共同作用的结果,在DDA溶液中,气泡在滑石表面接触碰撞的 t_{TPC} 随DDA浓度升高而增加,说明气泡与滑石表面微纳米气泡之间的相互作用对TPC的影响要大于疏水性对TPC的影响。

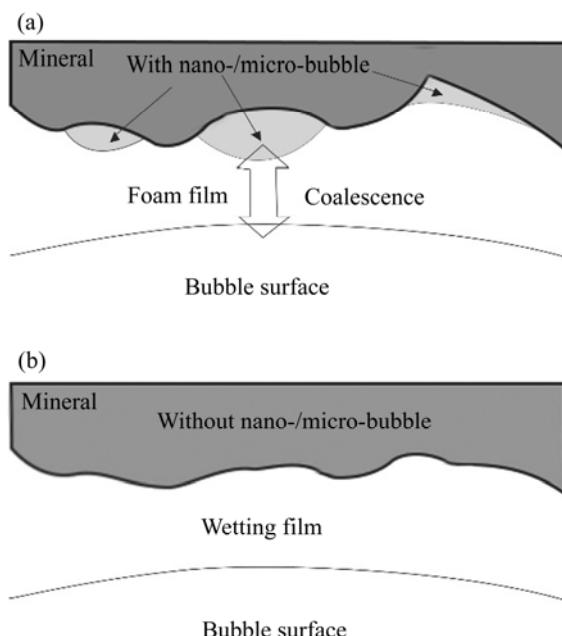


图13 液膜在有无微纳米气泡情形中的存在形式
Fig. 13 Form of liquid film in presence(a) and absence(b) of nano-/micro-bubble

3 结论

1) 气泡稳定性与DDA浓度有关,DDA浓度越

高,气泡破裂时间越长,气泡越稳定。

2) 气泡在滑石表面形成TPC的时间(t_{TPC})由气泡与滑石碰撞-反弹过程所经历的时间(t_B)及液膜排液时间(t_D)共同决定,即 $t_{TPC}=t_B+t_D$ 。在低浓度DDA溶液中, t_B 随DDA浓度升高变化不大,当浓度超过 1×10^{-4} mol/L时, t_B 随着浓度的升高而增加。 t_D 随着DDA浓度的升高而增加。气泡与滑石表面碰撞时, t_{TPC} 随着浓度的升高而增加。

3) 气泡与滑石间液膜排液时间(t_D)取决于液膜的稳定性,液膜稳定性越强,液膜排液时间越长。一方面,随着DDA浓度的升高,滑石表面疏水性增强,疏水引力增加,液膜稳定性减弱;另一方面,由于疏水性滑石表面存在微纳米气泡,且气泡与微纳米气泡间液膜的稳定性随着DDA浓度的升高而增强。因此,液膜的稳定性是疏水作用与微纳米气泡共同作用的结果。

REFERENCES

- WANG Dian-zuo, HU Yue-hua, LIN Yun. Solution chemistry of flotation[J]. Metallic Ore Dressing Abroad, 1990, 27(11): 1-7, 17.
- RALSTON J. Thin films and froth flotation[J]. Advances in Colloid and Interface Science, 1983, 19(1/2): 1-26.
- KOWALCZUK P B, ZAWALA J. A relationship between time of three-phase contact formation and flotation kinetics of naturally hydrophobic solids[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2016, 506: 371-377.
- KOWALCZUK P B, ZAWALA J, KOSIOR D, et al. Three-phase contact formation and flotation of highly hydrophobic polytetrafluoroethylene in the presence of increased dose of frothers[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2016, 55(3): 839-843.
- KOSIOR D, ZAWALA J, MALYSA K. When and how α -terpineol and n-octanol can inhibit the bubble attachment to hydrophobic surfaces[J]. Physicochemical Problems of Mineral Processing, 2011, 47: 169-182.
- ALBIJANIC B, OZDEMIR O, HAMPTON M A, et al. Fundamental aspects of bubble-particle attachment mechanism in flotation separation[J]. Minerals Engineering, 2014, 65: 187-195.

- [7] CHEN Quan-yuan, ZHANG Jing-sheng, WANG Dian-zuo. New progress in the study of bubble and particle interaction[J]. *Metallic Ore Dressing Abroad*, 2001, 38(2): 17–19.
- [8] MALYSA K, KRASOWSKA M, KRZAN M. Influence of surface active substances on bubble motion and collision with various interfaces[J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2005, 114/115: 205–225.
- [9] KOSIOR D, ZAWALA J, NIECIKOWSKA A, et al. Influence of non-ionic and ionic surfactants on kinetics of the bubble attachment to hydrophilic and hydrophobic solids[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2015, 470: 333–341.
- [10] KOSIOR D, ZAWALA J, KRASOWSKA M, et al. Influence of n-octanol and α -terpineol on thin film stability and bubble attachment to hydrophobic surface[J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2013, 15(7): 2586–2595.
- [11] NIECIKOWSKA A, KRASOWSKA M, RALSTON J, et al. Role of surface charge and hydrophobicity in the three-phase contact formation and wetting film stability under dynamic conditions[J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2012, 116(4): 3071–3078.
- [12] WANG W, ZHOU Z, NANDAKUMAR K, et al. An induction time model for the attachment of an air bubble to a hydrophobic sphere in aqueous solutions[J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2005, 75(1/2): 69–82.
- [13] MALYSA K, KRASOWSKA M, KRZAN M. Influence of surface active substances on bubble motion and collision with various interfaces[J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2005, 114/115: 205–225.
- [14] KOSIOR D, ZAWALA J, NIECIKOWSKA A, et al. Influence of non-ionic and ionic surfactants on kinetics of the bubble attachment to hydrophilic and hydrophobic solids[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2015, 470: 333–341.
- [15] KRASOWSKA M, ZAWALA J, MALYSA K. Air at hydrophobic surfaces and kinetics of three phase contact formation[J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2009, 147/148: 155–169.
- [16] KRASOWSKA M, KRASTEV R, ROGALSKI M, et al. Air-facilitated three-phase contact formation at hydrophobic solid surfaces under dynamic conditions[J]. *Langmuir: the ACS Journal of Surface and Colloids*, 2007, 23(2): 549–557.
- [17] 戴子林, 高丽霞, 李桂英, 等. 滑石的矿物结构与浮选性能[J]. *金属矿山*, 2018(2): 1–6.
- [18] DAI Zi-lin, GAO Li-xia, LI Gui-ying, et al. Mineral structure and flotation performance of talc[J]. *Metal Mine*, 2018(2): 1–6.
- [19] YAN L J, MASLIYAH J H, XU Z H. Interaction of divalent cations with basal planes and edge surfaces of phyllosilicate minerals: Muscovite and talc[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2013, 404: 183–191.
- [20] LIANG Yong-zhong, XUE Wen-ya. Study on foam stability and flotation behavior of talc flotation[J]. *Non-metallic Mines*, 1994(4): 21–23.
- [21] ZHAO Shan-rong. *Crystallography and mineralogy*[M]. Higher Education Press, 2004.
- [22] ZHANG Ning-ning. Study on the interaction mechanism of alumina/silicon minerals-Bubbles and regulation of adhesion behavior in the flotation system[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2018.
- [23] EXEROWA D, KRUGLYAKOV P M. *Foam and foam films: Theory, experiment, application*[M]. Amsterdam: Elsevier, 1997.
- [24] STÖCKELHUBER K W. Stability and rupture of aqueous wetting films[J]. *The European Physical Journal E*, 2003, 12(3): 431–435.
- [25] SCHUBERT H. Nanobubbles, hydrophobic effect, heterocoagulation and hydrodynamics in flotation[J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2005, 78(1): 11–21.
- [26] ZAWALA J, KOSIOR D, MALYSA K. Formation and influence of the dynamic adsorption layer on kinetics of the rising bubble collisions with solution/gas and solution/solid interfaces[J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2015, 222: 765–778.
- [27] KRASOWSKA M, ZAWALA J, MALYSA K. Air at hydrophobic surfaces and kinetics of three phase contact formation[J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2009, 147/148: 155–169.

Effect of dodecylamine on formation of three-phase contact line between bubbles and hydrophobic talc surface

JIANG Hao, LUO Hui-feng, XIE Jia-hui, HAN Wen-ping

(School of Resource Processing and Bioengineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Forming a three-phase contact line (TPC) by contacting and colliding between bubbles and mineral particles is a very important step in the flotation process. The bubble collision test, contact angle measurement and atomic force microscopy (AFM) test were used to study the effect of dodecylamine (DDA) on the formation of TPC on bubbles and hydrophobic talc and its mechanism. The results show that talc can form TPC in both deionized water and DDA solution, and the TPC formation time (t_{TPC}) increases with the increase of DDA concentration. The formation time of three-phase contact line (t_{TPC}) between bubbles and hydrophobic talc surface is the sum of the required time for the collision and rebound of the bubbles and talc (t_B) and the liquid film drainage time (t_D) between the bubble and talc. The rupture of the liquid film between bubbles and minerals is the necessary condition for the formation of TPC, so the stability of the liquid film is very important to the formation of TPC. The more stable the liquid film, the longer t_D and longer t_{TPC} . The stability of the liquid film between bubbles and talc is determined by the hydrophobic force on the talc surface and the interaction force between the bubbles and the nano-/micro-bubbles on the talc surface. The hydrophobic force is gravitational force. As the concentration of DDA increases, the hydrophobicity of talc increases, which tends to weaken the stability of the liquid film. There is a repulsive force between bubbles and nano-/micro-bubbles. As the concentration of DDA increases, the stability of the liquid film increases.

Key words: three-phase contact; talc; dodecylamine; flotation

Received date: 2020-11-03; **Accepted date:** 2021-01-15

Corresponding author: JIANG Hao; Tel: +86-15367312226; E-mail: jianghao-1@126.com

(编辑 李艳红)