



Tween-80 对低品位碳酸锰矿的浮选增效作用

邹义坤^{1,2}, 陈 婷^{1,2}, 周 凤^{1,2}, 严春杰^{1,2}, 杨 祥¹, 葛 文¹

(1. 中国地质大学(武汉) 材料与化学学院, 武汉 430074;
2. 中国地质大学(武汉) 教育部纳米矿物材料及应用工程研究中心, 武汉 430074)

摘 要:以新型改性脂肪酸 Dd-21 为捕收剂,考察 Tween-80 对低品位碳酸锰矿浮选的增效作用。通过 Zeta 电位、液体表面张力、红外光谱及量子化学计算,研究 Tween-80 的增效机理。结果表明:Tween-80 能显著提高新型改性脂肪酸 Dd-21 对碳酸锰矿的捕收性能;当捕收剂 Dd-21 与 Tween-80 的质量比为 3:1 时,锰品位为 10.69% 的原矿,通过一次粗选工艺,浮选回收率为 84.17%,精矿品位达 16.32%。Tween-80 的加入使溶液的表面张力降低,促进 Dd-21 在碳酸锰矿表面的吸附,使矿物表面的动电位降低;Tween-80 和 Dd-21 在矿物表面产生了共吸附;Tween-80 分子具有较大的偶极矩,氧原子上集中了较多的负电荷。分子中酯基部分和长链脂肪烃部分能分别以氢键与水作用、以范德华力与 Dd-21 的链烃基作用,分别发挥“亲水端”和“亲油端”的作用,增大 Dd-21 在水中的溶解度。

关键词:碳酸锰;改性脂肪酸;浮选;Tween-80;增效作用

中图分类号 TD91

文献标志码: A

Synergistic effect of Tween-80 on flotation of low grade manganese carbonate

ZOU Yi-kun^{1,2}, CHEN Ting^{1,2}, ZHOU Feng^{1,2}, YAN Chun-jie^{1,2}, YANG Xiang¹, GE Wen¹

(1. Faculty of Materials Science and Chemistry, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;
2. Engineering Research Center of Nano-Geo Materials,
Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: The synergistic effect of Tween-80 on modified fatty acid collector Dd-21 was investigated considering the flotation of low grade manganese carbonate. The synergistic mechanism was studied by the surface tension test, Zeta potential test, FTIR spectroscopy and quantum calculation. A concentrate with 84.17% recovery rate and 16.32% manganese grade is obtained from the raw ore with 10.69% manganese through one rougher flotation when the mass ratio of Dd-21 to Tween-80 is 3:1. The addition of Tween-80 would reduce the surface tension, promote the adsorption of Dd-21 on the surface of ore and reduce the Zeta potential. The co-adsorption between collector and Tween-80 exists on the surface of manganese carbonate. The strong dipole is found in Tween-80 and the negative charge focuses on the oxygen atoms. The hydrogen bond between oxygen and water, van der Waals interaction between the carbon chain in Tween-80 and carbon chain in Dd-21 would account for the solubilization of Dd-21 in water.

Key words: manganese carbonate; modified fatty acid; flotation; Tween-80; synergistic effect

碳酸锰是我国锰矿资源的主要存在形式,分布在广西、湖南和贵州等地区,但品位较低,一般在 20%

以下^[1]。锰矿是重要的战略资源,在国民经济中占有重要的地位。因此,开展低品位碳酸锰矿的选矿实验

研究具有重要意义。浮选是实现低品位、细粒级碳酸锰矿富集的有效方法，浮选药剂的研发是其中的关键技术^[2-3]。现代浮选技术中，脂肪酸仍然是一类最基本的氧化矿浮选捕收剂。为了克服脂肪酸类捕收剂的不足，提高其浮选性能，研究者们开展了表面活性剂对脂肪酸增效作用的系列研究^[4-6]。如李冬莲^[7]、罗慧华等^[8]、刘三军等^[9]等通过系统研究发现，非离子型和阴离子型表面活性剂可以较好地改善羧酸类捕收剂的捕收性能，从而成功地将这些表面活性剂的增效作用运用于磷矿、铝土矿等矿物的浮选中，但是将改性脂肪酸应用于浮选低品位碳酸锰矿的研究仍鲜见报道。计算机技术的发展，使得量子化学计算成为了矿物浮选研究领域里的有力研究工具^[10-11]。表面活性剂的理论研究主要集中在阴离子型表面活性剂的计算^[12-13]。而对于非离子型表面活性剂的研究并不多见。

陈涛等^[14]对来自湖南凤凰-花垣地区的低品位碳酸锰矿的浮选进行了系统研究，研发了高效改性脂肪酸捕收剂 Dd-21。在该药剂的研制中，发现不同的表面活性剂对 Dd-21 具有不同的增效作用。其中，Tween-80 的增效作用最为明显。采用多种实验手段和量子化学计算研究 Tween-80 的增效作用，将有助于从分子层面了解其增效机制，为新型捕收剂的研发提供参考。本文作者将在前期研究基础上，考察 Tween-80 对改性脂肪酸捕收剂 Dd-21 的增效作用。

1 实验

1.1 实验矿样

实验样品来自湖南凤凰-花垣矿区，是典型的低品位难选碳酸锰矿。菱锰矿以细微粒不均匀嵌布，主要粒度范围为 2~160 μm。图 1 所示为低品位菱锰矿的 SEM 像。由图 1 可知，菱锰矿主要有两种分布形态。由图 1(a)可知，微细晶粒菱锰矿集合体呈条纹状分布，与石英互层；由图 1(b)可知，微细晶粒菱锰矿集合体呈豆夹状、团粒状分布在白云母中，晶粒间为白云母充填，并都有微晶黄铁矿星散分布。根据 X 射线衍射分析(XRD)，确定了主要矿物为菱锰矿、石英、白云母、钠长石、黄铁矿、石膏、软锰矿。原矿 X 射线荧光光谱分析(XRF)结果见表 1。从表 1 可以看出，矿石中锰的品位较低，仅为 10.69%，但是锰是矿石中的主要金属元素有一定的综合回收价值。矿物经手工挑选除杂，用钢锤锤碎并用密封式对辊破碎机破碎至 4000 μm，然后用颚式破碎机破碎至 841 μm 筛，过孔径 841 μm。再用棒磨机湿磨至 74 μm 组分达到 91%以上，过

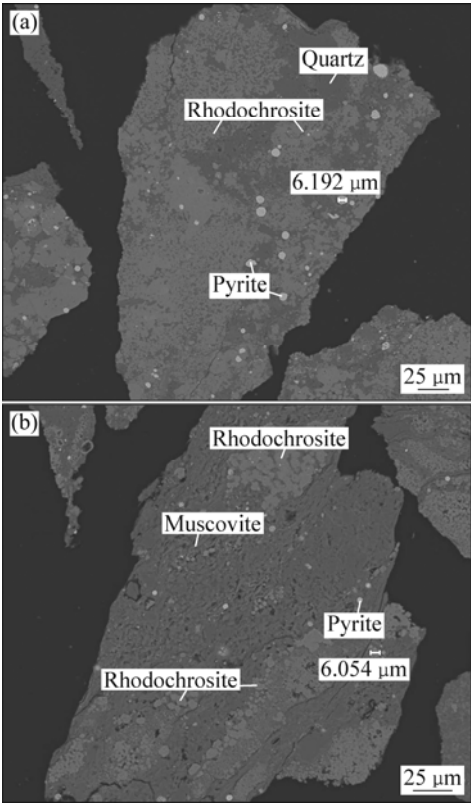


图 1 菱锰矿的 SEM 像
Fig. 1 SEM images of rhodochrosite particles: (a) Perthitic particle; (b) Podiform chromitite

表 1 锰矿 X 射线荧光光谱分析结果
Table 1 X-ray fluorescence chemical analysis of manganese ores (mass fraction, %)

MnO	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O
13.8	39.07	6.02	7.30	6.62	2.55	3.30

孔径 75 μm 筛，备用。

1.2 实验设备与仪器

本实验中主要实验设备如下：RK/FDIII0.5 型单槽浮选机(武汉洛克粉磨设备制造有限公司生产)，JK99B 型全自动张力仪(上海中晨数字技术设备有限公司生产)，Nano ZS90 纳米粒径电位分析仪，FW-4A 型压片机，Nicolet6700 型傅立叶变换红外光谱仪(美国赛默-飞世尔有限公司生产)，XPM-d120×3 三头研磨机，XPCd 250×150 型密封式对辊破碎机，RK/PEF 60X100 颚式破碎机，XRM-d160×200 棒磨机。

1.3 实验药剂

主要实验药剂如下：碳酸钠，工业级，配制 10%

水溶液(调节矿浆 pH=9);

水玻璃, 工业级, 高模数(2.9~3.4), 配制 10% 水溶液(用量为 1000 g/t);

增效剂, 分析纯, Tween-80;

捕收剂 Dd-21, 工业级, 自行研制的改性脂肪酸, 配制 2%(质量分数)水溶液(用量为 1250g/t)。

1.4 浮选实验

采用 0.5 L 的单槽浮选机进行浮选实验, 设定浮选机转速为 2000 r/min, 充气量为 0.20 m³/min, 浮选剂浓度为 20%(质量分数), 调浆时间为 3 min; 加入碳酸钠调节 pH 至 pH 为 9^[15], 搅拌 2 min 后加入抑制剂水玻璃溶液, 继续搅拌 3 min 后加入捕收剂, 立即加入少量松油作为起泡剂, 然后打开充气阀充气、刮泡、浮选 8 min, 得到的泡沫产品和槽内产品分别为锰矿精矿和锰矿尾矿, 分别过滤, 并在 50 °C 烘箱内干燥, 根据式(1)计算出选矿产品中 Mn 的回收率(R):

$$R = m_c c / [(m_c + m_t) f] \times 100\% \quad (1)$$

式中: m_c 和 m_t 分别为精矿和尾矿的质量, g; c 和 f 分别为精矿和原矿中 Mn 的品位, %。

1.5 表面张力测试

使用全自动张力仪对 100 mL 2% 捕收剂溶液进行测试, 测试方法采用白金板法。

1.6 Zeta 电位测试

采用电位分析仪进行测量, 设定仪器使用频率为

500 Hz。持续时间为 70 s, 测量温度控制在(25 ± 5) °C。

1.7 红外光谱分析

采用 Nicolet-6700 型傅立叶变换红外光谱仪进行红外光谱测试。

1.8 量子化学计算

Tween-80 的化学名称为油酸聚山梨酯。为计算方便, 采用图 2 所示的结构作为 Tween-80 的模型化合物。用密度泛函 B3LYP /6-31G(d) 方法对化合物进行几何构型全自由度优化, 得到 Tween-80 的优势构象(见图 3), 频率分析表明无虚频, 为势能面上的稳定驻点。

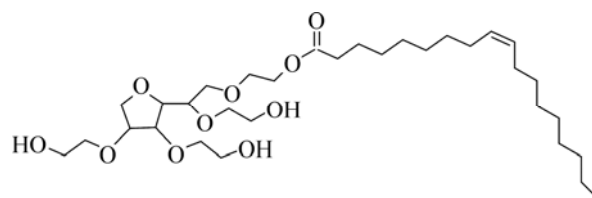


图 2 Tween-80 的模型化合物

Fig. 2 Model compound of Tween-80

2 结果与讨论

2.1 浮选实验

以 Dd-21 为捕收剂, 采用粗选工艺, 流程如图 4 所示, 对比了 Dd-21 与 Tween-80 的不同混合比及不同温度下浮选后的精矿品位和回收率。Dd-21 与 Tween-80 的质量比分别为 1:1、3:1、6:1、9:1 和 12:1,

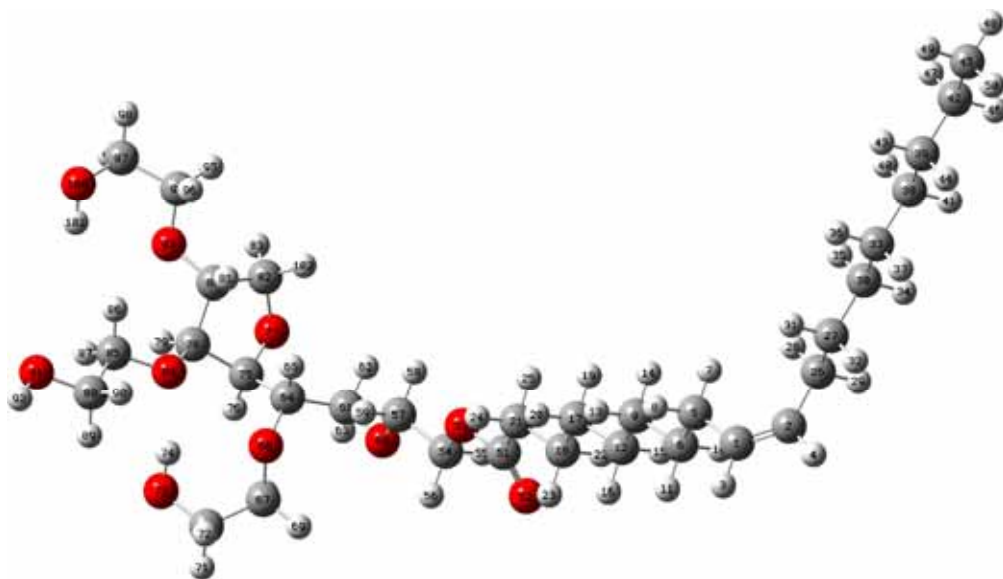


图 3 Tween-80 的优势构象

Fig. 3 Optimized conformation of Tween-80

浮选温度分别为 10、20 和 28^o。结果如图 5 和表 2 所示。从图 5 可以看出,随着捕收剂 Dd-21 与 Tween-80 质量比的增加,精矿的品位和回收率都呈现先上升后下降的趋势,且在质量比为 3:1 时达到最佳,能将锰矿品位从 10.69%提高到 16.32%,回收率达 84.17%。而在相同工艺条件下,单独使用 Dd-21 作为捕收剂时,精矿品位为 15.28%,回收率为 49.12%。可见,Tween-80 能显著提高新型改性脂肪酸 Dd-21 对碳酸锰矿的捕收性能。从表 2 可以看出,当捕收剂 Dd-21 与 Tween-80 按照 3:1 混合时,在不同温度下的浮选性能也有显著差异。当温度从 10^o升高到 28^o时,精矿的品位从 14.79%提高到 16.32%,相应的回收率则从 47.16%提高到 84.17%。在同一温度(28^o)下,由于 Tween-80 对 Dd-21 的增效作用,精矿的品位和回收率分别提高 1.04%和 35.05%。

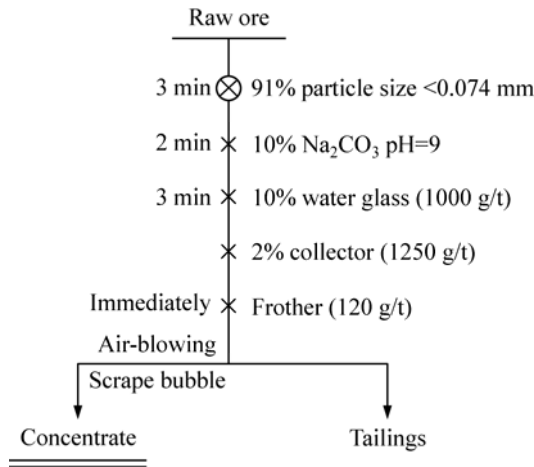


图 4 浮选流程图

Fig. 4 Flotation flow chart

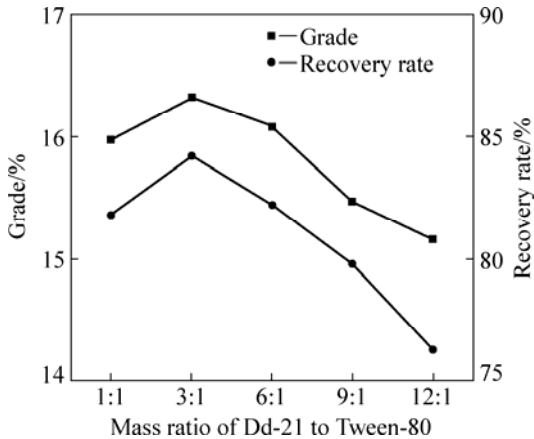


图 5 不同 Dd-21 与 Tween-80 质量比时浮选结果

Fig. 5 Flotation results at different mass ratios of Dd-21 to Tween-80

表 2 不同温度下浮选实验结果

Table 2 Results of flotation under different temperatures

Collector	Temperature/ Concentration	Recovery	
		grade/%	rate/%
Dd-21+Tween-80 (mass ratio of 3:1)	10	14.79	47.16
	20	16.13	54.09
	28	16.32	84.17
Dd-21	28	15.28	49.12
Sodium oleate	28	13.99	60.5

2.2 表面张力测试

捕收剂 Dd-21 与 Tween-80 不同质量比时捕收剂溶液的表 面 张 力 结 果 如 图 6 所 示。由 图 6 可 以 看 出,增 效 剂 Tween-80 的 含 量 增 加 时,溶 液 的 表 面 张 力 降 低。随 着 Tween-80 用 量 的 增 加,溶 液 的 表 面 张 力 快 速 降 低。溶 液 表 面 张 力 的 降 低 将 会 减 小 接 触 角,增 强 捕 收 剂 在 矿 物 表 面 的 润 湿、展 布 及 附 着 能 力,从 而 提 高 捕 收 剂 的 捕 收 能 力^[16-17]。前 期 研 究 成 果 已 经 表 明,非 离 子 型 表 面 活 性 剂 对 碳 酸 锰 矿 的 增 效 作 用 明 显 高 于 其 他 离 子 型 表 面 活 性 剂 的。Tween-80 作 为 一 种 非 离 子 型 表 面 活 性 剂,分 子 之 间 不 会 像 离 子 型 表 面 活 性 剂 之 间 有 电 荷 排 斥 作 用,因 而 可 以 更 多 地 在 界 面 上 吸 附。由 图 6 可 知,Dd-21 与 Tween-80 的 质 量 比 达 到 6:1 后,表 面 张 力 下 降 缓 慢,再 增 加 增 效 剂 的 质 量 比 增 效 效 果 并 不 明 显。

通过计算得到了不同比例捕收剂溶液的亲水亲油平衡值(HLB 值),结果见图 6。随着 Tween-80 用量的增加,溶液的 HLB 值增加。据报道^[18],HLB 值在 6~10 之间的表面活性剂经过激烈震荡后可以形成较稳定的

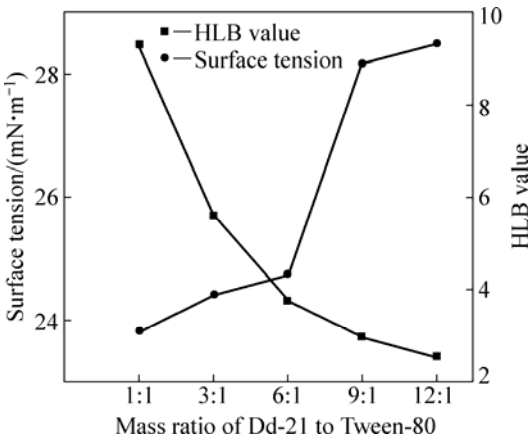


图 6 不同 Dd-21 与 Tween-10 质量比时捕收剂溶液表面张力和 HLB 值

Fig. 6 Surface tension and HLB value of collector solution at different mass ratios of Dd-21 to Tween-80

乳白色分散体,表面活性剂可以更好地在液-气界面上富集,形成较稳定的泡沫。稳定气泡的存在为气泡与矿粒提供了更多的碰撞机会,增加了有用矿粒的浮选几率^[19]。

综合表面张力和 HLB 值的分布情况,可知 Dd-21 与 Tween-80 的质量比为 3:1 时较合适,这与浮选实验的结果一致。

2.3 Zeta 电位测试

Dd-21 与 Tween-80 按照不同质量比混合得到捕收剂溶液后,与菱锰矿在不同 pH 作用下溶液的 Zeta 电位测定结果如图 7 所示。由图 7 可知,碱性范围内菱锰矿表面荷负电,此时并不利于阴离子捕收剂在矿物表面发生静电吸附,而菱锰矿与不同比例捕收剂作用后其电位进一步负移,可以推测捕收剂在菱锰矿表面还存在其他更主要的吸附方式,即化学吸附^[20]。分析产生这种现象的原因,可能是由于 Tween-80 的加入改善了捕收剂在水溶液中的分散性和溶解性,产生增溶作用,促使更多的捕收剂在矿物表面吸附,使得表面电荷更负;同时,Tween-80 也可能与捕收剂在矿物表面产生共吸附,使得表面负电荷升高^[21-22]。

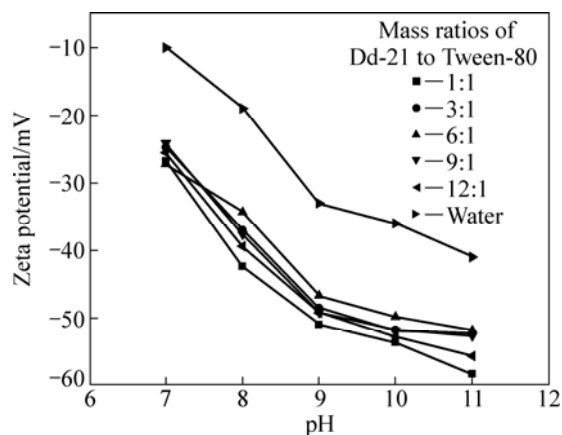


图 7 Dd-21 与 Tween-80 质量比对溶液 Zeta 电位的影响

Fig. 7 Impact of mass ratio of Dd-21 to Tween-80 on Zeta potential of solution at different pH values

2.4 红外光谱测试

菱锰矿、Dd-21 及 Dd-21-Tween-80 混合物的红外光谱如图 8 所示。菱锰矿的红外光谱由 CO_3^{2-} 振动模式及晶格振动模式构成, CO_3^{2-} 的内振动模式决定了其红外光谱的基本轮廓^[23]。由图 8 可知,797、870 和 1429 cm^{-1} 处为菱锰矿的特征吸收峰^[24];797 cm^{-1} 处吸收峰是 CO_3^{2-} 的面内弯曲振动峰;870 cm^{-1} 处为 CO_3^{2-} 面外弯曲振动峰; 1429 cm^{-1} 处是 CO_3^{2-} 的非对称伸缩

振动峰。曲线 3、4 和曲线 1 相比,在 1799 cm^{-1} 处出现的 C=O 伸缩振动峰有所增强,该峰对应 Dd-21 结构中的羰基。在曲线 4 中,2927 和 2850 cm^{-1} 处出现的 CH_3 —和— CH_2 —中 C—H 伸缩振动峰对应于 Dd-21 结构中的脂肪链烃。捕收剂 Dd-21 结构中的 COOH —极易与 Tween-80 结构中—OH 发生缔合。曲线 4 中峰的增强及新峰的出现可归因于这种缔合作用。这种缔合将有利于 Tween-80 与 Dd-21 在矿物表面的共吸附。这与离子型表面活性剂与捕收剂作用后得到的红外光谱类似^[25],也与本实验中 Zeta 电位测试结果中的推论一致。

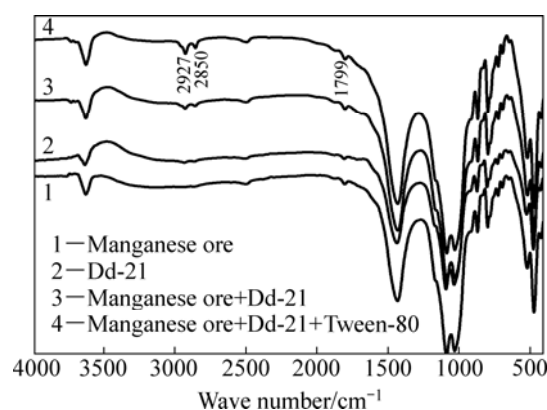


图 8 菱锰矿与捕收剂作用前后的红外光谱

Fig. 8 IR spectra of rhodochrosite untreated and treated by collector

2.5 量子化学计算

量子化学计算可以给出分子的微观空间结构参数、电性参数、偶极矩、轨道分布等信息,从理论层面对实验结果作补充。Tween-80 在 B3LYP/6-31G(d) 水平下优化的优势构象和原子编号见图 3,部分 Mulliken 电荷和轨道分布见表 3。

从空间构型上看,Tween-80 分子中长链脂肪烃部分的空间构型和油酸的优势构象极为相似(由于篇幅所限,没有列出油酸的优势构象),保证长链脂肪烃基部分作为“亲油端”能与捕收剂脂肪酸以范德华力相互作用,产生增溶作用。从电荷分布上看,Tween-80 分子虽然是非离子型表面活性剂,但是偶极矩较大,表明分子中正负电荷分布不均匀。氧原子上集中了大部分负电荷,这些氧原子上的负电荷为它们与水分子形成分子间氢键提供了有利条件,从而使 Tween-80 分子酯基部分具有“亲水性”。Tween-80 分子在空间构型和电荷部分上的特点都有利于增大捕收剂 Dd-21 在水中的溶解度,增加捕收剂与 Mn^{2+} 的接触机会,从而提高浮选效率。

表 3 部分 Mulliken 电荷和轨道分布

Table 3 Part of Mulliken charges and distribution of orbital

Atom	Charge	Orbital electron distribution	Atom	Charge	Orbital electron distribution
C(1)	0.010	[core]2s(0.96)2p(3.24)3p(0.01)	O(52)	−0.476	[core]2s(1.70)2p(4.88)3d(0.02)
C(2)	0.015	[core]2s(0.96)2p(3.24)3p(0.01)	O(53)	−0.478	[core]2s(1.62)2p(4.93)3d(0.01)
C(21)	−0.027	[core]2s(1.06)2p(3.48)3p(0.01)	O(60)	−0.479	[core]2s(1.61)2p(4.96)3p(0.01)3d(0.01)
C(51)	0.629	[core]2s(0.78)2p(2.34)3p(0.03)3d(0.01)	O(66)	−0.495	[core]2s(1.61)2p(4.97)3p(0.01)3d(0.01)
C(54)	0.287	[core]2s(1.04)2p(3.06)3p(0.01)3d(0.01)	O(73)	−0.228	[core]2s(1.68)2p(5.09)3p(0.01)3d(0.01)
C(57)	0.243	[core]2s(1.03)2p(3.07)3p(0.01)3d(0.01)	O(77)	−0.509	[core]2s(1.62)2p(4.95)3p(0.01)3d(0.01)
C(75)	0.224	[core]2s(0.97)2p(2.95)3p(0.02)3d(0.01)	O(84)	−0.513	[core]2s(1.61)2p(4.97)3p(0.01)
C(78)	0.287	[core]2s(0.96)2p(2.96)3p(0.01)3d(0.01)	O(91)	−0.225	[core]2s(1.69)2p(5.05)3d(0.01)
C(80)	0.232	[core]2sS(0.97)2p(2.98)3p(0.01)3d(0.01)	O(93)	−0.499	[core]2s(1.63)2p(4.94)3p(0.01)3d(0.01)
C(82)	0.267	[core]2s(1.02)2p(3.09)3p(0.01)3d(0.01)	O(100)	−0.228	[core]2s(1.69)2p(5.05)3p(0.01)3d(0.01)

3 结论

1) Tween-80 的加入使溶液的表面张力降低,促进了 Dd-21 在碳酸锰矿表面的吸附,使矿物表面的动电位降低。

2) 红外测试结果表明, Tween-80 和 Dd-21 在矿物表面产生了共吸附。

3) 量子化学计算显示, Tween-80 分子具有较大的偶极矩,氧原子上集中了较多的负电荷。分子中酯基部分和长链脂肪烃部分能分别以氢键和水作用、以范德华力与 Dd-21 的链烃基部分作用,分别发挥“亲水端”和“亲油端”的作用,增大 Dd-21 在水中的溶解度。

REFERENCES

[1] 曹学锋, 卢建安, 张 刚. 某低品位碳酸锰矿石浮选工艺研究[J]. 金属矿山, 2013, 443(5): 99–102.
CAO Xue-feng, LU Jian-an, ZHANG Gang. Flotation processing research of a low-grade manganese carbonate ore[J]. Metal Mine, 2013, 443(5): 99–102.

[2] JIANG Hao, SUN Zhong-cheng, XU Long-hua. A comparison study of the flotation and adsorption behaviors of diaspore and kaolinite with quaternary ammonium collectors[J]. Minerals Engineering, 2014, 65(10): 124–129.

[3] 许海峰, 钟 宏, 王 帅, 黄志强, 赵 刚. 一种新型环己烯羧酸的合成及其对萤石的浮选性能[J]. 中国有色金属学报, 2014, 24(11): 2935–2942.
XU Hai-feng, ZHONG Hong, WANG Shuai, HUANG Zhi-qiang, ZHAO Gang. Synthesis of novel cyclohexene carboxylic acid and flotation performance for fluorite ore[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2014, 24(11): 2935–2942.

[4] 冯其明, 张 晶, 卢毅屏, 欧乐明, 张国范. Tween80 在一水硬铝石浮选中的作用[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(11): 2228–2232.
FENG Qi-ming, ZHANG Jing, LU Yi-ping, OU Le-ming, ZHANG Guo-fan. Effect of Tween80 on flotation of diaspore[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(11): 2228–2232.

[5] HANUMANTHA R K, FORSSBERG K S E. Mixed collector systems in flotation[J]. Int Miner Process, 1997, 51(1): 67–79.

[6] 冯其明, 周清波, 张国范, 卢毅屏, 杨少燕. 六偏磷酸钠对方解石的抑制机理[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(2): 436–441.
FENG Qi-ming, ZHOU Qing-bo, ZHANG Guo-fan, LU Yi-ping, YANG Shao-yan. Inhibition mechanism of sodium hexametaphosphate on calcite[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(2): 436–441.

[7] 李冬莲. 脂肪酸增效剂在浮选中的应用[J]. 武汉化工学院学报, 1999, 21(3): 41–44.
LI Dong-lian. Application on fatty acid synergist in flotation[J]. Journal of Wuhan Institute of Chemical Technology, 1999, 21(3): 41–44.

[8] 罗惠华, 汤家焰, 李成秀, 刘飞燕, 王亚运, 陈炳炎, 池汝安. 不同表面活性剂对改性脂肪酸捕收剂的增效作用[J]. 武汉工程大学学报, 2013, 35(3): 30–33.
LUO Hui-hua, TANG Jia-yan, LI Cheng-xiu, LIU Fei-yan, WANG Ya-yun, CHEN Bing-yan, CHI Ru-an. Synergistic effect of surfactants on modified fatty acid collector[J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2013, 35(3): 30–33.

[9] 刘三军, 覃文庆, 刘 维, 王 军, 张雁生. 铝土矿浮选中 Tween-20 对油酸的增效机理[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(8): 2284–2289.
LIU San-jun, QIN Wen-qing, LIU Wei, WANG Jun, ZHANG Yan-sheng. Synergistic mechanism of Tween-20 to oleic acid in bauxite flotation[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(8): 2284–2289.

- [10] HUANG Z Q, ZHONG H, WANG S, XIA L Y, ZHAO G, LIU G Y. Gemini trisiloxane surfactant: Synthesis and flotation of aluminosilicate minerals[J]. *Minerals Engineering*, 2014, 56(2): 145–154.
- [11] JIANGY R, LI W, FENG R. Preparation and performance of 4-alkyl-4,4-bis(hydroxycarbamoyl) carboxylic acid for flotation separation of diaspore against aluminosilicates[J]. *Minerals Engineering*, 2011, 24(11): 1571–1579.
- [12] 曹绪龙, 吕凯, 崔晓红, 石静, 苑世领. 阴离子表面活性剂与阳离子的相互作用[J]. *物理化学学报* A, 2010, 26(7): 1959–1964.
- CAO Xu-long, LÜ Kai, CUI Xiao-hong, SHI Jing, YUAN Shi-ling. Interactions between anionic surfactants and cations[J]. *Acta Physico—Chemica Sinica A*, 2010, 26(7): 1959–1964.
- [13] 颜肖慈, 李学丰, 罗明道, 张高勇. 烷基硫酸盐表面张力的量子化学研究[J]. *武汉大学学报(理学版)*, 2002, 48(6): 655–658.
- YAN Xiao-ci, LI Xue-feng, LUO Ming-dao, ZHANG Gao-yong. Studies on surface tension of alkyl sulfate using a quantum chemistry method[J]. *Journal of Wuhan University (Natural Science Edition)*, 2002, 48(6): 655–658.
- [14] 陈涛, 梁欢, 周凤, 张飞霞, 徐晓晴, 严春杰, 葛文, 陈婷, 杨祥. 一种碳酸锰矿浮选剂及浮选方法: 中国, CN201310754287. 2[P]. 2013–12–31.
- CHEN Tao, LIANG Huan, ZHOU Feng, ZHANG Fei-xia, XU Xiao-qing, YAN Chun-jie, GE Wen, CHEN Ting, YANG Xiang. A kind of carbonate manganese ore flotation reagent and flotation method: China, CN201310754287. 2[P]. 2013–12–31.
- [15] ZHOU Feng, CHEN Tao, YAN Chun-jie, LIANG Huan, CHEN Ting, LI Dan, WANG Qun-ying. The flotation of low-grade manganese ore using a novel linoleate hydroxamic acid[J]. *Colloids and Surface A*, 2015, 466(2): 1–9.
- [16] FRANCISCO P, REGINA M D, TITO T, ARMANDO D. Determination of anionic surface active agents using silica coated magnetite nanoparticles modified with cationic surfactant aggregates[J]. *Journal of Chromatograph A*, 2013, 1299(7): 25–32.
- [17] ELIF C S, MEHMET M. Equilibrium and kinetic adsorption of drugs on bentonite of surface active agents effect[J]. *Applied Clay Science*, 2014, 101(11): 381–389.
- [18] 徐宝财. 活性剂的亲水亲油平衡值[J]. *北京轻工业学院学报*, 1991, 9(1): 30–33.
- XU Bao-chai. HLB value of surfactants[J]. *Beijing institute of light industry*, 1991, 9(1): 30–33.
- [19] 张祥峰, 孙伟. 阴阳离子混合捕收剂对异极矿的浮选作用及机理[J]. *中国有色金属学报*, 2014, 24(2): 499–504.
- ZHANG Xiang-feng, SUN Wei. Flotation behaviour and mechanism of hemimorphite in presence of mixed(cationic/anionic) collectors[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2014, 24(2): 499–504.
- [20] 胡岳华, 陈湘清, 王毓华. 磷酸盐对一水硬铝石和高岭石浮选的选择性作用[J]. *中国有色金属学报*, 2003, 13(1): 222–228.
- HU Yue-hua, CHEN Xiang-qing, WANG Yu-hua. Influence of phosphates on diaspore and kaolinite flotation[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2003, 13(1): 222–228.
- [21] 孙传尧, 印万忠. 硅酸盐矿物浮选原理[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 90–101.
- SUN Chua-nyao, YIN Wan-zhong. *Flotation Principles of Silicates*[M]. Beijing: Science Press, 2001: 90–101.
- [22] ISAO K, SUKEKUNI M, MISTUTOSHI N. Effects of type and physical properties of oil phase on oil-in-water emulsion droplet formation in straight-through microchannel emulsification[J]. *Experimental and CFD Studies, Langmuir*, 2005, 21(13): 5722–5730.
- [23] KOBAYASHI I, MUKATAKA S, NAKAJIMA M. Effects of type and physical properties of oil phase on oil-in-water emulsion droplet formation in straight-through microchannel emulsification, experimental and CFD studies[J]. *Langmuir*, 2005, 21(13): 5722–5730.
- [24] 闻轲. 物红外光谱学[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1989: 55–58.
- WEN Lu. *Mineral infrared spectroscopy*[M]. Chongqing: Chongqing University Press, 1989: 55–58.
- [25] HOU Qing-fen, LU Xian-cai, HU Bo-xing, SHEN Jian. Adsorption behaviour of Tween-80 on graphite[J]. *Adsorption Science and Technology*, 2005, 23(1): 27–36.

(编辑 龙怀中)