Application of Surfactant in Leaching Mining

表面活性剂在溶浸采矿中的应用

艾纯明　齐消寒　尹升华　著

中国矿业大学出版社
China University of Mining and Technology Press

表面活性剂在溶浸采矿中的应用

艾纯明　齐消寒　尹升华　著

常州大学图书馆
藏书章

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

在溶浸采矿中，矿石与溶液发生有效接触是实现矿物浸出的关键前提。本书以浸出体系固液相互作用为理论基础，以表面活性剂为强化矿石浸出的技术手段，以改善矿堆渗透性、提高矿石浸出效率为目的开展研究。通过研究，构建了溶液和矿石之间固液接触作用的热力学模型，探明了矿石润湿性能对表面活性剂的响应特征，揭示了表面活性剂强化矿石浸出的试验规律。

本书可供从事溶浸采矿、湿法冶金及选矿领域的研究人员、工程技术人员和高等院校相关专业师生阅读和参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

表面活性剂在溶浸采矿中的应用 / 艾纯明，齐消寒，尹升华著. —徐州 ：中国矿业大学出版社，2019.4

ISBN 978-7-5646-4416-1

Ⅰ. ①表… Ⅱ. ①艾… ②齐… ③尹… Ⅲ. ①表面活性剂－应用－溶浸采矿 Ⅳ. ①TD853.38

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 081966 号

书　　名　表面活性剂在溶浸采矿中的应用
著　　者　艾纯明　齐消寒　尹升华
责任编辑　满建康
出版发行　中国矿业大学出版社有限责任公司
（江苏省徐州市解放南路　邮编 221008）
营销热线　(0516)83884103　83885105
出版服务　(0516)83995789　83884920
网　　址　http://www.cumtp.com　**E-mail**:cumtpvip@cumtp.com
印　　刷　徐州中矿大印发科技有限公司
开　　本　787 mm×960 mm　1/16　**印张** 10　**字数** 190 千字
版次印次　2019 年 4 月第 1 版　2019 年 4 月第 1 次印刷
定　　价　38.00 元

（图书出现印装质量问题，本社负责调换）

前　言

有色金属矿产资源属不可再生资源，为国家必不可少的战略性资源。我国正进入快速工业化阶段，资源的人均消费量及消费总量仍将高速增长，造成资源保证程度急剧下降。

溶浸采矿是利用某些化学溶剂及微生物，有选择性地溶解、浸出和回收矿床、矿石或废石中有用组分的一种采矿方法。溶浸采矿可有效地回收中小型矿床资源、复杂难处理矿石、低品位矿石，甚至可以处理表外矿石、残矿、尾矿和废石。此外，溶浸采矿工艺生产成本低、环境友好，被誉为金属矿绿色开采技术。溶浸采矿技术对提高我国矿产资源综合利用率、扩大资源利用范围具有重要意义，是缓解我国矿产资源短缺局面的重要途径。

虽然溶浸采矿技术得到了广泛的应用，但仍存在矿堆渗透性差、浸出率低、微生物活性差等问题。因此，寻求高效的强化矿石浸出的手段已经成为研究的热点。目前表面活性剂在金矿和铀矿的浸出过程中已经得到应用，其用于提高矿堆渗透性、提升矿石浸出率效果显著，发展前景广阔。

表面活性剂是指具有固定的亲水亲油基团，在溶液的表面能定向排列，并能使表面张力显著下降的物质。表面活性剂被誉为“工业味精”，即很少的添加量便可收到显著的效果。表面活性剂改变体系的表面化学性质，具有乳化、起泡、分散和絮凝、润湿、渗透、润滑等功能。通过在溶液中添加表面活性剂，可以降低溶液的表面张力，改变矿石表面的润湿性能，改善溶液在矿石表面的润湿作用，同时还利于溶液在矿石表面孔裂隙中的流动，强化溶液的微观渗流，提高矿石的浸出率。

本书较系统地分析了表面活性剂在溶浸采矿中的应用。建立了不同条件下溶液与矿石固液作用的能量方程，分析了不同因素对固液接触作用的影响；开展矿石浸出实验，优化了表面活性剂助浸实验条件，探明了浸出过程中矿石表面粗糙度和润湿性的演化规律，得到了表面活性剂对矿柱渗透性和矿石浸出率的影响作用；分析了表面活性剂的吸附特性与浸出反应之间的相互作用，探讨了表面活性剂强化矿堆中溶液渗流的作用机制。

本书的出版得到国家自然科学基金(项目编号：51604138)的支持和资助，在此表示衷心的感谢！

由于作者水平有限，难免存在不妥甚至错误之处，敬请广大读者批评指正。

作　者

2019 年 3 月

目 录

1 绪论 …… 1
1.1 有色金属矿产资源现状 …… 1
1.2 溶浸采矿 …… 3
1.3 国内外堆浸技术应用现状 …… 5
1.4 表面活性剂强化矿石浸出研究现状 …… 7

2 堆浸体系中固液相互作用影响因素分析 …… 14
2.1 矿石表面的润湿作用 …… 14
2.2 矿石表面固液作用形式 …… 20
2.3 堆浸矿岩散体内固液作用力 …… 22
2.4 影响固液作用的主要因素 …… 26

3 表面活性剂遴选及助浸实验条件优化 …… 36
3.1 实验矿样 …… 36
3.2 实验仪器和方法 …… 38
3.3 实验方案与结果 …… 40
3.4 表面活性剂助浸实验因素选择 …… 49
3.5 表面活性剂助浸实验条件优化 …… 52

4 表面活性剂影响矿石表面润湿性能实验研究 …… 63
4.1 实验材料和原理 …… 63
4.2 硫酸浓度对矿石润湿性能的影响 …… 67
4.3 表面活性剂浓度对矿石润湿性能的影响 …… 74
4.4 矿石表面润湿性能随浸出时间变化 …… 79
4.5 浸出作用下矿石形貌及润湿性演化 …… 88

5 表面活性剂强化浸出体系溶液渗流实验研究 …… 94
5.1 实验矿石及颗粒结构分析 …… 94
5.2 实验原理和实验装置 …… 97
5.3 表面活性剂对溶液毛细上升的影响 …… 101
5.4 表面活性剂对渗透系数的影响 …… 108

6 表面活性剂强化矿石浸出机理研究 …… 114
6.1 表面活性剂改善矿石的润湿性能 …… 114
6.2 表面活性剂促进矿堆内固液作用 …… 119
6.3 表面活性剂增强矿堆内溶液渗流 …… 121
6.4 表面活性剂提高矿石浸出速率 …… 126

7 矿石堆浸的表面活性剂强化浸出技术 …… 136
7.1 某铜矿堆浸工程简介 …… 136
7.2 表面活性剂应用于堆浸的工艺 …… 138
7.3 表面活性剂对堆浸后续工艺的影响 …… 142
7.4 表面活性剂的生物降解性与环保 …… 145

参考文献 …… 149

1 绪 论

1.1 有色金属矿产资源现状

矿产资源关乎人类的生存和发展，提供着95%以上的能源来源，80%以上的工业原料，70%以上的农业生产资料，是人类社会的重要物质基础。有色金属矿产资源是国民经济发展的重要基础材料，也是国防科技工业、高尖端科学技术产业发展的重要战略物资。持续稳定的有色金属矿产资源供给是实现国民经济工业化、全面建设小康社会的必要物质保证。随着经济多年来持续快速发展，国内有色金属产量以及对矿产品需求量也不断增长，图1-1为我国近年铜生产量及消费量的变化趋势。

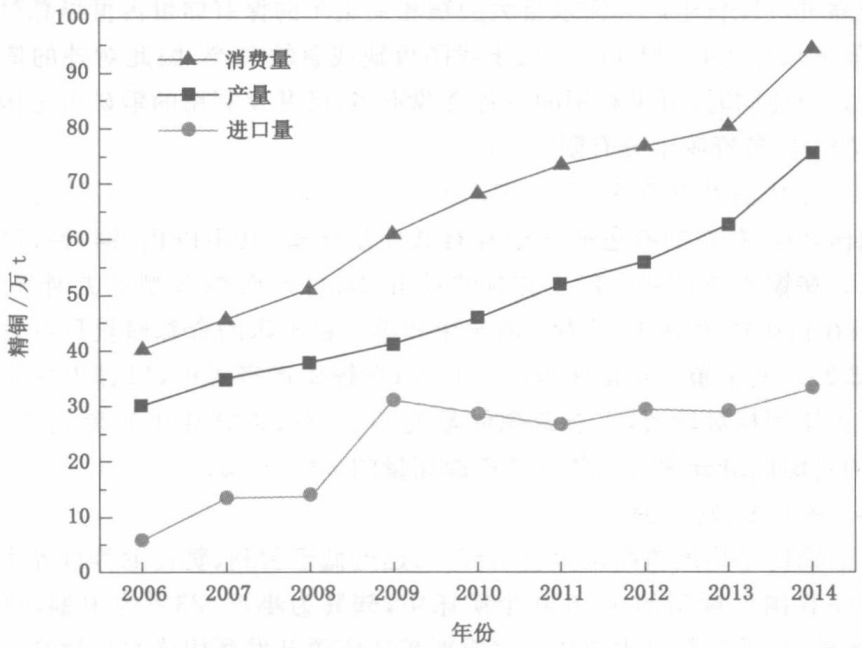


图1-1 近年我国精铜供求关系

由图 1-1 可以看出，近年来我国工业生产对于精铜的需要持续增长，消费量的涨幅大于产量，同时对于国外铜资源依赖程度也不断增加。铜净进口量在 2009 年时达到了最高点，虽然在 2010 年开始出现小幅下降，但仍保持高位运行。现阶段我国主要有色金属资源基本态势有以下几点。

(1) 资源总量大，人均占有量低，资源相对贫乏

我国现已发现 171 种矿产资源，查明资源储量的有 158 种。目前，中国的有色金属生产、消费量均居世界第一，但有色金属资源人均占有量严重不足。铜矿、铝土矿和镍矿等资源的人均拥有量分别仅为世界平均水平的 13%、10%和 9%。铜资源严重不足，铝、铅、锌、镍资源保证程度不高，对国外依赖度增加；钨、锡、锑由于过度开采，资源保证程度亦不乐观，优势地位在下降；只有钼、稀土、镁资源相对丰富。与其他资源型国家相比，资源约束成为我国经济发展的瓶颈。

(2) 资源需求量大，储量不足

从世界格局来看，1990 年全球的精铜消耗量为 1 088.6 万 t，到 2008 年全球精铜消耗量达到了 1 813 万 t，年平均增长率为 2.78%。其中，我国的消耗量净增加 417.2 万 t，年平均增长 11.2%，占全球净增加量的 57.6%。我国矿产资源储量增长远小于产量的增长，占有色金属产量 94%的铜、铝、铅、锌、镍等金属品种的资源储量严重不足，未来发展的资源压力巨大。至 2012 年，我国铜产量约 60%依靠进口原料生产。需求量大的铜和铝土矿的保有储量占世界总量的比例很低，分别只有 4.4%和 3.0%，属于我国短缺或急缺矿产，因此对外的依存度相对较大。与此同时，可供利用的后备资源不多，已开发利用的铜矿占全国资源总量的 67%，后备资源十分有限。

(3) 共生、伴生矿床多，单一矿床少

我国 80%左右的有色矿床中都有共伴生元素，其中以铝、铜、铅、锌矿产最为突出。在铜矿资源中，单一型铜矿只占 27.1%，而综合型的共伴生铜矿占 72.8%；在铅矿资源中，以铅为主的矿床和单一铅矿床的资源储量只占总资源储量的 32.2%，其中单一铅矿床只占 4.46%；在锌矿产资源中，以锌为主和单一锌矿床所占比例相对较大，占总资源储量的 60.45%；以共伴生矿形式产出的汞、锑、钼的资源储量分别占到各自总资源储量的 20%～33%。

(4) 贫矿多、富矿少

我国铜矿平均地质品位只有 0.87%，远远低于智利、赞比亚等世界主要产铜国家。在我国已探明的 15 000 个矿床中，66%为小型，23%为中型，11%为大矿，大型矿、易采矿数量少造成许多重要矿产资源开发利用成本远远高于世界平均水平。2003 年，要萃取 1 t 铜所需的矿石是 1950 年的 5 倍。铝土矿虽有高铝、高硅、低铁的特点，但几乎全部属于难选冶的水硬铝土矿，目前可经济开采的

铝硅比大于7%的矿石仅占总量的1/3，这些特点势必造成选冶难度的增加，加大建设投资和生产经营成本。

(5) 有色金属资源利用率低

国内有色金属矿床多为共生有用组分，多数未能及时回收利用，浪费现象较为严重。矿山采、选矿回收率平均比国际水平低10%～20%，资源贫、细、杂的特点加大了选冶加工的难度。据统计，我国钨矿选矿回收率为43.50%，稀土矿为18.25%，矿山采选综合回收率只有60%～70%。已进行综合利用的矿山平均资源综合利用率仅为20%，65%具有共生、伴生有用组分的矿山，尚未开展综合利用。我国现有库存尾矿约50亿t，每年新增排放固体废弃物约3亿t，平均利用率只有不到10%，而国外先进水平都在50%以上。

为缓解资源供需日益紧张的矛盾，除了继续加大资源勘探力度，提高资源储备量，还应努力开拓海外资源市场，缓解国内矿产资源供给的压力，更重要的是要大力开展技术革新，提高资源的回收率。

1.2 溶浸采矿

溶浸采矿是建立在物理化学反应、质量传递、热力和动力作用的基础上，利用某些能溶解矿石中有用成分的浸矿药剂，有时还借助某些微生物及催化剂、表面活性剂的作用，使矿石或矿体中的有用成分从固态转为液态进入溶液中，收集浸出液再提取金属的新型采矿方法。溶浸采矿法与常规的采矿方法区别很大，它集采矿、选矿、冶金于一体，是建立于水文地质学、矿物工艺学、冶金物理化学、微生物学、地下水动力学、散体动力学、渗流动力学等多学科基础上的一种新型采矿技术。在有色金属回收方面，溶浸采矿技术与传统的开采方法相比优势明显，具有环境污染小、生产成本低、能源消耗少以及作业安全等诸多优点。其亦存在不足，主要体现在浸出周期长、浸出率低等方面。但随着细菌浸出、物理和化学强化浸出以及分离、提取技术的革新，溶浸采矿技术的缺点将得到克服，在矿产资源开发中的地位越来越重要，其应用前景十分广阔。

国内外学者对溶浸采矿的理论和实践给予了极大关注，溶浸采矿近年获得了迅猛的发展，可以用溶浸技术开采的金属矿产包括铀、铜、金、银、镍、铝、锌、钴、锰等，非金属矿产有硫黄、岩盐、钾盐、磷酸盐等。目前在工业上应用较广的是浸出铜、铀、金、银等以及稀土元素矿石。据不完全统计，目前国外采用溶浸法生产的铜金属占总产量的30%左右，铀金属量占总产量的20%，金产量占到25%左右。

溶浸采矿能较好地回收常规开采方法不能回收的低品位矿石、难采矿体、难

选矿石和废石中的有用成分，拓宽了矿产资源的利用范围，增加了工业矿石储量，为满足世界对矿石产品日益增长的需求开辟了新途径。溶浸采矿已成为一种被人们公认的既经济有效又安全可靠的采矿技术。总体而言，针对我国矿石品位低、质量差的特点，开展溶浸采矿技术研究有助于扩大我国资源可采储量、缓解资源供需矛盾、减轻紧缺资源对国外的依赖程度，对于保障国家资源安全的意义十分重大。

通过“九五”科技攻关，溶浸采矿技术在我国获得了发展和提高，取得了丰硕的科技成果。目前，我国已形成了研究和应用溶浸采矿技术的高潮。溶浸采矿方法可分为原地浸出法、原地破碎浸出法和地表堆浸法三类，其中堆浸法应用历史最为悠久、应用范围最为广泛。与传统的开采方法相比，堆浸法无需庞大的基础工程和复杂昂贵的生产设备，因此具有基建周期短、基建费用省、生产设施设备简单、投资小、生产成本低、能耗小等诸多优点，受到了广泛关注。矿堆在井下或地表均可，浸渣可返回井下充填，作业安全，对环境污染小。堆浸技术能回收常规采冶流程不能回收的贫矿、残矿以及偏远地区的矿石，扩大了资源利用范围。

堆浸技术虽然得到了广泛的应用，并取得了良好的效果，但由于各种原因，许多堆浸实际生产指标与设计指标相差较大，存在浸堆渗透性差、浸出率低、微生物活性差等问题。因此强化浸出手段已成为目前研究的热点，物理强化手段包括超声波强化浸出、微波强化浸出、应力波强化渗流、电场强化浸出、充气强化浸出等；化学手段包括添加表面活性剂、催化剂和防垢剂等；生物方面主要有细菌驯化、诱变等强化浸出手段。其中添加表面活性剂可以改变溶液的物理化学性质，从而改变液体在矿石表面的润湿、接触以及在矿岩散体内的流动特性。目前国内在表面活性剂强化矿石浸出方面已经开展了探索性研究工作，但是并没有进行系统性试验，特别是对于表面活性剂强化浸出机理并没有给出全面、深入的解释。

对于单个矿石浸出，溶液进入矿石是从其表面的润湿和扩展开始的。由于表面张力的作用，液体被矿石表面吸附，首先在矿石表面形成结合液膜。溶液在矿石表面湿润的同时发生化学反应，遇到孔隙后受毛细管力作用，液体渗入颗粒内部。溶液在矿岩表面润湿、在矿石表面孔裂隙内的流动是浸出过程的关键步骤，决定了矿石的浸出效果。通过在溶液中添加表面活性剂，可以降低溶液的表面张力，改变矿石表面的润湿性能，改善溶液在矿石表面的润湿作用。同时还有利于溶液在矿石表面孔裂隙中的流动，强化溶液的微观渗流，提高矿石的浸出率。

对于堆浸矿岩散体而言，浸出过程是通过溶液在矿石堆中的渗流实现的，矿

堆的渗透性能对溶液的流动速率和路径影响较大，因此矿堆的渗透性能对浸出效果至关重要。溶液渗流在浸出过程中起两方面的作用，一是将浸出剂送达目的矿物，二是将有用组分运出矿堆。固液作用是矿堆渗透过程中的重要环节，影响溶液的流动状态。在孔隙介质中，由固液作用引发的一系列界面作用力，对溶液流动和浸出效果影响较大。

1.3 国内外堆浸技术应用现状

1.3.1 国外堆浸技术应用现状

早在1752年，西班牙就使用酸浸出氧化铜矿。1953年，葡萄牙用堆浸法处理铀含量为0.076%～0.15%的低品位铀矿；1958年，美国肯尼亚州铜矿采用微生物浸铜获得成功，证实了微生物在矿石浸出过程中的生物化学作用，促进了堆浸法的进一步发展。

20世纪70年代，开发利用低品位金矿资源问题引起了各国的重视，美国、加拿大、苏联和澳大利亚等国家的浸出法提金技术得到了迅速发展，而堆浸提金技术的发展又进一步推动了堆浸在铀、铜等金属提取中的应用。1973年，法国在尼日尔用堆浸法处理露天开采的表外矿石（铀品位0.04%～0.12%），20世纪70年代末堆浸法铀产量占总产量的30%。1976年，BHP公司开始金矿生物浸出技术的实验研究。

1986年，南非Fairview矿建成世界第一个金矿生物浸出工厂，日处理金精矿10 t。1988年，美国堆浸产金量接近100 t，占全国金总产量的50%；同年，澳大利亚堆浸黄金产量占总产量的80%。

Rawhide金矿位于美国内华达州中西部，20世纪80年代末开始实施机械化开采，2003年闭坑后，采用堆浸法处理排土场废石和低品位矿石，2004年堆浸厂销售收入达330万美元，取得了良好的经济效益。

智利铜金属年产量的30%左右来自堆浸法。Zaldivar矿位于智利北部沙漠地区，采用露天开采，矿石经破碎后，采用堆浸-萃取-电积工艺提取铜，堆高为6 m，年产15万t电积铜，生产成本较常规方法低很多，经济效益很好。Escondida铜矿位于智利Atacama沙漠地区，是世界上产量最大的露天矿。该矿山2014年铜产量为120万t，占全球第一大产铜国智利全国铜矿产量的20%。其中部分矿石采用堆浸-萃取-电积工艺提取铜，年产20万t电积铜。

Kisladag金矿位于土耳其西部，是土耳其最大的金矿。该矿山采用露天开采，并通过堆浸提金。2006年7月开始商业生产，最大年产量达6 792 kg。

近年来国外湿法冶金工艺产铜量大大增加，特别是非洲和南美洲地区新建

了一些大型湿法冶炼厂，不仅用于处理低品位矿，而且高品位的氧化矿也在处理范围之列。

赞比亚的穆利亚希铜矿采用堆浸和搅浸技术处理氧化铜矿，矿石平均品位达到了1.3%。2014年矿山生产阴极铜29 481 t，其中堆浸系统生产量为7 780 t，铜浸出率超过82%。

表1-1列出了堆浸技术在国外部分铜矿山的应用情况。

表1-1　　国外部分应用堆浸技术的铜矿山

矿山和生产期限	浸出工艺	储量/万t	铜品位/%	矿石类型	铜产量/(万t/a)
Cerro Colorado，智利，1994年～	细菌堆浸	8 000	1.4	辉铜矿和铜蓝	10
Quebrada Blanca，智利，1994年～	细菌堆浸 废矿堆浸	8 500； 4 500	1.45； 0.5	辉铜矿	7.5
Phoenix Deposit，塞浦路斯，1996年～	细菌堆浸	910； 590	0.78； 0.31	氧化矿和硫化矿	0.8
Lomas，智利，1998年	废矿堆浸	4 100	0.4	氧化铜矿和硫化铜矿	6
Escondida，智利，1990年～	细菌堆浸	170 000	0.3～0.7	氧化矿和硫化矿	20
S$K Copper，缅甸，1999年～	细菌堆浸	12 600	0.5	辉铜矿	4
Morenci，美国，2001年～	细菌堆浸	345 000	0.28	辉铜矿	38
Whim Greek，澳大利亚，2006年～	细菌堆浸	90； 600	1.1； 0.8	氧化矿和硫化矿	1.7

注：表中的储量和产量均为应用浸出工艺的数据。

1.3.2　国内堆浸技术应用现状

我国铀矿石堆浸试验始于1965年，经过多年的室内实验研究与工业实践，铀矿石浸出率达到了85%～97%。低品位含金氧化矿石的堆浸生产工艺研究始于1979年，随后在河南、辽宁、河北、湖南等地迅速发展，1989年全国已有70多个堆浸矿点。1991年，新疆萨尔布拉克金矿11万t堆浸试生产成功，原矿品位3.6 g/t，总回收率87.75%。1993年投产的云南楚雄广通堆浸铜厂是我国首家年生产阴极铜超过1 000 t的电积铜厂，处理的铜矿石属砂岩型铜矿。1996

年投产了云南元江福特电积铜厂，主要处理土状氧化铜矿。1997 年德兴铜矿建成了年产 2 000 t 电铜的原生铜矿废石堆浸场，是我国最大的废石堆浸厂。

1998 年，紫金山铜矿开始采用生物堆浸方法处理低品位硫化铜矿，建成了一条“地下采矿-生物堆浸-萃取电积”生产线；2000 年，铜金属产量达到 1 000 t/a；“十五”期间，紫金山铜矿生物提铜项目被列为国家“十五”科技攻关项目。目前，紫金山铜矿年产铜金属已超过 4 万 t，成为我国最大的生物提铜基地。

云南迪庆羊拉铜矿于 2007 年正式投产，2014 年采用堆浸法处理原矿 94 970 t，矿石平均品位 1.019%，电积铜产量 600 t，铜浸出率大于 65%。

目前西藏玉龙洞铜矿、云南玉溪元江福特铜矿、陕西太白金矿等矿山都在使用堆浸法提取金属，堆浸法回收低品位有色金属资源在我国的发展前景良好。

近年来我国的堆浸技术应用虽然有了很大的进步，但与先进的国家相比，仍有一定的差距，需要进一步开展研究工作。今后的研究应侧重于以下几个方面：① 降低允许入堆的矿石品位，增加采用堆浸技术加工的矿种，进行堆浸加工表外矿、选冶尾渣；② 扩展浸矿细菌种类，在传统酸性、常温菌的基础上，加大对碱性细菌、中高温菌的研发力度，提高细菌浸矿对不同种类矿石的适应性；③ 完善、改进堆浸的主要设备。堆浸技术的研究正朝着深度和广度发展，可以预见它将会发挥越来越大的作用。

我国堆浸技术的工业应用超前于理论研究，一些关键技术因缺乏理论支持等原因而未能解决，迫切需要开展基础理论方面的研究。与国外相比，从理论到实践都存在着较大的差距，例如，堆浸规模小，成本高，回收率低，理论研究主要集中于化学反应、细菌的培养和使用等。作为矿石浸出反应的前提，固液相互作用很少得到研究人员的重视，使得矿石浸出理论系统并不完整，制约了该学科的发展。国内外学者虽在堆浸渗流机理方面做了许多探索性工作，基本探清了堆体的宏观渗流规律及其与浸出速率、浸出率的内在联系，但对堆浸过程中固液作用力学问题的关注较少。

1.4 表面活性剂强化矿石浸出研究现状

1.4.1 表面活性剂及其分类

(1) 表面活性剂

表面活性剂是指具有固定的亲水亲油基团，在液体的表面能定向排列，并能使液体表面张力显著下降的物质。传统观念认为，表面活性剂是一类在很低浓度条件下即可显著降低表(界)面张力的物质。随着对表面活性剂研究的深入，目前一般认为只要在较低浓度能显著改变表(界)面性质的物质，都可划归到表

面活性剂的范畴。表面活性剂可降低溶液的表面张力，改变体系的表面化学性质，具有乳化、起泡、分散、絮凝、润湿、渗透、润滑等功能，因此表面活性剂经常被用作润湿剂、絮凝剂、渗透剂等。随着科学技术的发展和高新技术领域的不断开拓，表面活性剂的发展十分迅速，目前已广泛应用于纺织、制药、农药、化妆品、食品、石油、选矿、高分子化学、土建、冶金、机械等领域中。

(2) 表面活性剂分子结构

表面活性剂的分子结构由亲水基和疏水基两部分构成，如图 1-2 所示。



图 1-2　表面活性剂结构简图

表面活性剂分子的一端为非极性的疏水基，也称为亲油基。亲油基与水分子相排斥，与非极性或弱极性溶剂分子作用，使表面活性剂分子引入油(溶剂)，表面活性剂分子的亲油基常为非极性烃链，如 8 个碳原子以上烃链。分子的另一端为极性亲水的亲水基，有时也称为疏油基或亲水头，亲水基与水分子作用，使表面活性剂分子引入水中，亲水基团常为极性的基团，如羧酸、磺酸、硫酸、氨基或胺基及其盐，也可是羟基、酰胺基、醚键等。

两类结构与性能截然相反的分子碎片或基团分处于同一分子的两端并以化学键相连接，形成了一种不对称的、极性的结构，因而赋予了该类特殊分子既亲水、又亲油(疏水)，但又不是整体亲水或亲油的特性。表面活性剂的这种特有结构通常称之为“双亲结构”，表面活性剂分子因此被称作“双亲分子”。

(3) 临界胶束浓度

表面活性剂的表面活性源于其分子的双亲结构，极性亲水基使分子有进入水的倾向，而疏水的碳氢长链则竭力阻止其在水中溶解而从溶剂内部迁移，有逃逸出水的倾向，两种倾向平衡的结果是表面活性剂在液体表面富集，亲水基伸向水中，而疏水基伸向空气中，在表面形成单分子层膜，如图 1-3 所示。表面活性剂的这种从水内部迁至表面，在表面的富集过程称作吸附，吸附的结果是水表面似被一层非极性的碳氢链覆盖，吸附作用是导致液体表面张力下降的原因。

表面活性剂分子(或离子)在界面上吸附得越多，界面张力降低得越多。表面活性剂在溶液表面的吸附量随其浓度增高而增多，当浓度达到和超过某值后，吸附量不再增加，这些过多的表面活性剂分子的疏水部分相互作用，在溶液内部

以特定方式自聚形成缔合体，这种缔合体称为胶束。疏水链向里靠在一起形成内核，远离水环境，而将亲水基朝外与水接触（见图 1-3），使胶束的中心区形成了一个性质上不同于极性溶液的疏水假象。表面活性剂在溶液中形成胶束的起始浓度称为临界胶束浓度（Critical Micelle Concentration，CMC）。低于此浓度，表面活性剂以单分子体方式存在于溶液中，高于此浓度它们以单体和胶束的方式同时存在于溶液内。

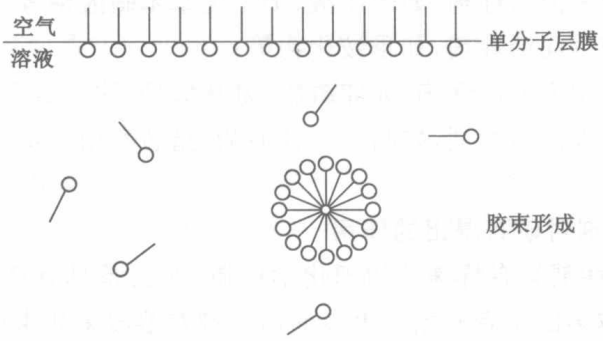


图 1-3 表面活性剂定向吸附及形成胶束

当表面活性剂浓度小于 CMC 时[见图 1-4(a)]，分子很快聚集到表面，表面张力急剧下降。随着浓度继续增大到 CMC 时，溶液达到饱和吸附，表面形成紧密排列的单分子膜，溶液中开始形成一定量的胶束，见图 1-4(b)所示，此时溶液表面张力降至最低值。当浓度大于 CMC 后，溶液表面张力几乎不再下降，只是内部胶束数目和聚集数增加，见图 1-4(c)。临界胶束浓度即为表面活性剂的降低液体表面张力的最大作用浓度。

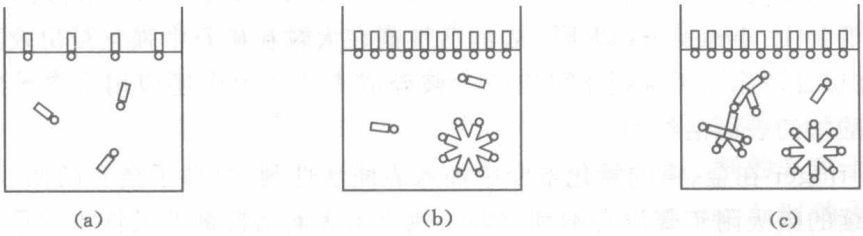


图 1-4 表面活性剂吸附及自聚过程

(a) 达 CMC 之前；(b) 达 CMC 时；(c) 大于 CMC 后

(4) 表面活性剂的分类

表面活性剂的分类方法很多，根据疏水基结构进行分类，分为直链、支链、芳香链、含氟长链等；根据亲水基进行分类，分为羧酸盐、硫酸盐、季铵盐、聚氧化乙

烯衍生物、内酯等；有些研究者根据其分子构成的离子性分成离子型、非离子型等，还有根据其水溶性、化学结构特征、原料来源等各种分类方法。

众多分类方法都有其局限性，很难将表面活性剂合适定位，并在概念内涵上不发生重叠。一般认为按照化学结构划分比较合适，即当表面活性剂溶解于水后，根据是否生成离子及其电性，分为离子型表面活性剂和非离子型表面活性剂。按极性基团的解离性质可分为：

① 阴离子型表面活性剂，如硬脂酸、十二烷基苯磺酸钠等；

② 阳离子型表面活性剂，如季铵化物等；

③ 两性离子型表面活性剂，如卵磷脂、氨基酸型、甜菜碱型等；

④ 非离子型表面活性剂，如脂肪酸甘油酯、脂肪酸山梨坦（司盘）、聚山梨酯（吐温）等。

1.4.2 表面活性剂对矿石浸出的作用

鉴于表面活性剂具有特殊的物理化学性质，尤其是具有良好的润湿及渗透性能，现在越来越多的学者开始从事表面活性剂在溶浸采矿中应用的研究工作，并取得了良好的效果。

在铀矿的原地化学浸出方面，Hjelmstad 提出在溶浸剂中添加一种由大分子量的长链烃分子组成的阳离子有机聚合物（分子量达到 10^6 数量级），该聚合物为特殊的表面活性剂。有机聚合物使黏土保持在絮凝状态并防止了胶体颗粒的形成，提高了渗透性和浸出率。

1993 年，Sierakowski 等在铜矿石的硫酸浸出中加入了含氟脂肪族表面活性剂，铜的浸出率提高了 4.79%。

Waddell 等在金、银的堆浸提取中加入了含氟表面活性剂，提高浸出率。当表面活性剂浓度为 250 ppm（1 ppm＝0.000 1%）（矿石质量）时，溶液的表面张力被降低到 40 dynes/cm 以下。表面活性剂在大颗粒矿石中强化浸出效果更为明显，在保证浸出率的前提下可以减少破碎成本。实验中还应用了含酸性硫酸基和磺酸盐的表面活性剂。

Luttinger 在金、银的氰化堆浸中加入表面活性剂，提高了金属的回收率，并且对后续的碳吸附步骤没有不利影响。他指出表面活性剂的最佳添加量主要取决于矿石自身的性质。实验中采用了聚乙二醇油酸、吐温 85、琥珀酸二辛酯磺酸钠 3 种表面活性剂，经过 35 d 的浸出，金浸出率最高值相对于对照组提高了 7.9%。

国内关于通过添加表面活性剂提高矿石浸出率的报道也很多。

1991 年，罗德生在金矿石的氰化堆浸中添加增浸剂（一种表面活性剂），矿石直接氰化喷淋实验结果表明，添加增浸剂后可提高金的浸出速度，降低 NaCN