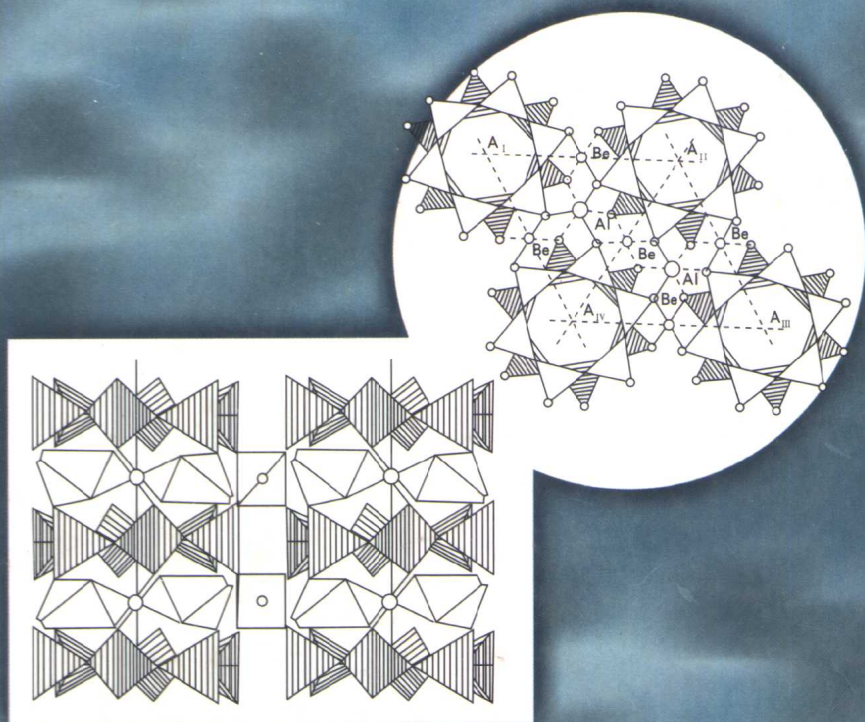


硅酸盐矿物 浮选原理

孙传尧 印万忠 著



科学出版社

硅酸盐矿物浮选原理

孙传尧 印万忠 著

科学出版社

2001

内 容 简 介

本书着重于矿物加工领域的应用基础研究。作者在长期从事硅酸盐矿物浮选理论研究及工业浮选生产的基础上,系统论述了岛状、环状、链状、层状和架状五类晶体结构硅酸盐矿物的晶体化学特征、表面特性与可浮性之间的关系;在胺类阳离子捕收剂和脂肪酸类阴离子捕收剂浮选体系中,不同类型调整剂对矿物的活化、去活,抑制和解抑作用及机理,以及谱学研究方法;根据矿物晶体化学原理总结了硅酸盐矿物浮选工艺流程制定的原则,并介绍了典型结构硅酸盐矿物的浮选工业实践。

本书可供从事有色金属、黑色金属、稀有金属和非金属等领域矿物加工和工艺矿物学专业的科研、设计人员、企业的工程技术人员和高等院校的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

硅酸盐矿物浮选原理/孙传尧,印万忠著.-北京:科学出版社,

2001.4

ISBN 7-03-009230-9

I. 硅… II. 孙… III. 硅酸盐矿物-浮游选矿 IV. TD95

中国版本图书馆CIP数据核字(2001)第07513号

科学出版社 出版

北京东黄城根北街17号
邮政编码:100717

新蕾印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

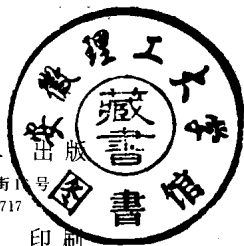
2001年4月第一版 开本:850×1168 1/32

2001年4月第一次印刷 印张:15 1/2

印数:1-1500 字数:400 000

定价:38.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈杨中〉)

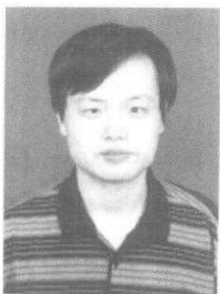


作者简介



孙传尧, 1944年12月生, 国家有突出贡献的专家, 全国劳动模范, 现任北京矿冶研究总院院长、研究员、博士生导师。1991年当选为俄罗斯圣·彼得堡工程科学院院士, 现兼职中国矿业联合会选矿委员会主任, 中国有色金属学会选矿学术委员会主任, 北京金属学会副理事长, 中南大学、昆明理工大学、东北大学、中国矿业大学和北京科技大学教授。

孙传尧 1968年毕业于东北大学有色冶金系矿物加工专业, 同年分配到新疆可可托海矿务局工作, 曾任选矿厂副厂长, 从事稀有金属锂铍钽铀硅酸盐和氧化物的选矿达10年之久。1978年考取北京矿冶研究总院矿物加工专业硕士研究生, 1981年毕业后分配到该院工作, 历任选矿工程师、科研处长、副院长, 1988年2月起任院长。该同志长期从事硅酸盐和氧化物以及复杂多金属矿石的浮选理论和工艺研究, 有丰富的工程化经验, 在锂铍钽铀、铜镍、铅锌、钨钼铋和铁矿石等选矿领域完成了多项科研工作, 获国家科技进步二等奖2项、省部级科技进步奖8项, 发表学术论文50余篇, 出版学术专著一部, 主编大型科技专业工具书一部, 指导博士研究生5名, 硕士研究生5名。



印万忠,1970年6月生于浙江省临安市。1988年考入东北大学(原东北工学院)矿物工程系选矿专业,1992年保送读硕士研究生,1995年5月获东北大学矿物加工工程专业工学硕士学位,同年留校任教,1996年在职攻读博士学位(由东北大学和北京矿冶研究总院联合培养),1999年9月获东北大学矿物加工工程专业工学博士学位。现任教于东北大学资源与土木工程学院矿物工程系,主讲《选矿学》、《浮选溶液化学》等课程,任系副主任,并在本校材料与冶金学院在职进行博士后的研究工作。在硅酸盐矿物浮选原理、黄金选冶、多金属矿物浮选分离和非金属矿物材料等研究领域具有一定的造诣,完成了6项与上述研究领域相关的研究课题,参与编写了《中国黄金生产实用技术》一书,在国内外学术期刊和会议上发表学术论文20余篇,获辽宁省科学技术进步二等奖、辽宁省科学技术研究成果等奖项。

序

我国是矿冶工业的大国,在矿物加工技术,包括浮选技术研究方面也具有强大实力。我国的钢铁、煤炭工业规模都是世界第一位,有色金属排名第二,非金属矿物的加工利用也是名列前茅。我国学者在矿物加工工程,包括浮选技术与科学的研究方面,取得了许多重要的、在国际同行中有影响的成果,撰写出版了许多优秀专著。呈现在我们面前的由孙传尧、印万忠两位同志著作的《硅酸盐矿物浮选原理》一书,是一本有特色的、高水平的学术专著。

选矿工作者通常将矿物分为硫化物、氧化物、盐类和硅酸盐矿物 4 大类,其中硅酸盐矿物对于选矿技术具有特别重要的研究意义。首先硅酸盐矿物是重要的工业基础原料,经过精选及特殊加工,它们更可以成为具有独特性能的结构材料和功能材料。其次,许多稀有金属以硅酸盐矿物的形态赋存于自然界,例如含铍的绿柱石,含锂的锂辉石、锂云母,含锆的锆石等等,是获取稀有金属的原料。此外,硅酸盐矿物是主要的造岩矿物,存在于各种矿石中。当我们从矿石中精选某种有用矿物时,必须解决与硅酸盐矿物的分离问题,因而硅酸盐矿物成为重要的研究对象。然而以往还没有见到过系统研究硅酸盐矿物浮选的理论与实践的有足够分量的专门著作,由此,我们可以看到本书的重要性。

在介绍本书的特点之前,我们首先介绍一点作者的学术背景和写书的过程。这本书的第一作者孙传尧同志,

20 世纪 60 年代末毕业于东北大学矿物加工专业,随即到新疆可可托海锂铍钽铀矿选矿厂工作,历经 10 年的硅酸盐矿物浮选生产实践,积累了丰富的工业生产经验。之后攻读研究生,进一步研究硅酸盐矿物的浮选理论与技术。在北京矿冶研究总院的 20 年工作中,孙传尧继续这一研究,并且指导了多位研究生,在这一研究领域取得了大量实验数据和一系列创新性成果。总结前人的成就和自己研究心得,撰写出这本硅酸盐矿物浮选的专著,是作者多年的愿望,也是长期潜心研究,付出大量劳动的结果。

我读了书稿之后,认为这本书的特点和贡献主要在以下几个方面。首先是系统全面地搜集了前人的工作,但不是简单罗列,而是经过精心梳理归纳,并且与最新的研究成果,特别是作者自己的研究成果比较分析,贯通融合,使读者从中可了解到硅酸盐矿物浮选理论与技术的发展过程,认识过程,从而更好地了解硅酸盐矿物浮选研究的来龙去脉和全貌。其次,这本书的主要内容是介绍作者的研究成果,特别是对 5 类 9 种典型硅酸盐矿物的结构与可浮性;各种硅酸盐矿物对捕收剂、抑制剂、活化剂的作用特征;多价金属离子和非金属离子对各类矿物的活化、抑制作用;含氟化合物对各类矿物的表面的溶蚀作用等,提供了完整系列的测试数据和结果,形成了规律性的看法。再次,作者运用基础科学的新成就研究讨论硅酸盐矿物浮选问题,如用美国著名化学家 Pauling 的键价理论和量子化学、表面电化学计算结果讨论硅酸盐矿物的结构——浮选性能关系;系统介绍用各种能谱光谱研究硅酸盐矿物浮选理论的方法和研究成果等等,有许多令人耳目一新的前人尚未涉足的内容。最后,作者还将研究工

作与丰富的生产经验相结合,提出硅酸盐矿物浮选流程制定的基础,并且按照硅酸盐矿物结构分类,介绍典型矿物的浮选工业实践。以上几点,在已经见到的各种浮选著作中,也堪称特色鲜明,独树一帜。此书的出版,对于硅酸盐矿物浮选的研究与工业发展,将会产生重要的影响和推动作用。

孙传尧同志正当年富力强,目前领导着北京矿冶研究总院选矿研究的学术队伍,承担一系列重要研究任务,已有多项出色的成果,是我国矿物加工工程领域的主要学术带头人之一。印万忠同志更是一位朝气蓬勃的年轻学术骨干,相信他们今后还会继续取得更多更好的学术成就,写出更多的学术著作,为矿物加工学科的发展,为我国矿冶工业的发展,做出新的贡献。

王逸佐
2000年2月

前 言

本书的构思和撰写基于如下考虑:首先,硅酸盐矿物化学成分复杂、结构复杂、种类繁多,是矿物加工的重要对象。某些硅酸盐矿物本身就是提取稀有金属的重要原料,例如锂辉石、绿柱石、锆石等;某些硅酸盐矿物经选别加工后可作为重要的矿物材料,例如云母、蓝晶石、夕线石等,这是当今功能材料开发的热点之一。此外,硅酸盐矿物还是主要造岩矿物,几乎所有的浮选工艺都涉及到有用矿物同硅酸盐脉石矿物的分离问题。并且,当有用矿物本身就是硅酸盐矿物时,浮选分离的难度就更大。长期以来,国内外的研究者对硅酸盐矿物的浮选理论及工艺实践进行了大量的研究工作,攻克了某些世界性的浮选难题。自20世纪80年代以来,随着科技的发展和研究手段的更新,国内外研究者,特别是我国学者对硅酸盐矿物浮选理论的研究较为活跃,发表了不少学术论文,只是还缺乏对各类硅酸盐矿物较系统的研究,而且迄今尚未见到反映系统理论研究的专著。

其次,应用矿物晶体化学原理研究矿物浮选有可能在矿物晶体结构、表面特性和矿物浮选行为之间建立某种联系,这是作者长期感兴趣的课题。以往浮选研究者以化学的观点,对浮选药剂、浮选溶液和矿浆组分以及界面现象研究很多,对矿物本身的研究,特别是对矿物的晶体结构、表面特性和浮选关系的研究少。可喜的是,近20年来与此相关的研究与报道有所增加。与硫化矿物、氧化矿

物和其他盐类矿物相比,结晶矿物学家们对硅酸盐矿物的晶体结构研究得比较早,也比较系统;此外,硅酸盐矿物样品的采集与加工制备也相对容易。因此,目前有关矿物的晶体化学与浮选关系的研究涉及到个别硅酸盐矿物的文献还能看到一些,有关其他类型矿物的文献就更少。

其三,作者长期从事硅酸盐矿物的工业浮选实践及科研工作,对硅酸盐矿物晶体化学特征与浮选关系的研究做过一些探讨。近年来我们对岛状、环状、链状、层状和架状 5 大类硅酸盐的代表性矿物进行了较系统地研究,并从中得出了某些规律。长期的科研与生产实践使作者深刻认识到硅酸盐矿物浮选工业化的复杂性,尤其是有关硅酸盐矿物晶体化学特征与浮选关系的研究,还有待于更多的结晶矿物学和浮选研究者联手合作才能别开生面。由此,作者总结了以往在科研和生产中的相关工作和体会并参考国内外学者的研究成果撰写成此书,目的是使国内外同行增加对此研究方向的兴趣,同时也为科研、设计机构和企业相关专业的科技人员、高等院校的教师、研究生和本科生提供一本研究内容较新、较为翔实的参考书。由于本书所涉及的多种硅酸盐矿物尚不足以代表各类硅酸盐矿物的复杂性,还因为影响矿物破碎及表面特性的因素很多,显然某些研究成果还有局限性,大量的研究工作还有待深化。

本书是按硅酸盐矿物的晶体结构分类体系,试图以矿物晶体化学的基本原理,主要是应用键价理论观点讨论某些硅酸盐矿物的晶体结构、表面特性和浮游性的关系,也包括硅酸盐矿物的表面电性,在阴阳离子捕收剂浮选体系中矿物的浮选行为,多价金属阳离子和无机阴离

子调整剂、有机高分子调整剂和络合调整剂对硅酸盐矿物浮选的活化与去活、抑制和解抑作用及机理等方面的研究,对于当今硅酸盐矿物浮选理论中所涉及的谱学研究也做了介绍。在此基础上,结合作者多年科研和生产实践的体会阐述了硅酸盐矿物浮选工艺流程制定的基础,并介绍了典型矿物的浮选工艺实践。

需要说明的是,石英本是一种氧化物,由于它与硅酸盐矿物共生关系密切,也为了研究、讨论问题的方便,因此本书将其也纳入典型的矿物之列。

作者的主要研究工作是在北京矿冶研究总院完成的。在研究工作中曾得到原院副总工程师吕永信先生的指导。在样品的采集、制备、试验、测试以及书稿的撰写过程中还得到该院汤集刚、杨锡惠、王淑秋、刘树藻、夏晓鸥、周秀英以及东北大学魏德洲、余仁焕、张力先和新疆有色金属公司李金海、唐洪勤等同行的帮助,中国科学技术大学研究生院何铸文先生也提出过宝贵意见,本书的出版还得到国家自然科学基金的资助,作者一并表示感谢。

感谢中国科学院院士、中国工程院院士王淀佐先生对部分科研选题的指导和在百忙之中审阅书稿并为本书撰写序言。感谢中国工程院院士陈清如先生、余永富先生、李东英先生以及北京矿冶总院吕永信先生对书稿的审阅及指导。

作者水平有限,书中难免有错漏之处,敬请广大读者指正。

作者

2001年1月

• vii •

目 录

序

前言

1 绪论

1.1 研究硅酸盐矿物浮选的重要意义 (1)

1.2 硅酸盐矿物浮选原理的研究进展 (2)

2 硅酸盐矿物的晶体结构特征及表面特性

2.1 硅酸盐矿物的基本晶体结构特征..... (10)

2.1.1 岛状结构硅酸盐矿物 (10)

2.1.2 环状结构硅酸盐矿物 (11)

2.1.3 链状结构硅酸盐矿物 (12)

2.1.4 层状结构硅酸盐矿物 (14)

2.1.5 架状结构硅酸盐矿物 (18)

2.2 硅酸盐矿物的浮游性与晶体结构及表面特性研究

概况..... (19)

2.2.1 岛状结构硅酸盐矿物 (19)

2.2.2 环状结构硅酸盐矿物 (20)

2.2.3 链状结构硅酸盐矿物 (21)

2.2.4 层状结构硅酸盐矿物 (22)

2.2.5 架状结构硅酸盐矿物 (24)

参考文献 (26)

3 硅酸盐矿物的化学键

3.1 硅酸盐矿物结构中 Si—O 键的性质 (28)

3.2 硅酸盐矿物中金属离子对 Si—O 键影响的量子化学研究..... (33)

3.3 硅酸盐矿物结构中 Al 及 Al—O 键的性质 (38)

3.4 硅酸盐矿物中 M—O 键的性质及阳离子多面体的

离子性程度·····	(40)
3.5 鲍林(Pauling)规则与硅酸盐矿物的晶体化学·····	(42)
3.6 硅酸盐矿物晶体结构中化学键的计算·····	(45)
3.7 硅酸盐矿物破碎后表面特性分析与预测·····	(56)
参考文献·····	(73)
4 硅酸盐矿物的表面电性及其与矿物晶体化学特征的关系	
4.1 纯水中矿物表面电性及其与矿物晶体化学特征的关系·····	(74)
4.1.1 岛状结构硅酸盐矿物·····	(75)
4.1.2 环状结构硅酸盐矿物·····	(78)
4.1.3 链状结构硅酸盐矿物·····	(79)
4.1.4 层状结构硅酸盐矿物·····	(83)
4.1.5 架状结构硅酸盐矿物·····	(87)
4.1.6 硅酸盐矿物表面电性的分析及PZC的计算方法·····	(90)
4.2 金属阳离子对矿物 ζ 电位的影响·····	(93)
4.3 无机阴离子调整剂对矿物 ζ 电位的影响·····	(105)
4.4 有机调整剂对矿物 ζ 电位的影响·····	(112)
4.5 捕收剂对矿物 ζ 电位的影响·····	(117)
参考文献·····	(121)
5 无调整剂作用下硅酸盐矿物的浮游性及机理	
5.1 常用捕收剂的溶液化学·····	(125)
5.1.1 阴离子捕收剂油酸钠·····	(125)
5.1.2 阳离子捕收剂十二胺·····	(127)
5.1.3 其他捕收剂的溶液化学·····	(129)
5.2 捕收剂在硅酸盐矿物表面的吸附特性·····	(130)
5.3 不同捕收剂作用下硅酸盐矿物的自然可浮性及浮选作用机理·····	(143)
5.3.1 阴离子捕收剂浮选体系中矿物的自然可浮性·····	(143)
5.3.2 阳离子捕收剂浮选体系中矿物的可浮性·····	(166)
5.3.3 混合捕收剂浮选体系中矿物的可浮性·····	(186)
参考文献·····	(191)

6	多价金属阳离子对硅酸盐矿物浮游性的影响及作用机理	
6.1	油酸钠浮选体系中多价金属阳离子的活化作用 …	(196)
6.2	十二胺浮选体系中多价金属阳离子的抑制作用 …	(216)
6.3	其他类捕收剂浮选体系中多价金属阳离子的作用 ……	(223)
6.4	金属阳离子的溶液化学 ……	(228)
6.5	金属阳离子在硅酸盐矿物表面的吸附特性 ……	(231)
6.6	多价金属阳离子对硅酸盐矿物活化和抑制作用的作用机理 ……	(240)
6.6.1	活化作用机理 ……	(240)
6.6.2	抑制作用机理 ……	(247)
	参考文献 ……	(252)
7	无机阴离子调整剂对硅酸盐矿物可浮性的影响及作用机理	
7.1	氟化物的作用 ……	(254)
7.2	硫化钠的作用 ……	(272)
7.3	氢氧化钠的作用 ……	(280)
7.4	碳酸钠的作用 ……	(283)
7.5	水玻璃的作用 ……	(287)
7.6	六偏磷酸钠的作用 ……	(295)
7.7	其他无机调整剂的作用 ……	(304)
	参考文献 ……	(309)
8	高分子量有机调整剂对硅酸盐矿物浮游性的影响	
8.1	淀粉的作用 ……	(312)
8.2	单宁的作用 ……	(324)
8.3	糊精的作用 ……	(327)
	参考文献 ……	(330)
9	络合调整剂对硅酸盐矿物浮游性的影响	
9.1	酒石酸的作用 ……	(332)
9.2	草酸的作用 ……	(340)
9.3	柠檬酸的作用 ……	(342)

9.4	EDTA 的作用	(348)
9.5	络合调整剂的作用机理	(349)
	参考文献	(352)
10	同种硅酸盐矿物表面元素分布的微小差异对浮游性的影响	
10.1	不同颜色锂辉石浮游性的差异及产生的原因	(353)
10.1.1	浮选试验结果	(353)
10.1.2	矿物表面特性测定结果	(355)
10.1.3	矿物可浮性差异的晶体化学分析	(356)
10.1.4	结论	(360)
10.2	两种霓石浮游性的差异及原因	(360)
10.2.1	浮选试验结果	(360)
10.2.2	两种霓石的表面电性	(361)
10.2.3	两种霓石表面钙镁含量的差异	(362)
10.2.4	关于霓石可浮性差异的晶体化学分析	(363)
	参考文献	(364)
11	硅酸盐矿物浮选原理的谱学研究	
11.1	X 射线光电子能谱分析(XPS)	(366)
11.2	俄歇电子能谱分析(AES)	(392)
11.3	穆斯堡尔谱分析	(400)
11.4	红外光谱分析(IR)	(407)
11.5	紫外光电子能谱分析(UPS)	(421)
	参考文献	(426)
12	硅酸盐矿物浮选工艺流程制定的基础	
12.1	关于矿石性质的研究	(429)
12.2	根据硅酸盐矿物晶体化学、表面特性及自然可浮性的差异拟定分离方案	(430)
12.3	磨矿过程中铁离子及矿浆中难免离子对硅酸盐矿物浮选的重要影响	(440)
12.4	原则浮选工艺的确定和流程结构的设计	(441)
12.5	捕收剂的选择	(442)

12.6	调整剂的选择	(444)
12.7	原矿中少量易浮矿物对精矿的影响	(445)
12.8	伴生矿物的综合回收和联合流程的应用	(446)
13	典型硅酸盐矿物的浮选工业实践	
13.1	岛状结构硅酸盐矿物的浮选工业实践	(447)
13.1.1	蓝晶石类矿物的浮选工业实践	(447)
13.1.2	石榴子石的浮选工业实践	(453)
13.2	链状结构硅酸盐矿物的浮选工业实践	(454)
13.2.1	锂辉石的浮选工业实践	(454)
13.2.2	硅灰石的浮选工业实践	(459)
13.3	环状结构硅酸盐矿物的浮选工业实践	(461)
13.3.1	绿柱石的浮选工业实践(含绿柱石与锂辉石的浮选 · 分离)	(461)
13.4	层状结构硅酸盐矿物的浮选工业实践	(468)
13.4.1	云母的浮选工业实践	(468)
13.5	架状结构硅酸盐矿物的浮选工业实践	(471)
13.5.1	长石和石英的浮选工业实践	(471)
	参考文献	(475)

1 绪 论

1.1 研究硅酸盐矿物浮选的重要意义

硅酸盐矿物在各类矿物中的地位极为重要。首先,硅酸盐矿物种类繁多,目前已知的有 548 种,约占已知矿物种类的 24%左右。在常见的矿物中约有 40%是硅酸盐矿物,据估算地壳中大约有 90%是硅酸盐矿物,因此它是主要的造岩矿物,广泛分布于自然界中;其次,从某些硅酸盐矿物中可提取稀有金属,如绿柱石中的铍、锂云母和锂辉石中的锂、锆石中的锆、钨等;有些硅酸盐矿物本身是重要的工业基础原料,如云母、高岭石、滑石、石棉、硅灰石、沸石等。

在当代矿物加工领域中浮选法是应用最广泛的高效分离方法。特别是随着入选矿石中 有用矿物的品位越来越低,矿物共生关系复杂,遇到的硅酸盐矿物种类和数量越来越多,应用重选和磁选法通常都难以获得良好的分选结果,因此对浮选法提出了更高的要求。在大多数情况下,硅酸盐矿物总是作为脉石矿物与有用矿物共生的。因此,几乎所有的浮选工艺都涉及到将有用矿物同硅酸盐脉石矿物进行浮选分离。此外,某些氧化物(如石英、金红石)与硅酸盐矿物浮选性质相近,某些有用的硅酸盐矿物(例如绿柱石、锂辉石、云母等)与硅酸盐脉石矿物的浮游性也相近,因而某些硅酸盐矿物和氧化物的浮选被列为世界性的浮选难题。在浮选实践中对某些硅酸盐矿物能否实现有效的选择性抑制和活化,是浮选工艺成败的关键。可见,系统地研究各类硅酸盐矿物的浮选行为,无论对硫化矿还是非硫化矿的浮选理论与工业实践均有十分重要的意义。