



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

有色金属 理论与技术前沿丛书
SERIES OF THEORETICAL AND TECHNOLOGICAL FRONTIERS OF
NONFERROUS METALS

硫化矿物浮选电化学

ELECTROCHEMISTRY OF SULFIDE MINERALS FLOTATION

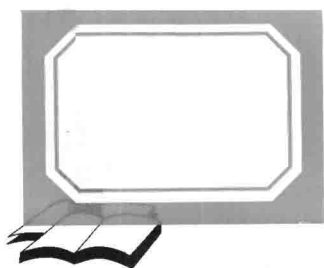
冯其明 陈建华 编著
Feng Qiming Chen Jianhua



中南大学出版社
www.csupress.com.cn



中国有色集团



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

有色金属理论与技术前沿丛书

硫化矿物浮选电化学

Electrochemistry of Sulfide Minerals Flotation

冯其明 陈建华 编著
Feng Qiming Chen Jianhua



中南大学出版社
www.csupress.com.cn



中国有色集团

图书在版编目(CIP)数据

硫化矿物浮选电化学/冯其明,陈建华编著.
—长沙:中南大学出版社,2012.7
ISBN 978-7-5487-0601-4

I. 硫... II. ①冯...②陈... III. 硫化矿物-浮游选矿-电化学分析 IV. TD923

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第179795号

硫化矿物浮选电化学

冯其明 陈建华 编著

-
- 责任编辑 胡业民 刘石年
责任印制 易红卫
出版发行 中南大学出版社
社址:长沙市麓山南路
发行科电话:0731-88876770
印 装 长沙瑞和印务有限公司

邮编:410083
传真:0731-88710482



-
- 开 本 720×1000 B5 印张 16 字数 310千字
版 次 2014年6月第1版 2014年6月第1次印刷
书 号 ISBN 978-7-5487-0601-4
定 价 64.00元
-

图书出现印装问题,请与出版社调换

内容简介

Introduction

硫化矿物浮选体系中固(硫化矿)、液(捕收剂和调整剂)、气(浮选气体中的氧气)三相均有氧化还原性,电化学性质是硫化矿浮选体系的基本性质。硫化矿浮选过程中发生的现象都可以用电化学理论来解释,不了解硫化矿浮选电化学就无法准确把握硫化矿浮选的本质。本书系统介绍了硫化矿物浮选过程中的电化学机理及其在浮选中的应用,包括硫化矿浮选体系的基本性质、硫化矿物浮选与抑制的电化学原理和研究方法、硫化矿浮选(磨矿)过程中的电偶腐蚀作用、硫化矿物矿浆电化学浮选工艺与实践以及硫化矿物浮选的第一性原理研究等内容。

本书除系统介绍硫化矿物电化学浮选的热力学性质、动力学行为、表面产物特性以及硫化矿物矿浆电化学分离工艺等内容外,还对硫化矿物浮选电化学的研究方法(包括热力学计算、电位-pH图、电化学测试等)进行了详细介绍,对于从事硫化矿物浮选电化学研究的科研人员非常有帮助。另外,本书还首次专门对硫化矿物浮选的电偶腐蚀现象进行了系统介绍,并从能带理论方面进行了电偶腐蚀机理的探讨,有助于选矿科研人员更好地了解磨矿对硫化矿物浮选的影响以及复杂多金属硫化矿物之间的交互作用。在本书的最后还介绍了目前我们的最新研究成果,即采用量子力学的方法,从固体物理的角度来研究硫化矿物的浮选,为硫化矿电化学浮选提供了微观解释。

本书可用来作为研究生、大学师生、研究院所以及选矿企业的技术人员学习和参考使用。

作者简介

About the Author

冯其明 1962年7月出生于湖北天门，中南大学教授，博士生导师，国家973项目首席科学家。1990年获得矿物加工工程专业博士学位，1999—2000年到日本产业创造研究所进行合作研究。主要从事硫化矿浮选电化学、复杂矿物资源加工利用、矿物材料及废弃物资源化等领域的研究工作。发表论文200余篇，出版专著教材3部，授权专利20余项；多项成果获得工业应用，获得国家科技进步奖2项，省部级科技奖10项。获得“全国青年科技标兵”“中国青年科技奖”“新世纪百千万人才工程”等多项表彰。

陈建华 1971年1月出生于四川西昌，教授，博士生导师。1999年毕业于中南大学矿物工程系，获得博士学位，2002—2003年留学瑞典吕勒奥理工大学，2011年入选教育部新世纪优秀人才支持计划，现任教于广西大学资源与冶金学院。主要从事硫化矿浮选电化学、浮选密度泛函理论、矿物晶格缺陷和固液界面等领域的研究工作。在国内外发表学术论文150多篇，被SCI收录40多篇，EI收录60多篇，出版学术专著5部，获省部级科技进步奖4项，授权国家发明专利20项。

学术委员会

Academic Committee

国家出版基金项目
有色金属理论与技术前沿丛书

主任

王淀佐 中国科学院院士 中国工程院院士

委员 (按姓氏笔画排序)

于润沧	中国工程院院士	古德生	中国工程院院士
左铁镛	中国工程院院士	刘业翔	中国工程院院士
刘宝琛	中国工程院院士	孙传尧	中国工程院院士
李东英	中国工程院院士	邱定蕃	中国工程院院士
何季麟	中国工程院院士	何继善	中国工程院院士
余永富	中国工程院院士	汪旭光	中国工程院院士
张文海	中国工程院院士	张国成	中国工程院院士
张懿	中国工程院院士	陈景	中国工程院院士
金展鹏	中国科学院院士	周克崧	中国工程院院士
周廉	中国工程院院士	钟掘	中国工程院院士
黄伯云	中国工程院院士	黄培云	中国工程院院士
屠海令	中国工程院院士	曾苏民	中国工程院院士
戴永年	中国工程院院士		

编辑出版委员会

Editorial and Publishing Committee

国家出版基金项目
有色金属理论与技术前沿丛书

主任

罗 涛(教授级高工 中国有色矿业集团有限公司总经理)

副主任

邱冠周(教授 国家“973”项目首席科学家)

田红旗(教授 中南大学副校长)

尹飞舟(编审 湖南省新闻出版局副局长)

张 麟(教授级高工 大冶有色金属集团控股有限公司董事长)

执行副主任

王海东(教授 中南大学出版社社长)

委员

苏仁进 文援朝 李昌佳 彭超群 陈灿华

胡业民 刘 辉 谭 平 张 曦 周 颖

汪宜晔 易建国 李海亮

总序

Preface

当今有色金属已成为决定一个国家经济、科学技术、国防建设等发展的重要物质基础，是提升国家综合实力和保障国家安全的关键性战略资源。作为有色金属生产第一大国，我国在有色金属研究领域，特别是在复杂低品位有色金属资源的开发与利用上取得了长足进展。

我国有色金属工业近 30 年来发展迅速，产量连年来居世界首位，有色金属科技在国民经济建设和现代化国防建设中发挥着越来越重要的作用。与此同时，有色金属资源短缺与国民经济发展需求之间的矛盾也日益突出，对国外资源的依赖程度逐年增加，严重影响我国国民经济的健康发展。

随着经济的发展，已探明的优质矿产资源接近枯竭，不仅使我国面临有色金属材料总量供应严重短缺的危机，而且因为“难探、难采、难选、难冶”的复杂低品位矿石资源或二次资源逐步成为主体原料后，对传统的地质、采矿、选矿、冶金、材料、加工、环境等科学技术提出了巨大挑战。资源的低质化将会使我国有色金属工业及相关产业面临生存竞争的危机。我国有色金属工业的发展迫切需要适应我国资源特点的新理论、新技术。系统完整、水平领先和相互融合有色金属科技图书的出版，对于提高我国有色金属工业的自主创新能力，促进高效、低耗、无污染、综合利用有色金属资源的新理论与新技术的应用，确保我国有色金属产业的可持续发展，具有重大的推动作用。

作为国家出版基金资助的国家重大出版项目，“有色金属理论与技术前沿丛书”计划出版 100 种图书，涵盖材料、冶金、矿业、地学和机电等学科。丛书的作者荟萃了有色金属研究领域的院士、国家重大科研计划项目的首席科学家、长江学者特聘教授、国家杰出青年科学基金获得者、全国优秀博士论文奖获得者、国家重大人才计划入选者、有色金属大型研究院所及骨干企

业的顶尖专家。

国家出版基金由国家设立，用于鼓励和支持优秀公益性出版项目，代表我国学术出版的最高水平。“有色金属理论与技术前沿丛书”瞄准有色金属研究发展前沿，把握国内外有色金属学科的最新动态，全面、及时、准确地反映有色金属科学与工程方面的新理论、新技术和新应用，发掘与采集极富价值的研究成果，具有很高的学术价值。

中南大学出版社长期倾力服务有色金属的图书出版，在“有色金属理论与技术前沿丛书”的策划与出版过程中做了大量极富成效的工作，大力推动了我国有色金属行业优秀科技著作的出版，对高等院校、科研院所及大中型企业的有色金属学科人才培养具有直接而重大的促进作用。

王淀佐

2010年12月

前言

Foreword

硫化矿浮选本质是一个电化学反应,电子可以在固液界面、药剂与矿物之间发生转移,离开电化学反应就无法从本质上了解硫化矿浮选过程。早在 20 世纪 60 年代就开始注意到硫化矿浮选体系中氧化还原性的重要性,进入 80 年代后,围绕硫化矿物是否有天然可浮性之争,在澳大利亚引发了黄铜矿天然可浮性的电化学反应,并扩展到其他硫化矿物(如方铅矿、黄铁矿、毒砂)以及用电位来控制硫化矿物的浮选与分离行为。经过国内外学者几十年的努力,建立起了比较完善的硫化矿浮选电化学反应理论体系,并成功应用到工业生产中。现在的主要发展趋势是研究应用矿浆电化学反应新工艺、电化学反应浮选设备来解决难选硫化矿物的分离(如硫砷、铜锌等),以提高资源利用率及经济效益;深化硫化矿物捕收、活化及抑制的电化学反应机理,并结合其他现代测试方法(如红外光谱、光电子能谱及俄歇能谱等),研究硫化矿物浮选体系热力学、动力学、硫化矿物表面产物性质以及溶液化学性质等,从而发展出用于工业生产的硫化矿物矿浆电化学反应浮选工艺及设备。

本书在 1992 年版的基础上进行了补充和修订,在保持原有特色的基础上,增加了电偶腐蚀和量子化学研究的相关内容,使该书的体系更加完整,内容更加充实。全书共分 8 章,第 1 章介绍硫化矿电化学反应浮选的基础知识和研究方法,主要是与电化学反应浮选有关的一些理论和研究、测试方法;第 2 章介绍硫化矿浮选体系的基本性质,分别介绍了硫化矿物、矿浆溶液、药剂和相等方面的电化学反应性质;第 3 章介绍硫化矿物无捕收剂浮选,从矿物的天然可浮性、自诱导浮选和硫诱导浮选几方面系统介绍了硫化矿的无捕收剂浮选行为及其机理;第 4 章从理论上系统阐述了硫化矿浮选电化学反应机理;第 5 章对硫化矿抑制作用的电化学反应机理进行了系统总结,

并对氢氧根、氰化物、硫化钠、氧化剂和有机抑制剂等常见抑制剂的电化作用机理进行了讨论;第6章系统介绍了硫化矿浮选过程中的电偶腐蚀原理,包括磨矿电偶腐蚀作用和硫化矿物之间的电偶腐蚀作用,并运用半导体能带理论进行了电偶腐蚀机理探讨;第7章介绍硫化矿物浮选分离矿浆电化学,从矿浆体系多组分、多反应角度讨论硫化矿电化学浮选行为;在本书最后一章给出了近两年来编者从固体物理角度来讨论浮选的尝试,从矿物的半导体性质和电子结构来讨论硫化矿电化学浮选过程。

本书在总结国内外研究的基础上,结合近年来我们的科研成果,全面、系统地介绍了硫化矿浮选体系的基本性质、硫化矿物浮选与抑制的电化学理论及研究方法、矿浆电化学浮选工艺及实践等内容,另外还提出了一些新的观点,并试图对一些问题进行系统化和理论化,如抑制剂的电化作用机理、矿物接触的电偶腐蚀电化机理以及硫化矿浮选的半导体电化等。由于水平及时间所限,书中难免有错误缺点,敬请读者批评指正。

编 者
2014年3月

绪 言

第 1 章 电化学基础及研究方法	3
1.1 电化学基础	3
1.2 金属的电化学腐蚀理论	8
1.3 电化学研究的实验体系	11
1.4 电化学研究方法在硫化矿物浮选研究中的应用	12
1.5 电位 - pH 图	23
第 2 章 硫化矿物浮选体系的基本性质	30
2.1 硫化矿物	30
2.2 捕收剂	40
2.3 调整剂	45
2.4 浮选气相	52
第 3 章 硫化矿物无捕收剂浮选	53
3.1 天然可浮性	53
3.2 自诱导无捕收剂浮选	56
3.3 硫化矿物硫诱导无捕收剂浮选	65
3.4 硫化矿物无捕收剂浮选分离	70
3.5 硫化矿物无捕收剂浮选实例	72
第 4 章 硫化矿物浮选电化学理论	75
4.1 硫化矿物浮选的电化学机理	75
4.2 混合电位模型	78
4.3 捕收剂(黄药)与硫化矿物反应的电化学研究	80

第 5 章 硫化矿物浮选抑制的电化学	90
5.1 电化学原理	90
5.2 氢氧化物	92
5.3 氰化物	97
5.4 硫化钠	100
5.5 氧化剂	101
5.6 有机抑制剂	107
第 6 章 硫化矿物浮选过程中的电偶腐蚀原理及应用	109
6.1 金属腐蚀基本原理	109
6.2 硫化矿物浮选电偶腐蚀原理及分类	111
6.3 电偶腐蚀原电池反应	112
6.4 硫化矿物间的电偶腐蚀	115
6.5 磨矿的电偶腐蚀电化学	120
6.6 电偶腐蚀的能带理论	127
第 7 章 硫化矿物浮选分离矿浆电化学	133
7.1 硫化矿物浮选矿浆电化学	133
7.2 矿浆电化学研究方法	139
7.3 电位 - pH 图与硫化矿物浮选分离	142
7.4 表面氧化及氧化产物性质与硫化矿物浮选分离	148
7.5 硫化矿物表面捕收剂产物电化学还原动力学性质与混合精矿浮选分离	155
7.6 矿浆电位与硫化矿物浮选行为的关系	159
7.7 硫化矿物矿浆电化学浮选工艺的设计及应用	170
第 8 章 硫化矿物半导体性质及表面吸附的量子理论研究	179
8.1 量子力学发展简介	179
8.2 矿物的能带结构	183
8.3 硫化铜矿物晶体电子结构及可浮性	188
8.4 硫铁矿物晶体电子结构及其可浮性	194
8.5 黄铁矿(100)表面结构及性质	201
8.6 硫化矿物表面氧分子吸附作用研究	208
8.7 氰化物分子与闪锌矿表面的作用研究	221
附录	226
参考文献	239

绪 论

自 1923 年美国 Keller 发现黄药可作为硫化矿物的捕收剂以后,现代泡沫浮选法才开始在工业生产上大规模地推广和应用。随后又发现氰化物是硫化矿物优良的选择性抑制剂,以及硫酸铜对闪锌矿的活化作用,浮选开始在多种硫化矿物生产中获得广泛应用。可以说黄药、氰化物、铜离子在浮选中的应用引发了矿物加工工艺的一次重大变革。浮选法仍然是当今有色金属硫化矿物选矿中最有效的方法。

自 1923 年到现在的 90 多年里,各国的选矿科学工作者对硫化矿物-硫氢捕收剂-氧-水这一复杂浮选体系的基础理论和应用进行了大量的研究,付出了几辈人的努力,在理论上得到了许多有意义的结论,在生产实践中取得了显著的经济效益。

硫化矿物浮选理论研究可以分为三个阶段:一是 20 世纪 50 年代以前,人们从纯化学的观点来解释硫化矿物与捕收剂的作用机理,如捕收剂与金属离子作用的溶度积理论;二是 20 世纪 50—80 年代提出了硫化矿物浮选的电化学理论,从电化学理论上解释了氧在浮选中的作用、黄药在硫化矿物表面的产物以及无捕收剂浮选等理论问题,基本建立了硫化矿物电化学浮选体系;三是近 30 年来开展的矿浆电化学的应用研究,即依据硫化矿物的电化学浮选行为,通过控制浮选体系的电化学条件,调控硫化矿物的浮选和分离行为。矿浆电化学条件已经成为控制硫化矿物浮选的重要参数之一。

硫化矿物浮选理论研究一直是选矿理论研究的重要课题。首先,硫化矿物是浮选工艺处理的主要对象,有必要从理论上研究硫化矿物浮选过程的机理;其次,硫化矿物浮选体系具有特殊的复杂性,如硫化矿物的表面性质易随时间和环境而变迁,硫化矿物与捕收剂的作用属于有机界面电化学过程等,这些因素给研究带来了困难。同时,科学技术的不断进步,为硫化矿物浮选理论研究不断地提供先进的研究手段,研究工作不断深入。如在 20 世纪 30—40 年代,研究方法只局限于测定药剂吸附量(残余浓度法)、液相的物质组成、浮选回收率等方法,从纯化学原理解释浮选现象。在 60 年代初期引入了光谱技术,如红外光谱,以鉴定捕收剂黄药与硫化矿物的反应产物。70 年代以来,电化学技术应用到浮选理论研究中,发现黄药与硫化矿物的反应是电化学过程,从而提出了大家公认的硫化矿物浮选的电化学理论。特别是现在,现代表面测试技术如光电子能谱(XPS)、俄歇能谱(AES)、拉曼光谱、核磁共振等,可以获得矿物表面几个原子层厚度的

化学成分和结构信息,使研究更加微观化。同时,生产实践对浮选理论研究提出了更高的要求,例如,现代矿物资源趋于贫、细、杂,环境保护问题日益受到重视,迫切需要寻找无毒而有效的硫化矿物分离工艺和理论。因此硫化矿物浮选电化学自从问世以来就不断获得发展的动力和源泉,并成为了有色金属硫化矿物浮选的基础和显著特色。

硫化矿物电化学浮选理论和工艺的研究直接导致了浮选工艺的又一次重大变革。广泛应用的常规浮选工艺是以 pH 控制为基础,捕收剂与调整剂相匹配来实现硫化矿物的富集与分离。对简单易选硫化矿石,通过控制 pH 可以达到较好的选矿指标,如单一铜矿石、铜硫矿石等,但对组成复杂的硫化矿石,如凡口的铅锌矿石、金川的铜镍矿石、柿竹园的钼铋硫多金属矿等,各矿物的浮选 pH 已不存在明显的差别,相互之间的浮选分离极为困难,由此产生了药剂种类多、用量大、流程复杂等一系列问题,特别是一些难选矿石根本无法分离,致使矿产资源不能综合利用。硫化矿物电化学浮选工艺通过调控矿浆电位来控制硫化矿物的浮选行为,在无捕收剂、少捕收剂的条件下实现硫化矿物的浮选分离。对硫化矿物浮选体系的矿浆电位进行调节和控制,可以使难选硫化矿石实现浮选分离(如硫砷分离),易选矿石实现无捕收剂或少捕收剂浮选(如铜硫、铜铅矿石)。浮选电化学工艺的问世使浮选工艺多了一个可控参数,即从以前的药剂 - pH 二维调控变为药剂 - 电位 - pH 三维调控,这就为多金属复杂矿物的分离提供了更大的可操作空间。

目前在实践中还只能实现局部控制电位浮选或者利用其固有的矿浆电位来提高浮选指标,离完全采用控制电位来进行硫化矿物浮选或分离的目标还有很大的距离,还需要进行大量的研究工作。在理论方面,必须研究硫化矿物电化学浮选体系热力学、动力学、硫化矿物表面产物性质、液相组分等几种因素对硫化矿物电化学浮选及分离的影响和作用规律,为不同硫化矿物浮选分离体系的矿浆电化学工艺的设计提供依据。在应用方面,必须设计实用的电化学工艺和研制工业型的电化学浮选设备。尽管现在电化学浮选工艺距大规模生产应用还存在一定距离,但理论和已有工业实践已经充分表明这一工艺在生产上是可行的和充满活力的,电化学浮选必将成为 21 世纪硫化矿物浮选的主要方法。

第1章 电化学基础及研究方法

电化学性质是硫化矿物浮选体系的基本性质,因此,电化学方法就成了硫化矿物浮选理论研究的基本手段。有关电化学的理论及实验技术已有许多专门著作。本章将简要介绍一些电化学的基本知识和一部分已用在硫化矿物浮选理论研究所中的电化学方法、技术以及它们的具体应用实例。

1.1 电化学基础

电化学是从研究电能与化学能的相互转换问题开始的,到现在已有近两百年的历史,特别是自1950年以来,形成了以研究有关电极反应速度及各种影响因素为主要研究对象的电极过程动力学,极大地推动了电化学的发展。随着电化学这一学科理论和技术的不断完善,电化学的理论和方法已广泛地应用于化工、冶金、材料、电子、机械、航天、能源、金属腐蚀与防护以及环境保护等科学领域。对选矿来说,正是由于引入了电化学概念,硫化矿物浮选中硫化矿物与捕收剂的作用机理才得以揭示。

1.1.1 导体

能导电的物质称为导体。在电化学研究体系中涉及两种类型的导体,即电子导体和离子导体。

1) 电子导体

这种导体是依靠电子传导电流,例如,金属、石墨、某些金属氧化物(如 PbO_2 、 Fe_3O_4)、金属碳化物(如 WC)以及金属硫化物(如 FeS_2 、 PbS 、 CuFeS_2)。按照能带理论,电子导体又可分为导体、半导体以及绝缘体,这三种物质的导电率($\Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$)分别为:导体 $10^6 \sim 10^8$,半导体 $10^{-7} \sim 10^5$,绝缘体 $10^{-20} \sim 10^{-8}$ 。

硫化矿物浮选中的绝大多数矿物都是半导体,因此在这里简单介绍一下半导体的导电机制。半导体在能带结构上可以分为导带、禁带和价带,当半导体提高温度或接受光的照射,就可以使价带中的一部分电子激发,越过禁带而进入导带。电子离开后在价带中留下的缺位相当于一个假想的正电荷,称为空穴。这时导带中的电子和价带中的空穴称为载流子。半导体可以简单分为本征半导体和掺杂半导体:

(1)本征半导体。化学组分纯净并且晶体结构完整的半导体称为本征半导体。其导电机理如上所述。

(2)掺杂半导体。在晶体中含有少量杂质原子的半导体称为掺杂半导体，随杂质原子不同掺杂半导体又可分为下面两大类：

N型半导体 存在于半导体晶格中的杂质原子，若其价电子除成键者外尚有多余，则为施主。例如，半导体硅中掺杂砷，施主的多余电子容易脱离施主而进入导带，这种掺杂半导体中能导电的电子比本征半导体多得多，这种主要依靠电子导电的半导体称为N型半导体。

P型半导体 若杂质原子的电子较少，不能满足半导体晶体成键需要，则为受主。例如，半导体硅中掺硼，受主失去电子后带正电，受主能级相当于一个正电中心所束缚的多余价电子的能级，受主需要价电子，它比较容易将价带中成键的价电子拉到自己的周围，因而使价带中产生空穴而导电，这时半导体中的空穴的数量远远超过本征半导体，这种主要依靠空穴导电的半导体称为P型半导体。

不管是P型还是N型半导体，其导电能力均比本征半导体要大得多。例如硅的电阻率为 $2.14 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$ ，若掺入百万分之一的硼元素，电阻率就会减小到 $0.4 \Omega \cdot \text{cm}$ 。对于所研究的硫化矿物来说，由于天然矿石在成矿过程中类质同象、固溶体的产生，使硫化矿物晶体中存在或多或少的杂质原子，从而使硫化矿物的导电性大大增加，如理想闪锌矿，其禁带宽度达到 3.6 eV ，属于绝缘体，而当闪锌矿中存在铁杂质时，其禁带宽度可以减小到 0.49 eV ，具有很好的导电性；另外，对方铅矿的半导体类型的测定表明，天然方铅矿有的属P型半导体，有的则是N型半导体，电化学研究表明，方铅矿等硫化矿物与黄药的作用机理与其半导体类型有关。

对于金属，温度升高，金属导体中离子振动增强，电子移动阻力增大，故导电性减小；但是，在半导体中载流子的浓度是影响导电的主要因素，随温度升高，载流子浓度近似地按指数规律增大，导电率也显著增加。温度对半导体导电率的影响非常突出，这是半导体的重要特征之一。

对方铅矿、黄铜矿精矿的导电率的研究表明，其导电率与温度的关系服从下式：

$$\rho = B \exp(At) \quad (1-1)$$

式中： ρ 为导电率 ($\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$)； t 为温度 ($^{\circ}\text{C}$)； A 、 B 为常数。

对人工合成的硫化铅的测定表明，其导电率与温度的关系式为：

$$\rho = 0.00258(1 + 0.00895t + 0.00002t^2) \quad (1-2)$$

式中： ρ 为导电率 ($\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$)； t 为温度 ($^{\circ}\text{C}$)。

天然方铅矿的导电率在 $(2.6 \sim 4.4) \times 10^2 \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ 范围内，可见方铅矿是导电性能良好的半导体。