

**Fundamental study
of comprehensive utilization
from iron ore tailings**

铁尾矿综合利用 基础研究

王长龙 倪文 杨飞华 郑永超 编著

Hb1

中国建材工业出版社

铁尾矿综合利用基础研究

王长龙 倪 文 杨飞华 郑永超 编著

中国建材工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

铁尾矿综合利用基础研究/王长龙等编著. — 北京:
中国建材工业出版社, 2015. 1

ISBN 978-7-5160-1019-8

I. ①铁… II. ①王… III. ①铁-尾矿砂-综合利用
-研究 IV. ①TD926. 4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 261274 号

内 容 简 介

本书以铁尾矿资源化为主线,从铁尾矿工艺矿物学特性、铁尾矿中单矿物的蒸压反应过程、铁尾矿制备加气混凝土和铁尾矿深度还原-磁选影响因素等方面系统地阐述了铁尾矿综合利用过程的基础理论问题和应用技术问题。旨在规模化利用铁尾矿二次资源的同时,缓解我国矿产资源短缺、环境污染的局面,为进一步在矿业集中地区构建循环经济产业链,为依托企业提供新的经济增长点,发展以尾矿资源为依托的新兴产业提供技术支撑,有效缓解矿山企业由于尾矿堆存所带来的社会矛盾和环境、安全压力。

本书力求从基础理论入手来解决铁尾矿综合利用中的问题,理论联系实际,适用性强,对从事建材、矿物加工、化工、冶金及节能方面的科技人员有较高的使用和参考价值,也可作为大专院校相关专业的教学参考书,或作为相关专业的研究生教材。

铁尾矿综合利用基础研究

王长龙 倪 文 杨飞华 郑永超 编著

出版发行: **中国建材工业出版社**

地 址: 北京市海淀区三里河路 1 号

邮 编: 100044

经 销: 全国各地新华书店

印 刷: 北京鑫正大印刷有限公司

开 本: 787mm×1092mm 1/16

印 张: 9.75 彩插 0.5 印张

字 数: 242 千字

版 次: 2015 年 1 月第 1 版

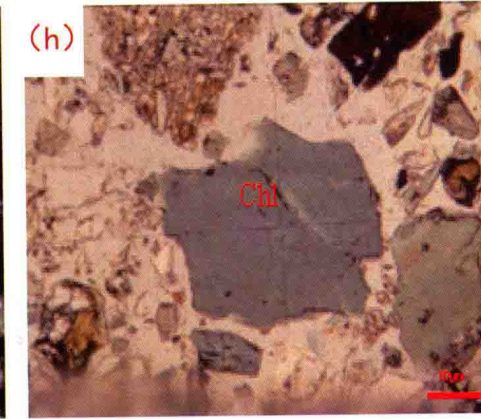
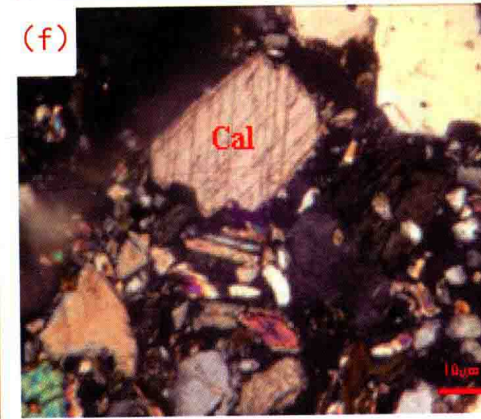
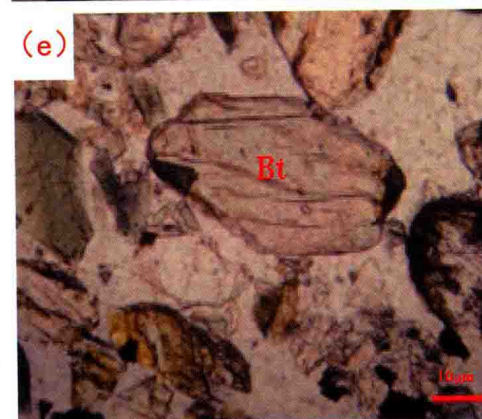
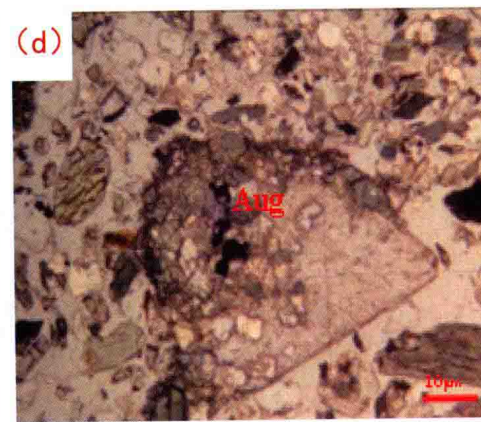
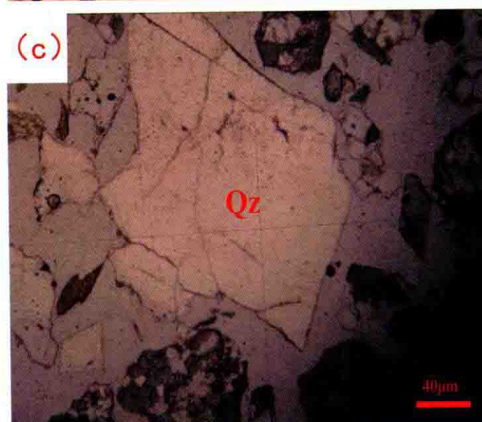
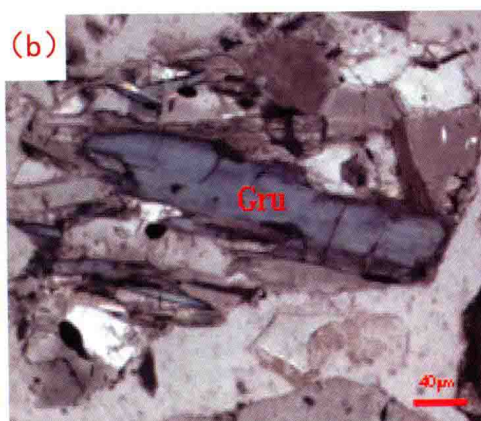
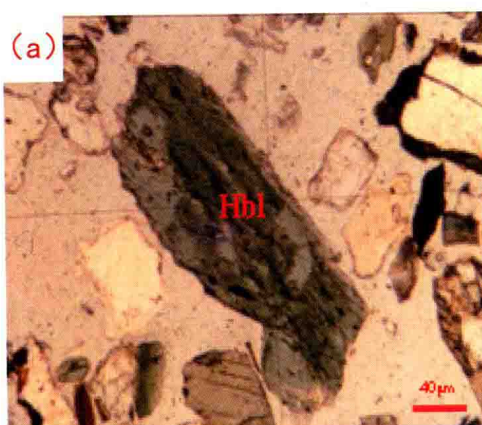
印 次: 2015 年 1 月第 1 次

定 价: 48.80 元

本社网址: www.jccbs.com.cn 微信公众号: zgjcgybs

广告经营许可证号: 京海工商广字第 8293 号

本书如出现印装质量问题,由我社发行部负责调换。联系电话: (010) 88386906



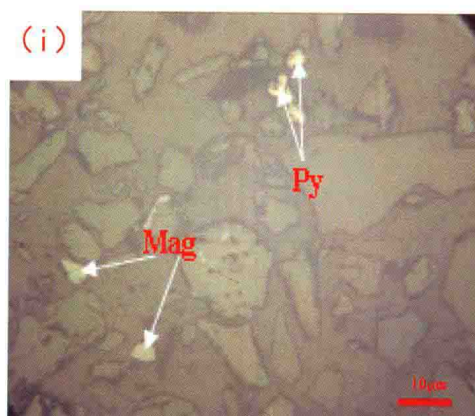


图 4-3 铁尾矿的显微结构 Hbl—普通角闪石（单偏光）

Gru—铁闪石（正交偏光）；Qz—石英（单偏光）；Aug—辉石（单偏光）；Bt—黑云母（单偏光）；
Cal—方解石（正交偏光）；Pl—斜长石（正交偏光）；Chl—绿泥石（单偏光）；Mag—磁铁矿（反光）；
Py—黄铁矿（反光）

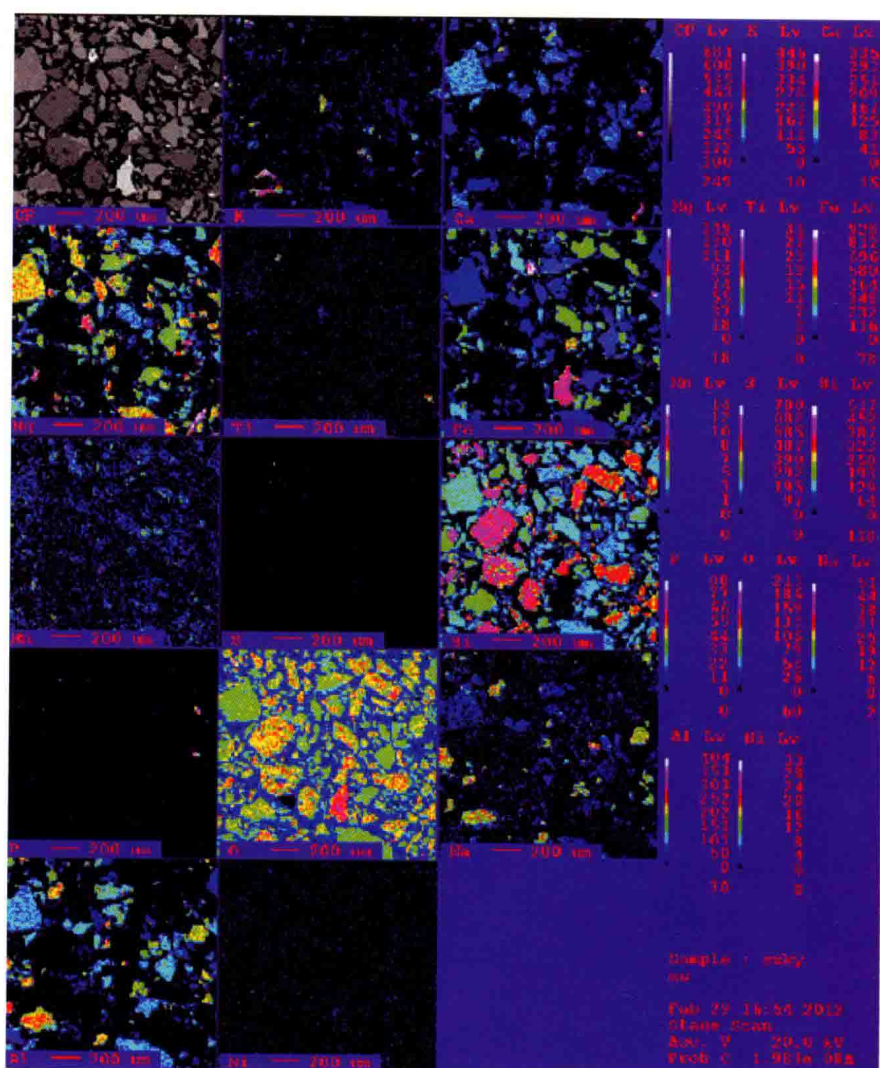


图 4-5 铁尾矿的不同元素的 EPMA 面分布分析结果

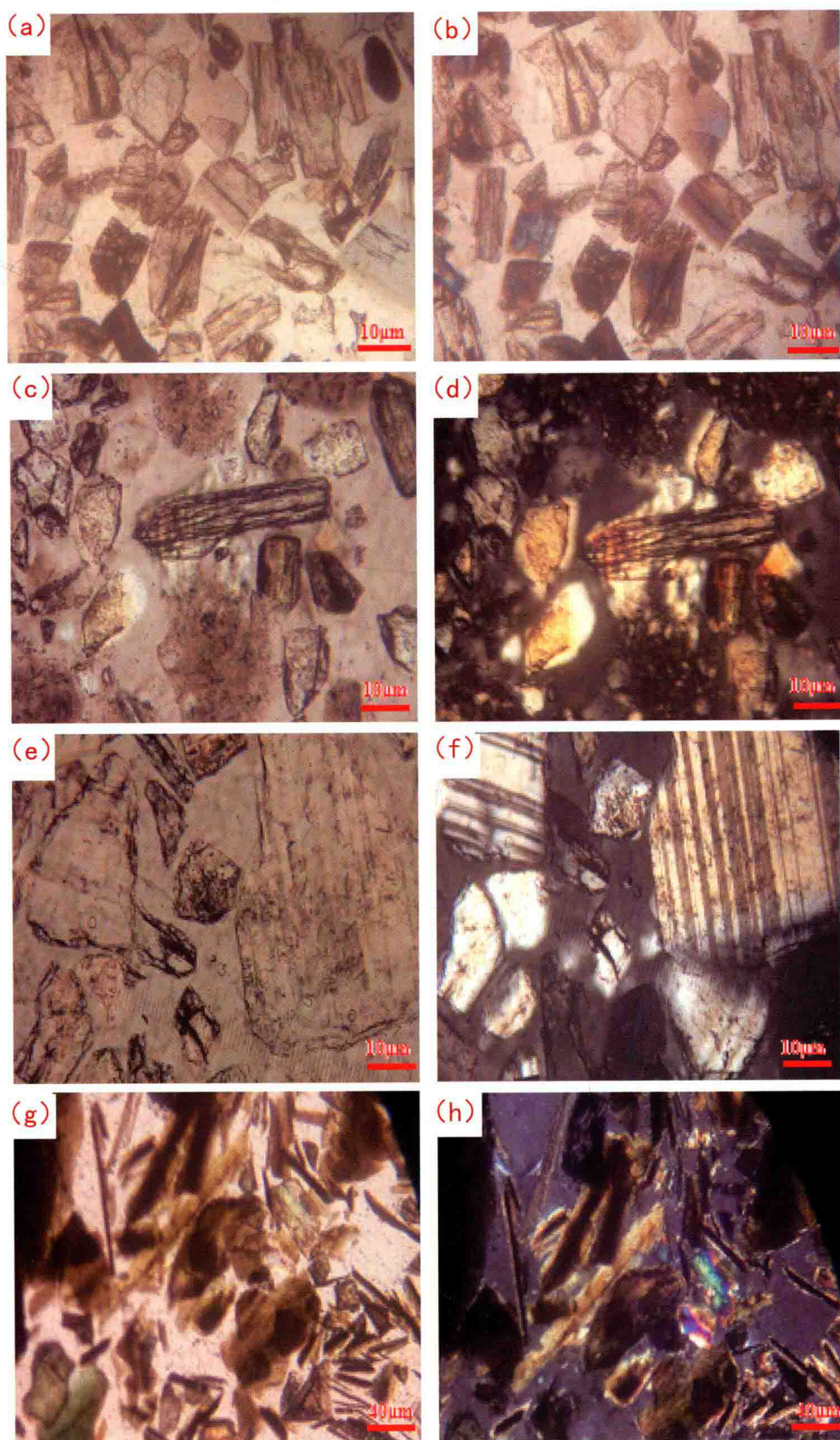


图 5-1 四种单矿物的显微结构

角闪石 [(a) 单偏光, (b) 正交偏光]; 拉长石 [(c) 单偏光, (d) 正交偏光]; 钠长石 [(e) 单偏光, (f) 正交偏光]; 黑云母 [(g) 单偏光, (h) 正交偏光]

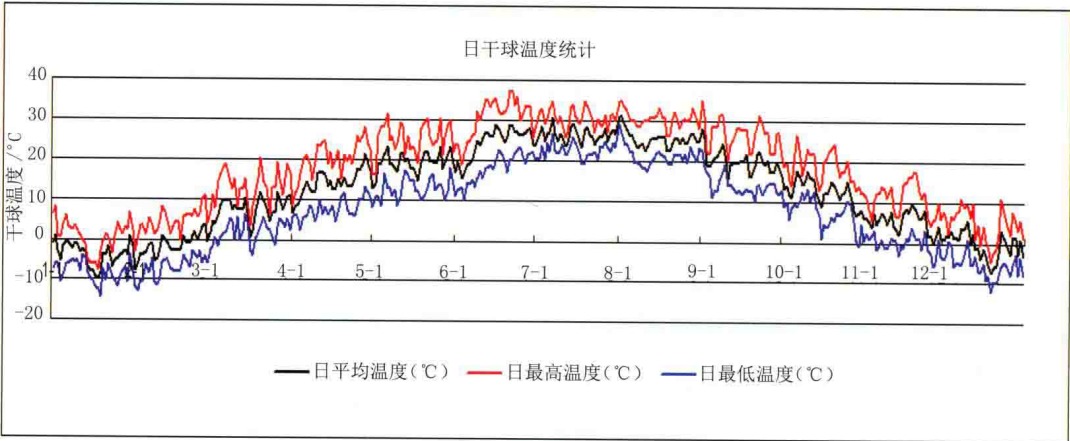


图 6-33 北京地区室外干球温度全年逐时变化曲线

Weekly Summary
Average Temperature (°C)

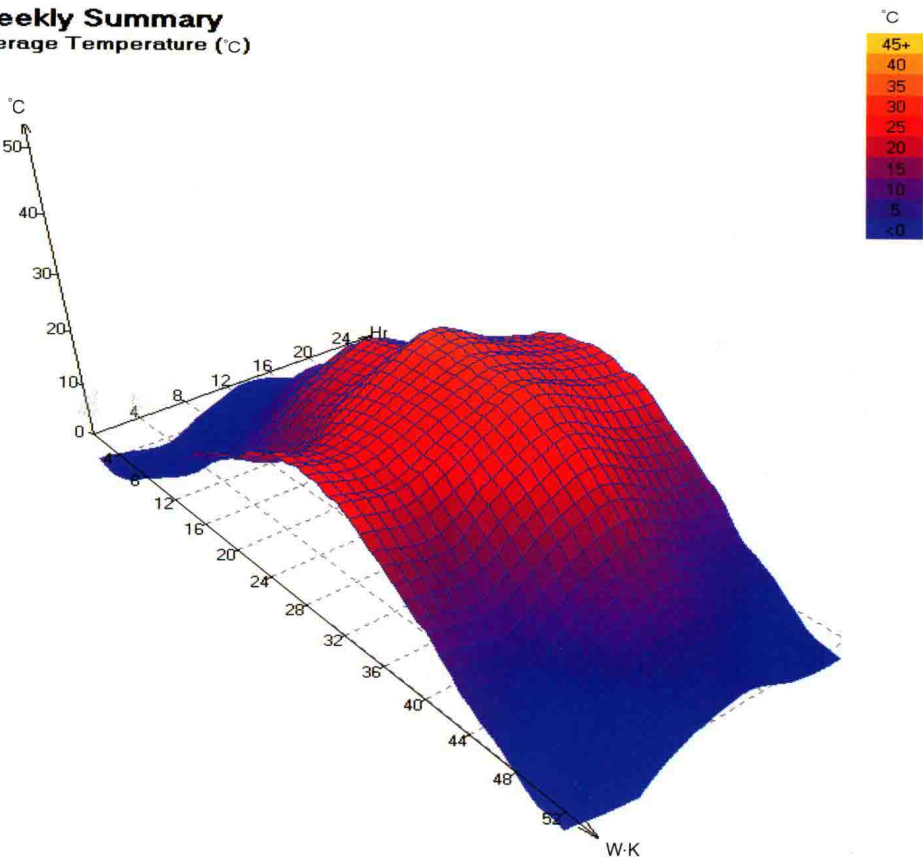


图 6-34 北京地区年度室外平均温度分布图

Weekly Summary
Relative Humidity (%)

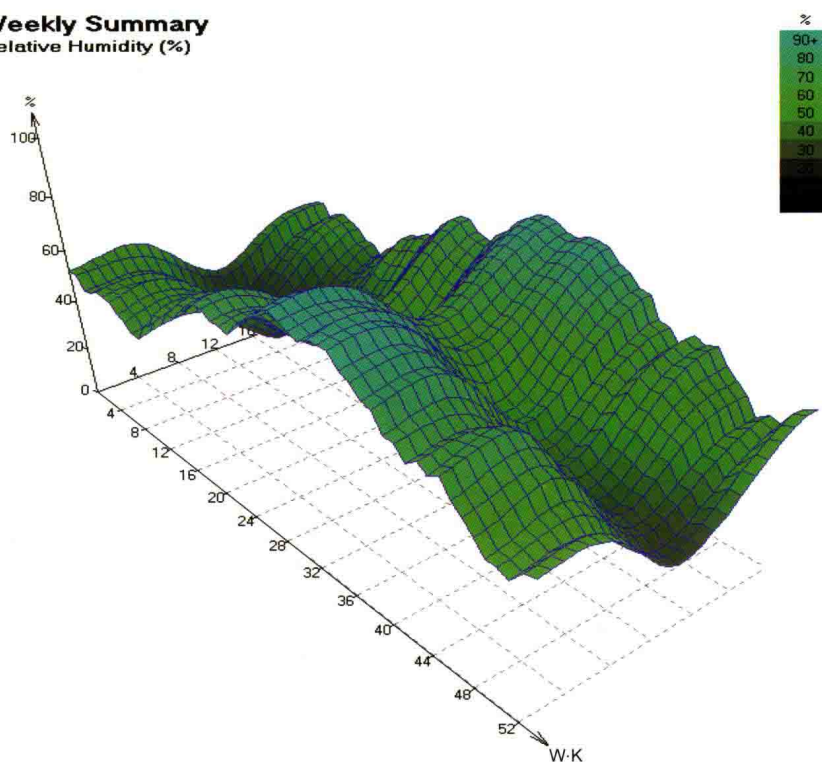


图 6-36 北京地区相对湿度分布图

Weekly Summary
Direct Solar Radiation (W/m)

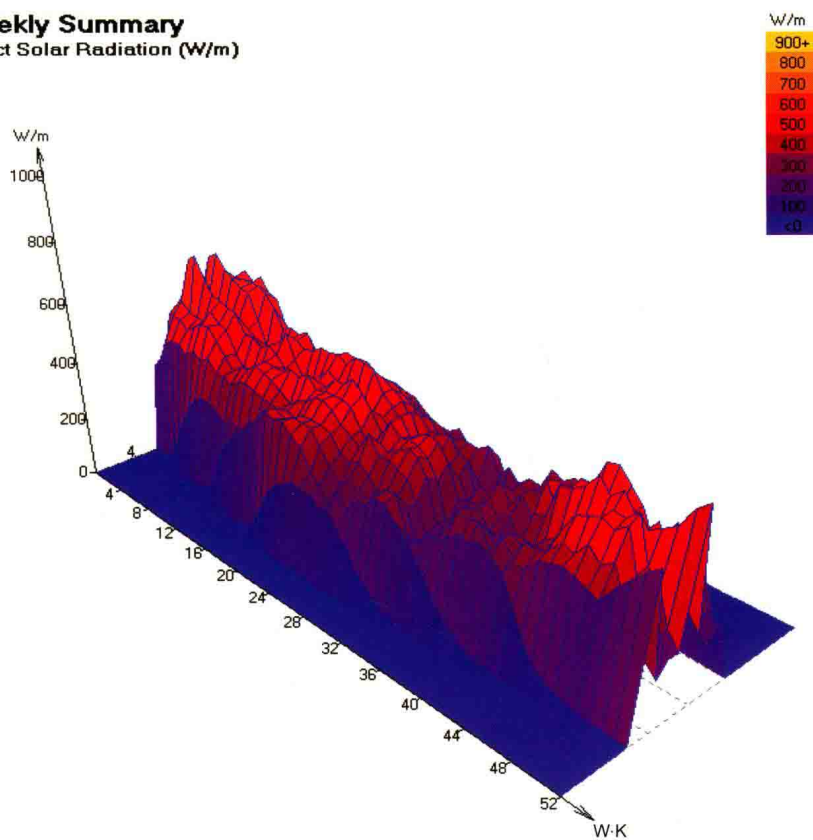


图 6-38 北京地区太阳辐射分布图



中国建材工业出版社

China Building Materials Press

我们提供

图书出版、图书广告宣传、企业/个人定向出版、设计业务、企业内刊等外包、代选代购图书、团体用书、会议、培训，其他深度合作等优质高效服务。

编辑部

010-88385207

宣传推广

010-68361706

出版咨询

010-68343948

图书销售

010-88386906

设计业务

010-68361706

邮箱：jccbs-zbs@163.com

网址：www.jccbs.com.cn

发展出版传媒 服务经济建设

传播科技进步 满足社会需求

(版权专有，盗版必究。未经出版者预先书面许可，不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。举报电话：010-68343948)

序 一

矿产资源开发在我国国民经济建设中起着极其重要的作用，伴随着铁矿资源的开发利用，引发了一系列的生态环境问题。尽管铁尾矿的综合利用已经引起了我国政府相关部门和学者的关注，但目前的综合利用率还不足 20%。加快铁尾矿综合利用的基础和应用研究，对促进我国循环经济发展，加快建设资源节约型、环境友好型社会具有重要的意义。

铁尾矿作为铁矿石选矿后排出的细粒废弃物，其矿物成分主要是硅酸盐，可以用来生产各种建筑材料。中国的铁矿以贫矿为主，所以铁尾矿排放量极大，铁尾矿化学组成的多样性、矿物成分的复杂性、堆放时间的长期性给铁尾矿综合利用的基础研究和应用技术带来了相当的难度。中国的铁矿主要有两种类型，含铁石英岩型和矽卡岩型，它们的成分有较大的差异，综合利用的方法和工艺流程也不同。该书是以山西灵丘的一个磁铁石英岩型铁矿的尾矿为研究对象。研究分两部分，即用这种尾矿制备加气混凝土，以及用深度还原-弱磁选的选冶联合方法直接从尾矿中提取金属铁微粉。前者的目的自然是为了高附加值地综合利用这种尾矿，后者是为了探索从富含铁硅酸盐中提取金属铁的可能性，当然这是为长远目标的基础研究。该书介绍了一些开创性的试验方法与试验结果，例如，结合磁铁石英岩型铁矿尾矿矿物成分的特点，用角闪石、斜长石和黑云母单矿物，在 1.25MPa、185℃碱性水热条件下进行蒸压试验，研究每单矿物的蒸压反应过程，为研究尾矿中硅酸盐矿物在蒸压建筑材料体系中的作用奠定初步理论基础。如此细致的基础研究给我留下极为深刻的印象。该书重点介绍了铁尾矿制备加气混凝土和从铁尾矿含铁硅酸盐中提取铁微粉方面的研究成果，也综合了国内外该领域的一些最新研究状况，是一本系统介绍有关铁尾矿特性与铁尾矿综合利用技术的著作，对从事工矿业固体废弃物基础研究及应用技术研究的科技工作者都有参考价值。

该书系王长龙副教授、倪文教授、杨飞华高级工程师、郑永超高级工程师在从事固体废弃物资源应用研究、开发与教学过程中部分工作成果的总结。借该书出版之际，我寄语有志于这一广阔领域研究的学者，广开思路、勇于探索，用新理论、新方法解决尾矿应用的技术瓶颈问题，有效地推动尾矿的综合利用。相信该书的出版，会引起同行的广泛关注。

叶大年

2014 年 11 月 21 日于北京

序 二

铁尾矿是我国堆存量和排放量最大的固体废弃物之一，其堆存量达 50 亿 t 以上，且每年以 5~6 亿 t 的速度增长。铁尾矿的长期堆存，占用土地，污染大气和地下水，尾矿库的溃坝、垮坝等重大事故严重危及人们的生命与财产安全。采用新方法、新技术和新工艺来实现铁尾矿的减量化、资源化和无害化，符合我国科学发展观的战略要求，对促进我国发展循环经济以及建设资源节约型社会具有重要意义。

我国铁矿石具有“贫”、“细”、“杂”等特点，平均铁品位较低，只有 32%，而这类铁矿石嵌布粒度细，为获得品位高的精矿大多采用细磨后选别，这些细磨后的细粒尾矿中粒度—0.074mm 的占到 50%。同时，由于成矿条件不同，矿床成因各异，所以相应矿石的尾矿种类繁多，性质复杂。铁尾矿作为一种复合矿物原料，除了含少量金属组分外，其他主要矿物组分为脉石矿物，如石英、长石、角闪石、辉石、石榴石及其蚀变矿物；其化学成分主要以硅、钙、铝、镁、铁的氧化物为主，并含有少量的磷、硫等。目前针对尾矿的性质不同，尾矿综合利用可以分为以下几个方面：回收有价值组分、用作建筑材料、用作土壤改良剂及复垦植被、用于井下充填料等。

《铁尾矿综合利用基础研究》一书以铁尾矿综合利用为主线，对铁尾矿制备加气混凝土和有价值铁组分回收进行了应用基础理论问题与技术问题的研究。以铁尾矿为主要硅质原料，通过机械力活化制备加气混凝土，不仅能够实现铁尾矿的资源化规模利用，而且在一定程度上缓解了资源短缺、资源危机以及环境污染等问题。在尾矿有价值铁组分回收中，探索了利用煤基深度还原-弱磁选的选冶联合方法直接铁从尾矿中提取金属铁微粉，为尾矿作为长远的潜在铁资源进行利用奠定了技术基础。

该书具有两大显著特点，其一是对尾矿的矿物学特性进行了系统的研究，对尾矿中的硅、铝、铁成分的赋存状态进行了分析，为尾矿的综合利用提供了技术基础；其二是对铁尾矿中除石英外的含 SiO_2 的非金属矿物在碱性水热条件下进行蒸压试验，模拟加气混凝土生产的基本反应过程进行蒸压反应过程的研究，为研究尾矿生产蒸压建筑材料奠定初步理论基础。该书从应用的角度探讨了应用过程的理论问题，既有一定的理论深度，又有实际应用价值，对大专院校相关专业师生、科研院所和相关行业的科技人员具有重要的参考价值。

我深信，该书的出版将能促进铁尾矿综合利用，也希望该书能够推进其他种类的工业固体废弃物的工程应用，特为之序。



2014 年 11 月 20 日于北京

前 言

矿产资源是人类社会赖以生存和发展的不可再生的重要自然资源，是人类社会文明进步的基础。世界上 95% 的一次能源、85% 以上的工业原料以及 70% 以上的农业生产资料均来源于矿产资源。铁矿石作为矿产资源的重要组成部分，是钢铁生产的主要原料，而铁尾矿是铁矿石采选过程中产生的废弃物。随着钢铁工业的发展，铁矿石需求量持续增加，人们在铁矿石开发中获取巨大利益的同时，也遭受着铁尾矿大量堆存所带来的土壤、水体以及空气污染等环境问题。在我国，尾矿是排放量最大的固体废弃物之一，其中绝大多数尚未被综合利用，尤其是有色金属尾矿和铁尾矿的综合利用率不足 20%，因此，加快尾矿的综合利用已迫在眉睫。

本书总结了作者近年来从事尾矿综合利用工作中积累的部分经验与体会，以铁尾矿资源化为主线，首先概述了铁尾矿的产生及危害、国内外综合利用现状，同时对铁尾矿的综合利用途径进行了评述。在众多的综合利用途径中，尾矿制备建筑材料和尾矿中回收有价金属的应用较广泛。根据尾矿中矿物组成的两大特点：①非金属矿物石英、角闪石、斜长石、黑云母等在尾矿中存量巨大，具有潜在的高附加值特性，可以用来生产建筑材料加气混凝土；②大量的铁赋存在含铁硅酸盐矿物中，甚至超过了我国某些矿山开采矿石的最低品位，可以作为长远的潜在铁资源进行利用。

针对铁尾矿的工艺矿物学方面，进行的研究包括原矿石的工艺矿物学特性及铁尾矿的产生过程、铁尾矿的元素分析、铁尾矿的矿物组成及含量等；针对铁尾矿制备蒸压建筑材料的理论基础方面，通过综合各地不同铁尾矿组分分析，重点选取铁尾矿中除石英外常见的含 SiO_2 的四种硅酸盐矿物，即角闪石、拉长石、钠长石和黑云母等，进行蒸压条件下的反应过程对比分析研究；针对铁尾矿制备加气混凝土的应用技术方面，进行的研究包括铁尾矿的机械力活化、不同制备条件对加气混凝土性能的影响、铁尾矿加气混凝土的反应机理等，此外，还针对铁尾矿回收铁组分方面，进行了铁尾矿深度还原-磁选直接提取金属铁微粉的研究，其目的是消除工程界对铁尾矿制备加气混凝土的疑虑，促进铁尾矿的规模化利用。本书从基础理论入手，突出铁尾矿的应用技术，力求理论研究和应用研究相结合、试验研究和工程应用相结合、应用问题与解决途径相结合，可为从事建材、矿物加工、化工、冶金及节能环保领域的科研技术人员以及大专院校相关专业师生参考。

本书的所有研究工作在北京科技大学完成,感谢孙体昌教授、孙春宝教授、李克庆教授、杨慧芬教授、陈德平副教授、马鸿志副教授、柳靖副教授、寇珏老师、徐承焱老师、胡文韬老师长期以来给予我极大的鼓励、爱护与支持,特别感谢中国科学院地质与地球物理研究所叶大年院士和北京建筑材料科学研究总院副院长陈旭峰教授审阅本书并作序;感谢国家高技术研究发展计划(863计划)(2012AA062405)、陕西省尾矿资源综合利用重点实验室开放基金(2014SKY-WK010)、河北省建设科学技术研究计划资助项目(2012-136)对于本研究工作的支持。本书撰写过程中,参阅了大量国内外文献与同行的工作。感谢北京金隅加气混凝土有限责任公司的张涣良工程师、黄长飞主任以及山西灵丘豪洋矿业有限公司董事长张永俊、刘光灵总经理、张鹏翔主任对本书技术开发与工程化实施过程中给予的帮助;感谢马明生博士后、李德忠博士后、刘建国博士、高术杰博士、王爽博士、乔春雨博士、仇夏杰硕士、平硕硕士、王健月硕士等在我写作过程中提供大量的资料与帮助,在此对他们付出的辛勤劳动一并表示感谢;感谢我的家人对我的理解和支持,使我能全身心投入到科研工作中。

本书的出版得到了固废资源化利用与节能建材国家重点实验室领导的大力支持和帮助,在此表示衷心感谢。

鉴于铁尾矿工程应用较少、涉及专业多、知识面广,受作者水平和学科知识面所限,书中难免存在着许多缺点和错误之处,敬请各位同行和读者批评指正。

作者

2014年11月于北京

目 录

1 引言	1
2 文献综述	3
2.1 铁尾矿综合利用现状	3
2.1.1 铁尾矿的产生及危害	3
2.1.2 国内外铁尾矿综合利用的现状	6
2.1.3 铁尾矿的综合利用途径	8
2.2 尾矿在加气混凝土中的利用现状	11
2.2.1 加气混凝土的特性和应用	11
2.2.2 国内外加气混凝土的发展及研究状况	14
2.2.3 尾矿加气混凝土的发展及研究状况	17
2.3 尾矿中硅酸铁选铁技术进展	19
2.3.1 废渣中硅酸铁选铁发展及研究现状	19
2.3.2 尾矿中硅酸铁选铁发展及研究现状	20
3 研究的技术路线、研究方法 with 试验条件	22
3.1 研究思路及技术路线	22
3.1.1 研究思路	22
3.1.2 技术路线	23
3.2 研究方法	23
3.2.1 试验方案	23
3.2.2 试验原料	24
3.3 试验条件	28
3.3.1 试验设备	28
3.3.2 原材料及成品性能测试方法	29
3.3.3 分析与测试	30
4 高铁硅酸盐尾矿的工艺矿物学特性研究	32
4.1 原矿石工艺矿物学特性及铁尾矿的产生过程	32
4.1.1 原矿石工艺矿物学特性	32
4.1.2 铁尾矿的产生过程	33
4.2 铁尾矿的元素分析	33

4.3 铁尾矿矿物组成及含量	35
4.3.1 铁尾矿的化学物相分析	35
4.3.2 铁尾矿的热分析	35
4.3.3 铁尾矿的光学显微镜分析	36
4.3.4 铁尾矿的X射线衍射分析	37
4.3.5 铁尾矿的电子探针分析	37
4.3.6 铁尾矿的粒度分析	38
4.4 小结	39
5 高铁硅酸盐尾矿中单矿物的蒸压反应过程研究	40
5.1 单矿物的工艺矿物学特性	41
5.2 单矿物蒸压反应过程试样的制备	41
5.3 试验结果与分析	42
5.3.1 角闪石的蒸压反应过程研究	42
5.3.2 拉长石的蒸压反应过程研究	44
5.3.3 钠长石的蒸压反应过程研究	50
5.3.4 黑云母的蒸压反应过程研究	57
5.4 小结	60
6 高铁硅酸盐尾矿制备加气混凝土的研究	61
6.1 硅质原料的预处理	61
6.1.1 铁尾矿的预处理	62
6.1.2 硅砂的预处理	66
6.2 硅质原料对铁尾矿加气混凝土性能的影响	69
6.2.1 铁尾矿细度对加气混凝土性能的影响	70
6.2.2 硅砂细度对加气混凝土性能的影响	75
6.2.3 铁尾矿掺量对加气混凝土性能的影响	77
6.3 钙质材料对铁尾矿加气混凝土性能的影响	80
6.3.1 水泥掺量对加气混凝土性能的影响	80
6.3.2 石灰掺量对加气混凝土性能的影响	82
6.3.3 石膏掺量对加气混凝土性能的影响	85
6.4 水料比对铁尾矿加气混凝土性能的影响	87
6.5 铁尾矿加气混凝土的正交试验	88
6.5.1 正交试验设计	88
6.5.2 正交试验方案与结果分析	89
6.5.3 验证试验	91
6.6 Al粉掺量对铁尾矿加气混凝土性能的影响	92
6.6.1 Al粉的发气	92
6.6.2 不同Al粉掺量对加气混凝土性能的影响	93
6.7 稳泡剂掺量对铁尾矿加气混凝土性能的影响	94
6.7.1 稳泡剂的作用及机理	94

6.7.2 不同稳泡剂掺量对加气混凝土性能的影响..... 95

6.8 铁尾矿加气混凝土反应机理研究..... 97

6.8.1 铁尾矿加气混凝土的物理性能..... 97

6.8.2 铁尾矿加气混凝土的 XRD 分析 98

6.8.3 铁尾矿加气混凝土的 FT-IR 分析 100

6.8.4 铁尾矿加气混凝土的 FE-SEM 分析 101

6.8.5 铁尾矿加气混凝土的孔结构分析 103

6.8.6 铁尾矿加气混凝土的水化反应机理 103

6.9 铁尾矿加气混凝土对建筑负荷影响模拟 105

6.9.1 建筑模型的设计 106

6.9.2 北京地区气候分析 106

6.9.3 能耗模拟软件 107

6.9.4 建筑负荷分析 109

6.9.5 负荷模拟结果 113

6.10 小结..... 117

7 高铁硅酸盐尾矿深度还原—磁选影响因素研究 119

7.1 二元碱度对还原铁指标的影响 120

7.2 还原剂对还原铁指标的影响 121

7.3 还原温度对还原铁指标的影响 122

7.4 还原时间对还原铁指标的影响 123

7.5 升温方式对还原铁指标的影响 124

7.6 冷却方式对还原铁指标的影响 125

7.7 弱磁选工艺对还原铁指标的影响 126

7.7.1 磨矿细度对还原铁指标的影响 126

7.7.2 磁场强度对还原铁指标的影响 127

7.8 添加剂种类对还原铁指标的影响 127

7.9 还原剂种类对还原铁指标的影响 129

7.10 还原产品特性分析..... 130

7.10.1 还原焙烧产物特性..... 131

7.10.2 磁选还原铁粉特性..... 132

7.11 小结..... 134

8 结论 136

参考文献..... 138

1 引言

矿产资源是人类社会赖以生存和发展、非可再生的重要自然资源^[1]。世界上 70% 的工业制成品原料和 90% 的能源来源于矿产资源；而我国 95% 的一次能源、85% 以上的工业原料以及 70% 以上的农业生产资料均来源于矿产资源，全国工业产值的 30% 是以矿业和以矿业为原料的加工业产值，同时从事矿业生产的人近 2000 万^[2-3]。铁矿石作为矿产资源的重要组成部分，是钢铁生产的主要原料，随着经济的迅猛发展，铁矿石的需求量日益增加，我国每年开采矿石近 70 亿 t，作为选矿过程中排放的铁尾矿产出量也越来越大。据不完全统计，截止到 2011 年底，我国各类尾矿堆存总量达 120 亿 t，其中铁尾矿的堆存量占全部尾矿的近 1/3^[4]，大量的堆存尾矿给资源、环境、安全和土地等带来一系列的问题^[5-7]。随着可开采矿石日趋贫化、资源日渐枯竭，解决资源困扰的根本出路必须依赖于二次资源的利用，它是解决矿产资源短缺和发展矿山循环经济^[8-9]的有效途径。我国矿产资源中 80% 为共（伴）生矿，大量有价值的资源被存留在尾矿之中。非金属矿物在尾矿中不但存量巨大，而且有些具有潜在的高附加值特性。这些尾矿资源如果不加以利用，将造成巨大的资源浪费。在世界各国重视二次资源尾矿的同时^[10-15]，我国的绝大多数尾矿尚未被综合利用，尤其是有色金属尾矿和铁尾矿的综合利用率更低，综合利用率不足 10%。随着矿产资源被开采力度的加大，尾矿排出量呈现每年不断增加的趋势，因此加快尾矿的综合利用已迫在眉睫。

近几年国家出台了一系列的法律、法规，加强了对固体废物进行综合利用的要求。依据《中华人民共和国循环经济促进法》、《中华人民共和国国民经济和社会发展第十一个五年规划纲要》，工信部印发《金属尾矿综合利用专项规划（2010~2015 年）》的通知（工信部联规〔2010〕174 号），铁尾矿的综合利用被列为金属尾矿综合利用的重点领域。

山西省灵丘县豪洋矿业有限公司每年排放的尾矿达 200 多万吨，基于该公司铁尾矿难以资源化利用和矿山迫切需求增加铁尾矿附加值及减少铁尾矿带来的环境隐患的背景，本书对灵丘高铁硅酸盐尾矿进行综合利用基础研究，初步探索了两种铁尾矿的综合利用方法的技术可行性，即铁尾矿制备加气混凝土和铁尾矿深度还原提铁，实现对铁尾矿中非金属