

林育炼 刘盛秋 编著



# 耐火材料与能源

冶金工业出版社

# 耐火材料与能源

林育炼 刘盛秋 编著

**Refractories and Energy**

by

Lin Yulian Liu Shengqiu



冶金工业出版社

(京)新登字036号

## 内 容 简 介

本书从利用材料的性能出发,较全面、深入地阐述了与能源的节约、有效利用、储存、开发和转换以及防治污染等有关的高温能源工程和能源科学技术的各个环节使用的耐火材料的基础理论、生产工艺和应用,介绍了近代能源和耐火材料科学技术的发展状况和研究成果,并对目前正在研究和有待开发的研究课题作了探索性讨论。全书分7章:1. 导论;2. 绝热与隔热耐火材料;3. 热交换与高传热耐火材料;4. 蓄热与储能用耐火材料;5. 固体电解质陶瓷的氧离子传导与高温陶瓷测氧探头;6. 高温加热与高温陶瓷发热体;7. 能源的开发和转换与耐火材料的应用。

本书可供从事耐火材料生产、应用和研究的科技人员,能源工程技术人员,环保工作者,以及大专院校有关专业师生参考。

### 耐火材料与能源

林育焯·刘盛秋 编著

Refractories and Energy

by

Lin Yulian Liu Shengqiu

冶金工业出版社出版发行

(北京北河沿天街嵩祝院北巷39号)

新华书店总店科技发行所经销

河北省香河县第二印刷厂印刷

850×1168 1/32 印张 15.375 字数 400 千字

1993年7月第一版 1993年7月第一次印刷

印数 1~3300 册

ISBN 7-5024-1268-9

TQ·55 (平)定价14.80元

(精)定价17.80元

## BRIEF INTRODUCTION

Starting from taking advantage of material properties, the present book originally elaborates extensive, comprehensive and profound basic theory, production and technology and application of refractories used for various purposes in the high temperature energy engineering and science associated with energy conservation, efficient utilization, storage, exploitation and transformation as well as environment pollution prevention. The contemporary development and achievements of science and technique in energy and refractories fields are described in detail, furthermore, the subjects that are under way of development and study at present are fully explained as well.

This book comprises 7 chapters as follows:

1. Introduction
2. Thermal Insulation and Insulating Refractories
3. Heat Exchange and High Heat Transferring Refractories
4. Thermal Capacity and Refractories for Energy Storage
5. Oxygen Ion Conduction of High Temperature Solid Electrolyte Ceramics and High Temperature Ceramics Oxygen Sensors
6. High Temperature Generation and High Temperature Ceramic Heating Elements
7. Exploitation and Transformation of Energy and Refractory Application

This book is recommended to those people who are engaging in production and scientific research of refractories, exploitation, utilization and conservation of energy, environment protection, as well as college teachers and students of material and energy science departments.

## 序

近半个世纪来,特别是近一二十年来,我国的耐火材料科学研究、生产和应用技术得到了很大的发展和进步。但是,耐火材料专业的图书资料较少,缺少系统论述基础理论、工艺原理、生产和使用等方面的专著,广大科技工作者、领导和管理干部盼望早出多出这方面的论著。因此,《耐火材料与能源》一书的出版是值得高兴和庆贺的。

本书作者颇具匠心地从利用材料的性能出发,较全面、深入地阐述了与能源的节约、有效利用、储存、开发和转换以及防治污染等有关的能源工程和能源科学技术的各个环节使用的耐火材料的基础理论、生产工艺和应用。本书内容丰富,把能源科学和材料科学以及生态环境保护问题有机地融为一体。全书严密的整体结构与专题论述协调一致,有使人耳目一新之感。

本书不仅尽力展示近代能源和耐火材料科学的发展状况和研究成果,并对目前正在研究和有待开发的研究课题作了充分的讨论,以期引发读者的进一步思考和研究。全书文笔流畅,说理深入浅出,理论与实用结合,兼顾普及与提高,配有必要的图表,以求通俗易懂。

总之,本书是一部很有实用价值的参考书,深信本书将受到广大读者的欢迎,因此本人在此乐于向读者推荐。

王泽田

1992年8月

## 前 言

1983年,我赴美国俄亥俄州大学陶瓷工程系学习和研究,时值世界石油危机爆发后的第10年。初次踏上美国国土,感慨颇多。但给我印象最深的要数那高速公路上日夜川流不息的车流和入夜后灯火辉煌的景观。心中便产生一个疑问,能源危机才过去几年,节能意识就淡薄了吗?同行者也有同感并加点评。对此,我产生了浓厚的兴趣。

进入学习、研究工作之后,能源问题依然深深印在脑中并不断思虑,渐渐成为探索的目标。在学习、工作、参观、参加会议等种种活动中,留心观察,用心思索,进而开始收集、积累和研读文献,并萌发写书的念头。

我的妻子,在我留美期间,也已关注节能耐火材料的发展动向,并将此列入她的研究课题。她对我写书的想法不但全力支持,并积极参与,成为本书的合作者。

在本书撰写过程中,得到许多同志的帮助,书中引用了许多作者的文献,在此表示谢忱。作者特别感谢的是,王泽田教授在百忙中审阅书稿,并为之作序。

由于本书的选题内容较新,涉及面又广,书稿虽经反复修改,有些章节数易其稿,但难免仍有疏漏,祈读者不吝赐教。

林育炼 高级工程师

1992年9月

于洛阳耐火材料研究院

# 目 录

<b>1 导论</b> .....	(1)
1.1 能源与社会发展 .....	(1)
1.2 能源资源与能源危机 .....	(4)
1.3 能源消费与能源效益 .....	(6)
1.4 能源的使用与生态环境 .....	(8)
1.5 能源的开发和有效利用与材料科学 .....	(10)
参考文献 .....	(13)
<b>2 绝热与隔热耐火材料</b> .....	(14)
2.1 隔热耐火材料与节能 .....	(14)
2.1.1 窑炉和热工设备的热损失 .....	(14)
2.1.2 炉体表面的散热损失 .....	(17)
2.1.3 炉体的蓄热损失 .....	(22)
2.1.4 窑炉的水冷热损失 .....	(24)
2.1.5 窑炉的泄漏热损失 .....	(26)
2.1.6 应用隔热耐火材料的节能效益 .....	(28)
2.2 隔热耐火材料的种类 .....	(29)
2.3 隔热耐火材料的结构与性能 .....	(32)
2.3.1 隔热耐火材料的组织结构特点 .....	(32)
2.3.2 隔热耐火材料的体积密度与气孔率 .....	(33)
2.3.3 隔热耐火材料的隔热性能 .....	(35)

2.3.4	隔热耐火材料的强度 .....	(51)
2.3.5	隔热耐火材料的耐热性 .....	(51)
2.4	隔热耐火材料的制造与性能 .....	(54)
2.4.1	粉粒状保温隔热耐火材料 .....	(54)
2.4.2	定形保温隔热耐火材料 .....	(87)
2.4.3	纤维状隔热材料 .....	(100)
2.4.4	复合隔热保温材料 .....	(137)
2.5	选用隔热耐火材料的技术经济问题的考虑 .....	(147)
2.5.1	隔热材料的体积密度的选择 .....	(147)
2.5.2	气氛与轻质隔热耐火材料的应用 .....	(148)
2.5.3	隔热方式 .....	(152)
2.5.4	隔热耐火材料的厚度及炉衬外表材料的影响 .....	(152)
2.5.5	隔热保温工程的经济性 .....	(152)
2.5.6	隔热对耐火材料内衬使用条件的影响 .....	(156)
	参考文献 .....	(157)

### 3 热交换与高传热耐火材料 .....

3.1	传热与节能 .....	(160)
3.2	高导热耐火材料 .....	(163)
3.2.1	热传导机理 .....	(163)
3.2.2	高导热陶瓷 .....	(167)
3.2.3	高导热性硅砖 .....	(167)
3.2.4	碳化硅耐火材料 .....	(182)
3.2.5	炭素耐火材料 .....	(203)
3.3	高温陶瓷热交换器用耐火材料 .....	(210)
3.3.1	高温陶瓷热交换器与节能 .....	(210)
3.3.2	陶瓷热交换器的结构类型 .....	(214)
3.3.3	高温陶瓷热交换器用耐火材料 .....	(217)
3.4	高辐射耐火材料 .....	(223)
3.4.1	高辐射节能耐火涂料 .....	(223)
3.4.2	高温陶瓷辐射加热管 .....	(232)
3.5	高反射节能耐火涂料 .....	(234)



参考文献	(237)
<b>4 蓄热与储能用耐火材料</b>	<b>(239)</b>
4.1 蓄热与节能	(239)
4.2 电—热储能用耐火材料	(241)
4.2.1 电—热耐火材料储能装置	(241)
4.2.2 电—热储能用耐火材料	(243)
4.2.3 电—热储能装置的使用情况	(245)
4.3 高炉热风炉用耐火材料	(245)
4.3.1 高炉热风炉的结构与类型	(245)
4.3.2 热风炉用耐火材料的使用条件	(247)
4.3.3 高温热风炉用耐火材料的选择和应用	(250)
4.3.4 热风炉用耐火材料的结构与性能	(260)
4.4 玻璃池窑蓄热室用耐火材料	(275)
4.4.1 玻璃池窑蓄热室耐火材料的使用条件	(275)
4.4.2 玻璃池窑蓄热室用耐火材料的选择与应用	(278)
4.4.3 玻璃池窑蓄热室用碱性耐火材料的结构与性能	(289)
4.4.4 玻璃池窑蓄热室格子砖用耐火材料的发展	(291)
参考文献	(294)
<b>5 固体电解质陶瓷的氧离子</b>	
<b>传导与高温陶瓷测氧探头</b>	<b>(296)</b>
5.1 氧含量的控制与节能	(296)
5.2 高温固体电解质陶瓷测氧探头的测氧原理	(298)
5.3 测氧探头的制造工艺与高温固体电解质陶瓷的性质	(302)
5.3.1 测氧探头的制造工艺	(302)
5.3.2 高温固体电解质陶瓷的结构与性能	(303)
5.4 高温固体电解质陶瓷测氧探头的应用	(312)
5.4.1 燃烧过程控制	(312)
5.4.2 工业窑炉的气氛控制	(316)
5.4.3 钢铁冶炼过程的控制	(317)

5.4.4 汽车废气排放控制 .....	(324)
参考文献 .....	(336)

## 6 高温加热与高温陶瓷发热体 .....

6.1 高温加热与高温陶瓷发热体的应用 .....	(337)
6.2 碳化硅发热体 .....	(339)
6.2.1 碳化硅发热体的种类与制造 .....	(339)
6.2.2 碳化硅发热体的性质 .....	(340)
6.2.3 碳化硅发热体的使用 .....	(345)
6.2.4 碳化硅发热体的改进 .....	(351)
6.3 硅化钼发热体 .....	(354)
6.3.1 硅化物和二硅化钼发热体材料 .....	(354)
6.3.2 硅化钼发热体的种类与制造 .....	(355)
6.3.3 硅化钼发热体的性能 .....	(356)
6.3.4 硅化钼发热体的使用 .....	(359)
6.3.5 硅化钼发热体的改进 .....	(361)
6.4 铬酸钼发热体 .....	(363)
6.4.1 稀土金属铬酸钼和铬酸钼发热体材料 .....	(363)
6.4.2 铬酸钼发热体的种类与制造 .....	(364)
6.4.3 铬酸钼发热体的性质 .....	(367)
6.4.4 铬酸钼发热体的使用 .....	(369)
6.5 氧化锆发热体 .....	(371)
6.5.1 氧化锆发热体的种类与制造 .....	(372)
6.5.2 氧化锆发热体的性质 .....	(373)
6.5.3 氧化锆发热体的使用 .....	(376)
6.5.4 氧化锆发热体的改进 .....	(378)
6.6 氧化钽发热体 .....	(379)
6.7 炭素发热体 .....	(380)
6.7.1 炭素发热体的种类与制造 .....	(380)
6.7.2 炭素发热体的性质 .....	(482)
6.7.3 炭素发热体的使用 .....	(485)
参考文献 .....	(386)

<b>7 能源的开发和转换与耐火材料的应用</b> .....	<b>(388)</b>
7.1 能源的开发和转换效率与耐火材料 .....	(388)
7.2 煤的气化与煤气化用耐火材料 .....	(388)
7.2.1 煤气化的意义 .....	(389)
7.2.2 煤的气化方法及对耐火材料的要求 .....	(391)
7.2.3 耐火材料在煤气化炉气氛中的稳定性 .....	(395)
7.2.4 耐火材料抵抗高温熔融煤渣侵蚀的性能 .....	(398)
7.2.5 煤气化炉内衬的耐火材料应用 .....	(399)
7.3 火力发电用耐火材料 .....	(407)
7.3.1 燃烧粉煤锅炉用耐火材料 .....	(407)
7.3.2 燃油锅炉用耐火材料 .....	(411)
7.3.3 液态排渣和旋风式燃烧锅炉用耐火材料 .....	(411)
7.3.4 垃圾焚烧炉用耐火材料 .....	(413)
7.4 磁流体发电与磁流体发电用耐火材料 .....	(415)
7.4.1 磁流体发电方法及对高温工程材料的要求 .....	(415)
7.4.2 燃烧室用耐火材料 .....	(418)
7.4.3 发电通道用耐火陶瓷材料 .....	(420)
7.4.4 空气预热器用耐火材料 .....	(430)
7.5 高温燃料电池发电与高温燃料电池用 耐火陶瓷材料 .....	(437)
7.5.1 高温燃料电池发电方法及对材料的要求 .....	(437)
7.5.2 高温燃料电池用固体电解质陶瓷 .....	(439)
7.6 太阳能发电与太阳能发电用耐火材料 .....	(442)
7.7 发动机用高温工程陶瓷材料 .....	(443)
7.7.1 发动机的效率与高温工程陶瓷材料 .....	(443)
7.7.2 陶瓷发动机用高温工程陶瓷材料的选择 .....	(446)
7.7.3 氮化硅的合成 .....	(450)
7.7.4 氮化硅陶瓷制品的制造工艺 .....	(452)
7.7.5 氮化硅材料的结构与性能 .....	(455)
7.8 氢能的生产与氢能生产用耐火陶瓷材料 .....	(467)
7.8.1 氢能的生产方法及对材料的要求 .....	(467)

7.8.2 氢能生产用耐火陶瓷材料..... (467)

参考文献..... (472)

# REFRACTORIES AND ENERGY

## CONTENTS

1	Introduction .....	(1)
1.1	Energy and Civilization .....	(1)
1.2	Energy Resources and Energy Crises .....	(4)
1.3	Energy Consumption and Cost Effectiveness of Energy .....	(6)
1.4	Energy Use and Ecological Environment .....	(8)
1.5	Exploitation and Efficient Use of Energy and Material Science .....	(10)
2	Thermal Insulation and Insulating Refractories .....	(14)
2.1	Insulating Refractories and Energy Saving .....	(14)
2.2	Classification of Insulating Refractories .....	(29)
2.3	Structure and Properties of Insulating Refractories .....	(32)
2.4	Manufacture and Properties of Insulating Refractories .....	(54)
2.5	Technical and Economical Considerations on Selecting Insulating Refractories .....	(147)
3	Heat Exchange and High Heat Transferring Refractories .....	(160)
3.1	Heat Exchange and Energy Saving .....	(160)
3.2	High Thermal Conductive Refractories .....	(163)
3.3	High Temperature Ceramic Heat Exchanger .....	(210)
3.4	High Emissive Refractories .....	(223)
3.5	High Reflecting Refractory Coatings .....	(234)
4	Thermal Capacity and Refractories for Energy Storage .....	(239)
4.1	Heat Storage and Energy Saving .....	(239)
4.2	Refractories for Electric Heating Energy Storage Units .....	(241)
4.3	Refractories for High Temperature Hot Blast Stoves .....	(245)

4.4	Refractories for the Generators of the Glass Fusion Tank Furnaces .....	(275)
5	Oxygen Ion Conduction of High Temperature Solid Electrolyte Ceramics and High Temperature Ceramic Oxygen Sensors .....	(295)
5.1	Oxygen Content Control and Energy Saving .....	(295)
5.2	The Concept of High Temperature Solid Electrolyte Ceramic Oxygen Sensors .....	(298)
5.3	Manufacture of Oxygen Sensors and Properties of Solid Electrolyte Ceramics .....	(302)
5.4	Applications of High Temperature Solid Electrolyte Ceramic Oxygen Sensors .....	(312)
6	High Temperature Heating and High Temperature Ceramic Heating Elements .....	(337)
6.1	High Temperature Heating and Applications of High Temperature Ceramic Heating Elements .....	(337)
6.2	Silicon Carbide Heating Element .....	(339)
6.3	Molybdenum Disilicide Heating Element .....	(354)
6.4	Lanthanum Chromate Heating Element .....	(363)
6.5	Zirconia Heating Element .....	(371)
6.6	Thoria Heating Element .....	(379)
6.7	Carbon Heating Element .....	(380)
7	Exploitation and Transformation of Energy and Refractory Applications .....	(388)
7.1	The Efficiency of Exploitation and Transformation of Energy and Refractory Applications .....	(388)
7.2	Coal Gasification and Refractories .....	(388)
7.3	Refractories for Coal and Oil Fired Power Station and Incinerators .....	(407)
7.4	MHD Generator and Refractories .....	(415)
7.5	High Temperature Fuel Cell and Refractory Ceramics .....	(437)
7.6	Solar Energy Power Plant and Refractories .....	(442)

7.7	High Temperature Engineering Ceramics for Engines .....	(443)
7.8	Hydrogen Energy Production and Refractories .....	(467)

# 1 导 论

## 1.1 能源与社会发展

能源即能量的来源,是指可为人类的生存与发展提供能量的各种自然资源,如煤炭、石油、天然气、生物质能、水能、风能、太阳能、地热能、潮汐能、原子能等天然资源,以及由这些天然资源经加工、转换制成的其它各种形式的能量来源,如蒸汽、电力、焦炭、煤气、沼气、汽油、煤油、柴油、重油、液化气、酒精、氢气等。

能源的种类繁多,形式和形态各异,按其来源可大致分为如下三类:

第一类是来自地球以外的天体的能源,主要是太阳能,它是目前人类所需的绝大部分能源的直接来源或间接来源。地球上的煤炭、石油、天然气、油页岩等矿物燃料,草木燃料、生物质能源等化学质能源都是由太阳辐射能转换而来的能源。海洋能、风能、水能等也是由太阳能转化而来的能源。

第二类是地球本身蕴藏的能源,主要有蕴藏于地壳的铀、钍等核燃料的核裂变核能和海洋中的氘的核聚变核能,以及蕴藏于地球内部的地热能,如地下热水、地下蒸汽、岩浆等。

第三类是地球与其它天体之间相互作用的引力场产生的能量,如潮汐能。

在上述各类能源中,以其自然状态形式或未经加工,转换的能源称为一次能源,或天然能源,煤炭、石油、油页岩、天然气、核能燃料、草木燃料、水能、风能、太阳能、地热能、海洋能、潮汐能等属于这一类。而由一次能源经加工或转换而得到的其它种类和形式的能源则称为二次能源,或称人工能源,如电能、蒸汽、焦炭、煤气、汽油、柴油、煤油、重油、人造石油、酒精、氢气等。一次能源还可根据



它们能否再生分为再生能源与非再生能源两类。风能、水能、海洋能、太阳能等用后还能重复产生,为再生能源,是人类取之不尽,用之不竭的能源。而石油、天然气、煤炭、核燃料等,用后在短时间内不能重复生成,为非再生能源。用一点就少一点,是可以被耗尽的能源,应珍惜节约使用。

人们通常还把现在世界上大量使用的能源,如煤炭、石油、天然气、水力、原子能、电力以及植物燃料等称为常规能源;而把新近才开始小规模应用或尚处于开发研究阶段的能源,如太阳能、风能、海洋能、核聚变能、氢能等称之为新能源。

根据能源在使用过程中对环境的污染程度,能源又可分为清洁能源与非清洁能源。对环境无污染或少污染的称为清洁能源,如太阳能、风能、地热能、海洋能、电能、天然气、液化气、煤气、沼气、氢气等;而把对环境污染严重的能源,如煤炭、石油、核能等称为非清洁能源。

表 1-1 列出了上述各种能源的分类情况。

表 1-1 各种能源的分类情况

类别		第一类 来自太阳的能源	第二类 地球本身的能源	第三类 地球与天体引力 作用产生的能源
一次能源	再生能源	太阳能 风能 水能 生物质能 海水温差能 海水波力能	地热能	潮汐能
	非再生能源	煤炭 石油 天然气 页岩	原子核能	