

镁质复相耐火材料 原料、制品与性能

■ 罗旭东 张国栋 栾舰 游杰刚 著



冶金工业出版社
www.cnmp.com.cn

镁质复相耐火材料 原料、制品与性能

罗旭东 张国栋 栾 舰 游杰刚 著

北 京

冶 金 工 业 出 版 社

2017

内 容 简 介

本书介绍了镁质复相耐火材料原料、制品与性能的基础知识,简述了镁质复相耐火材料制备工艺,重点论述了镁质复相耐火浇注料、镁质复相不烧砖、镁质复相烧成类耐火材料、镁质复相多孔材料的制备技术,以及不同种类和数量的添加剂和工艺参数对上述材料的组成、结构及性能的影响等,并且构建了镁质复相耐火材料原料、制品及性能的理论体系。

本书可供从事冶金工业、耐火材料科研、生产、设计工作的技术人员阅读,也可供高等院校有关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

镁质复相耐火材料原料、制品与性能/罗旭东等著. —
北京:冶金工业出版社, 2017. 2

ISBN 978-7-5024-7461-4

I. ① 镁… II. ① 罗… III. ① 镁质耐火材料—研究
IV. ① TQ175. 71

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 032243 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcbbs@cnmp.com.cn

责任编辑 杜婷婷 美术编辑 杨 帆 版式设计 彭子赫

责任校对 郑 娟 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-7461-4

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;固安华明印业有限公司印刷

2017 年 2 月第 1 版, 2017 年 2 月第 1 次印刷

169mm×239mm; 12.75 印张; 248 千字; 194 页

58.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街 46 号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

前 言

镁质复相耐火材料是以方镁石为主晶相，耐火材料基体中形成与主晶相相关的第二相的一类镁质材料，具有耐火度高、荷重软化温度高、对金属和碱性渣抗侵蚀性等优点，广泛应用于钢铁、水泥、有色金属等工业领域。镁质复相耐火材料原料、制备工艺等对制品组成、结构和性能具有重要影响。对于不同工艺制备的镁质复相材料，构建原料、工艺与制品组成、结构及性能的关系，对于进一步发展和完善镁质复相耐火材料体系、指导镁质复相耐火材料生产具有重要作用。

本书是作者在深入调研镁质复相耐火材料制备与性能的基础上开展的基础性研究工作，针对镁质复相耐火材料的原料组成、典型形貌及制品性质进行分析和讨论，通过对作者所在课题组多年来的研究成果进行归纳、总结而成。本书系统全面地对镁质复相耐火材料原料及制品的基础知识、镁质复相耐火材料的制备工艺及影响因素进行了论述，探索了新的研究方法，希望能够对从事耐火材料相关专业的科研和教学提供借鉴。

本书从镁质复相耐火材料原料、镁质复相耐火材料制品、镁质复相耐火浇注料、镁质复相不烧砖、镁质复相烧成类耐火材料及镁质复相多孔材料分析与探索几个方面进行编排。镁质复相耐火材料原料部分重点研究了典型镁质复相耐火材料原料组成及微观形貌特征；镁质复相耐火材料制品部分重点介绍了镁砖、镁尖晶石砖、镁白云石砖和镁锆砖；镁质复相耐火浇注料部分重点介绍了镁质浇注料、镁铝质浇注料和镁铬质浇注料的制备工艺及添加剂对其组成、结构与性能的影响；镁质复相不烧砖部分重点介绍了制备工艺及添加剂对镁质不烧砖组成、结构与性能的影响；镁质复相烧成类耐火材料部分重点介绍了制备工艺及烧成工艺与添加剂对烧成砖性能的影响；镁质复相多孔材料部分重点介绍了分散剂、减水剂及复相添加剂对镁质多孔耐火材料结构及性能的影响。

本书主要是以辽宁科技大学高温材料与镁资源学院冶金新技术用

耐火材料课题组多年来对镁质复相材料的研究与开发为基础编写的,在此感谢课题组负责人张国栋教授对本书的审阅工作。在本书的编写过程中,得到了辽宁科技大学高温材料与镁资源学院实验中心王春艳老师、东北大学张小芳博士、李美葶博士的大力支持,以及辽宁省镁质材料工程研究中心陈树江教授、曲殿利教授、李志坚教授、张玲教授的无私帮助,还得到清华大学新型陶瓷与精细工艺国家重点实验室谢志鹏教授、鞍山市量子炉材有限公司姚华柏总经理的指导以及辽宁科技大学高温材料与镁资源学院和辽宁省镁质材料工程技术研究中心同事们提供的多方面帮助和支持;在具体实验过程中得到了辽宁省镁质材料工程研究中心李志辉老师、关岩老师、郑玉老师、栾旭老师的热心帮助,在此一并深表感谢。

本书内容涉及的主要研究成果是在国家自然科学基金(编号:51402143)及辽宁科技大学“青年拔尖人才奖励计划”项目资助下完成的。

由于作者水平所限,书中不妥之处敬请读者和专家指正。

作者

2016年10月

目 录

1 镁质复相耐火材料原料	1
1.1 镁砂原料	1
1.1.1 烧结镁砂	1
1.1.2 电熔镁砂	5
1.2 合成原料	8
1.2.1 镁铝尖晶石砂	8
1.2.2 镁铬尖晶石砂	10
1.2.3 铁铝尖晶石砂	12
1.2.4 合成镁钙砂	13
1.2.5 镁橄榄石砂	16
1.2.6 镁锆砂	17
1.3 其他原料	18
1.3.1 氧化铝原料	18
1.3.2 氧化铬原料	20
1.3.3 氧化锆原料	20
1.3.4 二氧化钛原料	21
2 镁质复相耐火材料制品	22
2.1 镁砖	22
2.1.1 普通镁砖	22
2.1.2 中档镁砖	23
2.1.3 高纯镁砖	24
2.1.4 电熔镁砖（再结合镁砖）	24
2.2 镁尖晶石砖	26
2.2.1 镁铝尖晶石砖	26
2.2.2 镁铬尖晶石砖	27
2.2.3 镁铝铬尖晶石砖	31
2.2.4 镁铁铝尖晶石砖	33

2.3	镁白云石砖	34
2.4	镁锆砖	36
3	镁质复相耐火浇注料	38
3.1	镁质浇注料	38
3.1.1	镁质浇注料原料	38
3.1.2	镁质浇注料配方	38
3.1.3	镁质浇注料制备与检测	39
3.1.4	镁质浇注料性能分析	39
3.2	镁铝质浇注料	42
3.2.1	镁铝质浇注料原料	43
3.2.2	镁铝质浇注料配方	43
3.2.3	镁铝质浇注料制备与检测	43
3.2.4	镁铝质浇注料性能分析	44
3.3	镁铬质浇注料	52
3.3.1	镁铬质耐火浇注料原料	52
3.3.2	镁铬质耐火浇注料配方	53
3.3.3	镁铬质耐火浇注料制备与检测	53
3.3.4	镁铬质浇注料性能分析	53
4	镁质复相不烧砖	62
4.1	镁质复相不烧砖概述	62
4.2	镁质复相不烧砖制备工艺	63
4.2.1	镁质复相不烧砖原料	63
4.2.2	镁质复相不烧砖配方	64
4.2.3	镁质复相不烧砖制备与检测	64
4.3	镁质复相不烧砖性能	65
4.3.1	氧化锆对镁质复相材料性能的影响	65
4.3.2	氧化钛对镁质复相材料性能的影响	70
4.3.3	锆英石对镁质复相材料性能的影响	74
4.3.4	铝钛渣对镁基复相材料热膨胀行为的影响	79
5	镁质复相烧成类耐火材料	84
5.1	镁质复相烧成类耐火材料在滑动水口上应用的基础研究	84
5.1.1	钢铁冶金用滑动水口	84

5.1.2	滑动水口装置的发展与使用现状	86
5.1.3	滑动水口的损毁机理	93
5.1.4	镁质复相烧成类滑动水口机理	95
5.1.5	镁质复相烧成滑板的制备	97
5.1.6	镁质复相烧成滑板粒度级配	100
5.1.7	尖晶石对镁质复相烧成滑板性能的影响	101
5.1.8	α - Al_2O_3 微粉对镁质复相烧成滑板性能的影响	107
5.1.9	镁质复相烧成滑板与铝锆碳滑板性能对比	111
5.1.10	氧化铝、氧化铬对镁质复相烧成滑板抗钢水侵蚀性的影响	119
5.2	镁质复相耐火材料制备及添加剂对镁质复相耐火材料性能的影响	123
5.2.1	镁质复相耐火材料设计与制备	123
5.2.2	添加剂对镁质复相耐火材料性能的影响	124
5.3	尖晶石的引入形式和数量对镁质复相烧成类耐火材料性能的影响	131
5.3.1	预合成尖晶石对镁质复相耐火材料性能的影响	131
5.3.2	α - Al_2O_3 和 Cr_2O_3 对镁质复相耐火材料性能的影响	133
5.3.3	镁砂和氧化铝类型对镁质复相耐火材料性能的影响	141
5.4	方镁石/尖晶石复相烧成砖性能研究	150
5.4.1	方镁石/尖晶石复相烧成砖原料	150
5.4.2	方镁石/尖晶石复相烧成砖配方	150
5.4.3	方镁石/尖晶石复相烧成砖制备与检测	151
5.4.4	铝铬渣对方镁石/尖晶石复相不烧砖性能的影响	151
5.4.5	铬精矿对镁基复相材料性能的影响	154
5.5	方镁石/(原位/预合成)尖晶石复相烧成砖	156
5.5.1	方镁石/(原位/预合成)尖晶石复相不烧砖原料	156
5.5.2	方镁石/(原位/预合成)尖晶石复相不烧砖配方	157
5.5.3	方镁石/(原位/预合成)尖晶石复相不烧砖制备与检测	157
5.5.4	不同比例氧化铝/氧化铬对方镁石/尖晶石复相不烧砖性能的影响	158
6	镁质复相多孔材料	162
6.1	镁质多孔材料的研究现状	162
6.1.1	镁质多孔材料概述	162
6.1.2	发泡工艺制备镁质多孔材料基础	163
6.1.3	菱镁矿浮选尾矿的综合利用现状	166
6.1.4	利用菱镁矿浮选尾矿制备镁质多孔材料研究	167
6.2	发泡法制备镁质多孔材料	167

6.2.1 镁质多孔材料原料	167
6.2.2 镁质多孔材料制备与检测	170
6.2.3 发泡剂对镁质多孔材料的结构及性能影响	170
6.2.4 减水剂对镁质多孔材料的结构及性能影响	176
6.2.5 分散剂对镁质多孔材料的结构及性能影响	180
6.2.6 添加剂对镁质多孔材料的结构及性能影响	183
参考文献	188

1 镁质复相耐火材料原料

镁质复相耐火材料原料一般包括镁砂、合成砂及添加剂等。镁砂主要类型是烧结镁砂和电熔镁砂，合成砂主要类型是镁铝尖晶石砂、镁铬尖晶石砂、铁铝尖晶石砂、镁钙砂等。

1.1 镁砂原料

1.1.1 烧结镁砂

通常所说的烧结镁砂是指采用竖窑和回转窑以菱镁矿直接煅烧的产品。依 MgO 质量分数标定镁砂等级，一般最高级可达 $w(\text{MgO}) = 98\%$ 。我国镁砂基地主要在辽宁南部，品质纯净，原料中主要杂质是 SiO_2 和 CaO ， Fe_2O_3 质量分数不高。烧结镁砂通过根据制备工艺和氧化镁质量分数分为重烧镁砂、中档镁砂和高纯镁砂。表 1-1 为普通烧结镁砂理化指标。

表 1-1 烧结镁砂理化指标

型号	$w(\text{MgO})/\%$	$w(\text{SiO}_2)/\%$	$w(\text{CaO})/\%$	CaO/SiO_2 摩尔比	体积密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$
MS98A	≥ 97.7	≤ 0.3		≥ 3	≥ 3.40
MS98B	≥ 97.7	≤ 0.4		≥ 2	≥ 3.35
MS98C	≥ 97.5	≤ 0.4		≥ 2	≥ 3.30
MS97A	≥ 97.0	≤ 0.5		≥ 2	≥ 3.40
MS97B	≥ 97.0	≤ 0.6		≥ 2	≥ 3.35
MS97C	≥ 97.0	≤ 0.8			≥ 3.30
MS96A	≥ 96.0	≤ 1.0			≥ 3.30
MS96B	≥ 96.0	≤ 1.5			≥ 3.25
MS95A	≥ 95.0	≤ 2.0	≤ 1.6		≥ 3.25
MS95B	≥ 95.0	≤ 2.2	≤ 1.6		≥ 3.20
MS93A	≥ 93.0	≤ 3.0	≤ 1.6		≥ 3.20
MS93B	≥ 93.0	≤ 3.5	≤ 1.6		≥ 3.18
NS90A	≥ 90.0	≤ 4.0	≤ 1.6		≥ 3.20
NS90B	≥ 90.0	≤ 4.8	≤ 2.0		≥ 3.18

1.1.1.1 重烧镁砂

重烧镁砂是将菱镁矿、水镁石、海水及卤水氢氧化镁等原料在 1600~1900℃ 下充分烧结而得到的产物。我国习惯上所称的烧结镁砂是由菱镁矿烧结而得，采用 MgO 质量分数大于 46.0% 的镁石块矿，与固体燃料块混合，入竖窑煅烧生产的镁砂，其中 MgO 质量分数为 89%~92%；由于镁砂的烧结程度较高，所以有时也称作死烧镁砂。表 1-2 所示为典型重烧镁砂的技术指标。

表 1-2 典型重烧镁砂的技术指标

化学成分（质量分数）/%						体积密度/g·cm ⁻³
IL	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	3.16
0.27	3.87	1.86	92.48	0.62	0.90	

重烧镁砂的显微结构特征是主晶相为方镁石，晶体多为浑圆状和不规则粒状体，其晶体尺寸和形状取决于原料的纯度和烧结温度。一般重烧镁砂中的方镁石晶体尺寸较小，在 20~60μm 之间，晶间常伴随有硅酸盐相，成分多波动在 C₃S-C₂S-C₃MS₂-M₂S 之间。方镁石一方镁石间多以硅酸盐相的胶结结合为主。晶间多长条的开口气孔。图 1-1 和图 1-2 分别为重烧镁砂的光片形貌和断口形貌。

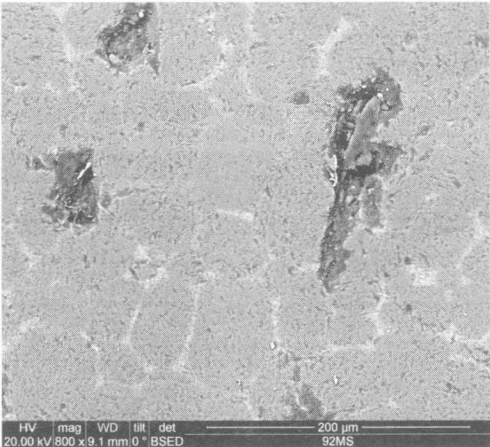


图 1-1 重烧镁砂的光片形貌

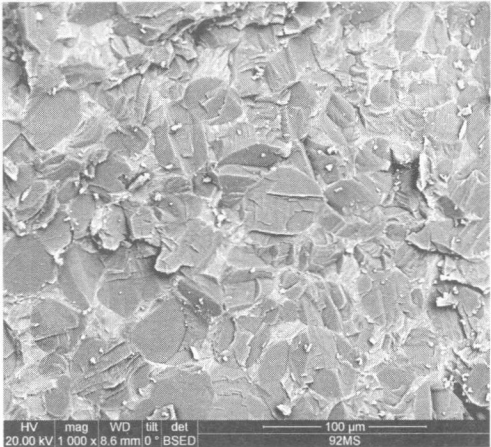


图 1-2 重烧镁砂的断口形貌

1.1.1.2 中档镁砂

采用 MgO 质量分数大于 46.5% 的镁石，经反射炉轻烧，再细磨，加水混合，压球，与固体燃料块混合入竖窑煅烧生产的镁砂，MgO 质量分数为 95% 左右，又称中档镁砂。表 1-3 所示为典型中档镁砂的技术指标。

表 1-3 典型中档镁砂的技术指标

化学成分（质量分数）/%						体积密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$
IL	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	
0.50	1.95	1.58	94.63	0.34	1.00	3.17

中档镁砂的显微结构特征是主晶相为方镁石，晶体多为浑圆状和不规则粒状体，晶体尺寸多在 50~100 μm 之间，晶间常伴随有硅酸盐相，成分多波动在 C_3S - C_2S - C_3MS_2 - M_2S 之间。方镁石—方镁石间多以硅酸盐相的胶结结合为主，晶间多开口气孔。图 1-3 和图 1-4 所示为中档镁砂的光片形貌和断口形貌。

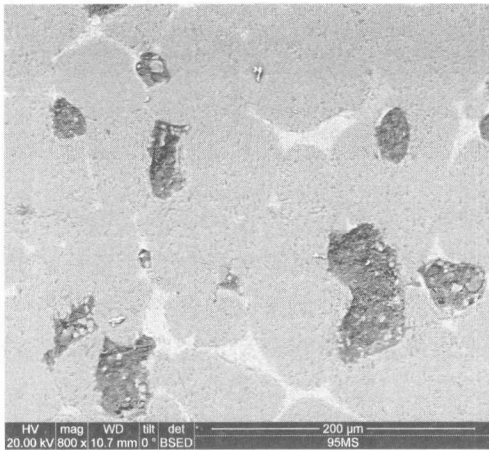


图 1-3 中档镁砂的光片形貌

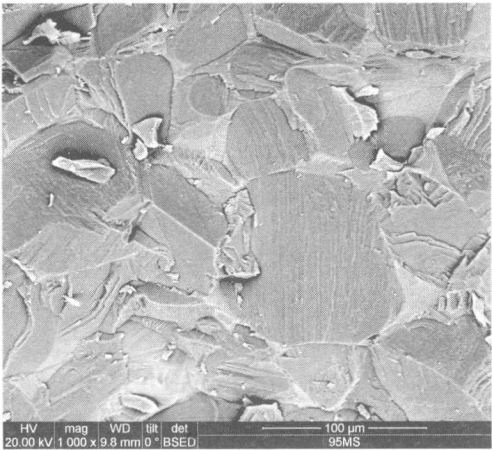


图 1-4 中档镁砂的断口形貌

1.1.1.3 高纯镁砂

采用 MgO 质量分数大于 47% 的镁石，经轻烧获得优质高纯的轻烧镁粉为原料，经细磨、干法压球，入超高温油竖窑煅烧生产的镁砂 MgO 质量分数为 96.5%~98%，称为高纯镁砂。表 1-4 所示为典型高纯镁砂技术指标。

表 1-4 典型高纯镁砂技术指标

化学成分（质量分数）/%						体积密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$
IL	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	
0.30	0.70	1.35	96.90	0.25	0.80	3.20

高纯镁砂的显微结构特征是主晶相为方镁石晶体，晶体尺寸在 30~100 μm 之间，晶内、晶间多圆形的封闭气孔，气孔孔径多小于 10 μm ，晶间硅酸盐较少，方镁石的结合形式有方镁石—方镁石之间的直接结合和硅酸盐相的胶结结合两种。图 1-5 和图 1-6 所示为 97 高纯镁砂的光片形貌和断口形貌。

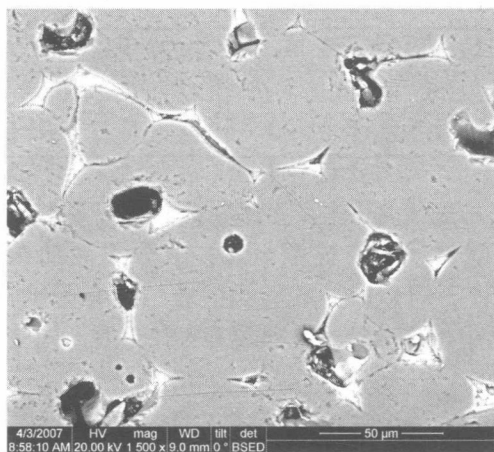


图 1-5 97 高纯镁砂的光片形貌

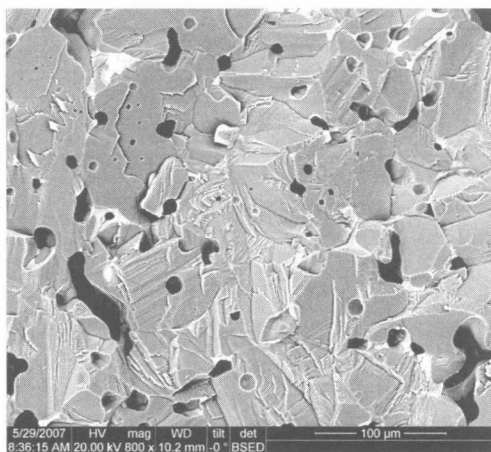


图 1-6 97 高纯镁砂的断口形貌

1.1.1.4 海水镁砂

海水和卤水中含有可溶性镁盐，用化学和热分解法制得 MgO ，经高温煅烧成海水镁砂和卤水镁砂。海水和卤水与菱镁矿相比是一种可再生资源，而菱镁矿是不可再生资源。我国海水制盐后的苦卤量居世界之首，但是海水镁砂的制造工艺却比较落后，日本海水高纯镁砂的生产技术水平很高，能制造出纯度达 99.5% 的高纯镁砂，最高纯度可达 99.9%。

我国由于菱镁矿储量丰富，长期以来冶金企业主要立足于从菱镁矿中生产镁砂，并以低档镁砂为主。利用二步煅烧法，可以生产出纯度接近 97% 的高纯镁砂，至今用重烧法还难以生产出不小于 99% 的超高纯镁砂。因此，从我国的实际情况看，利用单一的物理法要从矿石中大量生产 98% 以上的高纯镁砂，特别是不小于 99% 的超高纯镁砂的难度还是较大的。而从海水中，尤其是从卤水中生产高纯和超高纯镁砂显然是要容易很多，它比从菱镁矿中生产高纯镁砂具有更多的优点。海水镁砂的 MgO 质量分数高达 99.5%，一般的海水镁砂也在 98%~99%。表 1-5 所示为海水镁砂的典型技术指标。

表 1-5 海水镁砂的典型技术指标

化学成分（质量分数）/%						体积密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$
IL	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	Fe_2O_3	3.20
0.25	0.23	0.53	98.85	0.03	0.11	

海水镁砂的典型显微结构特征是主晶相方镁石晶体大小均匀，质地纯净，材料多晶界和微孔结构。方镁石晶体通常在 $30 \sim 50 \mu\text{m}$ ，晶间硅酸盐相少，晶体间多直接结合，晶内、晶间多封闭气孔，气孔大小均匀，孔径多在 $5 \mu\text{m}$ 以下，赋

予材料良好的抗热震性能和抗渣侵蚀性能。图 1-7 和图 1-8 所示为海水镁砂的光片形貌和断口形貌。

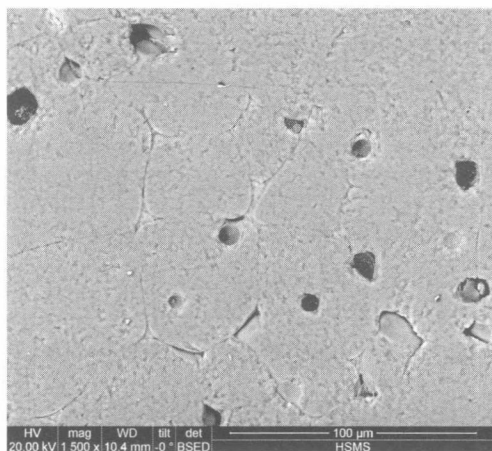


图 1-7 海水镁砂的光片形貌

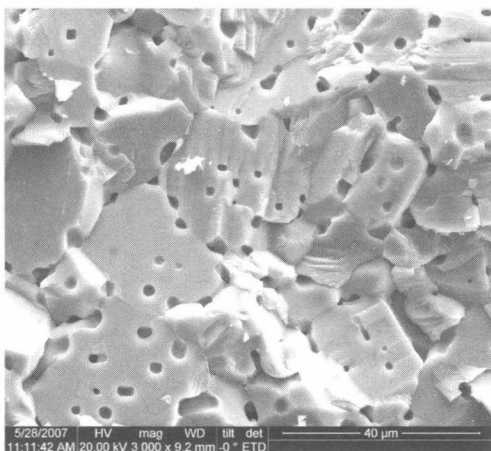


图 1-8 海水镁砂的断口形貌

1.1.2 电熔镁砂

由优质菱镁矿或轻烧镁粉在电弧炉中经 2800℃ 以上的高温熔融而成，其强度、抗侵蚀性及化学惰性均优于烧结镁砂。在电熔镁砂中，主晶相方镁石首先在熔体中自由析晶，结晶长大，晶粒发育良好，晶体粗大，直接结合程度高，结构致密，而少量硅酸盐和其他结合矿物相呈孤立状分布。这一结构特点使电熔镁砂比烧结镁砂更耐高温，在氧化气氛中，能在 2300℃ 以下保持稳定，高温结构强度、抗渣性和常温下抗水化性均较烧结镁砂优越。纯净粗大方镁石晶体还具有特殊的光学性质。因此说，电熔镁砂能更充分地发挥出方镁石的一些优越性能。表 1-6 为不同牌号的电熔镁砂理化指标。

表 1-6 不同牌号的电熔镁砂理化指标

牌 号	$w(\text{MgO})/\%$	$w(\text{SiO}_2)/\%$	$w(\text{CaO})/\%$	体积密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$
DMS-98	≥ 98	≤ 0.6	≤ 1.2	≥ 3.50
DMS-97.5	≥ 97.5	≤ 1.0	≤ 1.4	≥ 3.45
DMS-97	≥ 97	≤ 1.5	≤ 1.5	≥ 3.45
DMS-96	≥ 96	≤ 2.2	≤ 2.0	≥ 3.45

1.1.2.1 97 电熔镁砂

97 电熔镁砂在电熔镁砂中用量最大，主要用于制备镁碳砖、镁铝碳砖及部分烧成镁质复相耐火制品。97 电熔镁砂是以 MgO 质量分数大于 47% 的特级镁石

为原料，经电弧炉熔融生产出来的产品，MgO 质量分数通常大于 97%。表 1-7 所示为典型 97 电熔镁砂技术指标。

表 1-7 97 电熔镁砂技术指标

化学成分（质量分数）/%						体积密度/g·cm ⁻³
IL	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	3.46
0.14	1.15	0.73	97.25	0.20	0.53	

97 电熔镁砂的显微结构特征是主晶相方镁石，晶体结晶尺寸较大，多在 200~600μm 之间，大者单晶尺寸可达毫米级，晶间的硅酸盐呈薄膜状分布，晶界较细且较为平直，晶界薄膜厚度在 1~10μm 之间，晶界组成多为 CMS 或 C₃MS₂。图 1-9 和图 1-10 所示为 97 电熔镁砂的光片形貌和断口形貌。

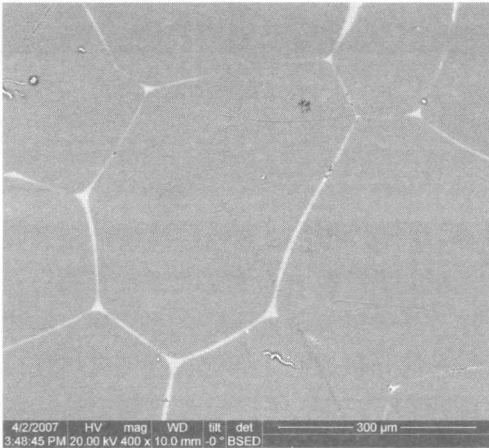


图 1-9 97 电熔镁砂的光片形貌

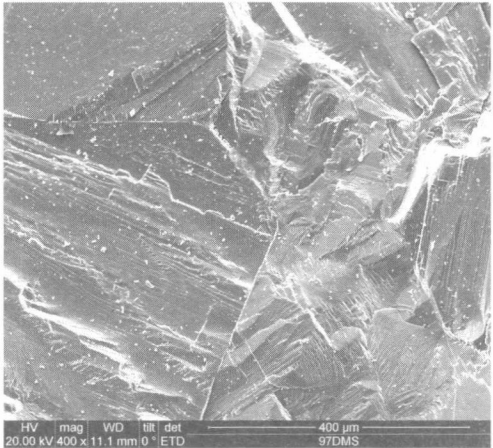


图 1-10 97 电熔镁砂的断口形貌

1.1.2.2 大结晶电熔镁砂

耐火材料厂家多追求使用大结晶电熔镁砂，甚至给大结晶以尺寸概念，即晶粒尺寸大于 400~500μm。如果从纯度与晶体尺寸具有一定相关性考虑，要求大结晶以求高纯度是合理的，但大结晶有结构强度偏低的缺陷。表 1-8 所示为典型大结晶电熔镁砂技术指标。

表 1-8 大结晶电熔镁砂技术指标

化学成分（质量分数）/%						体积密度/g·cm ⁻³
IL	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	3.47
0.16	0.65	0.31	98.40	0.12	0.36	

大结晶电熔镁砂的显微结构特征是晶体尺寸大，大者可达毫米级，晶体解理特别发育，晶界平直，晶间的硅酸盐相很少，且呈点状分布。胶结膜最薄的约1~2 μm ，较厚者为3~4 μm 。这意味着平行于解理方向施力，会形成小于3~4 μm 厚的薄片或微粒。尽管晶体外形尺寸大到毫米级，但材料的脆性大，制砖和使用过程易沿解理面碎裂。图1-11和图1-12所示为大结晶电熔镁砂的光片形貌和断口形貌。

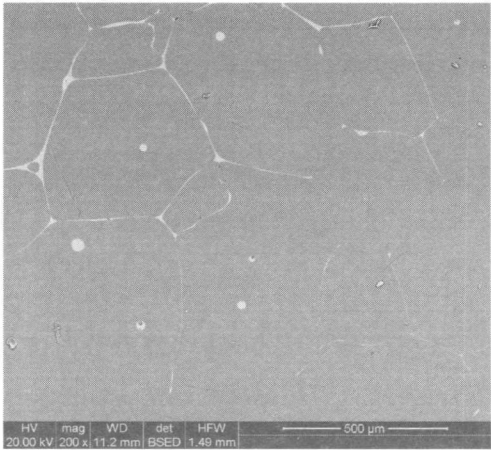


图 1-11 大结晶电熔镁砂的光片形貌



图 1-12 大结晶电熔镁砂的断口形貌

1.1.2.3 皮砂

镁石熔融结晶时，方镁石首先析晶，而杂质高的硅酸盐相，由于熔点低，呈液相被排向周边，常说的皮砂即为熔融料的最边缘部位的物料，由于杂质含量较高，皮砂颜色常呈棕色和褐色。表1-9所示为典型皮砂技术指标。

表 1-9 典型皮砂技术指标

化学成分（质量分数）/%						体积密度/g·cm ⁻³
IL	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	3.17
0.25	3.98	2.01	92.65	0.26	0.85	

皮砂的显微结构特征方镁石结晶尺寸较小，多在200 μm 以下，晶间硅酸盐相呈河流状分布，晶间含较多的硅酸盐相，成分多波动在C₃S-C₂S-C₃MS₂-M₂S之间。这类含硅酸盐相的原料气孔率低，但晶间大量硅酸盐相的存在，会使材料的高温性能降低。图1-13和图1-14所示为典型皮砂的光片形貌和断口形貌。

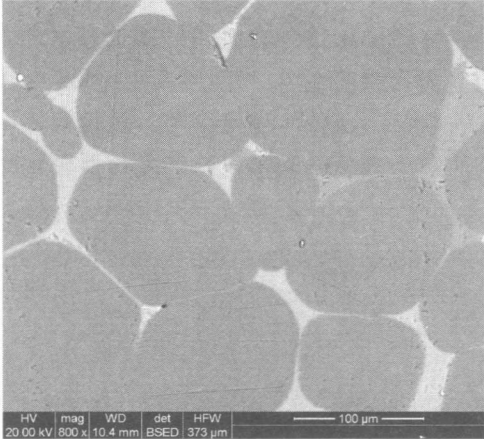


图 1-13 皮砂的光片形貌

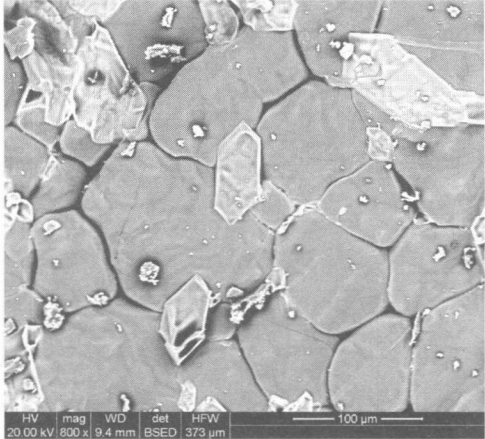


图 1-14 皮砂的断口形貌

1.2 合成原料

1.2.1 镁铝尖晶石砂

镁铝尖晶石化学式 MgAl_2O_4 或 $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ，理论含 $w(\text{MgO}) = 28.3\%$ ， $w(\text{Al}_2\text{O}_3) = 71.7\%$ 。天然镁铝尖晶石极少发现，工业上应用的全部是人工合成产品。镁铝尖晶石具有良好的抗侵蚀能力、抗磨蚀能力，热震稳定性好。按照合成方法分为烧结法和电熔法两种。

图 1-15 所示为 $\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3$ 系统相图。镁铝尖晶石固溶体熔点为 2135°C 。在镁铝尖晶石固溶体理论组成的两侧有两个低共熔点， MgO 侧的低共熔点组成为

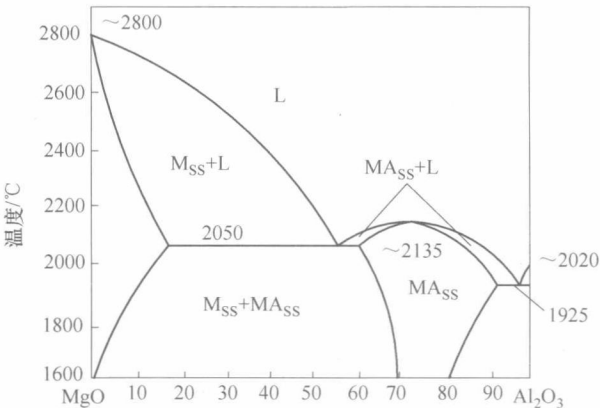


图 1-15 $\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3$ 系统相图