



李伯民 赵波 李清 编著

# 磨料、磨具 与磨削技术



化学工业出版社



图书在版编目 (CIP) 数据

磨料、磨具与磨削技术/李伯民, 赵波; 李清编著. 北京: 化学工业出版社, 2009.7

ISBN 978-7-122-05809-6

I. 磨… II. ①李…②赵…③李… III. ①磨料②磨具③磨削  
IV. TG7 TG58

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 089537 号

---

责任编辑: 朱 彤

文字编辑: 张燕文

责任校对: 陶燕华

装帧设计: 刘丽华

---

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷: 北京永鑫印刷有限责任公司

装 订: 三河市万龙印装有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张 26 1/4 字数 705 千字 2010 年 1 月北京第 1 版第 1 次印刷

---

购书咨询: 010 64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

---

定 价: 68.00 元

版权所有 违者必究

# 前言

磨削是用磨料或磨具去除材料的加工方法。磨料、磨具是磨削加工的工具。磨削涵盖了固结磨具的各种工艺方法、涂附磨具的各种工艺方法、游离磨料(粒)的各种工艺方法。从制造工艺方法分类讲,磨削是一个大类,是一个总称。由于人类生活质量的提高,国民经济各部门所需多品种、多功能、高精度、高品质、高度自动化技术装备的开发和制造,促进了先进制造技术的发展。磨削技术是先进制造技术中的重要领域,是现代制造业中实现精密加工、超精密加工最有效、应用最广的制造技术。有资料表明,磨削加工占机械加工总量的30%~40%,在机械、航空航天、国防、石油化工、机床、交通运输、建筑、农业机械、微加工、芯片制造众多产业部门得到广泛应用。

磨料、磨具与磨削技术的发展趋势正朝着采用超硬磨料、磨具和高速、高效、高精度磨削工艺及装备 CNC 控制磨床与磨削加工中心方向发展。但在中国制造业中普通磨床,普通磨料、磨具,普通磨削工艺仍占有重要地位。因此,本书既对传统磨削技术领域的实用技术进行了论述,又对磨削领域最新研究成果与技术开发进行了必要的介绍;在内容上突出磨料、磨具与磨削技术的实用性。对磨料的结晶原理、磨料特性及磨料生产工艺在第1章进行了论述;将各类磨具的磨料、黏结剂、组织、硬度等特性,黏结剂构成与配方,磨具成形等生产工艺列为第2章,第3~8章分别对磨削原理、砂轮修整、磨削液、固结磨具磨削工艺、涂附磨具磨削工艺、游离磨粒加工技术进行了阐述;第9章对磨削加工质量与检测技术进行了介绍。对于磨削加工装备——磨床结构及控制技术,因篇幅所限,本书没有进行专门论述,但对数控磨削加工进行了适当介绍。

本书绪论、第1、2、7章由李伯民教授编写,第3、4章及第6章第7节和第9章第7~9节由赵波教授(博士)编写,第5章和第9章第1~6节由贺子杏编写,第6章第1~6节、第8章由李清副教授编写。全书由李伯民教授统稿,王建红女士为本书书稿及图形处理做了辛勤的工作。本书的出版得到化学工业出版社的大力支持。

由于磨料、磨具与磨削技术是一门多学科、高新技术相结合的综合性的技术,涉及知识面宽,限于编者学识有限,书中难免存在不当之处,敬请读者批评指正。

编者

2009年4月

# 目 录

## 第 1 章 磨料 ..... 1

1.1 概述 .....	1	1.4.1 金刚石分类及牌号 .....	14
1.1.1 磨料定义 .....	1	1.4.2 金刚石的性质 .....	15
1.1.2 磨料分类及代号 .....	1	1.4.3 金刚石的物理、化学和力学性能 .....	16
1.1.3 磨料应具有的基本性能 .....	3	1.4.4 金刚石电子结构和晶体结构 .....	19
1.1.4 磨料的粒度 .....	4	1.4.5 金刚石生长过程——合成机理 .....	22
1.1.5 普通磨料的化学成分 .....	6	1.4.6 人造金刚石的合成装置与原料 .....	29
1.2 氧化物(刚玉)系磨料 .....	6	1.4.7 人造金刚石合成工艺 .....	32
1.2.1 刚玉系磨料 .....	6	1.5 立方氮化硼磨料 .....	37
1.2.2 刚玉磨料晶体结构与相图 .....	7	1.5.1 立方氮化硼的组成、结构和性质 .....	37
1.2.3 锆刚玉的晶体结构与相图 .....	10	1.5.2 氮化硼的 $p$ - $T$ 状态图 .....	38
1.2.4 刚玉磨料的生产工艺 .....	11	1.5.3 合成 CBN 的原料 .....	40
1.3 碳化物系磨料 .....	12	1.5.4 CBN 合成工艺、提纯及检测 .....	41
1.3.1 碳化硅的晶体结构及相图 .....	12		
1.3.2 碳化硅磨料的生产工艺 .....	13		
1.3.3 碳化硅制粒加工 .....	14		
1.4 金刚石磨料 .....	14		

## 第 2 章 磨具 ..... 43

2.1 磨具结构与特性 .....	43	2.2.5 陶瓷磨具的成形 .....	53
2.1.1 磨具的分类 .....	43	2.2.6 磨具坯体干燥与粗加工 .....	55
2.1.2 磨具的结构 .....	43	2.2.7 磨具的焙烧 .....	56
2.1.3 磨具的硬度 .....	44	2.2.8 磨制品的加工与检验 .....	57
2.1.4 磨具结合剂 .....	44	2.2.9 特种磨具 .....	58
2.1.5 磨具的组织 .....	45	2.3 树脂结合剂磨具 .....	58
2.1.6 磨具形状尺寸 .....	46	2.3.1 树脂结合剂原材料 .....	59
2.1.7 磨具的强度 .....	46	2.3.2 树脂结合剂配方设计 .....	62
2.1.8 磨具的静平衡度 .....	47	2.3.3 树脂磨具配混料工艺 .....	65
2.2 陶瓷结合剂磨具 .....	48	2.3.4 树脂磨具成形工艺 .....	66
2.2.1 陶瓷磨具的原材料 .....	48	2.4 橡胶结合剂磨具 .....	67
2.2.2 陶瓷结合剂的主要性能 .....	50	2.4.1 橡胶磨具的原材料 .....	68
2.2.3 结合剂的选择 .....	51	2.4.2 橡胶磨具的配方 .....	70
2.2.4 陶瓷结合剂原料配方设计 .....	52	2.4.3 橡胶结合剂的原料加工准备 .....	71

2.4.4	成形料的配制	72	2.6.1	涂附磨具原材料	80
2.4.5	橡胶磨具成形	73	2.6.2	黏结机理与黏结剂配方	83
2.4.6	橡胶磨具硫化	73	2.6.3	胶的涂附	84
<b>2.5</b>	<b>金属结合剂超硬磨具</b>	<b>74</b>	2.6.4	植砂	85
2.5.1	烧结金属结合剂超硬材料 磨具	74	2.6.5	干燥与固化	86
2.5.2	电镀金属结合剂超硬材料 磨具	77	2.6.6	涂附磨具产品转换工序	87
2.5.3	单层高温钎焊超硬材料磨具	78	<b>2.7</b>	<b>磨具的选择和使用</b>	<b>88</b>
<b>2.6</b>	<b>涂附磨具</b>	<b>79</b>	2.7.1	普通磨具的选择与使用	88
			2.7.2	超硬磨具的选择与使用	99
			2.7.3	涂附磨具的选择与使用	105

### 第3章 磨削原理 ..... 110

<b>3.1</b>	<b>磨削过程的特点及切屑形成</b>	<b>110</b>	3.3.1	磨削力的意义	126
3.1.1	磨削的切削刃形状与分布	110	3.3.2	磨削力的理论公式	126
3.1.2	磨削的特点	111	3.3.3	磨削力的尺寸效应	130
3.1.3	磨粒的切削作用与磨削过程	112	3.3.4	磨削力的测量与经验公式	134
3.1.4	磨屑的形成	113	<b>3.4</b>	<b>磨削温度</b>	<b>140</b>
3.1.5	砂轮的有效磨刃数	114	3.4.1	磨削热的产生与传散	140
<b>3.2</b>	<b>表征磨削过程的磨削要素</b>	<b>116</b>	3.4.2	磨削区温度分布的理论 解析	141
3.2.1	接触弧长和磨削长度	116	3.4.3	断续磨削时工件表面层温度 解析	149
3.2.2	磨粒磨削的磨屑厚度	119	3.4.4	缓进给强力磨削的温度分布 特征	155
3.2.3	砂轮的当量直径	123	3.4.5	磨削温度的测量	157
3.2.4	磨削比	124			
3.2.5	被磨材料的磨除参数	124			
<b>3.3</b>	<b>磨削力</b>	<b>126</b>			

### 第4章 砂轮的磨损与修整 ..... 163

<b>4.1</b>	<b>砂轮的堵塞</b>	<b>163</b>	4.3.8	声发射监测法	182
4.1.1	砂轮堵塞的形貌	163	<b>4.4</b>	<b>普通磨料砂轮的修整</b>	<b>183</b>
4.1.2	砂轮堵塞的形成机理	164	4.4.1	普通磨料砂轮的修整方法 与工具	183
4.1.3	影响砂轮堵塞的因素分析	166	4.4.2	单颗粒金刚石笔修整	184
<b>4.2</b>	<b>砂轮的磨损</b>	<b>167</b>	4.4.3	金刚石滚轮修整	184
4.2.1	砂轮磨损的形态与原因	168	<b>4.5</b>	<b>超硬磨料砂轮的修整</b>	<b>188</b>
4.2.2	砂轮磨损的特征	172	4.5.1	超硬磨料砂轮整形法	188
<b>4.3</b>	<b>砂轮磨损的检测</b>	<b>175</b>	4.5.2	超硬磨料砂轮修锐法	191
4.3.1	滚动复印法	175	<b>4.6</b>	<b>超硬磨料、磨具修整技术 的进展</b>	<b>194</b>
4.3.2	触针法	176	4.6.1	磨削修整法的改进——GC杯 形砂轮研磨修整法	194
4.3.3	光截法	177	4.6.2	在线电解修锐法	199
4.3.4	光电自动测量法	177	4.6.3	简易的双电极在线电解修锐法	202
4.3.5	激光功率谱法	179			
4.3.6	电镜观察法	180			
4.3.7	光反射法	181			

4.6.4 弹性修整法 .....	205	4.6.6 激光修锐法 .....	208
4.6.5 超声波振动修整法 .....	207		

## 第5章 磨削液 .....

<b>5.1 磨削液的性能和效果</b> .....	209	5.3.3 无机盐类 .....	217
5.1.1 磨削液的特性 .....	209	5.3.4 磨削液中的添加剂对磨削效果的影响 .....	217
5.1.2 磨削液的效果 .....	210	<b>5.4 磨削液的供给方法与效果</b> .....	219
<b>5.2 磨削液的种类和组成</b> .....	213	5.4.1 普通供液法 .....	219
5.2.1 磨削液的种类 .....	213	5.4.2 喷射供液法 .....	219
5.2.2 磨削液的组成 .....	214	5.4.3 穿流供液法 .....	220
<b>5.3 添加剂的种类和作用</b> .....	215	5.4.4 喷雾冷却法 .....	220
5.3.1 极压添加剂 .....	215		
5.3.2 表面活性剂 .....	216		

## 第6章 固结磨具磨削工艺 .....

<b>6.1 数控磨削加工</b> .....	223	<b>6.7 超声波振动珩磨</b> .....	260
6.1.1 数控外圆磨削加工 .....	223	6.7.1 超声波振动加工的工艺效果 .....	260
6.1.2 数控光学曲线磨削 .....	236	6.7.2 超声波振动珩磨的磨削机理 .....	261
<b>6.2 高速外圆磨削</b> .....	242	6.7.3 超声波振动珩磨声学系统的局部共振设计原理 .....	268
<b>6.3 缓进给磨削</b> .....	247	6.7.4 超声波振动珩磨装置的设计要点 .....	275
<b>6.4 高效深切磨削</b> .....	251		
<b>6.5 精密、高精度和超精密磨削工艺</b> .....	255		
<b>6.6 镜面磨削工艺</b> .....	259		

## 第7章 涂附磨具磨削工艺 .....

<b>7.1 涂附磨具加工特点及应用范围</b> .....	283	7.2.5 砂带磨削工艺参数 .....	287
7.1.1 涂附磨具加工特点 .....	283	7.2.6 砂带磨床 .....	294
7.1.2 涂附磨具应用范围 .....	283	7.2.7 砂带磨削加工实例 .....	295
<b>7.2 砂带磨削</b> .....	284	<b>7.3 超精密砂带磨削</b> .....	298
7.2.1 砂带磨削机理与特点 .....	284	7.3.1 砂带 .....	298
7.2.2 砂带磨削方式 .....	284	7.3.2 超精密砂带磨削方式 .....	298
7.2.3 接触轮材料、形状、硬度选择 .....	285	7.3.3 超声波砂带磨削运动与机理 .....	298
7.2.4 张紧与调偏机构 .....	287	<b>7.4 强力砂带磨削</b> .....	300

## 第8章 游离磨粒加工技术 .....

<b>8.1 概述</b> .....	301	8.1.3 游离磨粒加工特点 .....	304
8.1.1 游离磨粒加工机理 .....	301	<b>8.2 研磨</b> .....	305
8.1.2 超精密研磨及超精密抛光加工环境 .....	304	8.2.1 研磨原理及过程 .....	305
		8.2.2 研磨加工特点 .....	306

8.2.3	手工研磨与机械研磨 .....	307	8.4.6	端面非接触镜面抛光 .....	342
8.2.4	研磨工具 .....	307	8.4.7	“8”字流动抛光 .....	342
8.2.5	研磨剂 .....	310	8.4.8	刷光表面光整加工 .....	342
8.2.6	研磨运动轨迹 .....	312	<b>8.5 复合抛光工艺</b> .....	<b>343</b>	
8.2.7	研磨工艺参数 .....	317	8.5.1	机械化学抛光 .....	343
8.2.8	研磨加工的应用 .....	319	8.5.2	水合抛光 .....	345
8.2.9	研磨机 .....	324	8.5.3	胶质硅抛光 .....	345
8.2.10	研磨新工艺 .....	326	8.5.4	非接触化学抛光 .....	346
<b>8.3 磨粒喷射加工与磨料流动加工</b> ..	<b>334</b>		<b>8.6 硬脆材料的抛光</b> .....	<b>346</b>	
8.3.1	磨粒喷射加工 .....	334	8.6.1	陶瓷的金刚石微粉抛光 .....	346
8.3.2	磨料流动加工 .....	335	8.6.2	硅片的机械化学复合抛光 .....	348
<b>8.4 机械抛光</b> .....	<b>337</b>		<b>8.7 弹性发射加工</b> .....	<b>349</b>	
8.4.1	机械抛光方式 .....	338	8.7.1	弹性发射概念与加工原理 .....	349
8.4.2	机械抛光机理 .....	338	8.7.2	弹性发射加工装置及 NC 控制 .....	349
8.4.3	抛光剂 .....	339	8.7.3	弹性发射加工结果 .....	351
8.4.4	浮动抛光 .....	339			
8.4.5	修饰加工 .....	341			

## 第9章 磨削加工质量与检测 ..... 353

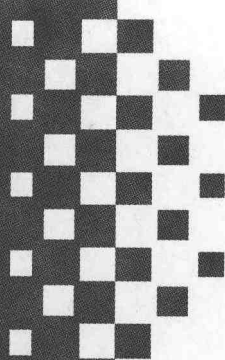
<b>9.1 磨削加工质量的含义及其对使用性能的影响</b> .....	<b>353</b>	9.5.2	强迫颤振 .....	363
<b>9.2 磨削表面纹理</b> .....	<b>354</b>	9.5.3	再生颤振 .....	364
9.2.1	磨削表面的创成机理 .....	<b>9.6 磨削加工精度检测</b> .....	<b>365</b>	
9.2.2	磨削表面粗糙度的理论 分析 .....	9.6.1	轴类零件的精度检验 .....	365
9.2.3	影响磨削加工表面粗糙度的 因素 .....	9.6.2	内孔的精度检验 .....	367
9.2.4	磨削加工表面粗糙度的经验 公式 .....	9.6.3	圆锥的精度检验 .....	368
<b>9.3 磨削表面层物理力学性能</b> .....	<b>357</b>	9.6.4	平面的精度检验 .....	369
9.3.1	磨削表面层加工硬化层 .....	<b>9.7 磨削中典型物理量的精密测量 方法与仪器</b> .....	<b>370</b>	
9.3.2	磨削表面金相组织变化——磨 削烧伤 .....	9.7.1	常用硬度测量方法 .....	370
9.3.3	表面层残余应力 .....	9.7.2	磨削表面层显微硬度的测量 方法 .....	372
<b>9.4 磨削表面完整性参数综合影响及 改善措施</b> .....	<b>361</b>	9.7.3	磨削烧伤的判别与检测 .....	374
9.4.1	磨削表面缺陷 .....	9.7.4	磨削残余应力的检测 .....	380
9.4.2	磨削表面完整性参数间的 关系 .....	<b>9.8 精密磨削表面的典型测量系统 简介</b> .....	<b>383</b>	
9.4.3	改善磨削加工零件表面完整性的 措施 .....	9.8.1	双频激光外差干涉仪及 应用 .....	383
<b>9.5 磨削加工中的振动</b> .....	<b>362</b>	9.8.2	圆度仪及圆度测量 .....	389
9.5.1	磨削加工中的颤振现象 .....	9.8.3	三坐标测量机 .....	390
		9.8.4	激光测量技术 .....	394
		9.8.5	气动量仪测量技术 .....	399
		<b>9.9 纳米表面测量技术</b> .....	<b>401</b>	
		9.9.1	纳米级测量方法简介 .....	401

9.9.2 Fabry-Perot 标准具的测量 技术 .....	402	9.9.4 扫描隧道显微测量技术 .....	402
9.9.3 X 射线干涉测量技术 .....	402	9.9.5 微观表面形貌的扫描探针测量 和其他扫描测量技术 .....	407
<b>参考文献 .....</b>	<b>409</b>		



# 第1章

## 磨料



### 1.1 概述

#### 1.1.1 磨料定义

磨料的概念是随着科学技术的发展,在不同阶段有不同含义。1982年出版的《科学技术百科全书》的解释是磨料是用于打磨或磨削其他材料的硬度极高的材料,磨料可以单独使用,也可以制备制成砂轮或涂附在纸或布上使用。1992年国际生产工程研究会编写的《机械制造技术词典》将磨料定义为:“磨料是具有颗粒形状的和切削能力的天然或人造材料”。2006年5月中国标准出版社出版的《机械工程标准磨料与磨具》中规定的磨料的概念是:磨料是在磨削、研磨和抛光中起作用的材料;磨粒是用人工方法制成特定粒度,用以制造切除材料余量的磨削、抛光和研磨工具的颗粒材料;粗磨粒是4~220粒度的磨料;微粒是不粗于240粒度的普通磨料或细于 $36\mu\text{m}/54\mu\text{m}$ 的超硬磨料;在自由状态下直接进行研磨或抛光的磨粒。

磨料已成为制造业、国防工业、现代高新技术产业中应用的重要材料。用磨料可以制成各种不同类型或不同形状的磨具或砂轮。磨料是磨具能够进行磨削加工的主体材料,可直接使用磨料对工件进行研磨或抛光。对于磨料用于材料及电工制品等非磨削加工领域,本书不再述及。

#### 1.1.2 磨料分类及代号

磨料分为普通磨料与超硬磨料两大类,在这两大类中又分为天然磨料与人造磨料。依据磨料的磨削性能,磨料的分类如图1-1所示。

天然普通磨料,在古代使用较多。由于天然普通磨料硬度较低,组织不均匀,含杂质多,其磨削性能较差,现已很少应用,现代工业中主要使用人造普通磨料,我国使用的人造普通磨料的品种及代号,已列入国家标准。表1-1所示为我国普通磨料的名称及代号(摘自GB/T 2476-1994)。

天然金刚石(又名钻石)是罕见的矿物质,宝石级金刚石晶莹剔透,显现特有的光泽,熠熠生辉。古代便开始用它制作美丽的装饰品,近代对金刚石的特殊性能及使用价值的开发,使金刚石昔日的装饰变成现代工业和科学技术的瑰宝,1954年人造金刚石问世,1957年立方氮化硼研制成功,超硬磨料得到迅速发展。人造金刚石和立方氮化硼的品种代号及适用范围列于表1-2中。

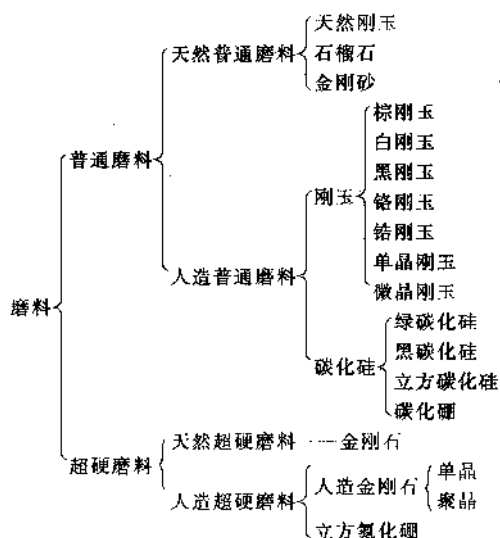


图 1-1 磨料的分类

表 1-1 普通磨料代号 (摘自 GB/T 2476—1994)

系 别	名 称	代 号
刚玉	棕刚玉	A
	白刚玉	WA
	单晶刚玉	SA
	微晶刚玉	MA
	铬刚玉	PA
	锆刚玉	ZA
	黑刚玉	BA
碳化物	黑碳化硅	C
	绿碳化硅	GC
	立方碳化硅	SC
	碳化硼	BC

表 1-2 人造金刚石、立方氮化硼的品种代号及适用范围 (摘自 GB/T 6405—1994)

品 种		适用范围		
系列	代号	粒 度/ $\mu\text{m}$		推荐用途
		窄范围	宽范围	
人造金刚石	PVD	60/70~325/400		树脂、陶瓷结合剂制品等
	MBD	35/40~325/400	30/40~60/80	金属结合剂磨具、锯切、钻探工具及电镀制品
	SCD	60/70~325/400		树脂结合剂磨具,加工钢与硬质合金组合件等
	SMD	16/18~60/70	16/20~60/80	锯切、钻探及修整工具
	DMD	16/18~60/70	16/20~40/50	修整工具
	M-SD	36/54~0/0.5		硬、脆材料的精磨、研磨和抛光等
立方氮化硼	CBN	20/25~325/400	20/30~60/80	树脂、陶瓷结合剂制品等
	M-CBN	36/54~0/0.5		硬、韧材料的精磨、研磨和抛光等

### 1.1.3 磨料应具有的基本性能

磨料是构成磨具的主要原料且可以直接用于研磨和抛光。磨料是磨具能够磨削工件的主体材料。为能适应各种工件材料加工的需要,磨料应具备以下基本性能:硬度、韧性、强度、热稳定性、化学稳定性。

#### (1) 磨料应具有很高的硬度

硬度是磨料的基本性能。磨削作用是通过磨料刻划工件表面完成。为此,磨料要能够切入工件,其硬度必须高于工件的硬度。磨料和硬质合金的显微硬度比较如下:

棕刚玉	19600~21600MPa
锆刚玉	14700MPa
铬刚玉	21600~22600MPa
绿碳化硅	31000~34000MPa
碳化硼	40000~45000MPa
立方碳化硼	73000~100000MPa
人造金刚石	86000~106000MPa
钨钴类硬质合金	16500~17500MPa
钨钛类硬质合金	28000~30000MPa

磨料的硬度是与磨料的化学成分、结晶构造的完整程度、熔合在结晶中的杂质等有关。由于各种磨料的化学成分、杂质的含量及结晶构造都不同,所以每一类磨料部分地适合于某一特定用途。

#### (2) 磨料必须具有一定的韧性

韧性是指磨料的磨粒在受力或冲击作用时抵抗破裂的能力。适当的韧性能保证磨粒微刃的切削作用,并在钝化后能够破裂面产生新的切削微刃,以继续保持其锋利状态。如果磨料脆性较大,就会在尚未充分发挥切削作用之前就被破损。磨料的韧性在很大程度上决定于它的结晶状态(包括结晶中存在的裂纹、孔隙等缺陷)、晶体的大小和磨料宏观几何形状及制粒方法等因素。例如,在棕刚玉磨料的成分中,随着 $TiO_2$ 含量的增加,集合体相应增加,而单晶体和紧密集合体将相应减少。由于集合体中玻璃(非晶体)含量多,从而降低了棕刚玉的韧性。磨粒形状也影响其韧性。等体积形磨粒比片状或针状磨粒的韧性要高。

#### (3) 磨粒应具有一定的机械强度

磨粒在磨削过程中要反复受到磨削力的作用,并在接触工作时要受到冲击载荷及磨削速度的影响,磨粒还会产生热应力。因此,磨粒必须有一定的机械强度,才能保证磨粒发挥切削作用。磨粒的强度与材质及结晶有直接关系。一般来说,刚玉系磨粒的强度高于碳化物系的磨粒。在刚玉系磨粒中,锆刚玉的强度最高,棕刚玉的强度高于白刚玉。在碳化物系磨粒中,黑碳化硅的强度高于绿碳化硅。对于金刚石磨料更是一项重要的性能指标,它以金刚石的抗压能力来表示。磨料呈单晶状态晶形完整的磨粒强度较高。

#### (4) 磨料应具有热稳定性(红硬性)

由于磨削区的温度很高(为 $400\sim 1000^{\circ}C$ ),因此要求磨粒在高温下仍能具有必要的物理力学性能,以继续保持其锋利的切削刃。

#### (5) 磨料应具有热稳定性

磨料与被加工工件材料应不易起化学反应,以免产生黏附和扩散作用,造成磨具的堵塞或磨粒的钝化,致使降低或丧失切削能力。

#### (6) 磨料应具有较好的制粒工艺性

为适应磨削加工,磨料应能制成尺寸范围广、颗粒形态较整齐均匀、形状较规则的磨粒,难以制成颗粒的硬度、韧性较高的材料,不适宜作磨料,如硬质合金粉末。

### 1.1.4 磨料的粒度

磨料的粒度是指磨料颗粒的粗细程度。磨料的粒度规格用粒度号来表示。磨料的国家标准把粒度规格分为两类：一类是用于固结磨具、研磨、抛光的磨料粒度规格，其粒度号以“F”打头，称为“F 粒度号磨料”；另一类是用于涂附磨料的磨料粒度规格，其粒度号以“P”打头，称为“P 粒度号磨料”。

#### (1) F 粒度号规格

GB/T 2481—1998 规定，普通磨料粒度按颗粒尺寸大小，分为 37 个粒度号，其筛比为 1.1892，即 F4、F5、F6、F7、F8、F10、F12、F14、F16、F20、F22、F24、F30、F36、F40、F46、F54、F60、F70、F80、F90、F100、F120、F150、F180、F220、F230、F240、F280、F320、F360、F400、F500、F600、F800、F1000、F1200。

根据磨料生产工艺，磨料粒度在 F4~F220 部分的称为“粗磨粒”，其磨粒尺寸在  $63\mu\text{m}$  以上，多用筛分法生产；磨料粒度在 F230~F1200 范围内，磨粒尺寸小于  $63\mu\text{m}$  的称为“微粉”，多用水选法生产。

F4~F220 粗磨粒磨料粒度组成、F230~F1200 微粉磨料粒度组成（光电沉降粒度）及 F230~F1200 微粉磨料粒度组成参见 GB/T 2481—1998 标准。

#### (2) P 粒度号规格

在涂附磨具中使用 P 粒度号磨料（P 为 popular 的第一个字母）。国标规定磨料有 28 个粒度号，即 P12、P16、P20、P24、P30、P36、P40、P50、P60、P80、P100、P120、P150、P180、P220、P240、P280、P320、P360、P400、P500、P600、P800、P1000、P1200、P1500、P2000、P2500。

P12~P220 磨料较粗，其筛比为 1.892。P240~P2500 磨料为粒度较细及微粉磨料，所用筛比为  $1.120 \rightarrow 1.589 \rightarrow 1.196$ 。P12~P220 磨料粒度组成与 P240~P2500 磨料粒度组成参见 GB/T 9258—2000 标准。

#### (3) 超硬磨料的粒度号

GB/T 6406—1996 等效于 ISO 6106—1979《超硬磨料制品——金刚石或立方氮化硼颗粒尺寸》，共有 25 个粒度号，其筛比为 1.18，其窄范围 20 个，宽范围 5 个。各个粒度号的尺寸范围以本粒度上、下检查筛的网孔尺寸范围表示。各粒度号的颗粒尺寸范围及粒度组成列于表 1-3 中。

表 1-3 超硬磨料的粒度标准 (GB/T 6406—1996)

粒度标记	公称筛孔尺寸范围/ $\mu\text{m}$	99.9%通过的网孔尺寸(上限筛)/ $\mu\text{m}$	上检查筛		下检查筛			不多于2%通过的网孔尺寸(下限筛)/ $\mu\text{m}$
			网孔尺寸/ $\mu\text{m}$	筛上物(不多于)/%	网孔尺寸/ $\mu\text{m}$	筛上物(不多于)/%	筛下物(不多于)/%	
窄范围								
16/18	1180/1000	1700	1180	8	1180	90	8	710
18/20	1000/850	1400	1000	8	850	90	8	600
20/25	850/710	1180	850	8	710	90	8	500
25/30	710/600	1000	710	8	600	90	8	425
30/35	600/500	850	600	8	500	90	8	355
35/40	500/425	710	500	8	425	90	8	300
40/45	425/355	600	455	8	360	90	8	255
45/50	355/300	500	384	8	302	90	8	213
50/60	300/250	455	322	8	255	90	8	181
60/70	250/212	384	271	8	213	90	8	151

续表

粒度标记	公称筛孔尺寸范围/ $\mu\text{m}$	99.9%通过的网孔尺寸(上限筛)/ $\mu\text{m}$	上检查筛		下检查筛			不多于2%通过的网孔尺寸(下限筛)/ $\mu\text{m}$
			网孔尺寸/ $\mu\text{m}$	筛上物(不多于)/%	网孔尺寸/ $\mu\text{m}$	筛上物(不多于)/%	筛下物(不多于)/%	
窄范围								
70/80	212/180	322	227	8	181	90	8	127
80/100	180/150	271	197	10	151	87	10	107
100/120	150/125	227	165	10	127	87	10	90
120/140	125/106	197	139	10	107	87	10	75
140/170	106/90	165	116	11	90	85	11	65
170/200	90/75	139	97	11	75	85	11	57
200/230	75/63	116	85	11	65	85	11	49
230/270	63/53	97	75	11	57	85	11	41
270/325	53/45	85	65	15	49	80	15	
325/400	45/38	75	57	15	41	80	15	
宽范围								
16/20	1180/850	1700	1180	8	850	90	8	600
20/30	850/600	1180	850	8	600	90	8	425
30/40	600/425	850	600	8	425	90	8	300
40/50	425/300	600	455	8	302	90	8	213
60/80	250/180	384	271	8	181	90	8	127

注：隔离线以上用金属织筛，其余用电成形筛筛分。

#### (4) 粒度组成

各粒度号磨料产品不是单一尺寸的粒群，不是尺寸仅限于相邻两筛网孔径之间的立群，而是跨越几个筛号的若干粒群集合，在规定各粒度号磨料的尺寸范围以及每个粒度号中各粒群的质量比例关系时，把各粒度号磨料的颗粒分为五个粒群，即最粗粒、粗粒、基本粒、混合粒和细粒。基本粒是指该粒度对应的筛网与相邻的粗一号筛网孔径尺寸间的粒群；粗粒是与基本粒最邻近的较粗的一个粒群；细粒是与基本粒邻近的较细的一个粒群；最粗粒是比粗粒尺寸更大的粒群；混合粒是基本粒群与相邻的较细粒群之和。

以 F36 磨料为例，说明各粒群的尺寸范围，如图 1-2 所示。磨料粒度组成就是测量计算各粒群所占的质量分数。

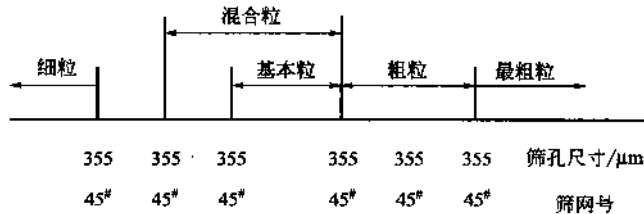


图 1-2 磨料粒群尺寸范围

我国国家标准规定的检查用筛号列于表 1-4 中。

国家标准规定微粉粒度号为 F230~F1200，若采用光电沉降仪检测， $R=2^{1/2} \approx 1.4142$  为公比数；若采用沉降管粒度仪检测， $R$  从 1.173→1.305→1.197，没有确定的公比数。

在 P 系列中，国家标准规定磨粒粒度号为 P12~P220 的公比数， $R=2^{1/4} \approx 1.1892$  为主。国家标准规定微粉粒度号为 P240~P2500，若采用沉降管粒度仪检测， $R$  从 1.120→1.589→1.196，没有确定的公比数。

表 1-4 我国国家标准规定的检查用筛号

筛号	网孔基本尺寸	筛号	网孔基本尺寸	筛号	网孔基本尺寸
5/16	8000	14	1400	70	212
0.265	6700	16	1180	80	180
3/4	5600	18	1000	100	150
		20	850	120	125
4	4750	25	710	140	106
5	4000	30	600	170	90
6	3350	35	500	200	75
7	2800	40	425	230	63
8	2360	45	355	270	53
10	2000	50	300	325	45
12	1700	60	250		

### 1.1.5 普通磨料的化学成分

磨料的化学成分是反映磨料质量和性能的主要指标。磨料的主要成分在其质量指标规定范围内含量越高，纯度越高，磨料的性质越好。各种刚玉磨料品种的主要区别是氧化铝含量的不同与杂质含量的不同。国家标准规定了相应范围，并限定了氧化钛与氧化铁的含量。碳化硅磨料的主要成分是 SiC，含量在 95%~99.5% 之间，其余为杂质。刚玉磨料和碳化硅磨料的化学成分的具体规定可查阅国家标准 GB/T 2475—1996 和 GB/T 2480—1996。

## 1.2 氧化物（刚玉）系磨料

### 1.2.1 刚玉系磨料

棕刚玉（A）是以矾土、无烟煤和铁屑为原料，在电弧炉中熔炼而成。在冶炼过程中，无烟煤的碳素将矾土中的氧化铁、二氧化硅、氧化钛还原成金属，它们与加入的铁屑  $Al_2O_3$  结合在一起成为铁合金。铁合金溶液的密度较刚玉熔液大，所以沉降在炉底而与刚玉熔液相分离。刚玉熔液冷却后成为晶体，由于含有杂质，因而呈棕褐色。棕刚玉的主要化学成分为 94.5%~97% 的  $Al_2O_3$  以及少量的氧化钛、氧化硅、氧化铁、氧化钙、氧化镁。棕刚玉有较高的韧性，能承受较大压力，磨削中抗破碎能力较强，加之价格比较便宜，在磨粒中用量最大。

白刚玉（WA）用含  $Al_2O_3$  98% 以上的铝氧粉熔融结晶而成。因此，白刚玉中含  $Al_2O_3$  更高，一般在 98.5% 以上，含  $Na_2O$  在 10.6% 以下。由于白刚玉中  $Al_2O_3$  的纯度高及晶体中存在有气孔（这主要是  $Al_2O_3$  粉中的  $Na_2O$  受热后蒸发而成的），所以白刚玉硬而脆。

单晶刚玉（SA）以矾土、无烟煤、铁屑、黄铁矿为原料，在电弧中熔合而成，熔炼过程的特点是：矾土中的杂质除了被无烟煤中的碳还原成金属结合体——铁合金，沉于炉底之外，矾土中的一部分铝与硫化合生成硫化铝夹杂在刚玉之间，由于硫化铝能溶于水，所以将冷却结晶好的熔块水解后，其  $Al_2O_3$  的含量在 98% 以上，颗粒形状多为等体积形，是完整的单晶体，具有良好的多角多棱切削刃，切削能力强。

微晶刚玉（MA）是以矾土、无烟煤、铁屑为原料，在电炉中冶炼。其冶炼过程与冶

炼棕刚玉基本相同,所不同的是将电炉中熔化还原的熔液,采用流放措施,使之急速冷却而成。微晶刚玉的主要成分为:  $\text{Al}_2\text{O}_3$  94%~96%,  $\text{TiO}_2$  小于3%,还有少量的氧化硅、氧化铁、氧化镁。其晶体尺寸小,90~280 $\mu\text{m}$ 的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  晶体占75%~85%,大  $\text{Al}_2\text{O}_3$  晶体不超过400~800 $\mu\text{m}$ 。它的韧性较棕刚玉高,强度较高,磨削中有良好的自锐性能。

铬刚玉(PA)是在熔炼白刚玉时加入适量的氧化铬( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ )而制得,呈紫红或玫瑰红色,其主要成分是  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,占97.5%以上,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  占1.3%以上。铬刚玉的韧性较白刚玉高,有良好的切削性能。

锆钽刚玉(NA)是用  $\text{Al}_2\text{O}_3$  粉、氧化锆、氧化钽混合物在电弧炉中熔炼冷却结晶而制得。它的化学成分除含有  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$  外,还含有少量稀土氧化物,稀土元素分布于  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  晶体、玻璃(晶体)和稀土化合物中,韧性较白刚玉好些。

锆刚玉(ZA)以矾土或  $\text{Al}_2\text{O}_3$  粉和锆英石为原料,在电弧炉中熔炼而成。其主要成分是  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{ZrO}_2$ ,其中  $\text{ZrO}_2$  占25%~45%,韧性好。

钒刚玉以  $\text{Al}_2\text{O}_3$  及  $\text{V}_2\text{O}_5$ (五氧化二钒)为原料,在电弧炉中熔炼冷却结晶而制得。磨料中含有  $\text{VO}_2$ ,呈猫眼绿色,具有坚而韧的特点。

钒土烧结刚玉,将钒土脱水后磨细至于10 $\mu\text{m}$ 以下再成形为颗粒,经高温烧结而成。其主要化学成分为:  $\text{Al}_2\text{O}_3$  占85%~90%,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  占4%~6%,  $\text{SiO}_2$  占2%~6%,  $\text{TiO}_2$  占2%~4%。硬度稍低,但韧性好。

黑刚玉(BA)又名人造金刚砂,用铁矾土及焦炭烧结而成。它的主要成分是:  $\text{Al}_2\text{O}_3$  占70%~85%,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  占7%~9%,少量的  $\text{SO}_2$  与杂质。其硬度较低,切削性能较差,但价格低廉。

### 1.2.2 刚玉磨料晶体结构与相图

氧化物系(刚玉)磨料常用的氧化物有  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Cr}_2\text{O}_3$ 、 $\text{ZrO}_2$ 、莫来石( $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ )、尖晶石( $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ )等。其中  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Cr}_2\text{O}_3$ 、 $\text{ZrO}_2$  是常用的、力学性能优越的刚玉磨料。

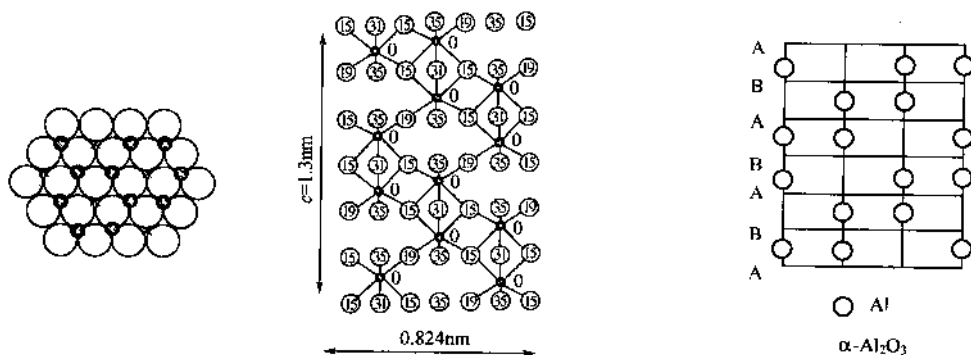
#### (1) $\text{Al}_2\text{O}_3$ 磨料(棕刚玉)晶体结构

$\text{Al}_2\text{O}_3$  是一种多晶型的化合物,其变体有多种,如三方晶系的  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、六方晶系的  $\beta$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、四方晶系的  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、等轴晶系的  $\eta$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、单斜晶体系的  $\theta$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 。稳定的天然  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  称为刚玉。 $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  由53.2%的铝(Al)和46.8%的氧(O)组成,有时含有微量的Ti、Fe、Cr、Mn等类质同像杂质。纯刚玉为无色透明,由于所含色素离子的不同,纯刚玉呈现不同颜色。天然  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  单晶体,称为白宝石;含微量的三价铬( $\text{Cr}^{3+}$ )呈红色,称为红宝石;含三价铁( $\text{Fe}^{3+}$ )或四价铁( $\text{Fe}^{4+}$ )呈蓝色,称为蓝宝石;含少量的  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  显现暗色,称为刚玉粉。

其结构比较复杂,因此以原子层的排列结构和各层间的堆积顺序来说明比较容易理解,如图1-3所示。其中  $\text{O}^{2-}$  离子近似地作六方最紧密堆积,  $\text{Al}^{3+}$  离子填充在6个  $\text{O}^{2-}$  离子形成的八面体空隙中。由于  $\text{Al}:\text{O}=2:3$ ,  $\text{Al}^{3+}$  占据八面体空隙时,多周期堆积起来形成刚玉结构。结构中2个  $\text{Al}^{3+}$  填充在3个八面体空隙时,在空间的分布有三种不同的方式,刚玉结构中正、负离子的配位键数分别为6和4,晶格常数  $|a_1|=|a_2|=a$ 。两轴变角为  $120^\circ$ 。 $c$  轴与底面垂直,  $c/a=1.633$ 。刚玉型结构的化合物还有  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ 、 $\alpha$ - $\text{Fe}_2\text{O}_3$  等。刚玉硬度非常大,为莫氏硬度9级,熔点高达2050 $^\circ\text{C}$ ,这与Al—O键的牢固性有关。 $\text{Al}_2\text{O}_3$  的离子键比例为0.63,共价键比例为0.37。

#### (2) $\text{Al}_2\text{O}_3$ 的相图

以  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的生成为研究对象称为系统。系统中具有相同物理与化学性质且完全均匀分

(a) 刚玉型结构中  
正离子的排列(b) 刚玉型结构在面(2110)上的投影,反映出  
6个Al—O层在c轴方向构成一个周期(c) 刚玉型结构中O<sup>2-</sup>作hcp排列,显示出Al<sup>3+</sup>填充以3个  
八面体空隙时在c轴方向上的三种不同的分布方式图 1-3 刚玉型 ( $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ) 结构

布的总和称为相。相与相之间有界面。越过界面时性质发生突变。相平衡主要研究多组分(或单组分)多相系统中相的平衡问题,即多相系统的平衡状态(包括相的个数、每相的组成、各相的相对含量等)如何随着影响平衡的因素(温度、压力、组分的浓度等)变化而改变的规律。一个系统所含相的数目称为相数,以  $P$  表示。按照相数的不同,系统可分为单相系统 ( $P=1$ )、两相系统 ( $P=2$ )、三相系统 ( $P=3$ ) 等。一种物质可以有几个相,如水可有固相、液相、气相。

为研究刚玉结晶过程中的矿物生成规律,需要了解  $\text{Al}_2\text{O}_3$  与杂质氧化物系统的相平衡。相平衡研究中遵循相律这一普遍规律。相律确定了多相平衡系统中系统的自由度 ( $F$ )、独立组元数 ( $C$ )、相数 ( $P$ ) 和对系统平衡状态能够发生影响的外界影响因素数 ( $n$ ) 之间的关系。相律的数学表达式为

$$F = C - P + n$$

自由度  $F$  是指在一定范围内,可以任意改变而不引起旧相的消失或新相的产生的独立变量,称为自由度。这些变量主要是指组成(组分的浓度)、温度、压力等。一个系统中有几个独立变量就有几个自由度。由相律可知,系统中独立组元数  $C$  越多,则自由度  $F$  就越大。相数  $P$  越多,自由度  $F$  越小。自由度  $F$  为零时,相数  $P$  最大。相数最小时,自由度  $F$  最大。

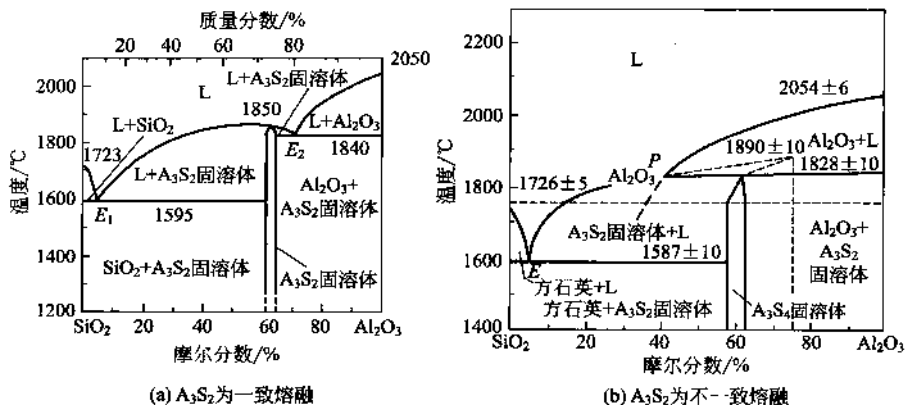
相平衡是一种动态平衡。根据多相平衡实验的结果,可以绘制成几何图形以描述在平衡状态下的变化系统,这种图形称为相图(或称平衡状态图)。它是处于平衡状态下系统的组分、物相和外界条件相互关系的几何描述,所以相图是平衡的直观表现。

氧化铝与杂质氧化物系统可分为  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  系、 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO}$  系、 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-FeO}$  系、 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  系、 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$  系及  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-SiO}_2$  系等。

①  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  系统相图  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  系相图中只有一个化合物  $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$  (称为  $\text{A}_3\text{S}_2$  莫来石),其质量组成是 72% 的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和 28% 的  $\text{SiO}_2$ 。物质的量组成是 60% 的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和 40% 的  $\text{SiO}_2$ 。图 1-4 所示为  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  系统相图。

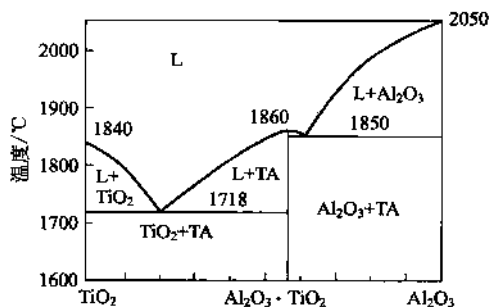
本系统的液相线温度都比较高。在使用高纯原料试样并在密封条件下进行相平衡实验时,莫来石  $\text{A}_3\text{S}_2$  则是一致熔融化合物,见图 1-4(a);当试样中含有少量碱金属等杂质,或相平衡实验是在非密封条件下进行时, $\text{A}_3\text{S}_2$  为不一致熔融化合物,见图 1-4(b)。莫来石和刚玉之间能够形成固熔体。由图 1-4(a) 中可以看出,一致熔融的莫来石,熔点为  $1850^\circ\text{C}$ ,分解为液相  $L$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 。 $\text{Al}_2\text{O}_3$  的质量分数大于 90% 以上的为刚玉质,其矿物相为刚玉与莫来石。因此,按  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的含量范围,可以在相图上确定其矿物组成,进而估算材料性能。



图 1-4  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  系统相图

在相图中  $\text{SiO}_2$  一端含  $\text{Al}_2\text{O}_3 < 1\%$ ，则是硅质耐火材料（硅砖制品范围，具有在高温  $1620\sim 1660^\circ\text{C}$  情况下，长期使用不变形的特点）。另外，从相同液相线的倾斜程度，可以判断其组成材料的液相量随温度而变化的情况。

②  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  系统相图  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  系相图示于图 1-5 中，该系统有一个化合物  $\text{Al}_2\text{TiO}_5$ ，熔点为  $1860^\circ\text{C}$ ，莫氏硬度为  $7\sim 7.5$ ，其质量组成是  $56\% \text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $44\% \text{TiO}_2$ 。从相图中可以看出， $\text{TiO}_2$  的含量多，会降低  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的熔点； $\text{TiO}_2$  对刚玉结晶范围的限制比  $\text{SiO}_2$  要小得多。在  $1850^\circ\text{C}$  时，液相全部凝固， $\text{TiO}_2$  难以固溶体状态存在于  $\text{Al}_2\text{O}_3$  晶体中，它将以微晶核形式从  $\text{Al}_2\text{O}_3$  中析出，使  $\text{Al}_2\text{O}_3$  晶体结构发生微晶型变化，从而提高  $\text{Al}_2\text{O}_3$  晶体的坚韧性和耐冲击强度，这是微晶刚玉形成的原因。

图 1-5  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  系统相图

③ 白刚玉的  $\text{Na}_2\text{O-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  三系统相图 如图 1-6 所示。白刚玉是以铝氧粉为原料，经高温熔融后冷却再结晶而获得的。而铝氧粉是以钽土经化学提纯获得的，其主要杂质是氧化钠，生成高铝酸钠 ( $\text{Na}_2\text{O} \cdot 11\text{Al}_2\text{O}_3$ )。高铝酸钠对白刚玉的质量有严重影响。可通过加石英砂和氟化铝 ( $\text{AlF}_3$ ) 消除或减弱  $\text{Na}_2\text{O}$  的危害。从  $\text{Na}_2\text{O-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  系统相图中可以看出，在白刚玉熔炼时加入一定量的石英砂 ( $\text{SiO}_2$ ) 能限制高铝酸钠的生成并形成三斜霞石：



④ 单晶刚玉 ( $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{S}_3$ ) 系统相图 单晶刚玉是用钽土、黄铁矿 ( $\text{FeS}_2$ )、碳素、铁屑等材料，在电弧炉内冶炼而成。在冶炼过程中，除相同于棕刚玉的杂质还原、铁合金沉降外，还会有部分氧化铅通过  $\text{FeS}_2$  和  $\text{C}$  复分解反应生成少量的硫化铝 ( $\text{Al}_2\text{S}_3$ )。  $\text{Al}_2\text{S}_3$  的