

# 普通磨料概论

PUTONG MELIAO GAILUN

PUTONGMELIAO  
XU WEIYU ZHU  
GAILUN

•河南教育出版社

PUTONGMELIAOGAILUN  
PUTONGMELIAOGAILUN



普通磨料概论

徐为瑜 著

河南教育出版社出版

郑州星宇数据公司排版

郑州中原区三元印刷厂印刷

787×1092毫米 32开本 6.625印张 149千字

1989年8月第1版 1989年8月第1次印刷

印数 1—000,000册

ISBN 7-5347-0699-8/TG·1

定 价 3.80元

# 前 言

本书主要讲述磨料磨具专业所需的磨料专业知识中最基本最主要的内容。同时，为了让从事磨具专业的工作者了解一些磨料专业有关的理论知识，书中也阐述刚玉和碳化硅磨料形成的物理化学原理，并简单介绍它们的生产工艺。

本书中引述的实验数据和工艺数据，主要来源于张念东编写的《碳化硅磨料工艺学》，孙斯衡编写的《刚玉制造》，余森编写的《碳化硅制造》，特向他们致以敬意。

由于作者水平有限，书中难免存在缺点和不当之处，敬请指正。

徐为瑜

1986年12月

# 目 录

第一章 绪论.....	(1)
第一节 人造磨料的发展概况.....	(2)
第二节 磨料的概念.....	(5)
第三节 磨料的分类、品种及代号.....	(7)
第四节 磨料粒度规格 .....	(11)
第五节 磨料粒度组成 .....	(14)
第二章 普通磨料的化学性质 .....	(20)
第一节 磨料的基本性质 .....	(20)
第二节 刚玉磨料的化学成分 .....	(22)
第三节 碳化硅磨料的化学成分 .....	(32)
第四节 普通磨料化学分析方法 .....	(38)
第三章 普通磨料的物理性质 .....	(43)
第一节 磨料的硬度 .....	(43)
第二节 磨料的韧性 .....	(49)
第三节 磨料的堆积密度 .....	(60)
第四节 磨料的颗粒密度 .....	(62)
第五节 磨料的亲水性 .....	(64)
第六节 磨料的磁性物含量 .....	(67)
第七节 磨料的其他几项物理性质 .....	(70)
第四章 碳化硅晶体 .....	(75)
第一节 碳化硅晶体形成 .....	(75)
第二节 碳化硅的结晶化学 .....	(78)
第三节 碳化硅人工合成的几种方法 .....	(85)

第五章 刚玉磨料生产工艺 .....	(90)
第一节 刚玉磨料生产原料 .....	(90)
第二节 刚玉磨料电弧炉 .....	(96)
第三节 刚玉磨料生产工艺 .....	(106)
第六章 刚玉磨料冶炼原理 .....	(117)
第一节 刚玉磨料冶炼的物理化学 .....	(117)
第二节 刚玉磨料有关系统的相图 .....	(124)
第三节 刚玉磨料的结晶 .....	(131)
第七章 碳化硅磨料生产工艺 .....	(137)
第一节 碳化硅磨料生产炉料 .....	(137)
第二节 碳化硅磨料电阻炉 .....	(145)
第三节 碳化硅磨料生产工艺 .....	(153)
第八章 碳化硅磨料制炼原理 .....	(161)
第一节 碳化硅有关系统的相图 .....	(161)
第二节 碳化硅炉内反应机理 .....	(169)
第九章 普通磨料的应用 .....	(173)
第一节 普通磨料的磨削应用 .....	(173)
第二节 普通磨料的非磨削用途 .....	(176)
第十章 磨料的制粒加工 .....	(184)
第一节 磨料的磨粒制造 .....	(184)
第二节 磨料的微粉生产 .....	(196)

## 第一章 绪论

磨料为人类所用已经有数千年之久。在人类的远古时期，原始人就已使用天然磨料来磨锐木质工具、骨头和燧石等。在陶器发明之前，应用磨料的研磨加工早已为人类的生产服务了。然而，磨料作为一门科学应该是以人类开始懂得选择一些具有特殊性质的岩石，并且用之制成磨削工具为始端。

从考古发现的证物表明：公元前 4000 年，埃及人已经使用磨料。大约公元前 2000 年，在中东地区，随着冶金工艺的发展，磨料的应用得到了相应的发展。

中国也是应用磨料最早的国家之一。在我国黄河流域曾多次发掘出经过研磨加工得很好的石斧、刀器以及装饰用的动物骨和角等等物件。在中国奴隶制社会就已经出现了用研磨法制成的青铜镜。

人类最早使用的磨料是天然石英砂和燧石等。随后，研磨性能更好的另外三种矿物又相继发现和使用。它们是天然刚玉、石榴石和刚砂。

十九世纪末，人造磨料研制成功了。自此磨料从天然采用到人工制造，经历过一个漫长的历史时期又开创了新的篇章。人造磨料具备很多特殊的优异的物理和化学性能，使它成为发展现代化国防、现代化工业和新科学技术所不可缺少的重要材料。

## 第一节 人造磨料的发展概况

在应用天然磨料时，人们逐渐认识到，几乎所有的天然磨料都含有结晶氧化铝，并且能起磨削作用的就是结晶氧化铝。基于这种认识，人们开始设法将含氧化铝的物质熔融制作成磨料，其磨削效果优于天然磨料。1893年法国人，1894年德国人分别获得熔融刚砂的专利权。

在许许多多研究人造磨料合成条件的工作中，特别应该提到的是美国人艾奇逊 (E.G.Acheson) 采用含氧化铝的粘土作为合成材料之一，配上焦炭这种碳素材料，对该混合物加以强大的电流，直至中心的粘土熔化。冷却后，他在电极的端头和混合物料中发现了明亮闪光的坚硬物质。艾奇逊多次重复这一试验，并且把这些坚硬物质收集起来试验它的磨削性能，结果竟然能磨损他的金刚石戒指。当时，艾奇逊把发现的碳化硅误认为是碳和刚玉的化合物，所以将这一物质取名为“卡普伦登” (carborundum)。它是英文 carbon (碳) 和 corundum (刚玉) 两个词复合构成的。事实上，这一研制工作中被采用的粘土里参与反应的化学成分并不是氧化铝，而是二氧化硅。

1893年艾奇逊获取碳化硅生产专利权，使得碳化硅成为世界上最早商品化的人造磨料。美国专利 492767 号《碳化硅 SiC》阐明了在碳质炉芯电阻炉中，以二氧化硅和碳为主要化学成分的混配料添加食盐制取碳化硅的工业方法。当时只能制取黑色碳化硅，日产 125 克。然而，它被人们誉为“研磨宝石”，每公斤价格高达 1600 美元。

1895年法国人对他的原专利加以修改，采用矾土代替原来所用的原材料刚砂。但是，首先研制出磨料级氧化铝晶体的

是美国人雅可布 (C.B.Jacobs)。到 1904 年，由于赫金斯 (A.C.Higgins) 熔炉的创立，人造刚玉成功地发展为工业大规模生产。人造刚玉磨料生产的进一步发展就是通过为原料中加入铁屑，用物理方法除掉刚玉熔液中悬浮的金属杂质。这个方法发明的目的最先并不是为生产刚玉磨料，而是为矾土生产纯氧化铝。从人造刚玉开始生产之后，市场上逐渐出现了许多品种的刚玉产品。各种产品的区别主要是刚玉中氧化铝的含量，杂质的种类及其含量和熔块冷却速度所致的结晶尺寸不同。

随着工业生产的发展，人造磨料制造作为一个工业生产部门不断发展起来。国外磨料磨具工业是十九世纪末，首先在北美开创的。那里有水力发电供给廉价的能源。世界上研制人造普通磨料和超硬磨料最早的公司是美国的诺顿公司 (Norton Company)、卡普伦登公司 (Carborundum Company) 和通用电气公司 (General Electric Company)。因而，美国磨料磨具工业发展具有典型的代表性。现列出几个公司研制成功的主要磨料品种及其投产年代，以资分析：

1891 年，卡普伦登公司研制成功碳化硅，于 1906 年投入生产。

1897 年，诺顿公司研制成功棕刚玉，于 1901 年投入生产。

1910 年，诺顿公司研制成功白刚玉。

1924 年，卡普伦登公司研制成功绿碳化硅。

1934 年，诺顿公司开始生产碳化硼磨料。

1936 年，诺顿公司开始生产半脆性低钛刚玉 (57A)。

1938 年，诺顿公司开始生产棕白刚玉混合磨料 (19A)。

1946 年，诺顿公司研制成功单晶刚玉。



1953年，通用电气公司研制成功人造金刚石。

1954年，诺顿公司研制成功微晶刚玉（44A）。

1957年，通用电气公司研制成功立方氮化硼。

1962年，卡普伦登公司研制成功铬刚玉。

1962年，诺顿公司研制成功烧结刚玉。

1962年，诺顿公司开始采用单晶刚玉和低钛刚玉的混合磨料（23A）。

1963年，美国埃克沙伦公司（Excello Co.）研制成功锆刚玉（AZ）。

美国磨料磨具工业在本世纪二十年代，以棕刚玉、白刚玉、绿碳化硅和黑碳化硅为主体的人造普通磨料体系日臻完备。其间，美国国内陆续建立了许多磨料磨具厂，初步形成行业体系。紧接着，在美国国内开始制定砂轮使用安全标准并且编辑出版《磨料磨具手册》一书，标志着至三十年代美国磨料磨具业已经构成稳固的专业体系，开始控制西方国家的磨料磨具生产和市场。四十年代是美国磨料磨具业的提高和发展阶段。二次世界大战之后，磨料磨具工厂设备和生产工艺技术进入改造更新阶段。五十年代是磨料磨具品种大发展的年代。六十年代，随着钢铁、汽车和机床制造的进展，人造磨料制造也有了高速的发展。人工合成金刚石和立方氮化硼等新型的高硬度磨料相继发明和投入工业生产。普通磨料相应地也由高精度向高效率发展，出现了一系列高韧性磨料品种。七十年代，美国人开始提倡经济、高效的磨料加工（abrasive machining），磨料磨具与金属刀具相比美。高速、重负荷和强力磨削工艺的发展，使磨料磨具成为高效率机加工的一种必要材料。

综上所述，人造磨料的发展正是适应磨加工发展的要求不断进展的。从普通磨料（刚玉、碳化硅）发展到超硬磨料（金

刚石、立方氮化硼), 国外有人称之为 AC 至 BD 进展过程。A 指刚玉, Alundum. C 指碳化硅, Carborundum. B 指立方氮化硼, Borazon (即 cubic boron nitride). D 指人造金刚石, Diamond (即 synthetic diamond). 也就是说, 人造磨料发展趋向, 超硬磨料立方氮化硼将取代普通磨料刚玉, 人造金刚石取代碳化硅。立方氮化硼磨料应用于强力磨削优于普通磨料刚玉, 今后必将自成体系并且与人造金刚石平行。普通磨料刚玉和碳化硅要向非磨削用途发展。

人造磨料其品种的发展是以韧性和硬度两个方面为重点的。前者指各种高韧性刚玉磨料, 后者由人造金刚石和立方氮化硼反映。磨料品种发展的结果是趋向专用, 具备特效。

## 第二节 磨料的概念

随着近代科学技术的发展, 磨料的含义实际上已经远远超越过去狭窄的传统观念。磨料最普通的词义, 在国外有人以“韦氏大辞典”(Webster's Collegiate Dictionary) 为依据, 说是“用于打磨、磨削、抛光等等工作的物质”。直至 1983 年, 中国对外翻译出版公司、英国贝尔—海曼有限公司合作出版的《英汉双解技术词典》(Technical Dictionary) 还是这样定义的, “磨料是一种用于打磨或磨削物件表面的物质, 例如: 砂子、金刚砂、碳化硅。”在《科学技术百科词典》

(McGraw-Hill Encyclopedia of Science & Technology 1982) 磨料被定义为是用于打磨或磨削其他材料的硬度极高的一种材料。接着百科词典以 abrasive materials 作一词条, 阐明磨料既可以单独运用, 也可以制成砂轮或者涂附在纸或布上应用。它们可以制作成陶瓷砂轮象普通刀具一样对金属

进行磨削加工。因为它们具有极高的硬度和耐熔性质，所以这些材料在磨削加工的速度，深度和光洁度等方面有它们的优越性。显然，这些定义和词义解释尚缺乏专业性。

最近，国际生产工程研究学会（CIRP）编著的《机械制造技术辞典》对“磨料”有一个比较好的定义：

磨料（天然的或人造的）

Abrasive (natural or synthetic)

具有颗粒形状的和切削能力的天然或人造材料。

Natural or synthetic material in the form of grains and which is capable of cutting.

不过，“磨料”一词目前终究已有相当广泛的含义。研究世界上不同的国家磨料磨具应用发展史上不同的阶段，证实磨料具有不同的内容和构成比。现以磨料发展先进的美国为例，磨料似可概括地作如下描述：磨料至少包括（1）人造非金属磨料；（2）人造金属磨料（metallic abrasives）；（3）天然磨料；（4）天然和人造金刚石；（5）其他超硬磨料。人造非金属磨料一直是磨料的主体，至六十年代人造非金属磨料的产量仍占美国磨料总产量一半多。它主要包含刚玉和碳化硅两大部分。它们多用于制造固结磨具，加工金属制品。人造非金属磨料近年来已更多地被做非磨削用途。在美国碳化硅的生产比重，六十年代以来持续提高，这种增长的主要原因就是碳化硅非磨削用途的不断开发，并且在冶金、化工、建材、电气、航天以及一些新兴工业中已进入实用性阶段。例如，美国诺顿公司的 NORALIDE-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>、SiC、Si<sub>2</sub>ON<sub>2</sub>。其中热压碳化硅 NC-203，再结晶碳化硅 NC-400 和高密度反应烧结碳化硅 NC-430，在高温下显示出良好的抗氧化性、耐热冲击性、热传导性和加工性能，可用于汽轮机、发动机和热交换器的关键

另件，以便适应能源危机、提高效率，延长使用寿命。人造金属磨料主要是指淬火钢粒和淬火铁粒 (steel or iron shot)，现在还有钢绒和铜绒 (steel wool, brass wool and copper wool) 等等。在美国，六十年代以来人造金属磨料的产量曾大幅度上升过。天然磨料仍是石榴石、刚砂和天然刚玉等几种。七十年代世界能源短缺，促成天然磨料的开采和应用有了相应的发展。当时在美国天然磨料和人造非金属磨料的产量比是 1: 4。天然和人造金刚石方面美国始终保持着优势，七十年代中期美国金刚石磨料的产量约占世界年产人造金刚石和天然金刚石总数的六分之一。金刚石磨料的产值可占全美国磨料总产值一半以上。其他超硬磨料以立方氮化硼为主。目前，人造金刚石和立方氮化硼磨料在整个磨料构成比中的比值逐年上升。由于这些超硬磨料在磨削性能上的高效率，尽管磨料磨具先进国家的年总产量历年变化不大，然而按单位磨料产量所能磨削加工的金属量衡量已有了显著提高。

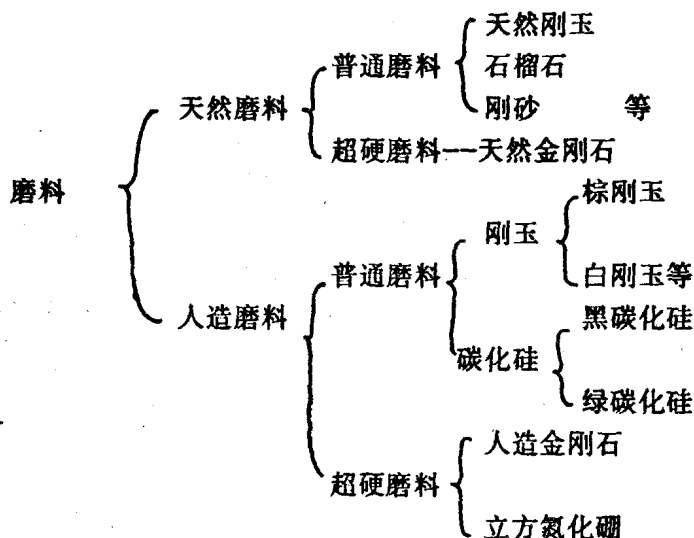
磨料的品种繁多，它们之间的化学成分、矿物组成、物理性质以及制造方法，常常互相接近而又交错，但在应用上却有很大的区别。从整个磨料制造工艺的内容来分析，它更是错综复杂和涉及多门学科。在理论上，它不是仅用无机、有机或物理的科学的理论所能概括的。在工艺上，它不单纯地属于无机化学工业、冶金工业或硅酸盐工业范围。

### 第三节 磨料的分类、品种及代号

磨料可分为天然磨料和人造磨料两大类。依据磨料的磨削性能，又可将金刚石等高硬度磨削材料称为超硬磨料，其他的

为普通磨料。人造普通磨料包括刚玉和碳化硅两大系列的各种磨料品种。同样，人造金刚石和立方氮化硼的各种品种归入人造超硬磨料。

磨料的分类可简单列表如下：



天然磨料是自然形成的，其化学成分和物理性能不能人为地给予改变。因此，它们之中除天然金刚石外，一般相比人造磨料都是硬度较低，磨削性能较差。天然金刚石产量极其有限。简言之，天然磨料在现代工业技术中应用受到限制。相对而言，人造磨料具有品种纯、硬度高、韧性好和颗粒锋利等特点。它被现代科学技术广泛采用，在国民经济建设中占有重要地位。国际上人们往往把磨料磨具工业水平，做为衡量一个国家国民经济发展水平的标志之一。

我国的磨料磨具工业是解放后才发展起来的。几十年来，磨料已发展约有 21 个品种，约 400 个规格。磨具约 348 个品

种，近 20 万个规格。我国主要的磨料品种及代号如表 1-1 所示。

• 表 1-1 我国主要的普通磨料品种及代号

品种名称	代号	代号
棕刚玉	A	GZ
白刚玉	WA	GB
单晶刚玉	SA	GD
微晶刚玉	MA	GW
铬刚玉	PA	GG
锆刚玉	ZA	GA
黑碳化硅	C	TH
绿碳化硅	GC	TL
立方碳化硅	SC	TF
碳化硼	BC	TP
国家标准	GB2476-83	GB2476-81

国外人造磨料的品种及代号，多是生产厂家和制造公司自行确定的。现选择国外磨料磨具主要制造公司的磨料品种及代号列表 1-2 如下：

表 1-2 国外的磨料品种及代号示例

品种名称	(美) 诺顿	(日) 昭和电工	苏联
棕刚玉	A	A	31
		A-40	32
		A-41	33
		A-43	34
		A-47	35
半脆棕刚玉	57A	GA (A-44)	
白刚玉	38A	WA	3B7
			3B8
			3B9
单晶刚玉	32A	SA	M8
			M7
铬刚玉		PA (C-37)	3X
微晶刚玉	44A	TA	
烧结刚玉	75A	SM	
黑碳化硅	C	C	K45
		C-25	K47
		C-26	K48
绿碳化硅	GC	GC	K36
			K37
			K38
			K39
碳化硼	Borbide		I II

#### 第四节 磨料粒度规格

磨料根据使用要求，通常采用筛分法和水选法制成粗细不同的各种粒度规格。磨料的颗粒尺寸在 40 微米以上的，多用筛分法。40 微米以下的，多用水选法。采用筛分法制得的各种粒度规格的磨料，以筛网号表示，并标记有井，作为粒度号。采用水选法制得的各种粒度规格的磨料，以其颗粒尺寸表示，并标记有 W，作为粒度号。因此，磨料的粒度是指磨料磨粒的颗粒尺寸，常用粒度号标记。

我国国家标准 GB2477-83 规定，磨料粒度按颗粒尺寸大小分为 41 个粒度号，记作：

4#	5#	6#	7#	8#	10#	12#	14#	16#
20#	22#	24#	30#	36#	40#	46#	54#	60#
70#	80#	90#	100#	120#	150#	180#	220#	240#
W <sub>63</sub>	W <sub>50</sub>	W <sub>40</sub>	W <sub>28</sub>	W <sub>20</sub>	W <sub>14</sub>	W <sub>10</sub>	W <sub>7</sub>	W <sub>5</sub>
W <sub>3.5</sub>	W <sub>2.5</sub>	W <sub>1.5</sub>	W <sub>1.0</sub>	W <sub>0.5</sub>				

我国国家标准 GB2477-83 代替 GB2477-81 是等效采用国际标准化组织 ISO/TC<sub>29</sub>/SC<sub>5</sub> (US-22) 295 (1979) 时，于粒度尺寸系列的空档处增加 22# 和 40# 两个粒度。

现行国家标准与被代替的标准是不同的，其差别的实质是所采用的筛网孔径系列不同了。磨料采用筛分法筛选分级时，很明显每一个粒度磨料必须在二层筛网之间获得。当然，采用水选法，也必须要有个上下限值来确定粒度规格。这就是说，



磨料粒度大小的变化是依从于筛网变化的。筛网的变化是可以人为地纳入一定的规律的，让相邻的二个筛网孔径之比相等，称为磨料粒度的公比，即：

$$\frac{N_0}{N_1} = \frac{N_1}{N_2} = \dots = \frac{N_n}{N_{n+1}} = R.$$

式中， $N_0N_1N_2 \dots$  为相邻的筛网孔径

$R$  是其公比数

这样一个数列就构成了筛网的孔径系列，它从一开始，每  $R$  倍定为一种网孔规格。系列的顺序称作筛序。

世界各国的筛网孔径系列不完全一样。例如：

美国标准 ASTME11-70

英国标准 BS410 (1969)

主系筛序公比数 =  $10^{3/20} = R_{20/3}$

副系筛序公比数 =  $10^{3/40} = R_{40/3}$

日本标准 JIS 28801 (1968)

筛序公比数 =  $2^{1/4}$

西德标准 DIN 4188 (1969)

主系筛序公比数 =  $10^{1/10} = R_{10}$

副系筛序公比数 =  $10^{1/20} = R_{20}$

苏联标准 ГOCT · 3584-53

筛号在 1 以上者，筛序公比数 =  $10^{1/10} = R_{10}$

筛号在 1 以下者，筛序公比数 =  $10^{1/20} = R_{20}$

国际标准化组织 ISO (R565-1972) 筛系标准

主系筛序公比数 =  $10^{3/20} = R_{20/3}$

副系 I 筛序公比数 =  $10^{1/20} = R_{20}$

副系 II 筛序公比数 =  $10^{3/40} = R_{40/3}$