

# 高性能耐火材料用板状刚玉概述

刘新彧

安迈铝业（青岛）有限公司，青岛，中国

**Dr. Gunter Büchel,**

Almatis GmbH, Frankfurt, Germany

**Dr. Andreas Buhr,**

Almatis GmbH, Frankfurt, Germany

## 1. 引言

七十多年来，板状刚玉广泛应用于钢铁、铸造、石油化工、陶瓷等领域的高性能耐火材料中。高纯氧化铝合成的板状刚玉具有高的耐火度，优越的抗热震稳定性、抗蠕变性和抗剥落性等等。随着高温工业的不断发展和耐火材料行业的技术进步，耐火材料的比消耗在过去的几十年中有着很大的降低。但与天然原料相比，合成原料如板状刚玉的总体用量是却是相对增加的，尤其是在钢铁行业。本篇文章目的是对板状刚玉和电熔白刚玉的具体性能进行总结和对比，并且探讨板状刚玉在各种不同应用中的性能和优势。

## 2. 刚玉骨料的合成

### 2.1 板状刚玉的生产工艺

1934年，美国人托马斯 S. 柯蒂斯按照与美国铝业公司的合约在发明的专利竖窑中率先生产出世界上首批板状刚玉。生成的板状刚玉结构致密，体积密度高，结晶粗大，晶体典型尺寸为 50-400  $\mu\text{m}$ ，在二维平面下晶体呈板片状，这些晶体可以在板状刚玉颗粒断裂面上肉眼可辨。

板状刚玉的生产工艺（图 1）是从拜耳流程中生产的高纯煅烧氧化铝的细磨开始，然后是造粒过程。安迈成球的过程中没有添加任何的外加剂，如有机结合剂或者  $\text{TiO}_2$ 。造粒后的生球送进干燥室中除去水分，然后提升至立窑的顶部（转换器）。干燥之后的生球在温度为 1800-1900  $^{\circ}\text{C}$  的高温竖窑中连续烧结成板状刚玉。天然气和空气的混合气体作为高温竖窑的燃料。

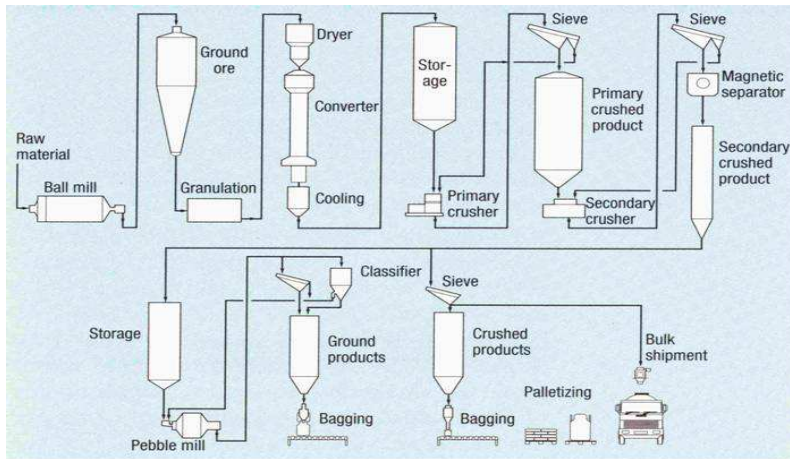


图 1: 烧结合成板状刚玉的生产流程

原料细磨好坏对生球的成型非常重要，细磨好的原料造粒后生球应具有足够的强度，可避免装卸和运输过程中可能产生的破损。成球过程非常关键，将影响烧结过程中氧化铝晶体的发育和致密化。平衡天然气和空气的比例（温度）和控制氧化铝生球的喂料量，可获得发育充分的板状刚玉结构。

烧结合成板状刚玉的熟料球经冷却、破碎，筛分成各种不同粒径尺寸的产品（段砂和研磨粉）<sup>[1]</sup>粒度的品种经过高强磁分离机除铁。在以陶瓷为介质的球磨机中研磨出小于 0.3mm 的板状刚玉各种细粉。

## 2.2 板状刚玉的性能

板状刚玉烧结均匀致密，熔点达 2050 °C，主要的化学杂质是从拜耳氧化铝中带来的氧化钠和各种破碎工艺中带来的金属铁屑。由于连续的烧结工艺，原料中氧化钠均匀地分布在产品范围之内。破碎后的产品通过多级磁选有效地除去产品中的金属铁屑。

安迈生产的板状刚玉没有添加任何的外加剂，普通的外加剂如有机结合剂能促进成球工艺中球的成型、TiO<sub>2</sub> 能够降低板状刚玉形成的烧结温度，但是这些外加剂也能影响板状刚玉的性能，例如晶体结构的均一、开气孔率和高温性能。文献<sup>[2]</sup>报道添加 TiO<sub>2</sub> 能使板状刚玉的致密化，但是当采用普通拜耳氧化铝(Na<sub>2</sub>O 含量为 0.4-0.5%) 时，在 1350 °C 就开始出现液相烧结。

烧结板状刚玉的基本物理性能包括体积密度，显气孔率和吸水率(表 1)。在反光的条件下，烧结良好的板状刚玉能够容易用肉眼观察到  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  晶体。通过肉眼对断裂面的观察，可根据晶体的形貌判定板状刚玉的烧结状况。板状刚玉结含有大的刚玉晶体和用肉眼观察不到开口气孔，显微结构中显气孔率较低，典型值仅为 2.9%。而电熔刚玉的显气孔率较高，大于 8%。

表 1. 板状刚玉和电熔刚玉的典型物理指标

| Chemical Analysis             |                 | T60/T64<br>typical | WFA<br>typical |
|-------------------------------|-----------------|--------------------|----------------|
| $\text{Al}_2\text{O}_3^{(*)}$ | %               | 99.5               | 99.36          |
| $\text{Na}_2\text{O}$         | %               | 0.36               | 0.35 (**)      |
| $\text{SiO}_2$                | %               | 0.02               | 0.10           |
| $\text{Fe}_{\text{mag}}$      | %               | 0.003              | n.d.           |
| $\text{Fe}_2\text{O}_3$       | %               | n.d.               | 0.1            |
| <b>Physical Properties</b>    |                 |                    |                |
| <b>Bulk Density</b>           | $\text{g/cm}^3$ | 3.55               | 3.51 (**)      |
| <b>Apparent Porosity</b>      | %               | 3.0                | 8.8 (**)       |
| <b>Water Absorption</b>       | %               | 0.5                | 3.0 (**)       |

(\*) 差分法，(\*\*) 较高的批次之间的波动

板状刚玉显微照片如图 2a 所示，可见气孔较小，有封闭的也有贯通的，气孔较均匀分布在整个微观结构中，这样的结构使得板状刚玉吸水率很低。电熔刚玉中可见大的气孔，且气孔有聚集现象，显微结构不均一（图 2b）。图 3 中可见板状刚玉的板片状结构（二维）， $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  晶体内含有大量直径小于  $10\ \mu\text{m}$  的封闭气孔。

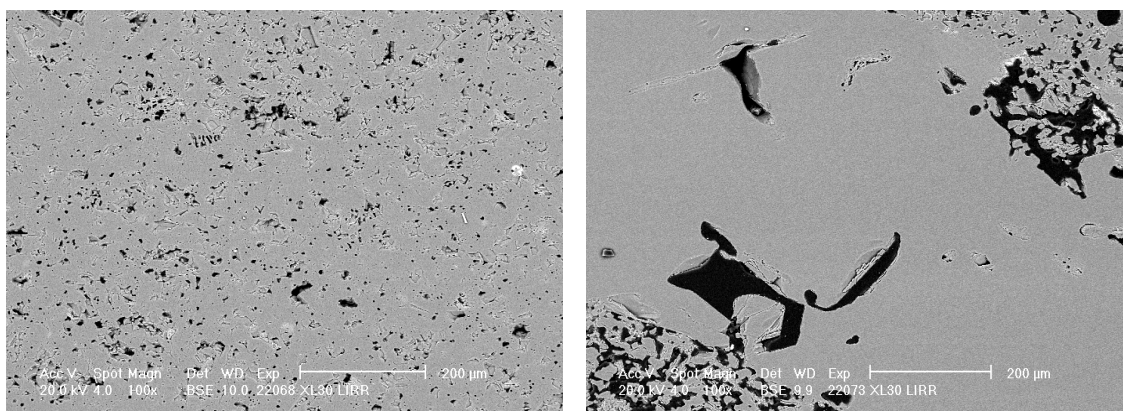


图 2 板状刚玉 (a, 左) 和电熔刚玉 (b, 右) 的显微结构

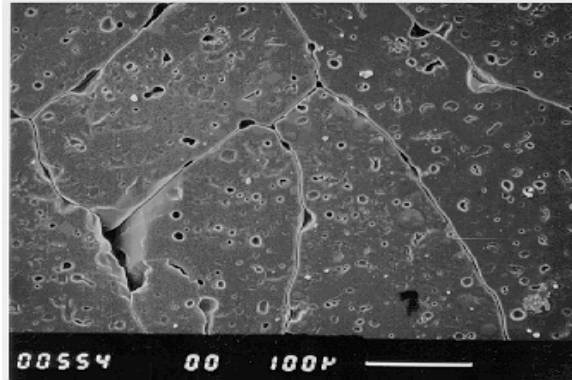


图3 板状刚玉的显微结构

板状刚玉的煅烧过程中，欠烧和过烧的板状刚玉中将出现大量的开口气孔，这些气孔均能使板状刚玉和最终耐火制品的体积密度降低、吸水量增大，因此在生产中要严格控制产品的烧成工艺。过量开口气孔同样也造成了颗粒强度和高温体积稳定性的巨大差异，欠烧的板状刚玉颗粒体积稳定性较差，用到烧成的耐火制品中收缩严重，因此板状刚玉中气孔率较高的结构缺陷直接削弱了耐火材料在使用中的抗侵蚀和渗透性能。加入添加剂的辅助烧结法有助于提高材料的体积密度，但是除了较差的机械性能外，材料中晶体生长受到限制从而降低了材料的抗热震性能和抗侵蚀性能<sup>[1]</sup>。

板状刚玉有较好的抗热剥落性能源于一定数量的封闭气孔（图4）。球形的封闭气孔有效的抵抗了热冲击，阻止了裂纹的扩散。可避免裂纹在整个晶体颗粒中扩散。最终的单晶颗粒和耐火浇注料或热震后的耐火砖制品都有高的耐压强度。与板状刚玉相比，电熔刚玉和棕刚玉的热震稳定性较差。

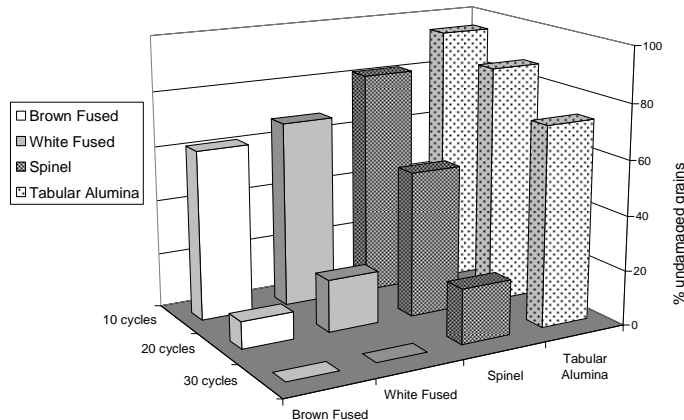


图 4 板状刚玉、电熔刚玉和其他耐火骨料的抗热震性

### 2.3 安迈全球板状刚玉产品

安迈是全球优质氧化铝原料的供应商，在越来越全球化的商业环境中，安迈为耐火材料行业的全球化提供支持并不断改进以促进这一进程。

板状刚玉 T60/T64 是其中的产品之一。过去，除了北美之外所有的国家都以 T60 命名板状刚玉，而在北美市场称为板状刚玉 T64。因此，全球统一后的产品就称为板状刚玉 T60/T64。

从 2001 后，全球提供 14 种标准粒度的产品（表 2），另外可按照客户要求，提供特殊粒度的产品。同时在 2001 年统一了产品的规格如化学成分和物理指标等。

表 2 全球板状刚玉产品的粒度（括号里的数字是泰勒目筛）

|       |                         |
|-------|-------------------------|
| 连续粒度砂 | T60/T64 0-3MM(-6)       |
|       | T60/T64 0-1MM(-14)      |
|       | T60/T64 0-0.5MM(-28)    |
|       | T60/T64 0-0.3MM(-48)    |
|       | T60/T64 0-0.2MM(-65)    |
|       | T60/T64 -45MY(-325) LI  |
|       | T60/T64 -45MY(-325) STD |
|       | T60/T64 -20MY           |
| 段砂    | T60/T64 3-6MM(3-6)      |

|                          |
|--------------------------|
| T60/T64 2-5MM(1/4"-8)    |
| T60/T64 1-3MM(6-14)      |
| T60/T64 1-2MM(8-14)      |
| T60/T64 0.5-1MM(14-28)   |
| T60/T64 0.2-0.6MM(28-48) |

粒径分布用毫米和泰勒目筛来表征，采用标准的泰勒目筛进行生产。同时，全球的板状刚玉产品采取同样的测试方法并提供统一的分析证书（COA）。

全球五个工厂生产相同规格的板状刚玉 T60/T64，包括荷兰鹿特丹、德国路德维希、美国利兹戴尔、印度法尔特、中国青岛。

在全球化市场的今天，统一的板状刚玉指标体现出应有的价值。统一的产品粒度分布，使得一个公司在全球的工厂可就地采购板状刚玉而无需调整配方，客户的进行技术转移也变得相当容易。最终为客户的生产减少了资源和时间的浪费，甚至可能避免额外的测试和鉴定。

T60 是在日本岩国生产的板状刚玉，与标准的 T60/T64 相比含有较低的氧化钠含量 (最大值 0.2% 对 0.4%) 和较高的体积密度 (典型值 3.7 对 3.55 g/cm<sup>3</sup>)。虽然大部分产品的粒度分布与全球 T60/T64 产品类似，但与全球的产品并不完全一致。

## 2.4 电熔刚玉的生产工艺

电熔刚玉首次生产是在 19 世纪。以工业氧化铝为原料在 Higgins 电炉中熔融后冷却而成<sup>[4]</sup>。根据原料中的杂质的不同类型，电熔刚玉可以分为棕刚玉、白刚玉、亚白刚玉、红宝石和黑刚玉。

电熔刚玉(WFA)是以拜耳氧化铝为原料熔融生成。电熔刚玉熔融之后，熔融块冷却过程中，氧化钠会迁移到熔块的上部生成  $\beta\text{-Al}_2\text{O}_3$  ( $\text{Na}_2\text{O}\cdot 11\text{Al}_2\text{O}_3$ )。由于熔块本身冷却速度的不同，电熔白刚玉块的内部和外部的性能具有明显的差异。除了氧化钠含量不同外，晶体尺寸和开口气孔在不同的区域也有所不同。冷却后把刚玉块破碎成小于 40mm 的小块。把低纯、晶体尺寸较小的电熔白刚玉从高质量的那部分分离出来，精心挑选出不同级别的白刚玉。挑选出来的刚玉块料经过破碎，随后筛分后并通过磁选机除铁。

## 2.5 电熔刚玉的性能

根据原料的纯度和电熔刚玉熔块的挑选，可生产出不同级别的电熔刚玉产品。电熔刚玉熔块的外部由于冷却过快导致生成比较小的刚玉晶体，而在内部冷却过慢导致晶体发育良好，可形成尺寸较大的单晶。这些晶体通常在破碎的过程中产生微裂纹，降低单晶的耐压强度。

电熔刚玉性能的影响最主要因素来自于杂质  $\text{Na}_2\text{O}$ 。虽然电熔刚玉中的  $\text{Na}_2\text{O}$  含量与板状刚玉的含量相近，但是由于电熔刚玉间歇的生产工艺，电熔刚玉熔块中  $\text{Na}_2\text{O}$  没有像板状刚玉中的那样均匀的分布，有的区域含量低，而有的区域含量又高。电熔刚玉中  $\text{Na}_2\text{O}$  的含量可在 0.07 % 到 4.0 % 之间变化<sup>[4]</sup>。因此电熔刚玉在破碎熔块时严格要求捡选，大块料中通过除去顶部中央部分来降低  $\text{Na}_2\text{O}$  含量。

与电熔白刚玉相比，用连续烧成工艺生产的板状刚玉产品中  $\text{Na}_2\text{O}$  含量水平很稳定，板状刚玉不需要捡选。

刚玉中  $\text{Na}_2\text{O}$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  反应生成  $\beta\text{-Al}_2\text{O}_3$  ( $\text{Na}_2\text{O}\cdot 11\text{Al}_2\text{O}_3$ )。与  $\alpha$ -刚玉相比， $\beta\text{-Al}_2\text{O}_3$  的莫氏硬度要低很多(6.5-7 对 9)。接下来的破碎和筛分中，低硬度的  $\beta\text{-Al}_2\text{O}_3$  更容易被破碎成较小的颗粒，这样细颗粒和研磨粉中  $\text{Na}_2\text{O}$  含量明显高于大颗粒。在一些粒径小于 45  $\mu\text{m}$  电熔刚玉颗粒中，含有大量可溶的  $\text{Na}_2\text{O}$ ，可严重影响浇注料的施工性和耐火性能。有人曾报道<sup>[4]</sup>：刚玉中  $\text{Na}_2\text{O}$  的含量在粗颗粒(> 14 目)中是 0.31%变化，细粉(< 120 目)中为 1.08%。

众所周知，可溶的  $\text{Na}_2\text{O}$  影响低水泥浇注料的流动性，这点在下面的实验中得到了证实。表 3 显示是两种刚玉浇注料的对比情况，两个配方中的不同之处就是一个加了 7%的-20 $\mu\text{m}$ 的板状刚玉，而另外的一个是加了 7%的-20 $\mu\text{m}$ 的电熔刚玉。为了得到相当的流动性，加电熔刚玉的配方需水量为 5.5%，而加板状刚玉的配方需水量只有 4.7%。

表 3: 板状刚玉和电熔白刚玉浇注料对比

| 组成            |      | 浇注料类型 |    | 自流浇注料<br>(板状刚玉-20 $\mu\text{m}$ ) | 自流浇注料<br>(电熔刚玉-20 $\mu\text{m}$ ) |
|---------------|------|-------|----|-----------------------------------|-----------------------------------|
|               |      |       |    |                                   |                                   |
| 粗颗粒 (0.5-6mm) | 板状刚玉 | %     | 51 | 51                                |                                   |
| 细粉 (0-0.5 mm) |      | %     | 27 | 27                                |                                   |

|       |               |    |     |     |
|-------|---------------|----|-----|-----|
| 基质细粉  | 板状刚玉 (-20 mμ) | %  | 7   | -   |
|       | 电熔刚玉 (-20 mμ) | %  | -   | 7   |
| 活性氧化铝 | CL370         | %  | 10  | 10  |
| 水泥    | CA-14 M       | %  | 5   | 5   |
| 分散氧化铝 | ADS 3 / ADW 1 | %  | 1   | 1   |
| 水     |               | %  | 4.7 | 5.5 |
| 自流值   | F10           | mm | 259 | 260 |
|       | F30           | mm | 268 | 266 |
|       | F60           | mm | 253 | 256 |

图 2b 显示电熔白刚玉的显微结构。电熔白刚玉比板状刚玉的显气孔率高（见图 2b 的显微结构），并且主要是有较大的、相互贯通的、尺寸可达到 1mm 甚至更大的宏观气孔。而板状刚玉在造粒和烧结的过程中可形成了球状的封闭气孔（图 2a）。这种差异导致电熔白刚玉的开口气孔是板状刚玉的三倍。中国和日本开发和应用致密电熔刚玉，这种刚玉是在拜耳氧化铝原料中添加了少量的还原外加剂生产得到的，体积密度可高达 3.90 g/cm<sup>3</sup>，但是致密刚玉中缺少封闭气孔导致材料的抗热震性能差。

图 5 中为板状刚玉和电熔白刚玉的外观形貌。板状刚玉连续的生产工艺可确保性能的稳定。图 5a 中显示板状刚玉的粗颗粒外表面，球或半球颗粒的内外结构致密。而图 5b 是电熔白刚玉的大颗粒，不同的晶粒尺寸和高的开口气孔甚至用肉眼都能很容易的辨别。



图 5: 板状刚玉 (a, 左) 和电熔白刚玉 (b, 右) 的外观形貌

### 3. 板状刚玉和电熔刚玉的应用

板状刚玉和电熔刚玉作为耐火骨料其主要的市场在于耐火材料。这些骨料可以和尖晶石，煅烧和活性氧化铝以及结合剂如水泥，粘土或者树脂复合使用。整个板状刚玉和白刚玉的全球消耗量估计在 620000 吨，按地区来看，欧洲约为 220000 吨，美国是 140000 吨，亚洲是 270000 吨。高纯氧化铝耐火原料的应用主要是钢铁工业，铸造，电解铝，化工和陶瓷。大约 65%~70% 的耐火材料用于钢铁行业的耐火砖和浇注料。钢铁冶炼技术和工艺的持续的进步要求高性能的耐火材料，即要求减小吨钢耐火材料的消耗，从而要求更多的使用人工合成的氧化铝原料<sup>[5]</sup>。据估计，板状刚玉和电熔刚玉的 80% 消耗在钢铁行业中。

板状刚玉的主要优点在于高温性能优良，化学稳定性好，热震稳定性高，耐磨损和性能稳定。板状刚玉性能可靠稳定，避免了因耐火骨料的质量偏差而造成性能的波动。相比板状刚玉，电熔白刚玉作为原料对耐火材料来讲可能更敏感些，有些产品的配方调整 and 性能试验必须进行。研究表明为了达到同样的 20cm 振动流动值，仅仅用电熔白刚玉取代同一种粒度的板状刚玉，浇注料的加水量由原来的 8.3% 增加到 10%<sup>[7]</sup>。2% 的加水量将会带来浇注料 6% 的开口气孔率，严重降低了材料的抗渗透性和高温强度。

#### 3.1 滑板

板状刚玉作为高性能原料首先成功应用于滑板，产品的热震稳定性和耐磨性能得到了明显的改善。板状刚玉已作为通用原料在世界范围内用于滑板生产。很多学者已论述了滑板耐火材料的发展<sup>[8-12]</sup>。通常通过采用刚玉 - 莫来石基原料（20—90%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ）来改善材料的性能，减少二氧化硅的含量并添加石墨，采用碳结合。莫来石改善了材料的热震稳定性，但是其二氧化硅削弱了材料的抗侵蚀性。这对于钙处理钢，高锰钢和高氧钢是不利的。通过添加  $\text{ZrO}_2$  以取代  $\text{SiO}_2$ ，滑板表现出优异的热震稳定性和抗侵蚀性。滑板的吨钢消耗一般在 0.05kg 左右。

#### 3.2 钢包包壁包底浇注料

洁净钢和连铸技术的诉求要求钢包进行多种冶炼工艺。Bannenber<sup>[13]</sup>进行了详细的论述。由于钢水开浇温度提高，如接近 1750 度，钢水在钢包中停留更长的时间，搅拌，加热，以及不同的渣的侵蚀，比如脱硫过程，钢包冶金不断发展使得钢包用耐火材料的工作环境更加苛刻<sup>[14]</sup>。

如今，钢包内衬的标准材料是碱性砖（镁碳砖或白云石砖），铝镁碳砖和高铝质浇注料（板状刚玉，电熔刚玉，尖晶石或原位尖晶石体系）。这些材料或者单独使用或者复合使用以适应不同的工作环境。例如，氧化铝—尖晶石浇注料用于包底和包壁，镁碳砖用于渣线。由于不同的冶金工艺，工作条件，以及不同的耐火材料使用观念，不同地区和不同工厂的钢包耐火材料的选用也各不相同。钢包耐火材料的消耗在钢铁冶金中占据整个耐火材料消耗的 25%，其单位消耗在 1—4kg 每吨钢<sup>[6]</sup>。

### 3.3 预制件

预制件主要用于钢包。预制件通常是作为如下功能材料使用，如透气砖，喷枪，座砖，水口，冲击板和钢包包底组件。在连铸中间包，预制件用来制备挡渣堰来控制钢水（渣）流动。这些耐火产品不仅是耐火衬里的一部分，而且对于冶金工艺的高效实施非常重要。高的钢包温度如 1750 度要求耐火材料必须基于人工合成的高纯原料如板状刚玉和尖晶石。尖晶石和板状的复合使用，可更加有效地提升耐火材料的热力学性能，耐磨和耐侵蚀性<sup>[5]</sup>。富铝尖晶石 AR78 和 AR90 可以用于氧化铝基耐火材料。前者主要用于细粉（基质），后者用做骨料。电炉三角区通常采用大的预制件。所有的预制件在炼钢过程中的单位消耗大约是 0.15—0.25kg/吨钢。

### 3.4 高纯刚玉砖

高纯刚玉砖广泛的用于耐火衬里，如石油裂解装置，煤气化炉，碳黑炉，纸浆废液气化炉和其它工业窑炉。这是因为刚玉砖有着优异的性能，如抗化学侵蚀性，耐磨性和热机械性能如高温强度，荷重软化温度和抗蠕变性，在含有侵蚀性气体和液体的高压环境下尤为如此。

高纯刚玉砖的主要骨料是合成氧化铝基产品如电熔白刚玉和板状刚玉。这是由于他们具有低的杂质含量（如 SiO<sub>2</sub>），高体积密度和热力学性能。这些性能满足了气化炉和其它窑炉在使用的过程中所要求的热化学和结构侵蚀性能<sup>[15]</sup>。

电熔刚玉和板状刚玉不同的生产工艺（电熔与烧结）使得两种原料性能各异。同时也使得其制备的刚玉砖性能不同。板状刚玉在钢铁冶金中被广泛的用于滑板，Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgO-C 砖，浇注料和预制品。多年以来，电熔刚玉一直作为高纯刚玉砖的骨料用于非钢铁行业如气化炉和其它工业窑炉。通常认为电熔刚玉骨料有更高的体积密度，从而可以增加烧成转砖的密度和抗侵蚀性，从而改善产品的性能。然而在一个较为详尽的研究中得到的结论却是相反的。

这一试验是围绕 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量大于 99% 的烧成刚玉砖进行的，采用板状刚玉和电熔刚玉为主要原料。对比板状刚玉，电熔刚玉的 SiO<sub>2</sub> 含量高出 0.1%，钠含量有明显波动。电熔刚玉的显气孔率高达 8.8%，气孔通常以单体或者团聚形式存在。对于不同比例的电熔刚玉和板状刚玉砖，测试了线变化，体积密度和显气孔率，常温和高温强度以及渣侵试验。渣侵试验用的是煤气化炉渣和石油裂解炉渣。

基质细粉和骨料采用安迈板状刚玉和中国产商品电熔白刚玉。在基质部分，添加煅烧氧化铝（CT800FG）。亚硫酸纸浆废液作为刚玉砖制备的暂时性结合剂。5 个配方如表 4 所示。配方代号分别为 T100，T75，T50，T25 和 T0，这里的数字代表板状刚玉的含量。表 4 给出了板状刚玉的含量（黑体标出）。

表 4 试验刚玉砖配方

|                               | <b>T100</b> | <b>T75</b>       | <b>T50</b>  | <b>T25</b> | <b>T0</b> |
|-------------------------------|-------------|------------------|-------------|------------|-----------|
| 骨料，% (板状刚玉或白刚玉)               |             |                  |             |            |           |
| 1-3mm                         | <b>42</b>   | <b>19.5+22.5</b> | 42          | 42         | 40        |
| 0.5-1mm                       | <b>15</b>   | <b>15</b>        | <b>12+3</b> | 15         | 15        |
| 0-0.5mm                       | <b>10</b>   | <b>10</b>        | <b>10</b>   | 10         | 10        |
| 细粉，% (板状刚玉 -325 目或白刚玉 -240 目) | <b>23</b>   | <b>23</b>        | <b>23</b>   | <b>23</b>  | 25        |
| 煅烧氧化铝 CT800FG，%               | 10          | 10               | 10          | 10         | 10        |

|           |     |    |    |    |    |
|-----------|-----|----|----|----|----|
| 纸浆废液, %   | +3  | +3 | +3 | +3 | +3 |
| 板状刚玉含量, % | 100 | 75 | 50 | 25 | 0  |

板状刚玉和白刚玉砖的实验结果表明板状刚玉可以改善刚玉砖的性能，尤其是综合性能得到提升。主要结果如下：

- 含有板状刚玉的烧成砖的烧结活性更好。同样的烧成温度下，砖的体积密度高，显气孔率低（见图 6）。
- 板状刚玉砖有着优异的常温抗压和常温抗折强度，高温抗折强度（1500 度）最高（见图 7）。
- 板状刚玉砖的耐磨性能更好。
- 抗石油裂解炉和煤气化炉炉渣的侵蚀，板状刚玉砖优于电熔白刚玉砖。
- 板状刚玉和电熔白刚玉骨料的混合使用可以改善刚玉砖的热震稳定性能。
- 纯板状刚玉砖和电熔白刚玉砖在抗蠕变性方面比混合配方更好。

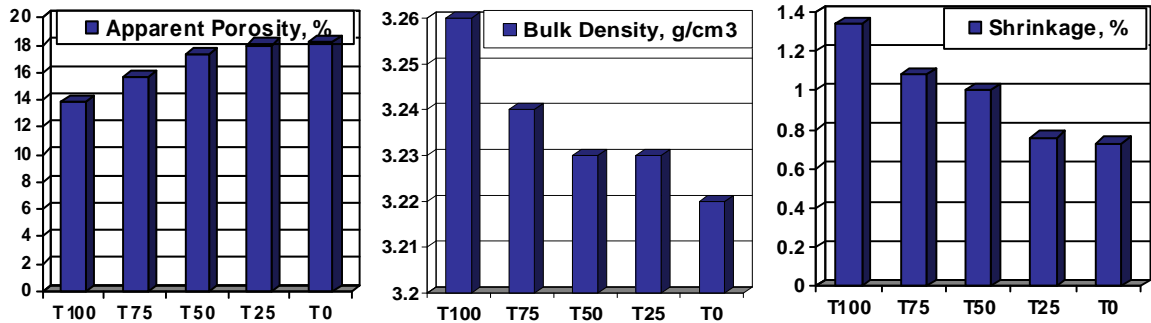


图 6: 刚玉砖的显气孔率，体积密度和线变化

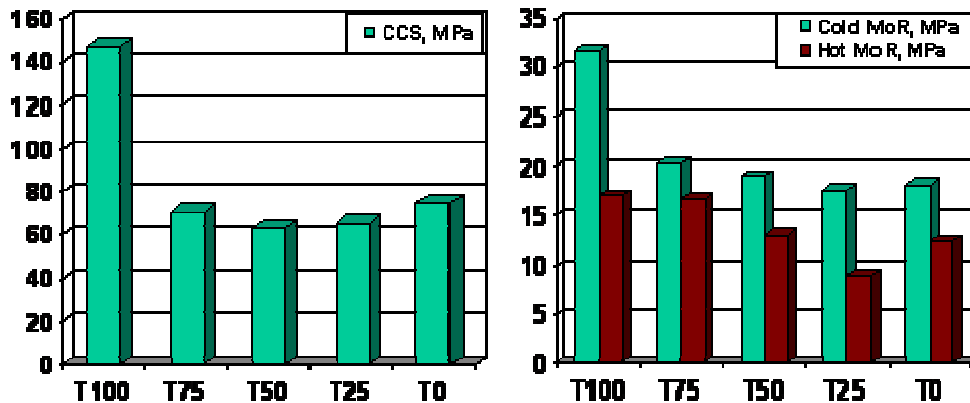


图 7 烧成刚玉砖的常温和高温强度

### 3.5 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgO-C 砖和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-C 砖

相比铝矾土，棕刚玉，或者红柱石，人工合成氧化铝原料如板状刚玉和富铝尖晶石有着更高的化学纯度 (>99.4% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, >99% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+MgO)。人工合成的耐火原料使得耐火衬里更长寿，热力学更稳定，对于洁净钢更有利。Corus Ijmuiden 的研究表明：尖晶石砖的 SiO<sub>2</sub> 含量由 0.1% 增加到 1%，寿命会降低 60%<sup>[17]</sup>。

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgO-C 砖含有氧化铝骨料，板状刚玉颗粒以及细粉，煅烧氧化铝粉，镁砂和碳（石墨或者树脂结合物）。在使用过程中，由于尖晶石的形成，AMC 砖在热面产生膨胀，可以减小砖缝结合处的磨损。板状刚玉骨料具有高耐火度，高热震稳定性和抗侵蚀性能。通常，AMC 砖还有 50~85% 的粗颗粒的高铝骨料，2~35% 的烧结镁砂，5~15% 的石墨，和 2~3.5% 的树脂结合剂。由于在砖的热面，氧化铝细粉和氧化镁细粉连续的形成尖晶石产生膨胀，并且由于碳的存在，渣的润湿性降低，因此材料的抗渣侵蚀性能得到很大的改进。

图 8 是由不同原料的生产的 AMC 砖的抗渣性能。试验是在感应炉内进行，侵蚀介质是钙硅渣。渣的钙硅比 (CaO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 为 1，SiO<sub>2</sub> 为 1.5%，5%MgO，3% FeO，4%MnO，6%CaF。用 15kg ST52 号钢和 1kg 渣。测试在 1650 度下保温 3 小时，每隔 1 小时补加一次渣。可见不论 MgO 加入量是高是低，以板状刚玉为主要原料的 AMC 砖的侵蚀速率最小。MgO 越高，侵蚀速率越小，但同时砖的永久线

变化显著增加，过多的 MgO 含量在实际应用中是不可行的。合适的骨料和 MgO 加入量是优化 AMC 砖性能的关键之一。

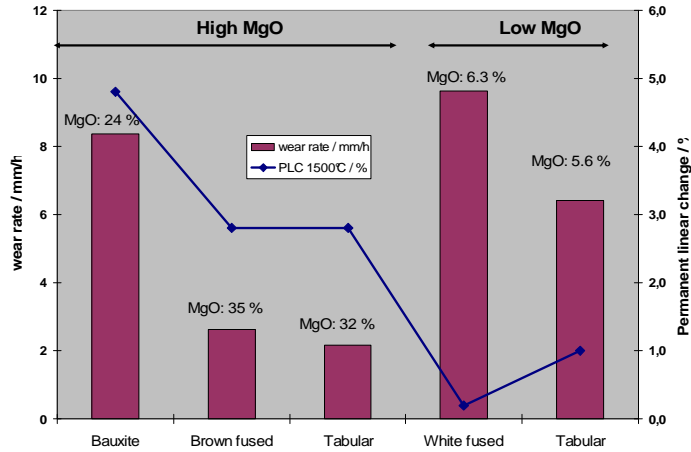


图 8: AMC 砖的抗侵蚀性

AMC 砖已经成为钢包包底和包壁常用的衬里材料。基于板状刚玉的 AMC 砖的良好性能，使其更适用于苛刻的工作环境如包底冲击区和大型钢包。

#### 4. 总结

板状刚玉是一种优异的合成耐火原料。耐火度高，硬度大，热震稳定性好，抗侵蚀性和耐磨性能好，性能稳定。生产工艺的独特设计和严格的质控是确保上述性能的首要条件。

安迈分布于三大洲的工厂提供统一标准指标的板状刚玉 T60/T64。这种统一的标准给耐火材料生产厂尤其是跨国企业带来方便，可就地采购原料而无需进行原料的重新认证。板状刚玉越来越广泛的应用于滑板，透气砖，钢包衬，浇注料，预制件或烧成砖。

板状刚玉是 70 年前开始商业化生产的，现在已经发展成为一个重要的和大量使用的耐火原料应用在钢铁和其它工业领域。由于终端客户尤其是钢铁工业的技术发展，耐火材料的使用环境越来越苛刻。与天然原料相比，高纯合成原料的地位越来越重要，在市场已趋于成熟的西方发达国家更是如此。产品品种的多样化，指标和质量控制的优化是合成原料今后的发展方向。

#### 参考文献

- <sup>1</sup> G. MacZura in L.D. Hart (ed), E .Lense, Alumina Chemicals Science and Technology Handbook, 1990, American Chemical Society, ISBN 0-916094-33-2. 109-170
- <sup>1</sup> T. Ikegami, K. Kotani, and Eguchi, J. Am. Ceram. Soc.70 [12] (1987) 858-90
- <sup>1</sup> P.E.D. Morgan and M.S. Koutsoutis, J. Am. Ceram. Soc., 68 [6] (1985) C-156-C158
- <sup>1</sup> P. Chichy in L.D. Hart (ed), E .Lense, Alumina Chemicals Science and Technology Handbook (1990) American Chemical Society, ISBN 0-916094-33-2. 393-426
- <sup>1</sup> Industrial Minerals Raw Materials Survey, Tabular & calcined aluminas – positive performance, 1998, 51-60
- <sup>6</sup> A. Buhr: Refractories for Steel Secondary Metallurgy, CN-Refractories, Vol. 6 (1999), No. 3, 19-30
- <sup>7</sup> F. Cantelaube, Alcan Specialty Aluminas, France, T. Tonnessen, RTWH, Germany oral presentation at UNITECR 2005, Orlando, Florida
- <sup>8</sup> X.C. Zhong, Refractory Developments... UNITECR Proc. Vol. 1, Kyoto (1995), 75-85
- <sup>9</sup> N. Nameischi, B. Nagei, T. Matsumura, Taikabutsu Overseas, Vol. 12 (1992), No. 2, 40-50
- <sup>10</sup> S. Kataoka, UNITECR, Proc. Vol. 1, Kyoto (1995), 1-27
- <sup>11</sup> S. Asano, UNITECR,Proc., São Paulo (1993) 69-94
- <sup>12</sup> D. Anderson, D. Taylor, I.V. Cameron, UNITECR Proc. Vol.3 (1997), 1385-1393
- <sup>13</sup> N. Bannenberg, Unitecr Proc. Vol. 1, (1995) 36-852
- <sup>14</sup> N. Bannenberg, A. Buhr, Stahl und Eisen 118, No.10 (1998) 83-87
- <sup>15</sup> R.C. Johnson, M.S. Crowley, UNITECR Proc., (2005), 949-953
- <sup>16</sup> X. Liu, X. Yanqing, G. KeminG, A. Buhr, G. Büchel, Proceedings of the 5th International Symposium on Refractories, 315-319 (Chinese), 344-348 (English) (2007)
- <sup>17</sup> M.C. Franken, R. Siebring, T.W.M de Wit, . UNITECR Proc., Vol. 1, (2001) 128-138