

烧结刚玉多元化发展模式的探索

赵义^{1,2)} 顾华志³⁾ 赵雷³⁾ 黄凯^{1,2)} 方义能²⁾

宋雅楠^{1,2)} 叶林^{1,2)} 汪贤^{1,2)}

1) 浙江自立氧化铝材料科技有限公司 浙江上虞 312300

2) 浙江自立股份有限公司 浙江上虞 312300

3) 武汉科技大学 省部共建耐火材料与冶金国家重点实验室 湖北武汉 430081

摘要：本文先是整体上分析了目前烧结刚玉的发展状况和技术优势，显示出国内烧结刚玉生产技术在最近几年取得较大的进步，从而探索试着向多元化和多样化烧结刚玉品种的模式发展，分别介绍了微孔烧结刚玉、致密烧结刚玉、轻质刚玉和特种烧结刚玉等多品种刚玉的技术特点和产品性能。此多元化的发展模式拓展了烧结刚玉的使用范围和领域，可以使得烧结刚玉的性能指标优势等得到充分的发挥和应用。

关键词：烧结板状刚玉 微孔烧结刚玉 致密烧结刚玉 轻质烧结刚玉 特种烧结刚玉

前言

随着钢铁冶炼对耐火材料的适应性要求提高，及钢铁企业耐火材料吨钢计价的采购模式普及，及节约化社会发展得要求，耐火材料企业对高档原料的需求日趋增加。刚玉类原料作为氧化铝基高档耐火材料的主要原料，体现出其使用优势越来越多，使用范围也越来越广泛，而刚玉质耐火材料的推进也是由于各种刚玉质耐火原料的不断发展和改进。在最近 10 年我国国内刚玉耐火原料的发展，无论是在技术还是在产量上面都得到了突飞猛进的提高，尤其以烧结刚玉最为明显。

虽然烧结刚玉在使用中体现出较大的优点，但是目前国内的烧结刚玉品质单一，大部分都是普通的烧结板状刚玉，体密一般也是在 $3.50\text{-}3.60\text{g/cm}^3$ 之间，并没有根据不同的使用环境和要求进行区分不同的烧结刚玉品种。因此，本文主要是探索了不同种类的烧结刚玉的特殊性能和使用特性，为烧结刚玉未来多元化发展提供一种可能。

1 烧结刚玉与电熔刚玉的比较

目前市场上存在的刚玉原料主要分为烧结刚玉与电熔刚玉两大品种，电熔刚玉在国内发展较早，生产技术比较成熟，而烧结刚玉起步较晚，仅仅最近 10 年

发展加快。然后这两种刚玉原料无论是从生产工艺还是性能指标上都存在较大的差异，因此分辨出其之间的异同有利于更好利用不同刚玉的特点。

1.1 生产工艺的不同

由于电熔刚玉可以分为电熔白刚玉和电熔棕刚玉，但是这里主要是阐述电熔白刚玉。电熔白刚玉和烧结刚玉都是以工业氧化铝为主要原料，分别以电熔法和高温烧结法制备出来的刚玉产品，因此其生产工艺和原理是完全不一致的。

(1) 电熔白刚玉的生产工艺

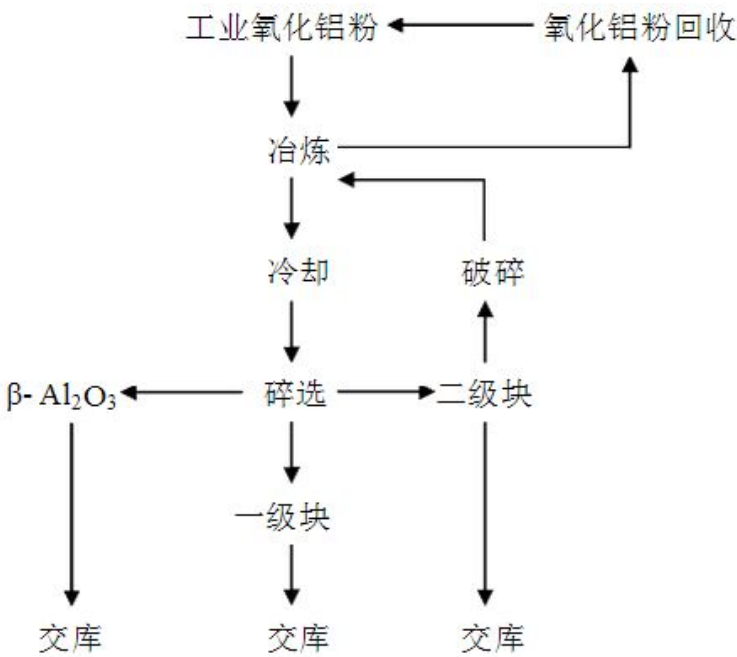


图1 电熔白刚玉的工艺流程

图 1 为电熔白刚玉的基本生产工艺流程，工业氧化铝在电弧炉中熔融后冷却再结晶而成的白色熔块的过程，其电熔温度高达 2000 度以上。电熔白刚玉的冶炼不存在还原过程，电熔处理虽有一定净化提纯作用，但还不能将其完全排除。其中 Na_2O 与 Al_2O_3 在熔融状态中生成 $\beta\text{-Al}_2\text{O}_3$ ($\text{Na}_2\text{O}\cdot 11\text{Al}_2\text{O}_3$)，生成量随着 Na_2O 含量的增加而增大。由于 $\beta\text{-Al}_2\text{O}_3$ 的熔点低，密度小，因此熔块冷却结晶时，偏析于熔块的上中部，虽然通过碎选可以剔除，但仍会有少量留在刚玉熔体中，严重影响白刚玉熔块的耐火性能。因此为了减少 Na_2O 的含量和危害，在冶炼的过程中会加入少量的氟化铝，可以促进 Na_2O 的高温挥发，但是同时也会产生少量的有害的氟化物气体，对空气和人体产生危害^[1]。

(2) 烧结刚玉的生产工艺

图 2 为目前烧结刚玉普遍使用的一种生产工艺流程，其工艺较电熔白刚玉复杂，但其原理不一样。烧结刚玉是利用氧化铝在竖窑中高温快速烧结快速冷却的过程来制备出来的，其烧结温度达到了 1900 度左右。烧结刚玉是在竖窑中连续

性生产，不但产量高，同时可以满足产品质量的稳定性和均一性，另外烧结刚玉在生产中不加任何外加剂，所以高温下也不会对环境产生任何影响，是一种绿色工业产品^[2]。

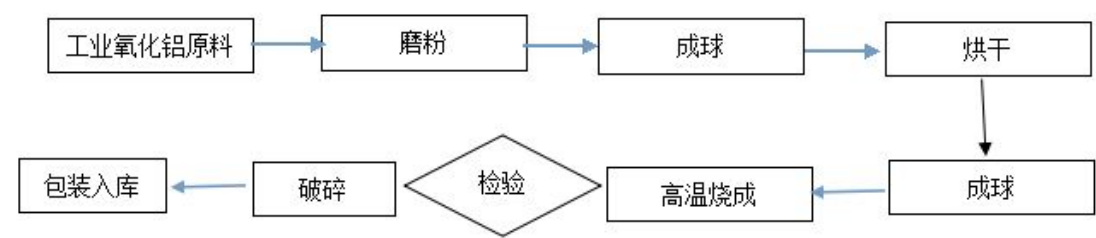


图 2 烧结刚玉的工艺流程图

1.2 性能指标的差异

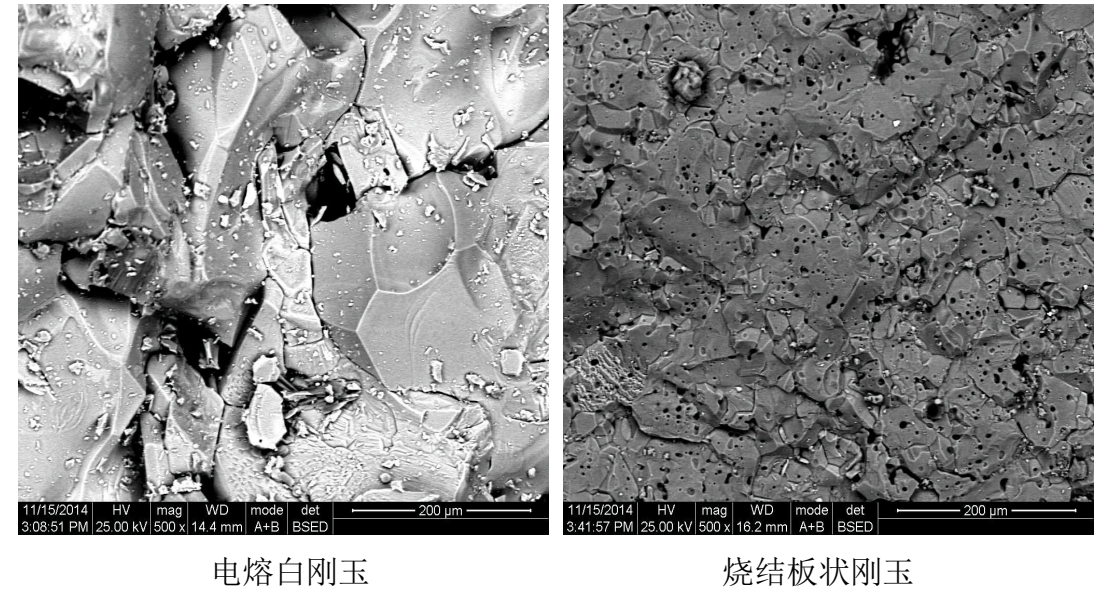
(1) 物理指标

表1 电熔白刚玉与烧结板状刚玉的物理指标

	电熔白刚玉	烧结刚玉
体积密度 g/cm ³	≥3.65	≥3.50
显气孔率 %	≤9.0	≤5
吸水率 %	≤3	≤1.5

从表 1 的物理指标可以看出，电熔白刚玉的体积密度要高于烧结板状刚玉，但是烧结板状刚玉的显气孔率和吸水率都要低于电熔白刚玉。

(2) 显微结构



电熔白刚玉

烧结板状刚玉

图3 熔白刚玉与烧结板状刚玉的显微结构

从图 3 的显微结构图中可以看出，电熔白刚玉的晶体较大，达到了 200μm 以上，而烧结板状刚玉的晶体大小一般分布在 60-120μm 之间。大的晶体结构必

然不导致晶体之间的结合不是很紧密，晶界之间的气孔较多较大，这也是电熔白刚玉体积密度高而气孔率也高的原因。烧结板状刚玉晶体较小，晶体之间的结合较为紧密，所以显气孔率低，但是烧结板状刚玉晶体内部分布有大量的微小闭气孔，其闭气孔的大小分布在 1-5 μm 之间，为其提供了较好的抗热震稳定性^[3-5]。

1.3 生产过程中耗能标准不同

可见电熔白刚玉与烧结板状刚玉无论是从生产工艺和性能指标上来说都存在一定的差异，各具有特点，因此使用的方向也不一致。但是最近几年高温耐火材料中使用烧结板状刚玉的趋势越来越明显，正是由于烧结刚玉在高温耐火材料中独特的性能优点，所以深入研究各种不同品种的烧结刚玉具有较大的意义。

2 国内烧结刚玉的发展

2.1 烧结刚玉产量的大幅度提高

最早烧结板状刚玉是 1934 年由 Thomas S. Curtis 在其发明的竖窑中烧结得到的，1935 年经中间试验后便商业化生产，用作耐火材料和陶瓷行业窑炉的内衬材料。20 世纪 50 年代，才作为大宗耐火材料骨料应用于耐火行业。这期间，美国铝业公司(现改名为安迈铝业公司)开发了一系列以低 Na_2O 工业氧化铝为原料的板状刚玉产品。

而我国接触烧结板状刚玉比较晚，在九十年代就尝试过多次，但均以失败告终。最终 1999 年，汉中秦元新材料有限公司在广泛考察研究的基础上，以洛阳耐火材料研究院和陕西冶金设计院为主，联合济南市平阴鲁耐新型材料厂的技术人员，于 2001 年修建了 1 条年产 4000 t 烧结板状刚玉生产线，于 2002 年 9 月生产出了满足用户使用要求的产品，揭开了烧结板状刚玉国产化大规模生产的序幕。2000 年以后，国内烧结板状刚玉得到了快速发展，2003 年 10 月，淄博泰贝利尔铝镁有限公司烧结板状刚玉生产线投产。2005 年，江苏扬州晶辉耐火材料有限公司开始建设烧结板状刚玉竖窑生产线；浙江自立股份有限公司在 2009—2015 年三年间，共投资建设了 5 条烧结板状刚玉生产线，目前公司烧结板状刚玉产能每年达到 9 万吨^[6]。

2014 年我国烧结刚玉总体产能大概在 25 万吨，国内需求量大概在 23 万吨，到 2015 年烧结刚玉的总产能可以达到 27 万吨。2014 年从所占市场份额来看，前三名分别是：安迈（21.7%）、自立（21.7%）、晶辉（17.4%），这三家企业占了整体市场份额的 60%多，其他企业占不到 40%，如图 4。

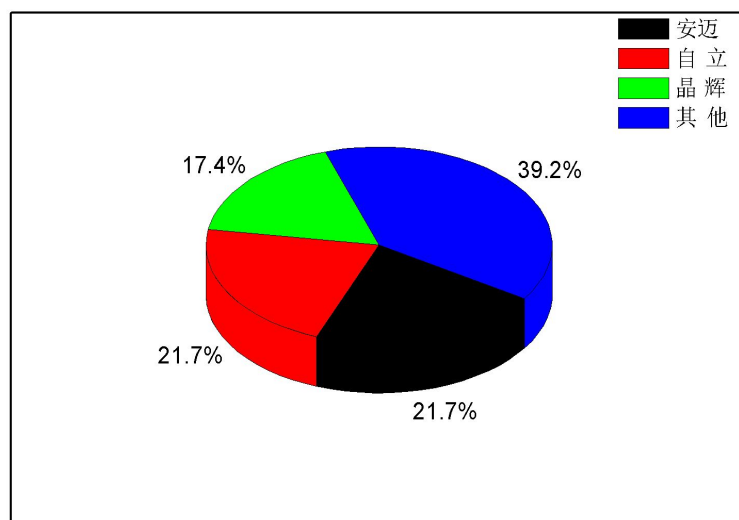


图 4 2014 年国内烧结板状刚玉市场销售比例

2.2 烧结刚玉生产技术的提高

国内烧结板状刚玉能得到快速发展，是和其生产工艺技术的提高密不可分。前期刚引入烧结板状刚玉的时候是需要对此产品和生产工艺进行分析解剖，所以刚开始的技术是模仿国外技术，但是后来由于我国国内生产烧结刚玉采用的原料与国外不一样，国内大部分采用的是工业氧化铝，而国外采用的是煅烧氧化铝作为原料，因此这也导致其生产工艺上出现差异，而不能完完全全模仿国外生产工艺技术，需要根据自身的特变开发相应的工艺技术，提高产品的性能指标。主要工艺改进如下^[7]：

（1）球磨技术的改进

烧结板状刚玉所用的原料在成球之前需要球磨成细粉，而目前大部分厂家只是控制球磨机出粉粒度为 325 目通过率，并没有从细粉粒度上去研究。然而原料粒度是影响烧结效果的一个重要因素，粒度的减小，增大原料的比表面积，增加烧结活性，促进烧结效果，降低烧结需要的温度，从而可以降低天然气用量。

原料粉的粒度主要是通过球磨机控制来实现的。球磨机中的研磨球分为两种瓷球和钢球，采用钢质磨球的生产效率要比瓷球效率高 20-30%左右，节约电力消耗 10-15%左右。另外同样的条件下，钢质磨球生产出的细粉粒度要比瓷球生产出的粒径小 5%左右，这样可以大幅度提高原料的烧结活性，降低烧成时需要的热能能耗。另外，球磨机中的研磨球配比也是十分影响其生产效率和细粉粒度，很多厂家经过多次尝试已调试出合适的磨球配比。

（2）成球方式的改进

烧结板状刚玉的烧成过程是一个固相烧结，通过物质迁移使粉末体产生强度并导致致密化和再结晶的过程。因此烧结板状刚玉的半成品球的致密度是影响制品烧结效果的一个重要因素，半成品致密度的提高是改变粉料颗粒之间的接触状

态，缩短颗粒之间的距离，增大接触面积，提高固相之间传递能量的速度和效率，从而提高烧结效果。为了达到较为致密的半成品球，浙江自立氧化铝材料科技有限公司对成球系统进行改进，使得成出的半成品球的体密可以达到 $2.0\text{g}/\text{cm}^3$ 以上，而传统式的成球机半成品体密只在 $1.80\text{g}/\text{cm}^3$ 左右，半成品致密度的提高可以提高高温的烧结效果和适当降低高温下烧结需要的能耗。

（3）干燥系统的改进

由于半成品球在成型的过程中加入大量的水分结合，其含水率高达 18-23%，因此在进入竖窑之前必须进行干燥处理，要求进窑前半成品球的含水率低于 5%，否则在窑炉中会出现大量炸球碎料状况，进而影响到整个窑炉的气氛分布，降低天然气的燃烧效率，影响烧结效果，增加天然气消耗量。原来很多厂家多此处重视程度不够，影响到整个生产体系。目前，大部分厂家已经对干燥系统进行大力改进，提高了整个干燥效果。

同时由于竖窑中有大量的逆流热气从竖窑窑口排出大气中，造成热能散失浪费。为此，大多数厂家也会收集余热进行干燥处理，但是由于烘干仓设计问题，除竖窑的逆流热风供热能外，该烘干仓还需要额外提供能源，依靠烧嘴加热进行半成品球的干燥。虽然最终也可以达到很好的烘干效果，但额外增加了天然气的消耗量。

（4）提高燃烧系统效率

竖窑燃烧系统是生产板状刚玉最重要环节，采用工业氧化铝生产烧结板状刚玉的煅烧温度要高于采用煅烧氧化铝的煅烧温度，国内采用工业氧化铝的煅烧温度一般在 1900°C - 1950°C ，而这么高的烧结温度是通过天然气的燃烧实现。因此，提高烧嘴天然气的燃烧效率是影响整个烧结工艺和节约能源的一个重要方式。

天然气的燃烧是一个化学放热过程，其燃烧的充分性由天然气和助燃风之间的比例及其之间混合的均匀度来决定的。若助燃风不够可能导致天然气燃烧不充分，若助燃风比例过高又会带走一部分热量造成能源浪费。目前国内大部分厂家是在分别向竖窑中通入天然气和助燃风，在烧嘴处混合后燃烧，这样可能会导致不容易控制天然气和助燃风之间的比例，不能保证天然气和助燃风混合均匀，这样也难以确保天然气得到充分燃烧。而国外公司则是在进入窑炉之前，在一个特定的容器中进行天然气和助燃风之间的混合，这样可以保证天然气和助燃风混合的比例及均匀性。因此，为了提高燃烧系统的效率，降低天然气的消耗量，首先就要改进燃烧系统，包括烧嘴、气体混合装置等，确保天然气的燃烧能够充分、集中。

因此，国内生产烧结板状刚玉厂家在不断自我摸索和总结的基础上，不断结合自身特点不断创新改进和提高，也相信未来国内烧结板状刚玉的质量会越来越好，越来越稳定。

3 烧结刚玉的多元化发展

目前市场上的烧结刚玉一般指的是普通的烧结板状刚玉，而根据电熔刚玉的种类可以生产出来多种电熔刚玉，如电熔白刚玉、电熔致密刚玉、电熔锆刚玉、电熔铬刚玉等。相对电熔刚玉，烧结刚玉多品种化推进工作比较落后，没有把烧结刚玉用途完全挖掘出来，所以要相应开发多品种烧结刚玉，推进耐火材料制品顾客化发展趋势。

3.1 轻质烧结刚玉

轻质烧结刚玉以工业氧化铝为主要原料，结合有机发泡技术，制备出具有核壳结构的多孔烧结轻质刚玉。该烧结轻质刚玉具有孔径分布均匀且多为封闭气孔、体积密度可以通过泡沫的加入量来控制的特点，应用在钢包浇注料中，旨在不降低其力学性能和抗渣性的前提下，降低其导热系数并且改善其热震稳定性。为优化钢包工作衬耐火材料的轻量化提供理论依据。

表 2 轻质烧结刚玉的常温物理性能

烧结轻质刚玉	体积密度/g·cm ⁻³	真密度/g·cm ⁻³	显气孔率/%	闭气孔率/%
	3.18	4.08	15.5	6.6

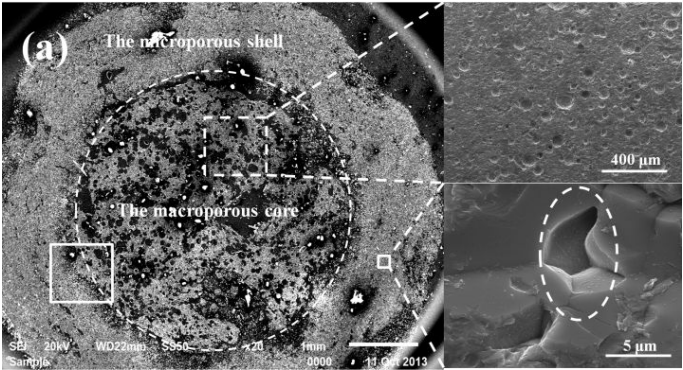


图 5 轻质烧结刚玉球剖面显微结构

从表 2 数据可以分析出，采用发泡法制备出的轻质烧结刚玉大幅度降低了刚玉体积密度；而图 5 中的显微结构可以看出该烧结轻质刚玉为核壳结构的多孔刚玉，其中内层核结构中气孔分布较多，且均匀，为减少导热起到较好作用，外层为壳结构，较为致密，为烧结轻质刚玉起到机械强度作用。

采用此方法制备出的烧结轻质刚玉在刚玉-尖晶石浇注料中应用，其结构如下：

表 3 常温力学性能

试样编号	常温抗折强度/MPa		常温耐压强度/MPa	
	110℃	1550℃	110℃	1550℃
PCSC（烧结轻质刚玉）	10.3	28.7	87	172
P000（烧结板状刚玉）	12.4	29.4	81	159

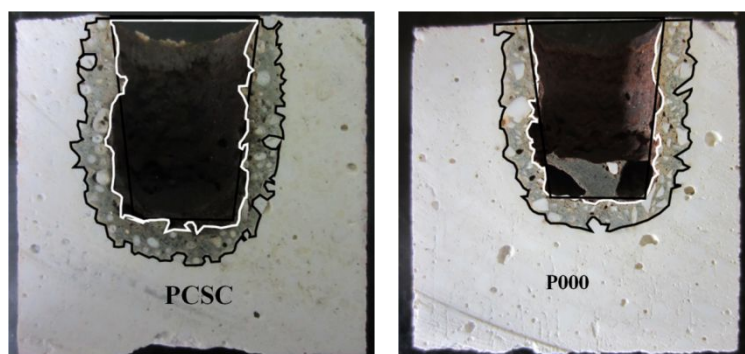


图 6 抗渣性试验后试样的剖面图

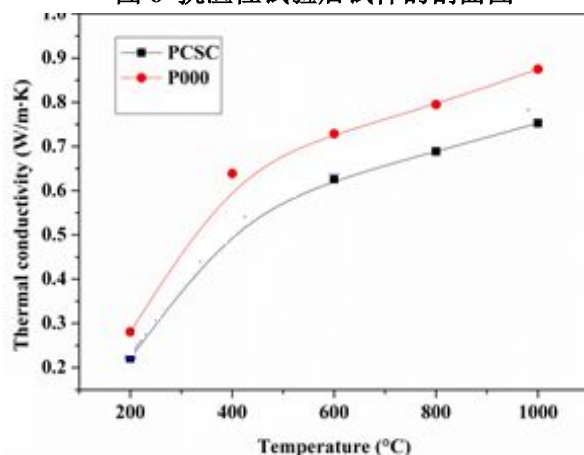


图 7 不同测试温度下的导热系数

由上面数据可以看出采用轻质烧结刚玉代替烧结板状刚玉在刚玉-尖晶石质浇注料中使用，在强度和抗侵蚀方面没有发现较大变化的同时，大幅度降低了材料的导热系数，为了改善材料的隔热保温性能起到较好作用。

3.2 微孔烧结刚玉

微孔烧结刚玉是一种高纯耐火骨料，与普通烧结板状刚玉相对，其主要不同点为体积密度相对较低；显微结构与板状刚玉的对比来看，主要区别在于晶内及晶间的微米级气孔的数量更多，而化学组成上与板状刚玉的无差异。其制备工艺也如同烧结板状刚玉一样，采用工业氧化铝和氢氧化铝及特定的有机外加剂为主原料，在高温下快速烧结，通过氢氧化铝的原位分解形成大量晶内和晶界间的微小封闭气孔，从而实现微孔轻量化。微孔烧结刚玉具有密度小、强度高、导热系数低等特点，可以直接接触钢水，抵抗钢渣和钢水的侵蚀和渗透，在某些部位可以直接代替烧结板状刚玉使用，降低热能散失。其理化指标如表 4。图 8 为烧结微孔刚玉的显微结构，由图可知微孔刚玉晶粒内部分布较多的细小气孔，该气孔的尺寸大小在 $1-8\mu\text{m}$ 之间，同时气孔分布均匀，其为晶体内部的闭气孔。另外微孔烧结刚玉中的晶粒大小和结构也和烧结板状刚玉一致，这样也保证了烧结微孔刚玉作为工作层材料使用的基本性能。

表4 烧结微孔刚玉理化指标

烧结微孔刚玉			
		标准值	典型值
物理指标	体积密度	$\leq 3.45 \text{ g/cm}^3$	3.35 g/cm^3
	显气孔率	$\leq 7\%$	6.0%
	吸水率	$\leq 3\%$	1.7%
化学指标	Al_2O_3	$\geq 99\%$	99.2%
	SiO_2	$\leq 0.1\%$	0.05%
	Na_2O	$\leq 0.40\%$	0.35%
	Fe_2O_3	$\leq 0.1\%$	0.05%

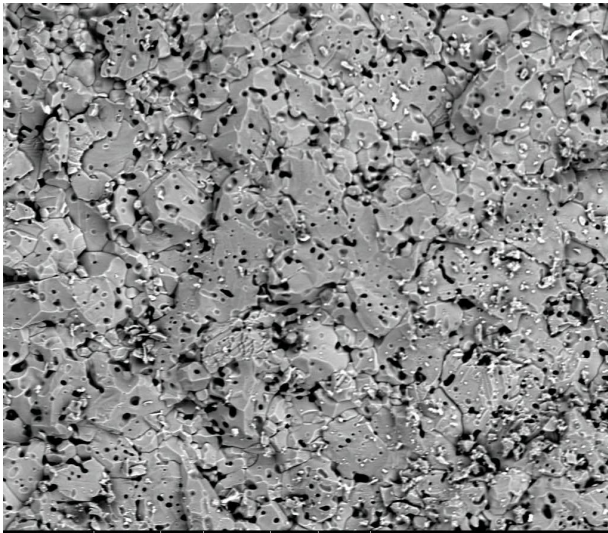


图 8 微孔烧结刚玉显微结构

下图 9 给出了板状刚玉及微孔烧结刚玉分别作为骨料对铝镁浇注料性能的对比。研究结果表面，利用微孔烧结刚玉作为骨料可以使浇注料体积密度降低约 4.5%，高温烧后的线变化率更低，300℃ 和 600℃ 下的热导率降低约 $0.200\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$ ；而浇注料的强度并没有出现下降的趋势，不同温度处理后的强度处于相同水平；另从抗渣试验结果来看，抗渣侵蚀性能相当，渗透性能略差一点。

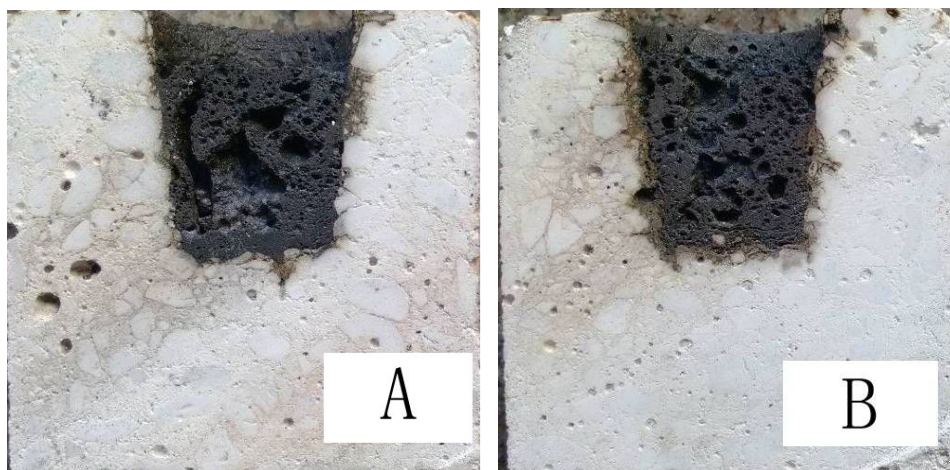
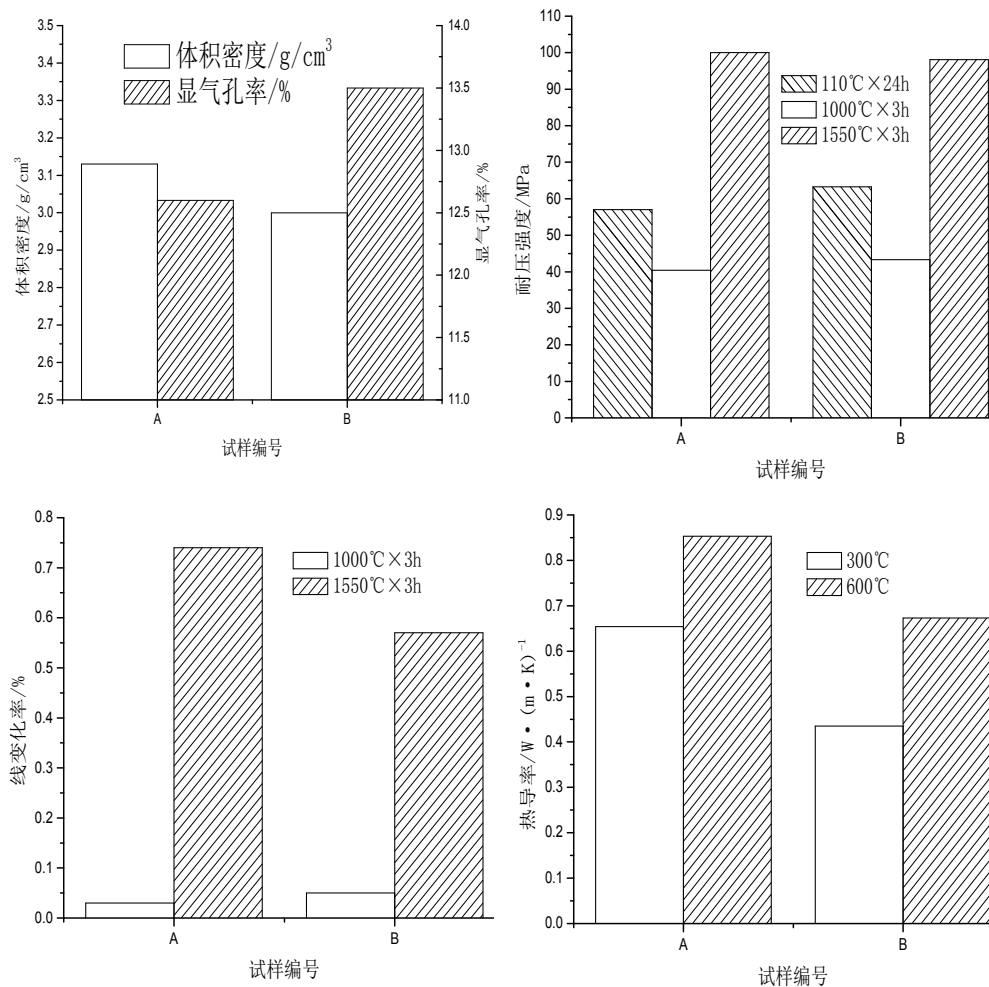


图9 板状刚玉（试样A）及微孔烧结刚玉（试样B）对铝镁浇注料性能的影响

因此烧结微孔刚玉可以广泛应用于冶金耐火材料（如钢包浇注料、中间包浇注料、加热炉）行业，也应用于石化行业、电子绝缘行业、热工窑炉行业。可以代替板状刚玉或电熔刚玉使用，大幅度降低高温热炉设备外表面温度。

3.3致密烧结刚玉

致密烧结刚玉是在普通烧结板状刚玉的基础上要发出来的一种新型高体密烧结刚玉。浙江自立氧化铝材料科技有限公司已成功批量生产出来该烧结致密刚玉。

与普通烧结板状刚玉不同的是致密烧结刚玉体密达到了 3.65g/cm^3 以上，同时气孔率小于3.0%，吸水率小于1%。这与原来的标准相比有了很大的提升，这将对耐火制品的性能有着很好的改善，有效地延长耐火材料的使用寿命，而这在国内普遍实施吨钢承包制的大环境下显得意义重大，更长的寿命意味着更大的经济效益。同时更低的吨钢耐材消耗意味着更节能更环保的生产。其主要理化指标如表5。致密烧结刚玉体积密度普遍比一般烧结板状刚玉高 0.2 g/cm^3 左右，同时显气孔率降低2%左右，另外化学成分中没有较大变化。因此致密烧结刚玉也是具备一般烧结板状刚玉所具有的高耐火度特点，同时由于其高致密度和极低的气孔率使致密烧结刚玉具备极好的耐磨性、抗冲刷性和抗侵蚀性。

致密烧结刚玉的显微结构如图10。可知致密烧结刚玉晶体大小分布较为均匀，都分布在 $25\mu\text{m}$ 左右，晶体之间结合较为致密。这为其提高材料的抗渣性和抗侵蚀性很好的前提条件。

表5 致密烧结刚玉理化指标

烧结致密刚玉			
		标准值	典型值
物理指标	体积密度	$\geq 3.65\text{ g/cm}^3$	3.70 g/cm^3
	显气孔率	$\leq 3\%$	2.0%
	吸水率	$\leq 1.2\%$	0.7%
化学指标	Al_2O_3	$\geq 99\%$	99.4%
	SiO_2	$\leq 0.1\%$	0.05%
	Na_2O	$\leq 0.30\%$	0.25%
	Fe_2O_3	$\leq 0.15\%$	0.05%

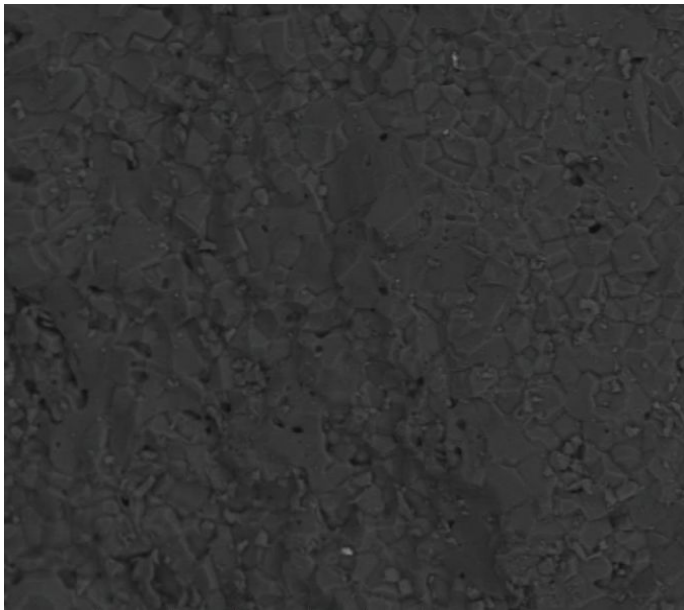


图 10 烧结致密刚玉显微结构

表 6 烧结致密刚玉在刚玉质低水泥浇注料中的应该数据

原料		烧结致密刚玉	烧结板状刚玉
试验配方	刚玉颗粒和细粉	88	88
	α -Al ₂ O ₃ 微粉	8	8
	凯诺斯 Secar71 水泥	4	4
	减水剂（外加）	0.1	0.1
	加水量	3.8	4.0
检测项目	检测条件	致密刚玉	板状刚玉
流动值 mm	0 min	195	198
	30 min	149	155
	60 min	110	110
可施工时间	室温	35min	40min
体积密度/g/cm ³	110℃×24h	3.35	3.25
显气孔率/%	110℃×24h	8.2	9.4
耐压强度/MPa	110℃×24h	78.92	75.6
	1000℃×3h	94.42	90.45
	1600℃×3h	183.25	165.19
抗折强度/MPa	110℃×24h	12.21	13.43
	1000℃×3h	10.18	9.29
	1600℃×3h	38.80	32.06
线变化率/%	1600℃×3h	0.43	0.39
热震稳定性	1100℃水冷3次后抗折保持率	68.5%	70.5%
高温抗折/MPa	1450℃×0.5h	19.8	20.3

烧结致密刚玉在刚玉质低水泥浇注料中的应用结果如表 4。可以看出,首先从加水量来看,烧结致密刚玉的配方中加水量可以减少 0.2%,同样也可以达到较好的流动值。而流动值随着时间的衰减速率相差不大。制得的浇注料试样,烧结致密刚玉的体积密度高板状刚玉在 0.1g/cm^3 左右,而显气孔率低 1.2%左右。常温、中温和高温抗折耐压强度均表现出烧结致密刚玉高于板状刚玉,而在热震稳定性和高温抗折上面表现出相当。

致密烧结刚玉比一般板状刚玉具有更高的体积密度和更低的显气孔率,因此烧结致密刚玉具有更好的机械强度、耐磨性和抗冲刷性能;更低的显气孔率使得材料的抗侵蚀性能得到好的提升。对于使用条件比较苛刻的耐火制品,如滑板、三大件、透气砖、水口等功能材料,以及钢包冲击区浇注料、铁沟浇注料、水泥回转窑喷煤管浇注料等抗冲刷性要求高的耐火制品中使用致密烧结刚玉可以大幅度提高耐火制品的使用寿命和安全系数。

3.4 特种烧结刚玉

特种烧结刚玉指的是在原料中加入少量的特种金属氧化物成份,经过竖窑高温烧结而制得的一种新型特种烧结刚玉。由于加入了少量的金属氧化物改变了原料的烧结刚玉某些性能特种,使其应用领域不同。

(1) 烧结钛刚玉

烧结钛刚玉是一种在工业氧化铝中加入少量的 TiO_2 粉磨一起球磨,经过成球后经过竖窑高温烧成制备出来的特种刚玉。在氧化铝中加入少量的氧化钛可以起到矿化促烧的作用,由于刚玉($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$)与金红石(TiO_2)的晶格常数接近,高温下 TiO_2 可与 Al_2O_3 形成固溶体,增加晶格缺陷,活化晶格,大幅度提高了烧结活性,烧结温度大概可以降低 100°C 左右。

加入了氧化钛后的烧结钛刚玉体积密度较普通烧结刚玉会略微提高,但其显气孔数量略微增多。这主要是因为 Ti^{4+} 可加速扩散能力,使气孔在烧结前期被排到表面,使得烧结钛刚玉晶体之间结合更加紧密。因此,烧结钛刚玉具有较大的机械强度,可以和 β -刚玉一起用于玻璃窑的熔池中;另外,钛刚玉还具备较好的抗弹性能,可以用于特殊陶瓷产品中。

(2) 烧结锆刚玉

电熔锆刚玉是以工业氧化铝和锆英石为主要原料,在电弧炉中经高温电熔而成,和生产电熔白刚玉工艺一致。所以烧结锆刚玉也是采用工业氧化铝和锆英石为原料,和烧结板状刚玉工艺一致,成球后竖窑高温快速烧结。这样制备出的烧结锆刚玉是 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 和 ZrO_2 组成的共晶几何体,显气孔率低,闭气孔数量多,因此烧结锆刚玉不但可以利用氧化锆物相提高热震,还可以利用大量微小闭气孔进一步提高热震稳定性。

和电熔锆刚玉一样,烧结锆刚玉可以用于玻璃和钢铁行业中热震性能较差的

耐火制品；另外锆刚玉的耐磨性较好，可以用于高速重负荷的耐磨材料中。

(3) 烧结铬刚玉

烧结铬刚玉在工业氧化铝原料中加入一定量的氧化铬粉体，成球后经过竖窑高温快速烧成。 Al_2O_3 和 Cr_2O_3 在高温下也可以形成固溶体，降低烧结温度，促进烧结效果。在刚玉材料中引入 Cr_2O_3 可以提高刚玉质材料的抗侵蚀性能。烧结铬刚玉可以直接用于铬刚玉砖中取代部分原来的电熔白刚玉，提高铬刚玉的使用性能。

4 小结

烧结刚玉作为一种高档耐火原料，由于其特有的性能优点，已经广泛于各种冶金设备和高温窑炉，各种耐火制品中均以烧结刚玉作为主要原料加入，以提高使用性能。国内通过这几年烧结刚玉技术的积累和发展，也已经形成了一套适合我国烧结刚玉的生产技术。因此，在此基础上探索开发不同种类的烧结刚玉，使得烧结刚玉向多元化发展，在不同的领域和环境下均有不同的烧结刚玉来使用，充分发挥各品种烧结刚玉的性能优点，提高耐火材料的使用寿命。

参考文献

- [1] Dilip C Jain. Fused white tabular alumina[J]. Ceramic Industry, 1991, 136(5): 25~27.
- [2] 徐延庆, 刘国齐, 刘新彧. 合成氧化铝原料—耐火材料创新的关键因素[J]. 国外耐火材料, 2001, 26 (4) : 3~11.
- [3] 高振昕. Tabular 氧化铝的显微结构[J]. 耐火材料, 1994, 28(5): 293~299.
- [4] 沈毅, 沈继耀, 陈玉如等. 超高温烧成对 Al_2O_3 晶粒形貌的影响[C]. 全国耐火材料洽谈会论文. 山东, 淄博, 1992. 6.
- [5] N. Bannenberg, A. Buhr. Tabular & calcined aluminas-positive performance[J]. Industrial Minerals Raw Materials Survey, 1998, 51~60.
- [6] 赵义, 沈明科, 李雪, 等. 板状刚玉在中国的发展状况[J]. 耐火材料, 2013, 47 (1) : 61-64.
- [7] 赵义, 黄凯, 沈明科等. 烧结板状刚玉节能降耗的方式[C]. 新形势下全国耐火原料发展战略研讨会论文集, 2014.