

DIAN LU YONG
NAI HUO CAI LIAO

电炉用耐火材料

王诚训 编著

冶金工业出版社

电炉用耐火材料

王诚训 编著



冶金工业出版社

1996

图书在版编目 (CIP) 数据

电炉用耐火材料/王诚训编著. -北京:冶金工业出版社, 1996.12
ISBN 7-5024-2010-X

I. 电… II. 王… III. 冶金炉: 电炉-耐火材料 IV. TF065.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (97) 第 00485 号

出版人 卿启云 (北京沙滩嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009)
北京市社科印刷厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销
1996 年 12 月第 1 版, 1996 年 12 月第 1 次印刷
850mm×1168mm 1/32; 5.625 印张; 151 千字; 173 页; 1-4000 册
12.00 元

前 言

耐火材料是制约钢铁等高温工业生产优化的过程和影响国民经济发展的一种重要的基础材料。国家“九五”重点科技攻关计划中，电炉用耐火材料被列为科技技术攻关的重要项目，并且提出要重点研究开发超高功率电炉（UHP 电炉）炉底吹氩搅拌用供气元件或透气捣打料以及直流电弧炉（DC 电炉）炉底用长寿导电耐火材料等高技术材料，以适应我国电炉炼钢，特别是 UHP 电炉和 DC 电炉炼钢技术的迅速发展，使我国骨干重点企业电炉的寿命和耐火材料的消耗达到 90 年代中期的世界先进水平。为此，作者特将自己多年以来的科研成果，生产实践经验和已收集到的资料汇总、归纳，编著了《电炉用耐火材料》一书，以期望能对我国电炉炉衬的寿命提高，耐火材料消耗的降低和电炉钢产量的增加有所帮助，同时也期望能为配合我国钢铁工业技术结构优化，完成“九五”电炉用耐火材料的攻关目标，对于从事电炉用耐火材料新品种的研制与应用的科技人员有所借鉴。

本书简单概述了电炉炼钢技术的发展，比较全面地阐述了不同类型电炉以及同一类型电炉的不同部位的使用条件下所选用的耐火材料的技术特征、发展过程和其选料原则，原料的烧结理论、制造技术、损毁机理和应用理论。希望这些原则和理论能对电炉用耐火材料的生产厂家和用户有所帮助。

在本书编写过程中，得到了侯瑾、李桂荣、王珏、李洪申、栾永杰和孙宇飞、张义先等的大力帮助，作者在此向他们表示衷心的感谢。

由于作者水平所限，错漏难免，殷切期望读者批评指正。

作者

1996 年 10 月

目 录

1 电炉炼钢生产技术的发展	(1)
2 电炉炉顶用耐火材料	(7)
2.1 早期电炉炉顶用耐火材料的回顾	(7)
2.2 电炉炉顶用高铝质耐火材料	(9)
2.2.1 起源	(9)
2.2.2 高铝质耐火材料的原料	(11)
2.2.3 高铝质电炉炉顶砖的质量控制	(15)
2.2.4 电炉炉顶砖的砌筑	(17)
2.2.5 高铝质电炉炉顶砖的抗蚀性能及其损毁	(17)
2.3 电炉炉顶用 $\text{MgO-Cr}_2\text{O}_3$ 砖	(23)
3 电炉侧墙用耐火材料	(26)
3.1 电炉侧墙内衬的损毁	(26)
3.2 普通功率电炉侧墙用耐火材料	(27)
3.3 UHP 电炉侧墙用耐火材料	(27)
3.4 电炉侧墙用镁质耐火材料	(35)
3.4.1 镁砂的生产	(37)
3.4.2 天然粗晶质烧结镁砂的生产	(59)
3.4.3 镁砂的显微结构	(66)
3.4.4 镁质耐火材料的高温强度	(77)
3.4.5 电炉侧墙用几类典型的镁砖	(82)
4 电炉炉底用耐火材料	(89)
4.1 电炉炉底的砌筑	(89)
4.2 与电炉炉底干打混料有关的相平衡	(90)
4.2.1 氧化铁的稳定性	(90)
4.2.2 MgO -氧化铁系统	(93)

4.2.3	CaO-氧化铁系统	(102)
4.2.4	MgO-CaO 系统和 MgO-CaO-SiO ₂ 系统	(103)
4.2.5	MgO-CaO-氧化铁系统	(107)
4.2.6	MgO-Fe ₂ O ₃ -CaO · SiO ₂ 和 MgO · Fe ₂ O ₃ -CaO · MgO · SiO ₂ 系统	(112)
4.2.7	MgO-Fe ₂ O ₃ -2CaO · SiO ₂ 和 MgO · Fe ₂ O ₃ -2CaO · SiO ₂ 系统	(113)
4.3	富铁死烧镁砂中 C ₂ F 的稳定性	(118)
4.3.1	C ₂ F 的热力学稳定性	(118)
4.3.2	C ₂ F 在空气中的稳定性	(120)
4.3.3	C ₂ F 在低氧压下的稳定性	(121)
4.4	MgO-CaO 系耐火材料的抗蚀性	(122)
4.5	电炉炉底用干打混合料的设计	(125)
4.6	电炉炉底用混合料的生产及其应用	(130)
5	直流电炉用耐火材料	(136)
5.1	DC 电炉的设计	(137)
5.1.1	炉底导电的 DC 电炉	(137)
5.1.2	全砖衬导电炉底	(152)
5.2	金属元件导电的 DC 电炉	(153)
5.2.1	钢棒电极	(153)
5.2.2	钢片和多根钢针	(156)
5.3	DC 电炉侧墙和炉顶用耐火材料	(158)
6	水冷炉衬	(159)
6.1	水冷炉墙	(159)
6.2	水冷炉顶	(160)
6.3	小结	(161)
7	电炉炉衬损毁的原因	(163)
8	电炉维护与喷补用耐火材料	(166)
9	电炉炉底吹气搅拌	(170)
	主要参考文献	(172)

1. 电炉炼钢生产技术的发展

电炉炼钢始于 1879 年，但 1940 年以前，电炉不论数量，还是容量都是极为有限的，大于 25t 容量的电炉全世界只有 5 台。第二次世界大战结束之后，电炉钢才得到极为迅速的增长。初略计算，电炉炼钢至今已有 100 年以上的历史了。但电炉炼钢技术开始明显进步却是本世纪 60 年代的事情。从 1960 年初开始，才推广大型的、高功率的吹氧电炉。70 年代中期，随着炉外精炼和连续铸锭技术的采用，电炉炼钢技术才得以迅速发展，导致电炉从炼钢装置发展成为大功率的熔炼设备。大约在 1975 年，自从引入超高功率电炉（UHP 电炉）以来，电炉炼钢广泛采用炉外精炼技术，从而使氧化环境下炼钢电炉的作用简化了。

80 年代以来，世界电炉炼钢生产技术得到更迅速的发展。电炉向大型化、超高功率化、直流化、连续化和自动化的方向发展。各国电炉钢厂开发并采用了复合吹炼、氧燃助熔、竖式电炉、智能型电炉、双炉座电炉、超高功率直流电炉、高阻抗变频电源交流电炉、水冷炉壁、水冷炉盖、水冷电缆、泡沫渣操作及偏心炉底出钢等一系列新技术、新工艺和新设备。上述新技术、新工艺和新设备的采用使世界电炉炼钢生产技术达到很高水平。目前，国外先进的超高功率交流电炉的吨钢电耗已降至 $350\text{kW} \cdot \text{h/t}$ ，电极消耗已降至 3kg/t ，冶炼周期已缩短至 70min；超高功率直流电炉的电能消耗已降至 $340\text{kW} \cdot \text{h/t}$ ，电极消耗已降至 1.1kg/t ，冶炼周期已缩短至 50min。

为了进一步降低电炉的电能和电极消耗，减轻电炉的电弧闪烁和提高电炉生产效率，各国电炉钢厂积极开展开发并采用了直流电炉炼钢技术。1993 年底国际钢铁协会统计，世界各国已经建成投产的直流电炉有 40 座。目前，各国已投产及正在建设或计划

建设的直流电炉大多为超高功率直流电炉，即吨钢变压器功率大于 $500\text{kV} \cdot \text{A}$ 的直流电炉。

目前，直流电炉炼钢生产技术已达到相当高的水平。日本东京钢铁公司九州钢铁厂于 1989 年 9 月建成投产的 130t 直流电炉，目前的平均冶炼周期为 58min ，最短的冶炼周期为 50min ，小时产钢量超过 130t 。电炉的电能消耗为 $350\text{kW} \cdot \text{h}/\text{t}$ ，电极消耗为 $1.1\text{kg}/\text{t}$ 钢，炉底电极的寿命超过 1000 炉，最近已超过 2000 炉，其电弧闪烁与交流电炉相比较减少 50% 以上。日本关西板坯中心于 1992 年投产的容量为 120t 的直流电炉，其变压器功率为 $85\text{kV} \cdot \text{A}$ ，该直流电炉 1993 年的平均冶炼周期为 50min ，年产钢达到 80 多万吨。美国纽克钢铁公司希克曼厂于 1992 年 8 月建成投产的容量为 150t 的直流电炉，1993 年的平均冶炼周期为 60min ，年产钢的能力达 100 万 t，炉底电极的寿命达到 2000 多炉。

1990 年 10 月，日本共英钢铁公司在其名古屋钢厂建成投产了新式直流电炉。这种直流电炉设有连续供料装置及废钢预热器，从供料装置连续向预热器内加入废钢和造渣材料。预热器利用电炉熔炼时产生的高温烟气的显热和烟气中的 CO 在二次燃烧时产生的化学热，可将废钢及造渣材料加热至 600°C 以上。目前，这种带有预热器的直流电炉的小时产量为 120t ，电能消耗平均为 $340\text{kW} \cdot \text{h}/\text{t}$ ，电极消耗为 $1.2\text{kg}/\text{t}$ ，氧气消耗为 $25\text{m}^3/\text{t}$ ，焦炭和煤的消耗平均为 $20\text{kg}/\text{t}$ 。

基于这种带有预热器的新型直流电炉的成功经验，日本石川岛播磨重工业公司 (IHI) 和瑞士 ABB 电气公司正在为日本东京钢铁公司的宇都宫钢厂制造目前世界上最大的容量为 250t 的直流电炉。这种带有连续装料装置和预热器的直流电炉，可以连续地进行熔炼和出钢，它相当于一台料槽型的连续炼钢炉。该直流电炉设计的连续出钢能力为每小时 140t 。该电炉于 1995 年建成投产。由于它可以在其预热器内将炉料预热至 800°C 以上，因而可将电炉生产效率提高 30% 以上，将电能消耗降低 30% 以上。墨西哥希尔萨钢铁公司的蒙特雷钢厂，目前正在建设带有连续装料装置、

预热器及炉底吹氩搅拌装置的直流电炉。该直流电炉的容量为150t,它由日本新日铁公司和美国富克斯公司联合制造,电炉的总造价为2000 万美元。该电炉于1995 年投产,年产钢的能力为120 万 t。

归纳起来,电炉炼钢技术的主要发展步骤可以用图 1-1 来表示。

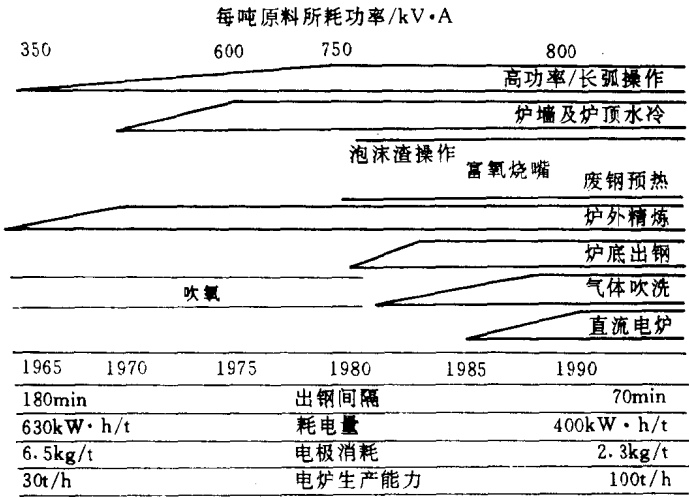


图 1-1 电炉炼钢技术的发展

电炉是生产特种钢的主要装置,图 1-2~图 1-5 示出了几种现代电炉的简图。十年以来,由于电炉新技术的不断发展,废钢资源充足(仅西方七个主要工业国蓄积量就达 101.26 亿 t,再生回收率约 66%);能耗低(电炉炼钢能耗仅为平炉/转炉的一半);环保优越(1t 转炉钢产生 CO₂ 气体 2000 升,电炉钢产生 800 升);投资低(就建筑工程费而言,转炉钢每吨投资约 1000~1500 美元,电炉钢仅 80 美元)。因此,全世界发展了一大批短流程的电炉小钢厂。1993 年世界电炉钢比为 31.0%,其中美国 38.2%,日本为 31.2%,西欧电炉钢比已达到总钢量的 30%~40%,特别是意大利已接近 60%,预计本世纪末全世界电炉钢比将由目前的 31%以

上增加到 38% 左右，其中直流电炉的生产能力将占电炉钢的 20% 以上。

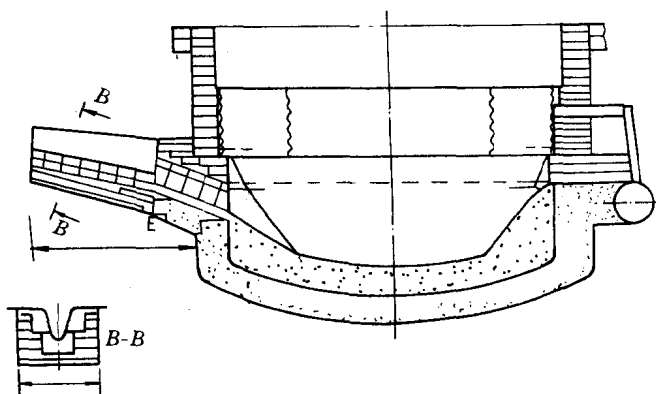


图 1-2 不带水冷炉壳斜出钢的电炉

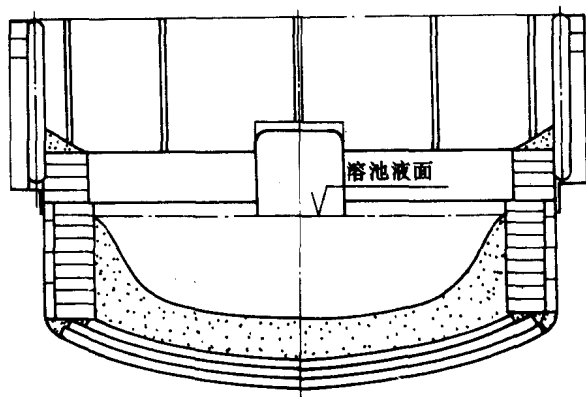


图 1-3 带水冷炉壳的电炉

80 年代，我国电炉炼钢取得了迅速发展，已由普通功率电炉向超高功率电炉发展，进而由交流电炉向直流电炉发展。据“七五”末期统计，我国共有炼钢电炉 1571 座，总吨位 4456.3t，平均容量 2.84t，平均年产钢量 5700t/座。在冶金系统内已建成 14 个特种钢厂，拥有电炉 117 座，形成了年产 450 万 t 钢的生产能

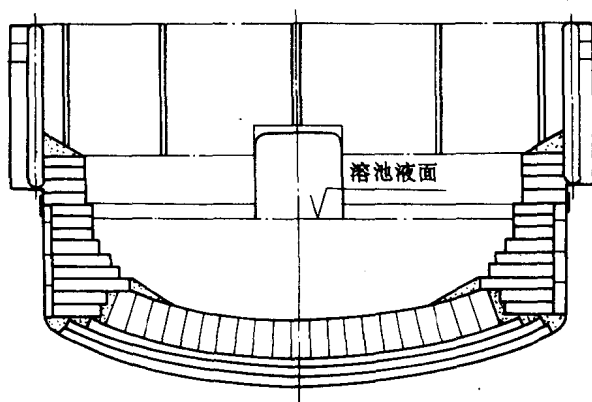


图 1-4 砖砌炉床的电炉

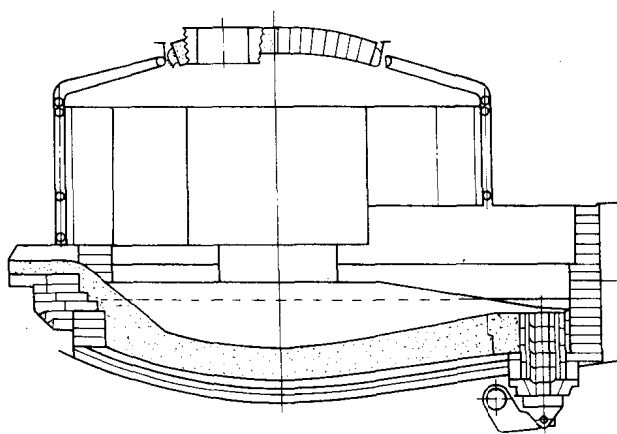


图 1-5 水冷偏心底出钢超高功率电炉

力。特别是近年来，舞钢、抚钢、天津钢管厂等钢厂相继建成、投产了一批超高功率电炉；另有一些钢厂陆续建成、投产了容量不同的新型直流电炉。因此，使我国电炉钢比率逐年提高，已由1980年的19.2%增加到1990年的21.1%，而1993年电炉钢比率已达

到 22.45%，电炉钢产量已增加到 1990 多万吨。

电炉炼钢的最新技术为直流电炉，供气搅拌和炉底出钢，以及超高功率电炉，直流电炉，精炼，连铸三位一体，实现炼钢短程化。应当指出，电炉炼钢技术的发展和进步，都与耐火材料技术的同步发展密切相关。电炉砌衬技术的发展见表 1-1。

表 1-1 电炉砌衬技术的发展

炉体部位	内 衬 进 展	
炉顶：外围部分	不烧 $\text{MgO-Cr}_2\text{O}_3$ 砖	水冷板 (1975)
中心部分	硅砖 烧成及不烧成 $\text{MgO-Cr}_2\text{O}_3$ 砖 高铝砖及捣打料	高铝预浇注大块 (1985)
侧墙：上部	振动成型白云石碳预制大块	水冷板
下部	不烧及烧成 $\text{MgO-Cr}_2\text{O}_3$ 砖 高温烧成及熔铸 $\text{MgO-Cr}_2\text{O}_3$ 砖 烧成白云石砖，沥青浸渍、沥青结合烧成镁砖，沥青浸渍、沥青结合镁钙砖 (1970)	镁碳砖 树脂结合 (1975) 沥青结合 (1978)
炉底	MgO 湿捣打， MgO 干捣打 白云石料干捣打	直流电炉用 MgO-C 砖及捣打料 (1985) MgO-C 元件，惰性气体搅拌 (1983)
出钢槽	MgO 捣打料，超低水泥浇注料	MgO-C 质预浇注出钢槽
出钢口	MgO-C 出钢口大块，炉底出钢系统 (1985)	
补炉材料	热喷补混合料，离心喷补混合料	

2. 电炉炉顶用耐火材料

2.1 早期电炉炉顶用耐火材料的回顾

早期电炉炉顶都是使用硅砖砌筑，直到 1960 年初，硅砖仍是最广泛使用的电炉炉顶用耐火材料。硅砖在性能方面具有许多优点：(1) 质量轻；(2) 高温强度大；(3) 蠕变速率低；(4) 荷重软化温度高；(5) 重烧不收缩；(6) 温度高至 1600°C 时具有良好的热震稳定性；(7) 价格较便宜。因此，它长期以电炉炉顶作为自己的阵地之一。这就是自电炉诞生以来的相当长的时期内，几乎全部电炉炉顶都选用硅砖的原因。

电炉炉顶用耐火材料的要求，首先需要较高的荷重软化温度。硅砖在荷重下的损坏温度接近 SiO_2 的熔点 (1723°C)，在此之前，几乎没有破坏的迹象。这就是硅砖能作为电炉炉顶用耐火材料一直使用到直接结合碱性耐火材料和高铝质耐火材料研制出来以后的原因。

其次，电炉炉顶处在温度变化的条件下工作，炉顶砖在加热时的膨胀特性特别危险。但是，使用时重新冷却的收缩也很重要。图 2-1 解释了为什么硅砖能够长期广泛用作电炉炉顶用耐火材料的原因。不过，如图 2-2 表明的那样，硅砖的缺点之一是在低温范围内热震稳定性较差，但这可以通过采用调整粒度等措施，生产出热震稳定性较好的硅砖并辅以通过使电炉结构合理化得到解决。

虽然纯 SiO_2 的熔点为 1723°C ，而耐火度检验经常发现硅质耐火锥高到 1730°C 才弯曲，但它仍然限制了硅砖在电炉炉顶上的使用。

为了提高硅砖的耐火性能，曾经根据 $\text{SiO}_2\text{-Cr}_2\text{O}_3$ 二元相图向

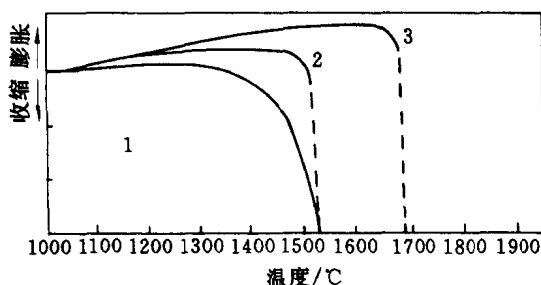


图 2-1 镁砖、粘土砖与硅砖的升温荷重软化点试验

(压力为 0.35MPa, 升温速率为 10°C/min)

1—耐火粘土砖在 1520°C 变形 10%；2—镁砖在 1525°C 时由于剪力而破坏；

3—硅砖在 1680°C 时由于剪力而破坏

硅砖中添加了 Cr_2O_3 ，制造了电炉炉顶用含铬硅砖。但是，作为解决熔损的措施，并未解决问题。硅砖电炉炉顶衬砖的损坏，主要是渣蚀熔流的结果，而硅砖本身降低了熔渣的碱度，造成电炉炉顶用该类耐火材料时的熔

流。这可由 SiO_2 - CaO -氧化铁系统相图得到解释。

自从 1960 年以后，电炉炼钢开始推广大型的、高功率的、吹氧的电炉，导致炼钢操作的进一步强化，冶炼温度已提高到硅砖再也不能承受的程度，因而不得不研究、试用其他更高熔点的耐火材料。其中，高铝砖首先得到了广泛的应用。

除了高铝砖之外，电炉炉顶还选用过 MgO -

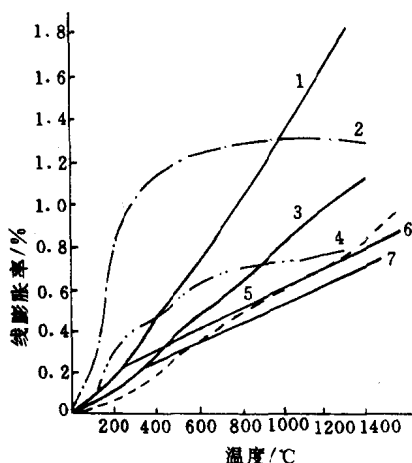


图 2-2 各种耐火砖的热膨胀曲线

1—镁砖；2—硅砖；3—镁铬砖；4—半硅砖；

5—粘土砖；6—高铝砖；7—粘土砖

Cr₂O₃ 系耐火材料，同时也进行过纯镁质耐火材料的试验和应用工作。

2.2 电炉炉顶用高铝质耐火材料

高铝质耐火材料和碱性耐火材料是高温设备大量使用的主要两大类耐火材料。当使用温度都超过粘土质和硅质耐火材料荷重软化温度时，高铝质耐火材料就显得很重要。通常以要求抗酸性或抗碱性熔渣的侵蚀性，抗剥落性以及耐磨性的角度来选择高铝质耐火材料，这就需要提供品种繁多的用途多样的高铝质耐火材料品种，以供用户选择。电炉炉顶用耐火材料的性能见表 2-1。

表 2-1 电炉炉顶用耐火材料的性能

项 目	高铝质预制块				高铝质不烧砖			不烧镁铝砖
	A	B	C	D	E	F	G	H
体积密度/(g/cm ³)	2.77	2.72	2.69	3.00	2.81	2.71	3.27	3.05
显气孔率/%	11.8	12.8	12.9	12.8	20.2	19.6	12.8	12.4
耐压强度/MPa	33.5	30.5	40.5	65.2	31.5	35.0	124.0	55.0
高温抗折强度/MPa (1400℃)	2.5	2.5	4.0	5.0			4.0	
SiO ₂ /%	25	26	21	7	11	19	7	57
Al ₂ O ₃ /%	69	67	76	89	83	76	82	
MgO/%								
Cr ₂ O ₃ /%				2			10	

2.2.1 起源

高铝质耐火材料的分类，按其 Al₂O₃ 的含量来划分，其 Al₂O₃ 含量在 48%~90% 范围内都属于高铝质耐火材料范畴。电炉炉顶用高铝质耐火材料的 Al₂O₃ 含量应不低于 65%，通常选用 Al₂O₃ 含量大于 75% (wt) 的材料。

我国是最早研究使用高铝质电炉炉顶砖的国家。从 1953 年唐

山古冶耐火材料厂试制高铝质电炉炉顶砖以来，高铝质电炉炉顶砖就得到了广泛的应用。

美国于 1958 年已大量使用高铝电炉炉顶砖；法国于 1956 年开始试用 $\text{Al}_2\text{O}_3=60\%、70\%、80\%$ 的高铝质电炉炉顶砖，1980 年才作为定型产品固定下来；英国在电炉炉顶上使用高铝砖则是 1960 年以后的事情；日本在电炉炉顶上应用高铝砖的时间较晚，在 1963 年才开始试用，直到 1968 年仍有 60% 的电炉炉顶采用硅砖砌筑。

最近几年，为适应 UHP 电炉更苛刻的操作条件，开发了高温性能更好的优质矾土基高铝砖，使用效果堪称满意，其性能见表 2-2；A 号砖是以刚玉为主要晶相的烧成砖，在电炉炉顶上的使用寿命大于 150 炉。B 号砖为加入 SiC 的化学结合砖，具有较好的抗热震性和抗蚀性，它在抚顺钢厂 50t 电炉炉顶使用，平均寿命为 224 炉，最高为 374 炉。

表 2-2 电炉炉顶用高铝砖的性能

样 号	A	B
$\text{Al}_2\text{O}_3/\%$	83.29~86.85	>80
$\text{Fe}_2\text{O}_3/\%$	1.20~1.37	<2
SiC/%	—	>5
体积密度/(g/cm ³)	3.01~3.08	>3
显气孔率/%	14~16	<15
常温耐压强度/MPa	163~223	80
荷重软化温度(0.2MPa)/℃	1550~1591	1600
重烧线变化率/%	0~0.4	<+1.0

现在，我国电炉炉顶一般都采用高铝砖，少数小型电炉的平均寿命已超过 200 炉次，大型电炉仅 100~150 炉次。但舞阳钢铁公司 75t 电炉使用唐钢耐火厂生产的 $\text{Al}_2\text{O}_3>85\%$ 的电炉炉顶砖，其使用寿命达 193 炉次，耐火材料单耗仅 1.34kg/t 钢。此外，我

国研制不烧蓝晶石砖的蚀损比高铝砖低,是一种优质电炉炉顶砖,其与高铝电炉炉顶砖的性能比较,见表 2-3。

表 2-3 电炉炉顶用耐火砖的性能

砖种	化学成分/%					耐火度	显气	荷重软	常温耐压
	Al ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	R ₂ O	℃	孔率/%	化点/℃	强度/MPa
高铝砖	>85	7	3.68	1.75	0.3	>1790	15~19	1565~1590	107.9~201.4
不烧蓝晶石砖	78	14.4	2.14	1.31	0.15	>1790	19~22	1530~1550	70~105
烧成红柱石砖	54.28	—	—	1.74	—	>1790	14.6	1620	108.5
烧成莫来石 刚玉砖	73.06	—	—	0.69	—	>1790	19.9	1710	81.7

高铝砖与硅砖相比具有如下优点:

(1) 由于高铝砖是中性耐火材料,其耐火度比硅砖高 100℃以上,在很高的温度下也不熔化,因而有利于电炉操作的强化。

(2) 高铝砖在高温下的耐蚀性能好,抗 CaO,特别是抗氧化铁的侵蚀性高,因而它与 CaO 和氧化铁相遇时,可在砖表面上生成极粘滞的反应产物,从而形成难熔化的壳皮,保护砖的工作面不被迅速熔损。

(3) 高铝砖具有较高的热稳定性和一定的热塑性。这对温度急剧变化和膨胀所产生的应力,有较高的抵抗能力。

因此,高铝砖能够适应工作温度高达 1700℃的电炉炉顶的操作条件,而被长期采用。

2.2.2 高铝质耐火材料的原料

高铝质耐火材料很早就已成为在电炉炉顶应用中的一种重要的耐火材料。用于生产这类高铝质耐火材料的原料,主要是烧结铝矾土(也称烧结矾土),它们是由天然矾土经过煅烧以后所获得的产物。天然矾土是经过风化过程形成的,即是在高原地带的雨季产生的,其形成的基本条件是要在这种气候条件下有一个长期稳定的时期,岩石每年都溶化一部分,在风化形成期间,所有比