

汪厚植耐火材料论文选

Wang Houzhi Refractories Collected Papers

汪厚植 著

冶金工业出版社

汪厚植耐火材料论文选

Wang Houzhi Refractories Collected Papers

汪厚植 著

北 京

冶 金 工 业 出 版 社

2010

内 容 简 介

本书是汪厚植教授在 20 世纪 80 年代后发表的重要文章的选编,共分四部分,涉及耐火材料行业的尖晶石合成原料及其制品、耐火材料数值模拟、纳米材料及其应用,以及其他相关文献资料,共 68 篇文章,展示了汪厚植教授在耐火材料技术方面的科研成果。

本书可供耐火材料行业的工程技术人员、科研工作者和高校相关专业师生学习和参考。

图书在版编目(CIP)数据

汪厚植耐火材料论文选/汪厚植著. —北京:冶金工业出版社, 2010. 3

ISBN 978-7-5024-5164-6

I. ①汪… II. ①汪… III. ①耐火材料—文集
IV. ①TQ175-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 021699 号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009

电 话 (010) 64027926 电子信箱 postmaster@cnmip.com.cn

责任编辑 王楠 章秀珍 美术编辑 张媛媛 版式设计 葛新霞

责任校对 王贺兰 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-5164-6

北京盛通印刷股份有限公司印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销

2010 年 3 月第 1 版, 2010 年 3 月第 1 次印刷

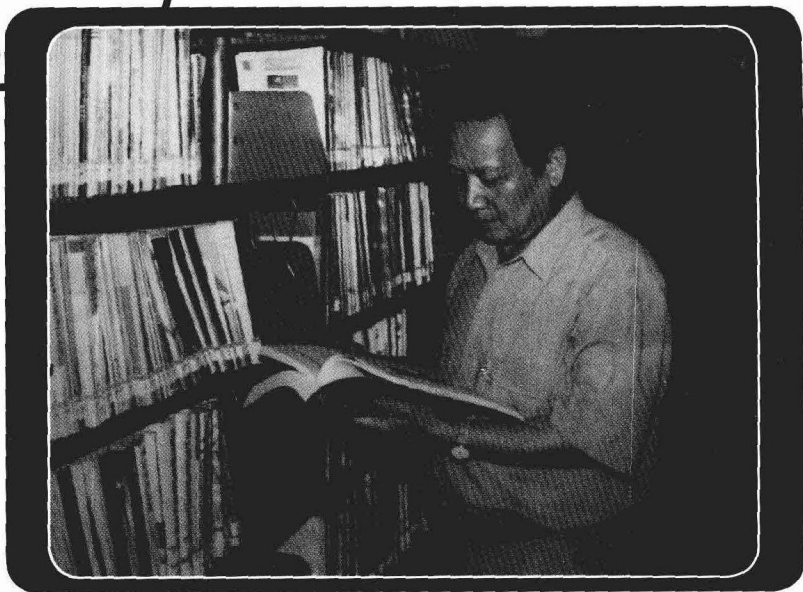
148mm×210mm; 20. 125 印张; 2 彩页; 598 千字; 635 页; 1-2000 册

75. 00 元

冶金工业出版社发行部 电话: (010) 64044283 传真: (010) 64027893

冶金书店 地址: 北京东四西大街 46 号(100711) 电话: (010) 65289081

(本书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)



汪厚植同志1942年3月7日出生于浙江省建德市，1985年加入中国共产党。1959年进入浙江大学学习，1964年毕业后任教于武汉钢铁学院。1979年至1981年在德国克劳斯塔工业大学留学，获工学博士学位。回国后，历任武汉钢铁学院微观中心主任、耐火材料专业教研室主任，教务处副处长、处长，武汉冶金科技大学校长助理、校长，武汉科技大学校长，首席教授、博士生导师，享受国务院政府特殊津贴。汪厚植同志还先后担任武钢-武科大新材料研究院院长、纳米材料与技术研究中心主任、湖北省耐火材料产品质量检验监督站站长、中国金属学会耐火材料分会副理事长、中国耐火材料行业协会副会长等职务。



序 言

20 世纪 70 年代末、80 年代初，汪厚植教授留学联邦德国克劳斯塔大学，取得冶金及工程材料学工学博士学位。归国后，汪厚植教授充分利用我国丰富的菱镁矿和铝矾土天然资源优势，从事合成镁铝尖晶石原料及其应用的基础研究，较深入地探讨了尖晶石与方镁石、刚玉和高铝矾土复合耐火材料的相平衡及性能及结构的内在关系，开发了方镁石-尖晶石、矾土-尖晶石和铝镁尖晶石等材料，用于平炉炉顶、水泥窑、玻璃窑、石灰窑、钢包、出铁沟等，特别是大、中型整体浇注钢包方面的应用，取得了良好的使用效果，部分制品取代进口，填补了国内空白；期间，还从事了锆刚玉莫来石和镁白云石熟料的合成与反应烧结机理的研究工作，所合成的原料在滑板、转炉炉衬、钢包衬砖中推广使用。为我国人工合成耐火原料的发展和天然耐火资源的综合利用作出了重要的贡献。

20 世纪 90 年代末，汪厚植教授敏锐地意识到纳米科学与技术耐火材料领域具有极大的发展潜力，果断地组织团队开展了纳米技术在耐火材料中的应用探索，在国内率先提出“纳米复合耐火材料”概念，进行了纳米粉体的制备，并成功地在耐火材料中得到实施。研究工作得到了国内外同行的认可和好评。

21 世纪以来，汪厚植教授结合钢铁冶金新技术对耐火材料的需求，开展了计算机科学在耐火材料中的应用研究。采用数值模拟和物理仿真方法，较系统地研究了耐火材料服役过程中的温度场、应力场、流场与耐火材料的结构、形状和炉体结构的关系，完成了中间包冶金技术、钢包冶炼新技术用耐火材料的损毁机理



及优化设计工作，并推广至炼铁系统耐火材料领域。其成果对于推动我国纯净钢冶炼技术的发展，具有重要的理论价值和实际指导意义。

汪厚植教授具有崇高的科学理想、敏锐的学术战略眼光和严谨求实的治学态度，坚持理论与实践、教学与科研的统一，始终身体力行，是我国著名的耐火材料专家，在耐火材料界享有较高的威望。他在从事科学研究的同时，也非常重视培养人才，注重教育学生的为人处世和人生追求，诲人不倦，引导学生的学术研究和科学探索，为国家培育了一批又一批的优秀学子，培养了一大批富于理想、视野开阔、基础扎实、动手能力强的技术骨干和管理人才。

汪厚植教授于2009年的今天匆匆离开了我们，尽管没有来得及说上半句片语，但他奋斗数十载所遗留下来的却很多很多，许多值得我们学习和借鉴。本书汇集了汪厚植教授发表的与耐火材料相关的主要论文，以缅怀汪厚植教授，同时，也供耐火材料专业的学生、教师、技术人员及管理工作者参考。

中国耐火材料行业协会

田学光

2010年2月15日



目 录

第一部分 尖晶石合成原料及其制品

- ☆ $\text{MgO-MgAl}_2\text{O}_4$ 系统耐火材料的性能与显微结构 汪厚植 (3)
- ☆ 烧结法合成镁铝尖晶石熟料工艺条件的研究
..... 戴晓光, 汪厚植 (45)
- ☆ 电熔合成镁铝尖晶石及其应用研究
..... 汪厚植, 张文杰, 丁孔奇, 等 (55)
- ☆ 利用煅烧镁铝尖晶石制造方镁石-尖晶石砖的研究
..... 汪厚植, 顾华志, 巫云祥, 等 (64)
- ☆ 镁铝尖晶石原料及其产品的优化设计与使用
..... 顾华志, 汪厚植, 张文杰 (73)
- ☆ 活性 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 对 RH 浸渍管浇注料的组成、结构与性能
..... 赵惠忠, 蓝振华, 汪厚植, 等 (80)
- ☆ 我国钢包新材料的展望 汪厚植, 张文杰, 顾华志 (89)
- ☆ 富铝尖晶石的烧结特性及其对抗渣性能的影响
..... 顾华志, 韦勳方, 汪厚植, 等 (95)
- ☆ 高铝矾土-尖晶石钢包砖用结合剂的研究 ... 邓承继, 汪厚植 (103)
- ☆ 不烧铝尖晶石钢包砖的研究 邓承继, 汪厚植 (110)
- ☆ 矾土-尖晶石钢包不烧砖的蚀损研究 戴汉莲, 汪厚植 (115)
- ☆ 矾土-尖晶石浇注料相平衡与材料组成及性能的关系
..... 顾华志, 汪厚植, 张文杰, 等 (121)
- ☆ MgAlON 结合镁质和尖晶石质材料的烧结性能
..... 王玺堂, 汪厚植, 张保国, 等 (130)
- ☆ 连铸钢包用高纯铝镁系浇注料的性能与损毁
..... 顾华志, 汪厚植, 张文杰, 等 (141)

- ☆不同熔渣对钢包铝镁铬材料渣蚀行为的影响
..... 汪 蛟, 顾华志, 汪厚植, 等 (148)
- ☆水泥窑用方镁石-铁铝尖晶石砖的性能研究
..... 杨 斌, 顾华志, 汪厚植, 等 (156)
- ☆不同结合系统铝镁浇注料的性能研究
..... 王 玮, 汪厚植, 顾华志, 等 (164)
- ☆A Study on Synthetic Magnesium Aluminate Spinel from
Bauxite-magnesite and its Application
..... Wang Houzhi, Zhang Wenjie, Ding Kongqi, et al (173)
- ☆Properties and Microstructure of Metal Fe Reinforced
Unburned MgO-Al₂O₃ Brick for Cement Kiln
..... Gu Huazhi, Wang Houzhi, Yang Bin, et al (185)

第二部分 纳米材料及其应用

- ☆纳米技术在耐火材料中的应用研究
..... 汪厚植, 赵惠忠, 顾华志, 等 (201)
- ☆Sol-Gel-SCFD 法制备纳米莫来石
..... 赵惠忠, 雷中兴, 汪厚植, 等 (213)
- ☆气体种类对 CVD 法制备碳纳米管的影响研究
..... 计道珺, 李轩科, 汪厚植, 等 (223)
- ☆气体流量对多壁纳米碳管形貌和产率的影响
..... 计道珺, 李轩科, 汪厚植, 等 (229)
- ☆碳纳米管的制备与应用进展 陈华圣, 赵惠忠, 汪厚植 (235)
- ☆反应时间对 CVD 法制备多壁碳纳米管产率和形貌的影响
..... 计道珺, 李轩科, 汪厚植, 等 (244)
- ☆Magnetic Properties of Carbon Nanotubes Encapsulating
Nanosized Nickel Particles
..... Lei Zhongxing, Li Xuanke, Wang Houzhi, et al (250)
- ☆纳米 Al₂O₃ 和 SiO₂ 对刚玉质耐火材料烧结与力学性能的影响
..... 赵惠忠, 吴 斌, 汪厚植, 等 (259)

- ☆共沉淀法制备纳米镁铬尖晶石粉体
..... 邓勇跃, 汪厚植, 李平和, 等 (268)
- ☆溶胶浸渍对镁铬砖性能的影响
..... 邓勇跃, 汪厚植, 赵惠忠 (277)
- ☆硅铝凝胶粉结合 SiAlON 增强 Al_2O_3 -SiC-C 浇注料
..... 吕春燕, 汪厚植, 顾华志, 等 (287)
- ☆氯氧化锆前驱体制备纳米氧化锆的机理探讨
..... 唐勋海, 顾华志, 汪厚植, 等 (297)
- ☆氟树脂/硅溶胶复合涂层的制备和超疏水性能研究
..... 段 辉, 白 晨, 汪厚植, 等 (303)
- ☆含氟丙烯酸酯共聚物的制备及性能
..... 熊征蓉, 段 辉, 汪厚植 (311)
- ☆Influence of Chrome-bearing Sols Vacuum Impregnation on
the Properties of Magnesite-chrome Refractory
..... Deng Yongyue, Wang Houzhi, Zhao Huizhong (319)
- ☆Fabrication and Characterization of Mullite
Whisker-reinforced Porous Refractory
..... Zhang Meijie, Wang Houzhi, Gu Huazhi, et al (337)

第三部分 耐火材料数值模拟

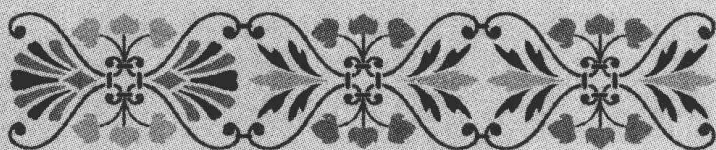
- ☆气幕挡墙技术优化多流中间包数模研究
..... 汪厚植, 黄 奥, 顾华志, 等 (345)
- ☆弥散型透气砖阻力系数的测试与分析
..... 张美杰, 汪厚植, 黄 奥, 等 (353)
- ☆气幕挡墙中间包夹杂物去除的水模型研究
..... 黄 奥, 汪厚植, 顾华志, 等 (361)
- ☆多孔介质模型在底吹精炼过程数值模拟中的应用
..... 张美杰, 汪厚植, 黄 奥, 等 (369)
- ☆底吹中间包气泡运动过程的数模研究
..... 黄 奥, 汪厚植, 张美杰, 等 (380)

- ☆利用红外热像技术监测钢包内衬厚度
..... 孟庆新, 张美杰, 汪厚植, 等 (389)
- ☆透气砖对底吹中间包钢液流动特性影响的水力学模拟
..... 张美杰, 汪厚植, 黄 奥, 等 (397)
- ☆气幕挡墙对中间包内钢液流场影响的数值模拟
..... 张美杰, 汪厚植, 顾华志, 等 (407)
- ☆底吹中间包内钢液及夹杂物运动特性的数模研究
..... 张美杰, 汪厚植, 黄 奥, 等 (418)
- ☆中间包吹氩技术的研究进展
..... 张美杰, 汪厚植, 顾华志, 等 (426)
- ☆Optimization of Melted Iron Flow Behavior in Torpedo with
Gas Blowing at Bottom
..... Huang Ao, Gu Huazhi, Wang Houzhi, et al (435)
- ☆底吹氩钢包内衬蚀损行为的数值模拟研究
..... 顾华志, 黄 奥, 汪厚植, 等 (445)
- ☆中间包底吹氩行为的数值模拟
..... 张美杰, 汪厚植, 顾华志, 等 (454)
- ☆Numerical Simulation of Temperature Field and Thermal
Shock Resistance Property of Permeable Brick
..... Gu Huazhi, Wang Houzhi, Zhang Meijie, et al (464)
- ☆Finite Element Analysis on Temperature-stress of Permeable
Refractory Ceramic under Working Process in Ladle
..... Gu Huazhi, Huang Ao, Wang Houzhi (472)

第四部分 其他相关材料

- ☆用 X 射线探讨硅酸铝耐火纤维的玻璃结构
..... 汪厚植, 尚野茫, 庞 科 (483)
- ☆国外玻璃窑用耐火材料的发展..... 汪厚植, 丁孔奇, 汪治宽 (488)
- ☆国外连续铸钢用耐火材料的发展 汪厚植 (500)
- ☆改性煤沥青炭化产物结构和性能 王周福, 汪厚植 (510)

☆利用添加物提高沥青结合耐火材料性能的研究	王周福, 汪厚植 (516)
☆湿法合成锆刚玉莫来石熟料	李亚伟, 汪厚植, 邱国恒 (525)
☆自蔓延高温合成 β -SiC 超细粉	杨林福, 汪厚植, 顾华志 (535)
☆提高镁质浇注料抗热震性的研究	张海萍, 汪厚植, 顾华志, 等 (542)
☆ ZrB_2 系陶瓷材料的研究进展	吕春燕, 顾华志, 汪厚植, 等 (546)
☆添加熔融石英提高黏土质浇注料抗热震性的研究	舒友亮, 汪厚植, 顾华志, 等 (559)
☆ Li_2O - MgO - Al_2O_3 - SiO_2 系高温低膨胀釉的制备及性能研究	秦常杰, 汪厚植, 顾华志 (568)
☆对叔丁基苯甲醛改性沥青性能研究	辛占武, 汪厚植, 段 辉, 等 (576)
☆几种分散剂对硅微粉悬浮液分散性的影响	薛海涛, 汪厚植, 顾华志, 等 (585)
☆高碳化硅铁沟渣线自流浇注料的研究	邓良奎, 汪厚植, 顾华志, 等 (593)
☆聚丙烯酸酯/ TiO_2 - SiO_2 纳米复合胶乳的制备与性能研究	柯昌美, 汪厚植, 赵惠忠, 等 (602)
☆超临界流体干燥法制备超细钙钛矿型 $LaMnO_{3+\lambda}$	余高奇, 赵惠忠, 张光德, 等 (612)
☆机械合金化制备 FeSiAl 合金粉末的研究	邱翠榕, 汪厚植, 顾华志, 等 (623)
☆矿物多元掺和料配制混凝土应用性能研究	李世秋, 汪厚植, 胡新民 (630)



第一部分

尖晶石合成原料 及其制品



MgO-MgAl₂O₄ 系统耐火材料的 性能与显微结构^①

汪厚植

摘 要：本文论证几组由纯度不同的原料，以不同生产方式制备的 MgO-MgAl₂O₄ 系统耐火材料的性能和显微结构之间的关系。直接结合镁铝砖具有高耐火度、高热稳定和高荷重软化的性能，它可以由纯原料或用添加氧化铬矿物来制备。铬矿在烧成时起着晶芽的作用，并阻止 Al₂O₃ 进入熔体。镁铝砖的高热稳定性应归结于其线膨胀系数低及其在热冲击下的稳定性裂纹扩张。镁铝砖荷重软化试验时的真实流变速度，可以认为在一定温度范围内具有纯黏性的性状，借此可以求出流变的实验活化能。

On the Performance and the Microscopic Constitution of Refractories in the Magnesia Spinel (MgO-MgAl₂O₄) Series

Wang Houzhi

Abstract: This paper deals with an investigation on the performance and the microscopic constitution of a number of refractories in the magnesia spinel (MgO-MgAl₂O₄) series prepared from raw materials varying in their grade of purity and manufactured by different processes. So far as the high refractoriness, the high thermal stability and the high softening point under load of the magnesia spinel brick are concerned, it is possible to prepare

① 本文是作者根据在德国克劳斯达尔大学硅酸盐工业研究所 (Institute Fuer Steine Und Erden T U Clausthal) 完成的博士论文改写成的，作者衷心感谢亨尼克教授和莱尔斯教授的指导，衷心感谢提供样品和帮助的单位和个人。

them either by using highly purified raw materials or by adding chromite. The chromite serves as seed crystals and an inhibitor keeping Al_2O_3 from entering the melt. The magnesia spinel brick owes its high thermal stability to its low coefficient of expansion and the steadiness of its crevice development under thermal shock. The actual rheological speed measured in the refractoriness test under load for the magnesia spinel brick can be assumed as purely viscous nature from which the empirical energy of activation can be estimated.

»» 1 引 言

含镁铝尖晶石的镁质耐火材料（简称镁铝砖）以热稳定性优良而闻名。中国、欧洲和苏联都生产这类砖，将其用于冶金工业和水泥工业。尤其是中国，创造性地大量生产平炉炉顶镁铝砖，使之成为我国耐火材料的主要品种之一。

本工作的目的是通过对镁铝砖的某些性能和显微结构的研究，探索其规律，为制造性能更优良的镁铝砖提供启示。

真尖晶石（ MgAl_2O_4 ，简称为 MA）是 $\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3$ 系统中唯一的化合物，熔点 2135°C ^[1,2]，该系统的低共熔点为 2030°C （55% Al_2O_3 和 45% MgO ）和 1925°C （98% Al_2O_3 和 2% MgO ）^[1]。尖晶石能吸收较多的 Al_2O_3 形成固溶体，这时 Mg 离子部分被 Al 离子所取代。 MgO 只有在高温下才少量溶于 MA 尖晶石中。

尖晶石生成的动力学研究^[3~6]表明，在 $\text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3 = \text{MgAl}_2\text{O}_4$ 固相反应中，扩散过程起着决定性作用。大的氧离子在尖晶石晶格中看成是不运动的，因此它的生成速度是由较慢运动的阳离子穿过已形成的尖晶石隔离层的速度所决定的。在 1900°C 以下的氧化气氛中， MgO 和 Al_2O_3 只在界面上反应，在 H_2 或低 O_2 气压下，出现通过气相的反应，这里主要是 MgO 能蒸发或通过气相传送。

不同作者^[1,7,8]给出的反应速度是：在 $1000 \sim 1200^\circ\text{C}$ 下生成速度较小，在 $1500 \sim 1600^\circ\text{C}$ 下反应进行较快，在 1500°C 下尖晶石的生成基本上能完成。另外，在 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 向 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 的转变区，即约 1000°C 时，反应进行较快^[1]。按化学分子量计算的混合物制备尖晶石的初

期,可能生成 Al_2O_3 过量的尖晶石^[9]。按理论计算,在 $\text{MgO} + \alpha\text{-Al}_2\text{O}_3 = \text{MgAl}_2\text{O}_4$ 反应中,反应产物相对于反应物线膨胀系数约 2.3%^[1]。

矿化剂对尖晶石形成和烧结性能影响的研究^[8~10]表明,少量的其他氧化物的加入对尖晶石的形成和烧结起着从强烈促进直至阻碍作用的不同效应。少量铬矿对有 MgO 过剩的尖晶石的烧结有利。在 1350℃ 时,铬矿完全熔于 MA 尖晶石晶格之中。

尖晶石是立方晶格。由高 Al_2O_3 含量的组分和 MgO 生成的 MA,倾向于生成巢状晶体。晶体一般是很小的(约 10 μm),其值与反应温度密切相关^[11,12]。

尖晶石晶格可以吸收显著数量的相应离子半径的其他离子,形成固溶体,这是与晶格的显著变宽相联系的。MA 和 $\text{MgO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ 及 $\text{MgO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$ 是完全固溶的。MA 的结构虽是一种不太紧密的堆积,并且其阳离子是比较活动的,但组成 MA 的 MgO 和 Al_2O_3 在气氛变化时不发生变价,所以仍然具有很好的化学稳定性。与铬矿相比,MA 硬度大,并在氧化和还原气氛中都十分稳定。

尖晶石的密度是 3.55g/cm³^[1],线膨胀系数几乎和刚玉一样,明显比方镁石小。例如在 25 ~ 800℃ 下, $\alpha_{\text{MA}} = 8.94 \times 10^{-6}$, $\alpha_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 8.5 \times 10^{-6}$, $\alpha_{\text{MgO}} = 14.04 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ^[13]。它的热导率是很低的,如在 200℃ 时为 49.0kJ/(m · h · °C)^[14]。它的弹性模量与烧成温度密切相关,在 1770℃ 下烧成的致密尖晶石的 $E = 2.38 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$,完全致密尖晶石(气孔率=0)的 $E = 3.05 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ 。

与方镁石比,MA 具有线膨胀系数低得多及在高温和还原气氛下更加稳定的长处。两者的密度和弹性模量几乎相等,而热导率、热容和熔点 MA 都较低^[1,10,17,18]。与刚玉相比,MA 熔点稍高,但强度较低^[9]。

$\text{MgO-MgAl}_2\text{O}_4\text{-Al}_2\text{O}_3$ 系统耐火材料可分为尖晶石基、含尖晶石碱性材料和含尖晶石刚玉材料^[9,19,20,21]。

加入少量的铬矿、氧化铝或尖晶石,能改善镁砖的热稳定性,这是众所周知的^[19,22~25]。自 1932 年以来,奥地利-美国镁砖股份公司生产添加 2% ~ 6% 煅烧氧化铝、矾土或铝粉的特种镁砖“Radex A”,



具有比镁砖好得多的热稳定性。

镁铝砖还可以用预烧成或熔融 MA 尖晶石以及用含 MA 尖晶石碱性熟料来制造^[26~31]。

» 2 原 料

制作试样的原料为普通海水镁砂（记为 MS）、高纯镁砂（RMS）和煅烧 Al_2O_3 （A），其化学成分如表 1 所示。对其矿物成分进行计算^[19]，并用 X 射线分析进行验证，结果如表 2 所示。原料的物理性能如表 3 所示。

表 1 原料的化学成分

原 料	化 学 成 分					
	MgO/%	Al ₂ O ₃ /%	SiO ₂ /%	CaO/%	Fe ₂ O ₃ /%	$\frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2}$
镁砂 MS	96.6	0.17	0.71	2.31	0.18	3.3
高纯镁砂 RMS	98.7	0.07	0.25	0.71	0.16	2.8
煅烧 Al ₂ O ₃ A	—	99.6	0.03	—	—	$\frac{\text{Na}_2\text{O}}{\text{SiO}_2}$ <0.1

表 2 原料的矿物成分（%）

原料	方镁石	C ₃ S	C ₂ S	C ₄ AF	C ₃ A	CA	MA
MS	96.6 +	2.63 +	0.06 —	0.55 —	0.15 —	—	—
RMS	98.66 +	—	0.72 痕迹量	0.49 —	—	0.03 —	0.29 —
A	仅有 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ，没有 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$						

注：“+”表示为 X 射线分析所证实；“—”没有或没有被证实；

$\text{C}_3\text{S} = 3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ， $\text{C}_2\text{S} = 2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ， $\text{C}_4\text{AF} = 4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ ， $\text{C}_3\text{A} = 3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ， $\text{CA} = \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 。