

耐火浇注料及其 技术发展

王诚训 贺文贵 宋希文 编著
刘世年 侯 谨 张义先



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

耐火浇注料及其 技术发展

王诚训 贺文贵 宋希文 编著
刘世年 侯 谨 张义先

北 京

冶 金 工 业 出 版 社

2015

内 容 提 要

本书以耐火浇注料为主题,全面介绍了 $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 耐火浇注料、 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Spinel (MgO)}$ 耐火浇注料、特殊应用耐火浇注料、碱性耐火浇注料、复合耐火浇注料和高性能隔热耐火制品的技术路线、选料原则、配制原理、凝结硬化机理、高温物理化学变化、主要性能以及影响因素,并扼要说明了耐火浇注料的应用情况。

本书可供从事耐火浇注料研究、开发、设计、生产和应用的工程技术人员使用,也可供大专院校有关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

耐火浇注料及其技术发展/王诚训等编著. —北京:
冶金工业出版社, 2015. 4
ISBN 978-7-5024-6873-6

I. ①耐… II. ①王… III. ①耐火浇注料—技术发展—研究 IV. ①TQ175. 73

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 06296/ 号

出 版 人 谭学余
地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926
网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcs@cnmp.com.cn
责任编辑 于昕蕾 美术编辑 彭子赫 版式设计 孙跃红
责任校对 李 娜 责任印制 李玉山
ISBN 978-7-5024-6873-6

冶金工业出版社出版发行; 各地新华书店经销; 北京百善印刷厂印刷
2015 年 4 月第 1 版, 2015 年 4 月第 1 次印刷
148mm×210mm; 8. 375 印张; 246 千字; 255 页
29.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn
冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893
冶金书店 地址 北京市东四西大街 46 号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)
冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgy.tmall.com

(本书如有印装质量问题, 本社营销中心负责退换)

前 言

耐火浇注料是用耐火骨料、粉料、添加剂并加入一定量结合剂和水配制的不定形耐火材料。它具有较高的流动性，适宜用浇注方法施工，并无须加热即可硬化。一般在使用现场以浇注、震动或捣固的方法浇注成型，也可以制成预制件使用。它是一种生产工艺简单、节能、材料利用率高、施工简便与高效，经过浇注（施工）成型和烘烤后能直接使用的新型耐火材料。

随着高温熔炼材料工业特别是冶金工业的快速发展和改善，对耐火浇注料的要求也越来越高。采用优质原料（包括超细粉）、新型结合剂、高效加入剂、最佳化的颗粒组成以及完善的施工工艺（包括施工装备），使耐火浇注料的开发取得了巨大进步。

（1）耐火浇注料已进入高温环境（1600~1700℃），并在使用中也取得了良好的效果，而且即使在熔渣或者碱的化学侵蚀和高温气流冲刷、高温熔体冲击、急剧热震等恶劣的使用环境中使用时，其寿命都有所改进。

（2）耐火浇注料已从传统耐火浇注料（CC）发展到低水泥（LCC）甚至超低水泥（ULCC）、无水泥（NCC）耐火浇注料。这些耐火材料具有更好的热力学性能和抗侵蚀性能。同时，自流耐火浇注料（SFRC）和泵送耐火浇注料以及耐火喷射料的开发应用，为高温窑炉中难以施工的部位如拐角、狭缝、孔洞等部位的施工提高了可靠性，而且还可以保证质量，使用效果突出。

（3）高性能合成原料如 Al_2O_3 基、 MgO 基等合成原料和非氧化物合成原料以及微粉（ uf-SiO_2 、 $\text{uf-Al}_2\text{O}_3$ 和 $\rho\text{-Al}_2\text{O}_3$ ）的规模化

工业生产,使高技术耐火材料的生产有了可利用的高性能原料基础。

根据使用条件的不同,自流耐火浇注料、泵送耐火浇注料和喷射耐火浇注料等这些高性能耐火浇注料经常用来代替传统的振动耐火浇注料。通过应用粉体力学、胶体化学、流变学和热力学等理论以及配方的扩展方法等,进行耐火浇注料的配方设计,在充分考虑拟合的累积粒度分布(PSD)的情况下,根据MPT(骨料颗粒表面最大浆体厚度)分析和基质的流变性状(包括IPS(指基质粒子间的距离)的影响)进行性能调节,从而可配制出现代高性能耐火浇注料。同时,在大力开发碱性耐火浇注料和复合(氧化物同非氧化物组合)耐火浇注料的条件下,不断增加了新的耐火浇注料品种,通过对耐火浇注料应用技术的研究,扩大了其应用范围。

本书对近年来耐火浇注料的新技术、新工艺、新发展及其应用作了系统的介绍:

(1)在对组合原料进行仔细平衡的同时,对粒度组成进行精心优化(PSD),从而设计出高性能耐火浇注料。

(2)选择更合适的结合系统和大量使用微粉,从而满足了高强度和高抗蚀能力耐火浇注料的生产要求。对于含有 SiO_2 、 Al_2O_3 组分的结合系统的耐火浇注料,则调整其相对含量达到最佳的 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ 比例范围;对于含水泥结合系统的耐火浇注料来说,则控制其水泥用量,从而使材料获得了最佳化的抗渣性。

(3)通过大量使用碳和/或非氧化物等提高了耐火浇注料的抗热震性和抗渣性,从而满足了材料能适用于高温炉窑关键部位的要求。

(4)根据不同的使用条件,应用纳米技术,向耐火浇注料中引入纳米材料分布于基质中,提高了材料的使用性能,从而延长

高温窑炉的使用寿命。

随着高性能耐火浇注料的品种不断增加和推广应用，大大降低了耐火材料的消耗，明显延长了高温窑炉的使用寿命。

在本书的编写过程中，参阅了全国耐火材料学术会议相关资料和耐火材料方面的报刊，在此向有关作者致谢。同时得到了陈晓荣、康伟、赵亮、祝立丰等同志的关心和帮助，在此向他们表示衷心的感谢。

由于水平所限，书中有不妥之处，恳请读者不吝赐教。

作 者

2014 年 11 月

目 录

1 耐火浇注料及其演变	1
2 耐火浇注料制造技术	7
2.1 耐火浇注料的分类	8
2.2 耐火浇注料的配方设计	9
2.3 原材料的选择	10
2.3.1 主原料的选择	10
2.3.2 结合系统的组合	15
2.3.3 特殊添加材料	18
2.3.4 表面活化剂	20
2.4 颗粒分布	24
2.5 耐火浇注料的施工技术	30
2.5.1 用水量的控制	30
2.5.2 混合及混合机理	32
2.5.3 耐火浇注体的干燥	35
2.6 高性能耐火浇注料	38
2.6.1 自流耐火浇注料	38
2.6.2 泵送耐火浇注料	43
3 $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 耐火浇注料	46
3.1 全铝耐火浇注料	46
3.1.1 全铝耐火浇注料的配方设计	47
3.1.2 全铝耐火浇注料的施工技术	49
3.2 刚玉耐火浇注料	51
3.2.1 刚玉耐火浇注料设计原则	51

3.2.2	活性填料的作用	52
3.2.3	刚玉耐火浇注料施工性能	52
3.2.4	刚玉耐火浇注料硬化机理	54
3.2.5	刚玉耐火浇注体(件)的干燥	57
3.2.6	含水泥刚玉耐火浇注料	57
3.2.7	无水泥刚玉耐火浇注料	64
3.3	硅铝耐火浇注料	65
4	Al_2O_3-MgO 耐火浇注料	69
4.1	Al_2O_3 -Spinel(MgO)耐火浇注料设计原理	69
4.2	Al_2O_3 -Spinel(MgO)耐火浇注料的类型	71
4.2.1	Al_2O_3 -Spinel 耐火浇注料	71
4.2.2	Al_2O_3 - MgO 耐火浇注料	78
4.2.3	Al_2O_3 -Spinel- MgO 耐火浇注料	81
4.3	Al_2O_3 -Spinel(MgO)耐火浇注料在钢包上的应用	81
4.3.1	包壁用 Al_2O_3 -Spinel(MgO)耐火浇注料	84
4.3.2	包底用 Al_2O_3 -Spinel(MgO)耐火浇注料	86
4.3.3	冲击区用 Al_2O_3 -Spinel(MgO)耐火浇注料	90
4.3.4	钢包用铝矾土-Spinel(MgO)耐火浇注料	94
4.4	Al_2O_3 -Spinel- CA_6 耐火浇注料	96
5	特殊应用耐火浇注料	98
5.1	氧化气氛熔融炉用含 Cr_2O_3 耐火浇注料	98
5.1.1	含 Cr_2O_3 耐火浇注料的选择	98
5.1.2	关于 Cr_2O_3 含量	103
5.1.3	Cr_2O_3 - Al_2O_3 耐火浇注料的配制	106
5.1.4	Cr_2O_3 - Al_2O_3 耐火浇注料在熔融炉上的应用	109
5.1.5	Al_2O_3 - Cr_2O_3 耐火浇注料在炭黑反应炉中的应用	114
5.2	Spinel- Cr_2O_3 耐火浇注料	117
5.3	Al_2O_3 - Cr_2O_3 - ZrO_2 耐火浇注料在熔融炉上的应用	119

5.4	ZrO_2 耐火浇注料	120
5.4.1	ZrO_2 原料的类型	120
5.4.2	铝酸钡(锶)水泥结合 ZrO_2 耐火浇注料	122
5.5	Al_2O_3 - SiO_2 - ZrO_2 耐火浇注料	125
6	碱性耐火浇注料	130
6.1	碱性耐火浇注料需要解决的问题	130
6.1.1	水化反应及其控制技术	131
6.1.2	碱性耐火浇注料的抗渗透性	132
6.1.3	MgO - Al_2O_3 材料的膨胀性	134
6.2	镁质耐火浇注料	136
6.2.1	全 MgO 质耐火浇注料	137
6.2.2	MgO - SiO_2 结合 MgO 耐火浇注料	140
6.2.3	MgO 耐火自流浇注料	146
6.3	MgO -熔融石英耐火浇注料	148
6.4	MgO - Al_2O_3 - SiO_2 耐火浇注料	150
6.5	MgO -Spinel(Al_2O_3)耐火浇注料	151
6.6	MgO -Spinel- CaO 耐火浇注料	157
6.7	MgO -Spinel- ZrO_2 耐火浇注料	157
6.7.1	基础研究	157
6.7.2	MgO -Spinel- ZrO_2 耐火浇注料配制原则	159
6.7.3	原料选择	161
6.7.4	MgO -Spinel- ZrO_2 耐火浇注料的应用	163
6.8	MgO -Spinel(Al, Ti)耐火浇注料	166
6.9	MgO - CaO 耐火浇注料	169
6.9.1	MgO/CaO 比对 MgO - CaO 砂抗水化的影响	169
6.9.2	添加物对 MgO - CaO 砂抗水化性的影响	171
6.9.3	MgO - CaO 砂颗粒表面覆膜	172
6.9.4	MgO - CaO 耐火浇注料的配制	173

7 复合耐火浇注料	176
7.1 $\text{Al}_2\text{O}_3(-\text{SiO}_2)-\text{SiC}$ 耐火浇注料	176
7.1.1 SiC 原料的选择	176
7.1.2 $\text{Al}_2\text{O}_3(-\text{SiO}_2)-\text{SiC}$ 耐火浇注料的设计	183
7.1.3 $\text{Al}_2\text{O}_3(-\text{SiO}_2)-\text{SiC}$ 耐火喷射料和自流/泵送料	188
7.2 A-C-S 耐火浇注料	191
7.2.1 概述	192
7.2.2 原料的选择	193
7.2.3 A-C-S 耐火浇注料的类型	219
7.3 $\text{Al}_2\text{O}_3(-\text{SiO}_2)-\text{Spinel}(\text{MgO})-\text{SiC}-\text{C}$ 耐火浇注料	221
7.3.1 $\text{Al}_2\text{O}_3-\text{Spinel}-\text{SiC}-\text{C}$ 耐火浇注料	221
7.3.2 $\text{Al}_2\text{O}_3-\text{MgO}-\text{SiC}-\text{C}$ 耐火浇注料	226
7.3.3 $\text{Al}_2\text{O}_3-(\text{MgO}/\text{Spinel})-\text{SiC}-\text{C}$ 材料中 SiC 的氧化行为	229
7.4 $\text{Al}_2\text{O}_3-\text{MgO}-\text{C}$ 耐火浇注料	231
7.5 碳复合碱性耐火浇注料	234
7.5.1 $\text{MgO}-\text{C}$ 耐火浇注料	235
7.5.2 $\text{MgO}-\text{Spinel}(\text{Al}_2\text{O}_3)-\text{C}$ 耐火浇注料	241
8 高性能隔热耐火浇注料	243
8.1 氧化铝空心球耐火浇注料	243
8.2 铝钙多孔耐火浇注料	245
8.2.1 CA_6 的合成	245
8.2.2 CA_6 微孔耐火制品	246
8.2.3 CALSITHERM 制品	247
8.3 轻质镁质耐火浇注料	249
参考文献	251

1 耐火浇注料及其演变

耐火材料按形状可以粗略地分为定形耐火材料 and 不定形耐火材料（或称散状耐火材料），其中，不定形耐火材料包括耐火浇注料、耐火喷涂料、耐火捣打料、耐火可塑料、耐火投射料、耐火压入料、耐火火泥（耐火胶泥）、耐火泥浆、耐火干式混合物（或称耐火干振料）、耐火涂层以及陶瓷纤维等多个品种。

普通水泥混凝土在建筑环境低于 400℃ 的民用建筑和工业建筑中已长期使用，当使用温度高于这个温度时，由于混凝土会产生膨胀、断裂并失去强度，因此需采用耐热混凝土来满足使用温度超过 400℃ 的工业领域。

铝酸钙水泥的生产和应用，为高温工业应用领域提供了良好的水化结合系统。随着铝酸钙水泥强度和质量的不断提升，耐火浇注料的应用也越来越广。低水泥和超低水泥浇注料的开发与性能的提高，替代了部分定形制品。形成了近 30 年以来，耐火材料工业发展中，不定形耐火材料超过定型耐火制品的格局。无水泥可泵送和自流浇注料的开发，进一步增加了浇注料的应用。湿式喷涂工艺施工技术的采用，其施工体具有喷涂和浇注的优点，使不定形耐火材料的应用达到了新的水平。采用这一新工艺后，不仅耐火材料制造费用低、能源与资源消耗少，也能使耐火材料用户节省劳动力、易于修补、提高生产效率。

随着高温熔炼工业特别是冶金工业的快速发展和改善，对不定形耐火材料的要求也越来越高。由于采用优质原料（包括超细粉）、新型结合剂、高效加入剂、最佳化的颗粒组成以及完善的施工工艺（包括施工装备），使不定形耐火材料（特别是耐火浇注料）的开发取得了巨大进步。主要特点是：

（1）工厂占地面积小，投资少，能耗低；生产过程简单，工艺控制要求严格，劳动强度低；供货周期短；适应性强，可制成任意形

状的构筑物；施工方便，可直接使用或调配后使用；使用方便，可进行在线或离线修补；构筑物体整体性好；制造成本低，利润高。现场拆卸施工须用专用设备。

(2) 不定形耐火材料（特别是耐火浇注料）已进入高温环境（1600~1700℃），并在使用中取得了良好效果，即使在熔渣或者碱的化学侵蚀和高温气流冲刷、高温熔体冲击、急剧热震等恶劣的使用环境中使用时，其寿命都有所提高。

(3) 耐火烧注料已从传统耐火烧注料（CC）发展到低水泥（LCC）甚至超低水泥（ULCC）、无水泥（NCC）耐火烧注料。这些耐火材料具有更好的热力学性能和抗侵蚀性能。同时，自流耐火浇注料（SFRC）和泵送耐火浇注料以及耐火喷射料的开发应用，为高温窑炉中难以施工的部位如拐角、狭缝、孔洞等部位的施工提高了可靠性，而且还可以保证质量，使用效果突出。

(4) 高性能合成原料如 Al_2O_3 基、 MgO 基等合成原料和非氧化物合成原料以及微粉（ uf-SiO_2 、 $\text{uf-Al}_2\text{O}_3$ 和 $\rho\text{-Al}_2\text{O}_3$ ）已能工业化生产，从而使高技术耐火浇注料材料的生产有了可利用的高性能原料基础。

耐火浇注料进一步发展的目标是开发使用效果更好，制造成本较低，具有更高的使用性能，能承受更加恶劣使用条件的所谓高技术耐火浇注料。为了达到这一目标，需要从以下几个方面进行研究和创新：

(1) 在对组合原料进行仔细平衡的同时，对粒度组成进行精心优化（PSD）是设计高性能耐火浇注料的重要条件。

(2) 选择更合适的结合系统和适量的微粉是满足生产高强度和高抗蚀能力耐火浇注料的重要要求。对于含有 SiO_2 、 Al_2O_3 组分的结合系统的耐火浇注料，则应使其相对含量调整至最佳的 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ 比例范围；对于含水泥的结合系统的耐火浇注料来说，则需要控制水泥用量以便能获得最佳的抗渣性。

(3) 使用碳或非氧化物等来提高耐火浇注料的抗热震性和抗渣性，以使之适用于高温炉窑关键部位的衬体。

(4) 根据不同的使用条件，应用纳米技术，向耐火浇注料中引

入纳米材料分布于基质中,以提高其使用性能,延长高温窑炉的使用寿命。

另外,大力开发施工技术和高性能装备,同时结合自流耐火浇注料、可泵送耐火浇注料和喷射耐火浇注料的使用,为实现更加简单、可靠的施工工艺提供更好的条件。

在耐火浇注料(根据触变性能和流变性能,耐火浇注料可细分为振动耐火浇注料、自流耐火浇注料、泵灌耐火浇注料以及喷射耐火浇注料,其中,自流耐火浇注料、泵灌耐火浇注料以及喷射耐火浇注料属于现代高性能耐火浇注料)的应用中,应用量较大的耐火喷涂料,其技术已得到了快速发展。

耐火浇注料成分中的 CaO 几乎全部来自水泥(纯铝酸钙水泥,简称为 CAC,本书无特别指明时均指 CAC)结合剂,因而往往根据材料中 CaO 含量来划分耐火浇注料的类型:

耐火浇注料的类型	CaO 含量 (质量分数)/%	简写 (代号)
传统耐火浇注料	>2.5	CC
低水泥耐火浇注料	$1.0 \sim 2.5$	LCC
超低水泥耐火浇注料	$0.2 \sim 1.0$	ULCC
无水水泥耐火浇注料	<0.2	NCC

另外,化学或者有机结合等耐火浇注料,在 CaO 含量(质量分数)小于 0.2% 的情况下,也可广义地将它们列入无水水泥耐火浇注料范畴(非水泥结合耐火浇注料)。

在不定形耐火材料的发展中,结合剂和添加剂的使用是关键,最初,使用的耐火浇注料属于传统耐火浇注料[水泥用量超过 8% (一般为 12% ~ 30%,即耐火浇注料成分中的 CaO 含量大于 2.5%)],需要多量的混合水(达 9% ~ 13%)才能制成具有浇注性能的浆体,结果导致了耐火浇注构件或者衬体的高气孔、低强度。为了获得高强度,不得不增加水泥用量。在这种情况下,虽然改善了耐火浇注料的低温性能,但多量水泥的使用(导致更多混合用水量的增加),又导致耐火浇注体产生了更多的气孔,结果却并未使材料的中温性能和高温性能有实际的改变,从而限制了其总体应用。

为了克服传统耐火浇注料这些缺点,法国在1969年首先提出通过添加软质黏土和反絮凝剂等方法将水泥使用量降低到8%以下,而初始(烘干)强度不会降低,同时改善了材料的高温性能。然而,由于这类耐火浇注料使用软质黏土代替部分水泥使用量,所以浇注体仍需要用较长的时间进行干燥,而且开裂和剥落等问题也没有得到根本的解决,这就给实际生产和使用带来许多不便,妨碍了耐火浇注料的进一步推广应用。

通过进一步研究,法国于1977年又提出采用超微粉技术和高效表面活性剂,配制出可实际应用的低水泥耐火浇注料(水泥用量小于8%,用水量低至7%,耐火浇注料中CaO含量小于2.5%)。在这类耐火浇注料中, SiO_2 、 Al_2O_3 和 MgO 都被用于耐火浇注料。由于 SiO_2 资源丰富并且价格合适,所以大部耐火浇注料使用了 SiO_2 。为了使耐火浇注料易于流动, SiO_2 则以超细粉(u f-SiO_2)形式取代部分水泥结合剂。可见,这类低水泥耐火浇注料是使用了超微粉技术和高效表面活性剂的耐火浇注料。因此其用水量减少,气孔率降低,密度和强度增加。同时,由于水泥用量受到了控制而且在硬化过程中也只是部分水化,所以其中温阶段没有强度损失。同时,由于颗粒级配精细优化后,颗粒间的空隙几乎被超微粉全部填充,因而其用水量已降低到4%~7%,其组织结构致密,气孔率低,体积稳定性好,而且具有强度高、耐磨损、抗侵蚀等优点。根据其材质,可分为硅铝质低水泥耐火浇注料、莫来石质低水泥耐火浇注料、刚玉低水泥耐火浇注料和尖晶石质低水泥耐火浇注料等。

超微粉技术和高效表面活性剂并用的低水泥耐火浇注料具有良好的触变性,即混合浆料有一定的形态,稍加外力便开始流动,解除外力则可保持已经获得的形态,所以这类耐火浇注料又可称为触变性耐火浇注料,自流耐火浇注料也属于触变性耐火浇注料范围。

在20世纪70年代后期,相继开发了超低水泥耐火浇注料(CaO含量为0.2%~1.0%)和无水泥耐火浇注料(CaO含量小于0.2%)。其技术路线是,通过超微粉和高效表面活性剂的使用以及颗粒分布的优化,从而开发出新一代耐火浇注料,使低水泥耐火浇注料达到了系列化。这类超低水泥耐火浇注料和无水泥耐火浇注料集多



数耐火浇注料的优点于一身，具有高密度、低气孔率、高强度、低磨损性、耐热震性高和抗侵蚀强等优点，属于高性能耐火材料范畴内的一类材料，因而可以将它们称为高技术耐火浇注料、高性能耐火浇注料、致密耐火材料、低气孔耐火材料和低水分耐火材料等。

20 世纪 80 年代，低水泥耐火浇注料得到了迅速发展，其性能达到了烧成制品的水平，而使其应用范围迅速普及到高温工业领域，并获得了良好的使用效果。

硅胶作为耐火浇注料的结合剂的原理是溶胶 - 凝胶技术。采用该技术的材料具有易于成型、均匀性好、烧结温度低等优点。其组织结构特征是耐火浇注料中硅胶 - 凝胶包围耐火颗粒，经过干燥以后，凝胶结合的骨架（颗粒）形成初始强度，而且由于材料缺少 CaO ，因而具有较佳的高温强度。在 20 世纪 80 年代初期，开始使用硅胶作为耐火浇注料的结合剂，从而给这类耐火材料带来了巨大变化。硅胶取代纯铝酸钙水泥（CAC）所配制的耐火浇注料具有 LCC 和 ULCC 的所有优点。因为硅胶作为结合剂的耐火浇注料只需很少的混合时间，而且干燥时间短，材料的高温强度大，抗热震性好，热导率低；同时不受施工时添加剂的影响，还改善了材料的一些施工及应用性能。

20 世纪 80 年代以后，开发出自流浇注料（FSRC）的结合系统，从而导致耐火浇注料技术的重大突破。FSRC 的优点是很好地解决了热工设备的拐角、狭缝、孔洞等难施工部位筑衬的难题。后来发展起来的泵送耐火浇注料和喷射耐火浇注料，为筑衬技术革新提供了有利条件，也为耐火浇注料有效应用提供了更多的空间。

可见，系统的上述改进和发展导致了普通耐火浇注料（CC）向 LCC 以及 ULCC 的发展。然而，这类硅铝材料中含有 CaO 而使其 1500°C 时的强度明显下降，这便限制了它们在与熔渣接触的环境中的应用。为了克服这一缺点，在 20 世纪 80 年代，使用 uf-SiO_2 特别是采用硅胶作为结合剂的无水泥耐火浇注料（NCC）的开发，促进了耐火浇注料的发展。因为 NCC 具有 LCC 和 ULCC 的所有优点并克服了它们的大部分缺点。其特点是 NCC 中硅胶 - 凝胶包围耐火颗粒，经干燥后，凝胶骨架结合颗粒形成了初始强度。由于 $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 系材料中缺少了 CaO ，避免了材料高温强度下降的问题。

硅胶结合的耐火浇注料有更好的黏结性和自流性,因而其施工性能也不受影响。硅胶结合的耐火浇注料的技术发展将可泵送的耐火材料推向了市场。从1989年开始,硅胶结合的耐火浇注料便开始了工业应用,特别是复合耐火浇注料,例如 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-SiC}$ -C系中的可泵送耐火材料的应用都非常成功。

近二十多年来,由于硅胶、铝溶胶(应用溶胶-凝胶)技术的应用促进了LCC和ULCC的发展,通过调整粒度使其可泵送,从而拓宽了传统耐火浇注料不适合应用的部位。喷射技术为LCC开辟了另一个应用天地,改善了施工,降低了成本。

目前,自流耐火浇注料、泵送耐火浇注料和喷射耐火浇注料等这些高性能耐火浇注料常用来代替传统的振动耐火浇注料。通过应用粉体工学、胶体化学、流变学和热力学等理论以及配方的扩展方法学等,进行耐火浇注料的配方设计,在充分考虑拟合的累积粒度分布(PSD)的情况下,根据MPT分析和基质的流变性状(包括IPS的影响)进行性能调节,从而可配制出现代高性能耐火浇注料。同时,在大力开发碱性耐火浇注料和复合(氧化物同非氧化物组合)耐火浇注料的条件下,不断增加了新的耐火浇注料品种,通过对耐火浇注料应用技术的研究,扩大了其应用范围。

通常,耐火浇注料呈原始状态向用户供货,只有采取浇注施工的成型构件才是通过干燥以后提供给用户使用的;而浇注施工的整体内衬都是在现场施工的,其干燥、烧成则是在热工窑炉使用前进行烘烤或者在使用过程中先进行预烘烤后直接投入使用,烘烤和使用是连续进行的。

2 耐火浇注料制造技术

浇注料的生产是指骨料与基质的混练，其颗粒尺寸可以在较大范围内变化。一般骨料的颗粒尺寸为 $0.075 \sim 8\text{mm}$ ，基质颗粒尺寸可以小到 $0.1\mu\text{m}$ ，这些组分的混练与方法及其均匀程度对获得设计的期望性能尤为重要。每一尺寸段的颗粒尺寸分布必须稳定以获得良好的性能。混合料的总体颗粒尺寸分布以及颗粒尺寸分布的一致性对材料的质量有一定影响。浇注料可以是能够施工的预混合好的混合料，也可在施工现场与结合剂一起混合后施工，还可以制成不同尺寸和形状的预制件，并通过一定的热处理后即可直接投入使用。

一般情况下，浇注料的密度、气孔率及相关物理性能与产品的颗粒尺寸分布有关，因此骨料的加工，必须选择合适的破粉碎设备，将原料破碎成所需要的不同粒度的颗粒。细磨一般采用球磨机、管磨机、辊磨机或振动球磨机更为有效。

配料的精确与均匀混料是浇注料生产的又一重要方面。近几年来，组成耐火浇注料的微细颗粒和添加少量的化学添加剂对耐火浇注料的性能和应用非常重要。混料工序和混料设备不仅要使最终产品均匀，而且要避免配料中质量轻、粒度小者的损失。由于细小颗粒的损失或分散不均匀，不仅影响产品性能，而且会造成配料之间的差异。因此干混时，既要保证配料精确、混料均匀，又要避免成分损失，基质料与结合剂及少量添加剂采取预混合。

耐火浇注料的蚀损机理取决于材料的主成分及特定工艺的不同使用环境，耐火浇注料的蚀损形式主要为：磨蚀、渗透、侵蚀、腐蚀、剥落。为达到材料期望的使用效果，除了对颗粒加工、配料混练控制外，所采用的各种物料质量也必须严格控制，并对浇注料的流动性、常温强度、高温抗折强度和抗渣侵蚀/腐蚀性进行测试。

随着低水泥浇注料的开发应用，预制件的用量显著增加，并广泛应用于各行业。用于生产不同尺寸和结构的预制件的低水泥浇注料必