



上海市科学技术协会
“晨光计划”资助出版

Tie Shui Tuo Liu
Pen Qiang
Yong
Xin Xing
Nai Huo Cai Liao
Yan Jiu

李江 李楠 著

铁水脱硫喷枪用 新型 耐火材料研究

上海科学普及出版社

铁水脱硫喷枪用新型 耐火材料研究

李 江 李 楠 著

上海科学普及出版社

图书在版编目(CIP)数据

铁水脱硫喷枪用新型耐火材料研究/李江,李楠
著. —上海:上海科学普及出版社,2007.2
ISBN 978-7-5427-3609-3

I. 铁... II. ①李...②李... III. 铁水—脱硫—喷
枪—耐火材料—研究 IV. TF345

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 154392 号

责任编辑 史炎均

铁水脱硫喷枪用新型耐火材料研究

李江 李楠 著

上海科学普及出版社出版发行

(上海中山北路 832 号 邮政编码 200070)

<http://www.pspsh.com>

各地新华书店经销

商务印书馆上海印刷有限公司印刷

开本 787×1092 1/16 印张 9.5 插页 4 字数 215 000

2007 年 2 月第 1 版 2007 年 2 月第 1 次印刷

印数 1-1500

ISBN 978-7-5427-3609-3/N · 101 定价: 35.00 元

本书如有缺页、错装或损坏等严重质量问题

请向出版社联系调换



上海科技发展基金会(www.sstdf.org)的宗旨是促进科学技术的繁荣和发展,促进科学技术的普及和推广,促进科技人才的成长和提高,为推动科技进步,提高广大人民群众的科学文化水平作贡献。本书受“上海科技发展基金会”资助出版。

“上海市科协资助青年学者出版科技 著作晨光计划”出版说明

“上海市科协资助青年学者出版科技著作晨光计划”由上海市科协和上海科技发展基金会主办,上海科学普及出版社协办。该计划定向资助 40 周岁以下的上海青年学者出版首部个人原创性科技著作,旨在支持和激励学有所成的上海青年学者著书立说,加快培养青年科技人才的成长,切实推动“科教兴市”战略的实施。该计划每年资助不超过 5 人,每人资助 1 500 册以内的出版费用。申请资助的作者需要通过其所在学会(协会、研究会)向上海市科协学术部推荐,申请表
下载网址: www.sast.stn.sh.cn。

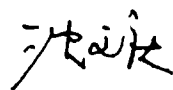
总 序

尊重知识、尊重人才,在积极发现、培养、使用、凝聚优秀科技人才的同时,大力促进创新人才特别是年轻人才脱颖而出,是推动科技进步和创新的重要任务,也是上海市科学技术协会及其所属科技团体的重要职责。上海市科协联合上海科技发展基金会、上海科学普及出版社,新推出的“上海市科协资助青年学者出版科技著作晨光计划”,是履行这一职责的重要体现。

上海是我国科技人才集聚和青年科技人才涌现的地区之一。上海的青年科技工作者,长期以来为贯彻实施“科教兴国”战略,推动科技进步和创新,在科研和教学实践中默默耕耘,逐渐形成了一些新的工作成果,推出了不少新的学术思想,然而,这些优秀青年想要为自己的创新成果或创新思想著书立说,却受到资金、渠道等多种因素的困扰。“上海市科协资助青年学者出版科技著作晨光计划”,就是为这些优秀青年科技人才而设立的,就是要雪中送炭,支持和鼓励学有所成、干有所长的上海青年科技人才著书立说,从而促进青年科技人才的成长,繁荣学术交流,加快科学技术新思想、新方法和新知识的传播。

众人拾柴火焰高,科学事业的繁荣要依靠社会各界的关心和支持,尤其需要科技团体发挥独特作用。纵览目前国内的资助出版项目有很多,但“上海市科协资助青年学者出版科技著作晨光计划”在资助青年学者出版首部个人原创性科技著作上具有鲜明的特色。我衷心希望这项计划的实施,能对上海青年科技人才的成长有所帮助,能向世界展示上海青年科技人才的新面貌。

上海市科学技术协会主席



序

李江博士出版《铁水脱硫喷枪用新型耐火材料研究》，请我写序。作为一名长期从事钢铁工业的工程技术人员，在此发表几点感想。

耐火材料是高温工业的基础材料，发展新型优质高效耐火材料、改善耐火制品质量，对推动和保证冶金等相关行业的技术进步和节能降耗有重大意义。

伴随着我国钢铁生产与科技持续高速地发展，耐火材料技术取得了很大的进步。在 21 世纪中，耐火材料发展的重点目标是“更长寿、无污染、功能化”，为钢铁工业的发展提供有力的支撑。近年来，这几个方面的进步是显著的。虽然有了这些进步，但从整体上看我国耐火材料装备与科技水平与国际先进水平还有差距，尤其是一些关键的功能性耐火材料（如薄板坯连铸用浸入式水口、超微孔碳砖等）还需与国外进行技术合作。为了适应钢铁生产与科技快速发展的要求，除了继续满足当前高炉长寿、连铸高效化的耐火材料要求外，我们还应该关注钢铁流程优化对耐火材料提出的新要求，确定科技开发的重点。

铁水预处理是我国日益普及的钢铁工艺流程，李江博士对铁水脱硫喷枪用耐火材料进行了研究，并开创性地应用有限元分析研究了喷枪枪体内的温度与应力分布，将此研究结果与材料的研究结合起来，得到了包括从枪体结构到材料组成与显微结构等方面的组合研究成果，从而提高对喷枪结构及材料的设计水平。

李江博士，作为一名青年技术人员，学习努力，知识面广，钻研精神很突出，很有敬业精神，事业心强，从事炼钢及耐火材料等技术工作近 20 年，著述颇多。李江博士的《铁水脱硫喷枪用新型耐火材料研究》对冶金工程、耐火材料等专业的科研、工程技术人员和教学人员，以及研究生都是很有价值的参考书。

原中国金属学会副理事长

中国金属学会荣誉会员

资深炼钢专家

陈祖康

2006 年 12 月 23 日

前 言

铁水脱硫是现代钢铁工业生产优质钢材的必要手段。铁水脱硫喷枪质量将影响生产成本,而且,频繁更换喷枪会对提高生产效率起到极大的阻碍作用。因而,延长喷枪的使用寿命,对铁水脱硫作业乃至整个炼钢流程的稳定性有着重要的意义。

喷枪损坏的主要原因是开裂,即热震损坏。过去的工作大量集中在通过改善喷枪用莫来石质浇注料的组成结构来提高其热震稳定性。由于对喷枪在烘烤与工作条件下枪体内的温度与应力的分布情况不了解,常出现一些相互矛盾的研究结果,取得的实际效果也不大。为此作者应用有限元分析研究了在烘烤与使用条件下喷枪枪体内的温度与应力分布,将此研究结果与材料的研究结合起来,得到了包括从枪体结构到材料组成与显微结构等方面的组合研究成果,从而提高对喷枪结构及材料的设计水平。在此基础上研究开发出的脱硫喷枪寿命有较大幅度的提高,并获湖北省科技进步三等奖(编号:2004 J-240-3-140-030)。本书将这些结果介绍给读者是为了得到大家的指正与帮助,也希望引起冶金及耐火材料界同行的注意,有更多的人投入到相关的研究工作中来。

本书共分7章:第1章介绍了铁水脱硫以及脱硫喷枪用耐火材料、耐火材料有限元热分析与热应力的基础知识及研究现状。第2、3、4章用XRD、SEM、EPMA、DSC-TG及热力学计算等方法对铁水脱硫喷枪用莫来石质浇注料进行了研究,探讨了红柱石、碳化硅和金属硅对莫来石质浇注料性能的影响。第5、6章是针对铁水脱硫喷枪结构的特点,利用有限元技术完整地仿真分析了脱硫喷枪在其制作过程的预热烘烤工作状况和生产使用过程的脱硫工作状况的温度场与应力场。第7章为全书的结论。

本书的完成是基于作者的博士学位论文。整书也倾注了导师李楠教授的心血和汗水。在此,对导师的悉心指导和热情关怀致以衷心的感谢!同时武汉科技大学李远兵教授给予了耐心的指导,韩兵强博士、戚建强硕士以及华中科技大学王学林副教授与王兴东博士、陈峰军硕士参与了有关课题的研究。作者在此一一表示感谢!中国地质大学沈上越教授、武汉理工大学陈文教授、华中科技大学谢长生教授、胡于进教授、湖北大学程时远教授、武汉科技大学孔建益教授、柯昌明教授、陈奎生教授和武汉钢铁公司喻承欢教授级高工、欧阳德刚教授级高工对本书提出了宝贵意见。

研究耐火材料的有限元热分析与热应力不仅涉及冶金学科、耐火材料学科的知识,还涉及机械学科的知识。作者知识有限,书中不足之处敬请读者批评指正。

李 江

目 录

第 1 章 引言	1
§ 1.1 铁水炉外喷粉预脱硫	1
1.1.1 铁水炉外喷粉脱硫的发展概况	1
1.1.2 铁水炉外喷粉脱硫的技术优势	2
1.1.3 我国发展铁水炉外喷粉脱硫的重要意义	3
§ 1.2 铁水脱硫喷枪工作条件	4
1.2.1 机械作用	4
1.2.2 热机械应力作用	5
1.2.3 化学侵蚀作用	8
§ 1.3 铁水脱硫喷枪用浇注料	9
1.3.1 浇注料的发展概况	9
1.3.2 低水泥浇注料的硬化与强度	11
1.3.3 浇注料热震稳定性研究	12
1.3.4 莫来石质浇注料	13
1.3.5 喷枪用浇注料材质方面的研究	16
1.3.6 喷枪结构的研究	19
1.3.7 复相材料增韧理论	20
1.3.8 过渡塑性相工艺	21
§ 1.4 耐火材料有限元热分析与热应力分析	23
1.4.1 有限元原理概述	23
1.4.2 有限元热分析基础	24
1.4.3 有限元热应力分析的基础	29
1.4.4 有限元法在耐火材料中的应用	30
1.4.5 基于有限元的数值仿真技术	35
1.4.6 有限元热分析与热应力分析的国内外研究概况	36
1.4.7 ANSYS 软件的简介	36
§ 1.5 存在的问题	38
1.5.1 多相材料本身的性能	38
1.5.2 有限元分析计算	38
1.5.3 利用计算结果来进一步延长高温部件的寿命	39
1.5.4 实际情况下温度和应力的测量	39

§ 1.6 本文的主要内容	40
1.6.1 优化配置研究	40
1.6.2 有限元热分析与热应力分析	40
第2章 喷枪新型耐火材料的基础研究之一	
——红柱石的添加	41
§ 2.1 基质研究	41
2.1.1 概述	41
2.1.2 实验	41
2.1.3 实验结果与讨论	42
§ 2.2 红柱石的分解研究	44
2.2.1 概述	44
2.2.2 实验	45
2.2.3 实验结果与讨论	45
§ 2.3 红柱石对莫来石质浇注料性能的影响	46
2.3.1 概述	46
2.3.2 实验	47
2.3.3 结果与讨论	48
2.3.4 微观结构分析	53
§ 2.4 本章小结	55
第3章 喷枪新型耐火材料的基础研究之二	
——碳化硅对莫来石质浇注料性能的影响	56
§ 3.1 碳化硅粉料在莫来石质浇注料基质中的氧化行为研究	56
3.1.1 概述	56
3.1.2 实验	56
3.1.3 实验结果	58
§ 3.2 碳化硅细粉对莫来石质浇注料性能的影响	62
3.2.1 概述	62
3.2.2 实验	63
3.2.3 实验结果	63
3.2.4 分析与讨论	65
3.2.5 显微结构分析	66
§ 3.3 碳化硅微粉对莫来石质浇注料性能的影响	69
3.3.1 概述	69
3.3.2 实验	69
3.3.3 实验结果	70

3.3.4 分析与讨论	71
3.3.5 显微结构分析	71
§3.4 碳化硅细粉对添加有红柱石的莫来石质浇注料试样性能的影响	72
3.4.1 实验	73
3.4.2 实验结果	73
3.4.3 分析与讨论	74
3.4.4 显微结构分析	75
§3.5 本章小结	76
 第4章 喷枪新型耐火材料的基础研究之三 ——结晶硅对莫来石质浇注料性能的影响	77
§4.1 结晶硅的氧化行为研究	77
4.1.1 概述	77
4.1.2 实验	77
4.1.3 实验结果	78
4.1.4 烧后试样物相分析	81
§4.2 结晶硅对浇注料性能的影响	82
4.2.1 实验	82
4.2.2 实验结果与讨论	83
4.2.3 显微结构分析	85
§4.3 本章小结	89
 第5章 喷枪整体仿真建模与结果分析	90
§5.1 脱硫喷枪的建模	90
5.1.1 喷枪结构概述	90
5.1.2 喷枪的三种分析模型	90
5.1.3 喷枪的材料模型特点	92
§5.2 喷枪的载荷工作状态	95
5.2.1 喷枪在烘烤预热工作状态下的热边界	95
5.2.2 喷枪在脱硫工作状态下的热边界	95
5.2.3 喷枪在热应力分析时的结构边界条件	97
§5.3 脱硫喷枪的仿真分析若干问题的实现方法	97
5.3.1 加载随温度变化对流的方法	97
5.3.2 加载辐射热载荷的方法	98
5.3.3 热应力分析中的瞬态温度加载	100
§5.4 脱硫喷枪整体仿真分析	101
5.4.1 计算条件概述	101
5.4.2 喷枪在烘烤预热工作状态下随时间变化的喷枪温度与应力	102

5.4.3 喷枪在烘烤预热工作状况下恒温 450℃ 前后的热应力分布	103
5.4.4 喷枪在脱硫工作状况下各时刻的温度场	104
5.4.5 喷枪在脱硫工作状况下随时间变化的喷枪温度	106
5.4.6 喷枪在脱硫工作状况下在各时刻的应力场	107
5.4.7 喷枪在脱硫工作状况下随时间变化的喷枪热应力	109
§5.5 本章小结	111
第 6 章 影响喷枪热应力因素的分析	112
§6.1 耐火材料物理性能参数对脱硫喷枪热应力的影响	112
6.1.1 概述	112
6.1.2 物理性能参数对温度场的影响	112
6.1.3 物理性能参数对应力场的影响	113
6.1.4 复合层结构耐火材料对改善喷枪应力状态的作用	116
§6.2 芯管结构及布置对脱硫喷枪热应力的影响	118
6.2.1 概述	118
6.2.2 喷枪支撑结构形式改变对喷枪热应力的作用	118
6.2.3 喷枪几何结构参数对喷枪热应力的作用	118
6.2.4 增大支撑钢管与枪芯钢管外壁间距(无腹板)的效果	119
§6.3 耐火材料中锚固钢筋密度对脱硫喷枪热应力的影响	122
6.3.1 概述	122
6.3.2 SOLID65 单元的应用	122
6.3.3 结果比较	122
§6.4 本章小结	124
第 7 章 结论	125
附录一 热—结构分析的菜单与页面系统	127
附录二 三维有限元模型的自动生成 APDL 源程序	131
参考文献	134

第 1 章 引言

§ 1.1 铁水炉外喷粉预脱硫

高炉铁水炉外脱硫技术于 20 世纪 30 年代开始应用,60 年代氧气顶吹转炉炼钢工艺发展后得到迅速推广。采用铁水炉外脱硫技术既可大大减轻高炉脱硫负担,真正实现高产低耗,同时又可使转炉炼钢甩掉脱硫环节,改善连铸坯质量,提高成材率,也能实现高产低耗。而采用铁水三脱技术(包括同时脱硫、脱磷、脱硅),既可减轻转炉脱硅、脱磷任务,实现少渣或无渣炼钢,大大改善转炉炼钢的技术经济指标,又为经济地冶炼低磷、低硫优质钢提供了技术前提。目前铁水预处理技术在国外已属成熟技术,趋向从单一脱硫发展到同时进行铁水三脱。在我国一些企业炉外脱硫已大规模应用于生产,取得了显著的经济效益。

1.1.1 铁水炉外喷粉脱硫的发展概况

随着连铸技术的普遍采用和市场对汽车、石油、天然气管线以及电工用钢的质量要求日益苛刻,包括对钢的耐酸气腐蚀、高强度、超低碳等品质要求日益提高,世界各国钢铁工业都在努力通过降低钢中杂质特别是硫含量的途径来提高钢材质量。20 世纪 80 年代前期,欧洲生产的钢材中,大批量产品硫含量 $\leq 0.02\%$,小批量产品硫含量 $\leq 0.01\%$,少数优质钢硫含量 $\leq 0.005\%$ 。而到 1994~1995 年度时,约 70%的产品硫含量 $\leq 0.015\%$,约 50%的产品硫含量 $\leq 0.01\%$,约 28%的产品硫含量 $\leq 0.005\%$,约 10%的产品硫含量 $\leq 0.002\%$ ^[1]。为了适应低硫钢、超低硫钢生产的迅猛发展,作为一项引入生产中的重要技术,铁水脱硫得到不断发展和广泛应用。

铁水炉外脱硫技术处理工艺方法种类繁多^[2],约六类 16 种。先后发明的工艺有摇动法,包括瑞典的单向偏心摇动铁水罐法和日本神户川崎铁厂的可逆旋转式 DM 摇包法;机械搅拌法,有原联邦德国 DO(Demag-Ostberg)法、RS(Rheinstahl)法和赫歇法,日本新日铁的 KR(Kambara Reactor)法和千叶的 NP 法;吹气搅拌法,有新日铁的底喷(PDS)法和顶喷(CLDS)法;钟罩压入法,主要有美国简·劳夫林(Janes Laughlin)公司的镁焦法和其他镁系脱硫法;喷吹法,有原联邦德国蒂森(Thyssen)公司的斜插喷枪(ATH)法和新日铁的顶喷(TDS)法;炉前铁水沟连续脱硫法。

我国在 20 世纪 50 年代初期就开始用苏打铺撒法处理高硫铁水。但由于我国从平炉改造到转炉炼钢比较晚,因此铁水炉外脱硫到 70 年代才逐渐发展起来。至今,宝钢、武钢、鞍钢、攀钢、太钢、包钢、齐钢、大钢、上钢一厂、冷水江铁焦总厂、承钢、酒钢、宣钢、重钢、涟钢、

鄂钢等厂均建立了高炉铁水炉外喷吹脱硫站,还有不少厂家进行了工业试验研究。

20 世纪 70 年代初,原联邦德国的 SKW 公司和蒂森公司合作开发了在鱼雷罐中喷吹 CaO/CaC_2 粉剂脱硫方法;1971 年,日本新日铁公司实验成功了混铁车顶喷粉脱硫法。1976 年,美国科洛斯(Koros)获得了复合喷吹 CaO/Mg 粉剂铁水脱硫方法专利;直到 1983 年美国 EMS 公司采用更细的粉剂才使这一专利技术第一次工业应用成功。1985 年复合喷吹铁水脱硫技术传入欧洲,以后逐渐被越来越多的公司采用,技术和设备亦日趋完善。近十多年来世界上大多数改建或新建的铁水脱硫站都采用了铁水包复合喷吹 $\text{CaC}_2/\text{CaO}+\text{Mg}$ 的技术和设备,基本情况见表 1-1^[3]。

表 1-1 世界各国铁水脱硫情况

基本情况	西 欧	加 拿 大	美 国	日 本	中国宝钢
初始硫含量 (%)	0.03~0.05	0.04~0.06	0.04~0.06	0.02~0.04	0.025~0.03
终点硫含量 (%)	全量 ≤ 0.015 部分 ≤ 0.003	全量 ≤ 0.015 部分 ≤ 0.005	20% ≤ 0.003 20% ≤ 0.005 60% ≤ 0.015	全量 ≤ 0.015 部分 ≤ 0.005	目前 ≤ 0.007 目标 20% ≤ 0.003 80% ≤ 0.01
容器(鱼雷罐/铁水罐)	50/50 ↑	75/25 ↑	0/100	75/25 ↑	75/25
脱硫剂趋势	$\text{CaC}_2 + \uparrow \text{Mg} + \text{CaO}$	$\uparrow \text{Mg} + \text{CaO} + \downarrow \text{CaC}_2$	$\text{CaC}_2 + \text{CaO} + \text{Mg}$	$\text{CaO} + \uparrow (\text{Mg} + \text{CaC}_2)$	$\text{CaC}_2 + \text{CaO} + \uparrow \text{Mg}$

注:箭头 ↓、↑ 分别表示继续下降或上升。

1.1.2 铁水炉外喷粉脱硫的技术优势

理论研究及工业生产实践表明,无论从技术、经济效益及工艺结构合理性等方面考虑,采用铁水喷粉脱硫都是最佳选择。

铁水炉外脱硫预处理有以下一些特点。

- (1) 保留了与高碳含量、硫含量平衡的炉渣低氧势的优点,无论热力学及工艺条件较炼钢有利。
- (2) 利用冶金喷粉技术更容易实现连续可控地供料。
- (3) 利用气体喷射等手段,加大了渣—铁间接触面积,充分发挥了粉剂脱硫能力。
- (4) 铁水硫含量可以降到超低含量,有利于转炉冶炼优质钢和合金钢,有利于钢铁产品升级换代,生产出具有高附加值的优质钢材。
- (5) 能保证炼钢吃精料,降低转炉炼钢的生产成本,提高生产效率,降低炼钢能耗。
- (6) 可有效地提高铁、钢、材系统的综合经济效益。

哈伯特(M. A. Hubbard)等人^[4]根据脱硫材料和能耗的情况,以现场实际工艺参数为基准,分析了从高炉到钢包冶金各个环节的脱硫费用,其结果见表 1-2。从中可以看出以铁水炉外脱硫最为经济。

表 1-2 各环节脱硫费用(按脱去每千克硫计算)对比

项 目		最小费用 (美元)	最大费用 (美元)	条 件
高 炉		25	30	低硫焦(硫含量 0.45%),增加焦比进行低硫铁水操作
选择转炉料		9	135	低硫废钢(118 美元/吨、硫含量 0.015%)代替高硫废钢(115 美元/吨、硫含量 0.05%),低硫铁水(硫含量 0.005%)代替普通生铁(硫含量 0.04%)
铁水脱硫		8	13	硫含量从 0.047%脱至 0.005% 硫含量从 0.02%脱至 0.005%
转炉脱硫		43	311	硫含量 0.047%的铁水和硫含量 0.074%的废钢 硫含量 0.005%的铁水和硫含量 0.015%的废钢
出钢脱硫		16	35	原始硫含量 0.040%,出钢后硫含量脱至 0.031% 原始硫含量 0.017%,出钢后硫含量脱至 0.014%
钢 包 冶 金 脱 硫	钙—石灰—萤石	42	142	硫含量从 0.031%脱至 0.01% 硫含量从 0.014%脱至 0.01%
	石灰—萤石	5	56	硫含量从 0.031%脱至 0.01% 硫含量从 0.014%脱至 0.01%
	铝—石灰—萤石	35	87	硫含量从 0.031%脱至 0.01% 硫含量从 0.014%脱至 0.01%
	顶渣吹氩	25	120	硫含量从 0.031%脱至 0.01% 硫含量从 0.014%脱至 0.01%

对于铁水炉外喷吹脱硫技术来说,由于喷粉脱硫克服了反应面积小(即渣与金属界面小)以及硫从渣—金属界面向渣整体界面移动困难两大难点,可在铁水炉外脱硫时将铁水中的硫含量降至很低的水平,因而,自其发明后得到了迅速的发展,并在国内外许多钢铁企业得到广泛的应用与推广。

1.1.3 我国发展铁水炉外喷粉脱硫的重要意义

在我国,开展铁水炉外喷粉脱硫更具有特殊意义。首先,降低钢中硫含量对其成型性能、机械性能、加工性能等都有明显的改善(见表 1-3)^[5],可以给化工设备、远洋轮船、海上采油平台、输油(气)管等提供大量的高级优质钢材;其次,由于我国原料条件较差,采用铁水脱硫是优化现有流程和提高经济效益的一项重要措施。

表 1-3 降低钢中硫含量对钢材性能的影响

项 目	硫含量(%)		效 果
	原始含量	脱 硫 后	
连铸板坯裂纹	0.025~0.04	<0.015	有裂纹坯减少 80%
输油管表面缺陷	0.025~0.04	<0.015	报废率由 10%降至 1%

续 表

项 目	硫含量(%)		效 果
	原始含量	脱 硫 后	
冷成型材缺陷	0.018	0.009	报废率减少 90%
机械性能和抗腐蚀性能			
钢板厚度上延展性	0.02	0.003	断面收缩率增加 2~8 倍
调制钢锻造阀门韧性	0.04	0.003	增加 3 倍
X-65 管线钢韧性	0.019	0.003	增加 1 倍
船板钢激光焊接吸收性能	0.025~0.04	<0.015	增加 1 倍
2.25Cr-1Mo 阀门焊接吸收性能	0.008	0.003	约增加 3 倍
成型带钢针孔腐蚀和层状开裂	0.02	0.01	大大减少
低硫钢应用			
965 MPa 高强度层状开裂	0.008	0.002	减少
石油 C-90 套筒抗硫化物应力裂纹 (SSC)		0.001~0.005	保证抗 SCC 性能
大口径高强度管道		0.002~0.003	保证韧性和抗 SCC 性能
汽车薄板型毛边切边裂纹		<0.015	保证消除缺陷
汽车轮箍火花焊接成型缺陷		0.003	降低 5~10 倍

§ 1.2 铁水脱硫喷枪工作条件

喷枪是铁水脱硫的关键部件,它的使用寿命和性能直接影响到铁水脱硫技术的发展和应用。

铁水脱硫喷枪耐火材料损毁的主要原因有三种:机械作用、化学作用和热应力^[6-9],耐火材料损毁往往是三者综合作用的结果。机械作用与通过喷枪喷入铁水中的载气量、喷枪喷孔参数以及操作工艺密切相关,表现为强烈的震动和冲击式的机械负荷作用;热应力和化学作用则与耐火材料的性质、操作工艺有很大的联系。由化学作用引起的破坏形式称为化学侵蚀。化学侵蚀是指耐火材料同炉渣、铁水、脱硫粉剂、烟气等物质之间的(物理、化学)反应对喷枪枪体所造成的破坏,主要表现形式:渣蚀、熔蚀、铁水的渗透等。

1.2.1 机械作用

铁水搅混能量及流动状态

由于吹入脱硫粉剂的载气的冲击力以及气泡上升和膨胀,给铁水带来了很大的搅动能量^[9]。铁水的搅动特性是由通过喷枪喷孔喷吹的载气流控制的。当载气由喷枪喷孔喷吹到铁水中时,由于其机械动能的作用,立即在铁水内形成向上弯曲的锥形流股,受铁水的阻挡而分散成小流股和气泡,并夹带周围的熔体上浮,发生动量交换,同时在流股四周形成逆向压力差,喷孔区形成相对低压区,处理器皿内其他部位为相对高压区,从而造成铁水喷孔区与载气流股界面成垂直的方向流动。当气液两相混合流体冲击铁水表面时,气泡从两相

流体中分离出来,铁水向四周循环运动,喷溅到喷枪枪体上,使其受到化学侵蚀;同时,铁水在搅动过程中,对喷枪枪体造成强烈的机械冲刷作用,加速了熔渣对喷枪耐火材料层表面的化学侵蚀。

清理喷孔时的机械震动

由于在喷吹过程中,不可避免地要生成脱硫产物,再加上在脱硫操作时,喷孔附近铁水的回灌,在喷孔易生成结瘤,所以需要不断地清理,此时的机械震动力对喷孔附近的耐火材料破坏作用相当大。当喷孔附近耐火材料变质层达到一定程度时,在这种机械作用下,往往容易发生突发性剥落,对喷枪寿命影响极大。

1.2.2 热机械应力作用

衡量耐火材料质量的一个重要指标是衡量它在加热和冷却时对温度急剧变化引起的破坏的抵抗能力,该能力称之为抗热震性^[10]。

耐火材料是一种非均质的脆性材料^[11],其弱点是韧性与抗热震性比金属材料差。在间歇式生产设备中,由于耐火材料承受着周期性的温度剧变,热剥落与结构剥落严重,其抗热震性的好坏往往是决定其使用寿命的主导因素。

耐火材料的抗热震性可以看作是表征耐火材料抵抗温度急剧变化而不破坏的能力强弱的一个实用参数。冶金部标准“YB3T6”用对标准砖(一端)受“1 100℃—水冷”循环至受热端面破坏 50% 的次数来表征耐火材料的抗热震性;德国标准“DIN51068”则规定用对 50 mm×50 mm 的圆柱体(烧成砖)或对类似 1/4 标准砖(不烧制品及碱性砖)依次进行“950℃—水冷”或者“950℃—风冷”循环的破坏次数来表征耐火材料的抗热震性。

据估计,大约有 1/3 的耐火材料在远远低于耐火度(或熔点)的温度下因抗热震性差而发生损坏。耐火材料热损毁主要与材料使用过程中产生的热应力有关。热应力对材料的影响不仅决定于热震条件、应力大小、分布和持续时间,而且还取决于材料的性质,其中包括塑性、均匀性以及存在裂纹的大小、数量和类型等。热应力分为两种类型:第一类应力,是因温度梯度引起的,即温度应力;第二类应力,是因非均质现象、线性热膨胀、化学反应、多晶转化等导致体积膨胀或收缩引起的,这些应力在恒温时,也称为化学—结构应力。

热应力

一般来讲,材料的抗热震可以分为两大类:一类是发生瞬时断裂,抵抗这类破坏是抗热震断裂;另一类是在热冲击循环作用下,材料表面开裂、剥落并不断扩展,以致最终断裂而损坏,这类破坏的抵抗性称为抗热震损伤。不少研究者都曾经企图从理论上导出陶瓷与耐火材料处于脆性阶段的抗热震性与其他性质之间的关系。但是,由于热应力对材料的影响不仅决定于热震条件、应力大小、分布和持续时间,而且还决定于材料的性质,其中包括塑性、均匀性以及存在的裂纹大小、数量和类型等。因此,企图用一个适用于任何情况的定量关系式或热震参数来计算、预测材料的抗热震性都是困难的。有关材料的热震理论主要有两种:以金格瑞(Kingery)^[12]为代表的热弹性理论和以哈塞尔曼(Hasselmann)^[13]为代表的能量