

RAL · NEU 研究报告 No.0024

搪瓷钢的产品 开发及机理研究

TANGCIGANG DE CHANPIN KAIFA JI JILI YANJIU

轧制技术及连轧自动化国家重点实验室
(东北大学)



冶金工业出版社
www.cnmp.com.cn

RAL · NEU 研究报告 No. 0024

搪瓷钢的产品开发及机理研究

轧制技术及连轧自动化国家重点实验室
(东北大学)

北 京

冶 金 工 业 出 版 社

2016

内 容 简 介

本研究报告介绍了东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室在搪瓷钢理论研究及产品开发方面的最新进展。报告内容主要分为4个部分,其中第2章为热轧搪瓷钢的组织性能研究;第3、4章为低碳、超低碳冷轧搪瓷钢组织及性能研究;第5章为钢中的氢渗透行为机理及实验研究;第6章为涂搪工艺对低碳搪瓷钢组织性能的影响。报告中介绍的研究工作大部分已经在工业化生产中得到了推广应用,产生了显著的社会经济效益。

本报告可供材料、冶金、化工等部门的科技人员及高等院校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

搪瓷钢的产品开发及机理研究/轧制技术及连轧自动化
国家重点实验室(东北大学)著. —北京:冶金工业出版社,
2016. 12

(RAL·NEU 研究报告)

ISBN 978-7-5024-7432-4

I. ①搪… II. ①轧… III. ①搪瓷—钢—产品开发—
研究 IV. ①TQ173 ②TG161

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 315192 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

策 划 任静波 责任编辑 卢 敏 夏小雪 美术编辑 彭子赫

版式设计 彭子赫 责任校对 卿文春 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-7432-4

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;固安华明印业有限公司印刷

2016 年 12 月第 1 版,2016 年 12 月第 1 次印刷

169mm×239mm;8 印张;122 千字;112 页

48.00 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 yjgycbs.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

研究项目概述

1. 研究项目背景与立题依据

本项研究工作的背景是课题组与企业合作的科研项目，这些项目包括与马钢合作的家电用搪瓷钢机理研究及其关键性能评价，与唐山国丰钢铁公司合作的新型系列冷轧搪瓷用钢研究开发。这些研究工作均涉及搪瓷钢轧制及退火工艺、氢在钢中渗透行为及析出粒子等方面的研究内容。

热轧搪瓷钢板是近些年开发并开始使用的经济型环保类型产品，主要应用于建筑设施、消防设施、家电、石油化工设施等。我国传统搪瓷制品的主要生产商大多为中小型企业，其生产的产品多为日用搪瓷制品和搪瓷玻璃化工制品等。如搪瓷化工反应釜、搪瓷玻璃制品储存容器、搪瓷冷凝器等则主要是以热轧搪瓷钢板为生产原料的，随着我国化工产业的发展，这部分制品的市场需求也逐年增加。且搪瓷制品的应用范围已经开始呈现着多元化的方向发展，向生活中的各个领域扩展。

从研究现状来看，国内相关机构对搪瓷专用钢板的研究大多针对热轧搪瓷用钢板和超低碳冷轧搪瓷用钢板开展，为获得稳定的第二相作为“氢陷阱”大都添加了 Nb、V、Ti 或 RE 等合金元素。而对于优化低碳冷轧搪瓷用钢成分，控制 S、Mn 和 B 等元素含量，利用珠光体、渗碳体和 MnS 作为“氢陷阱”，并且系统研究热轧和退火工艺参数对搪瓷用钢综合性能的影响，深入探讨钢中不同类型的第二相对成型性能和抗鳞爆性能影响的报道尚比较少见。

2. 研究进展与成果

本项研究工作最早开始于 RAL 国家重点实验室承担的与唐山国丰钢铁公司合作的项目。搪瓷钢的轧制及退火工艺控制与钢中析出物控制研究，其难点在于通过对轧制退火及析出物的控制，既要保证搪瓷钢的抗鳞爆性能，又要保证搪瓷钢的高成型性能。课题组通过与唐山国丰钢铁公司及马鞍山钢铁

股份有限公司的合作项目，对这些问题进行了系统研究并取得了重要进展。

以下是本项研究工作的具体研究内容和主要研究结果：

(1) 在实验室研究了模拟搪瓷烧制工艺对热轧搪瓷钢的组织演变和力学性能的影响规律，并分析热轧搪瓷钢中存在的各类型第二相粒子。结果表明：热轧搪瓷板组织以铁素体为主，经模拟搪烧后，随搪烧时间的延长，铁素体晶粒尺寸呈增大趋势。随着搪烧温度的升高，保温时间延长，实验钢的强度逐渐下降，塑性提高。确定了最佳的搪烧温度。同时，也可适当提高 C 含量，调整工艺，提高原板的强度。

(2) 以低碳且适当增加 S、Mn 含量为基础，设计了不添加 B 和添加微量 B 元素及只添加 Ti 元素的 3 种低碳搪瓷实验钢。通过实验室条件下的工艺模拟，研究了热轧及退火工艺对实验钢组织性能的影响。对含 Ti 超低碳搪瓷钢进行了罩式退火和连续退火工艺研究，对其进行了力学性能测试，并利用光学显微及电镜对实验钢的显微组织及微观织构进行了研究。结果表明：

1) 含 B 低碳搪瓷钢在不同温度罩式退火获得的均为单相铁素体组织，且分布均匀，晶粒尺寸在 $10\sim 50\mu\text{m}$ 范围。在 $620\sim 710^\circ\text{C}$ 退火后，强度随着温度的升高逐渐下降。 n 值在 710°C 退火后升高为 0.22，退火后的断后伸长率在 $9.6\%\sim 18.5\%$ 。确定了 2 号实验钢的罩式退火工艺为 $710\sim 730^\circ\text{C}$ ，保温 5h。

2) 在退火温度由 650°C 升至 730°C 过程中，低碳搪瓷钢的氢渗透时间有着明显的降低。在 2 号实验钢中添加了合金元素 Ti，会和钢中的 S、C 形成大量粗大弥散的第二相粒子 $\text{Ti}_4\text{C}_2\text{S}_2$ ，提高钢板的贮氢性能，因此添加微量合金元素 Ti，可以有效提高实验钢的氢渗透时间。

3) 超低碳搪瓷钢连退组织主要以铁素体为主，晶粒尺寸为 $5\sim 30\mu\text{m}$ ，晶内析出物尺寸随着保温温度的升高而增大。提高均热温度，可使力学性能得到优化，晶粒尺寸增大， γ 织构加强。延长均热阶段的保温时间也有利于 γ 织构的增强以及力学性能的优化。确定了连续退火工艺中最佳制度为 850°C 均热并保温 60s。实验钢经 730°C 罩式退火后的力学性能最佳，随着退火温度的升高，力学性能得到优化，晶粒尺寸增大， γ 织构强度逐渐增加。

4) 随着退火温度的改变，织构以 γ 纤维织构为主， α 纤维织构始终很弱，而 γ 纤维织构很强。随着退火温度的升高，氢渗透时间 t_h 缩短。

5) 在采用两种退火工艺的超低碳搪瓷钢中均存在大量析出物，其中小尺

寸的析出物为 $\text{Ti}(\text{C}, \text{N})$ ，大尺寸的析出物主要为 $\text{Ti}_4\text{C}_2\text{S}_2$ 和 MnS 。在连续退火工艺中，随着均热温度的升高及保温时间的延长，析出物经过聚集长大，尺寸均有明显的增大。与连续退火相比较，罩式退火后的析出物由于保温时间长，得到充分的长大，其尺寸及体积分数大于连续退火后的实验钢。

(3) 研究了超低碳冷轧搪瓷用钢中析出相尺寸和分布的影响，分析了 $\text{Ti}_4\text{C}_2\text{S}_2$ 和 $\text{Ti}(\text{C}, \text{N})$ 析出粒子对钢板抗鳞爆性能的影响规律和机理。

1) 实验钢的组织均以铁素体为主，SPCC 及宝钢 2.0 钢中，在晶界处可观察到少量珠光体，STC1 中没有珠光体，组织更加细小。M380AS 实验钢铁素体组织明显更加细小，具有一定含量的珠光体，晶界处存在明显的粗条状渗碳体。DC01 实验钢组织以等轴铁素体为主，晶粒尺寸稍大于宝钢 2.0 实验钢。

2) 含有 Ti、Nb 的搪瓷专用钢板 M380AS 的 H 渗透时间 t_b 明显大于其他试样，钢中含有较多的“氢陷阱”，可提高抗鳞爆性能指标。实验钢中的 MnS 、 TiN 、 $\text{Ti}(\text{C}, \text{N})$ 等析出物作为“氢陷阱”，使氢渗透的能力降低。析出物 TiS 和大量的位错都起到了“氢陷阱”的作用，有效提高实验钢的抗鳞爆性能。

3. 论文

(1) 董福涛，杜林秀，王晓南，刘相华，焦景民. 退火温度对 DC03EK 搪瓷钢组织性能的影响 [J]. 材料热处理学报，2012，33 (10): 74~79.

(2) Dong Futao, Du Linxiu, Liu Xianghua, Jiao Jingmin. Influence of sulfur and manganese contents on texture and fish-scale resistance of DC03EK cold-rolled enamel steel [J]. Materials Science Forum, 2013, 749: 337~342.

(3) Dong Futao, Du Linxiu, Liu Xianghua, Hu Jun, Xue Fei. Effect of Ti (C, N) precipitation on the texture evolution and fish-scale resistance of ultra-low carbon Ti-bearing enamel steel [J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2013, 20 (4): 41~47.

(4) Dong Futao, Du Linxiu, Liu Xianghua, Xue Fei. Optimization of Chemical Compositions in Low-carbon Al-killed Enamel Steel Produced by Ultra-fast Continuous Annealing [J]. Materials Characterization, 2013, 84: 81~87.

(5) 董福涛, 杜林秀, 刘相华, 薛飞. 连续退火工艺对含 B 搪瓷用钢组织性能的影响 [J]. 金属学报, 2013, 49 (10): 1160~1168.

(6) 董福涛, 杜林秀, 刘相华, 薛飞. 退火方式对含硼冷轧深冲搪瓷钢组织性能的影响 [J]. 东北大学学报, 2014, 34 (10): 1412~1415.

(7) Dong Futao, Du Linxiu, Liu Xianghua, Xue Fei. Effect of hot-strip coiling temperature on microstructure and properties of boron containing enamel steel [J]. Materials Research Innovations, 2015, 18 (S4): S4-290~S4-294.

(8) 袁晓云, 杜林秀, 董福涛. 退火温度对 DC05EK 搪瓷用钢贮氢性能的影响 [J]. 东北大学学报, 2014, 34 (12): 1716~1720.

(9) 张宜, 吴红艳, 吴桐, 张麒, 杜预, 杜林秀. 搪瓷烧制工艺对 210MPa 搪瓷钢组织与性能的影响 [J]. 金属热处理, 2016, 41 (8): 94~98.

(10) 张宜, 吴红艳, 张麒, 杜预, 董福涛, 杜林秀. 搪瓷钢焊缝处瓷釉层凹坑缺陷形成原因分析 [J]. 物理测试, 2016, 34 (4): 48~52.

4. 项目完成人员

本项研究工作的参加人员主要是课题组的几位老师和研究生。报告的撰写由吴红艳老师带领几位博士生完成, 杜林秀老师提出了很多建议。第 1 章由吴红艳撰写, 第 2、6 章由吴红艳、吴桐撰写, 第 3、4、5 章由吴红艳、董福涛、王晓南、袁晓云撰写, 杜预负责格式和文字校对, 整篇报告由吴红艳主编。

主要完成人员	职 称	单 位
吴红艳	副教授	东北大学 RAL 国家重点实验室
杜林秀	教 授	东北大学 RAL 国家重点实验室
董福涛	副教授	华北理工大学
王晓南	副教授	苏州大学
袁晓云	博士生	东北大学 RAL 国家重点实验室
杜预	博士生	东北大学 RAL 国家重点实验室
吴桐	工程师	沈阳黎明航空发动机集团公司

5. 报告执笔人

吴红艳、杜林秀、董福涛、吴桐、杜预。

6. 致谢

本项研究工作的背景是课题组与企业合作的科研项目，这些项目包括与马钢合作的家电用搪瓷钢机理研究及其关键性能评价，与唐山国丰钢铁公司合作的新型系列冷轧搪瓷用钢研究开发。这些研究工作均涉及搪瓷钢轧制及退火工艺、氢在钢中渗透行为及析出粒子等方面的研究内容。在研究工作的进行过程当中，除了课题组成员的努力工作之外，还得到了实验室领导、同事，以及合作企业的相关领导和工程技术人员的帮助与支持，这些帮助与支持对于上述科研项目的顺利完成和在析出理论研究上取得一定程度的进展是非常重要的。

轧制技术及连轧自动化国家重点实验室的领导对于我们的研究工作从方向的把握到具体的实验均给予了细致周到的关心与指导，在此表示由衷的感谢！同时，还要感谢实验室的多位老师，感谢大家在实验研究工作过程中给予的大力支持与帮助！

目 录

摘要	1
1 绪论	4
1.1 搪瓷用钢的国内外研究现状	5
1.2 化学成分设计的基本思路	8
1.3 本项目研究内容	9
2 热轧搪瓷钢的组织性能研究	11
2.1 实验材料及方法	11
2.1.1 化学成分及生产工艺模拟	11
2.1.2 微观组织观察及力学性能检测分析	12
2.1.3 氢渗透理论	12
2.1.4 扩散系数的测定方法	14
2.1.5 电化学氢渗透实验	16
2.2 实验结果与分析	19
2.2.1 微观组织特征	19
2.2.2 热轧状态下析出物	21
2.2.3 力学性能	24
2.2.4 氢渗透行为和抗鳞爆性能	26
2.3 本章小结	28
3 低碳冷轧搪瓷钢组织性能研究	29
3.1 实验材料及方法	29
3.1.1 化学成分	29

3.1.2 实验方案	29
3.2 实验结果及讨论	32
3.2.1 热轧实验钢板的显微组织和力学性能	32
3.2.2 冷轧及罩式退火工艺对低碳冷轧搪瓷钢组织性能的影响	36
3.2.3 再结晶温度测定结果	39
3.2.4 冷轧及罩式退火工艺对含 Ti 低碳冷轧搪瓷钢组织性能的影响	41
3.3 本章小结	50
4 超低碳冷轧搪瓷钢退火工艺对组织性能的影响	52
4.1 实验材料及方法	52
4.1.1 成分设计	52
4.1.2 退火工艺制定	53
4.1.3 电化学 H 渗透实验	54
4.1.4 织构	54
4.2 连续退火实验结果与分析	55
4.2.1 不同温度的连退微观组织特征	55
4.2.2 不同温度退火对力学性能及成型性能的影响	56
4.2.3 不同保温时间下连续退火显微组织	58
4.2.4 不同保温时间对力学性能的影响	60
4.2.5 退火温度对织构的影响	62
4.2.6 退火工艺对氢渗透时间的影响	65
4.3 罩式退火实验结果与分析	69
4.3.1 保温温度对显微组织的影响	69
4.3.2 保温温度对力学性能的影响	72
4.3.3 保温温度对微观织构的影响	74
4.4 两种退火工艺对比分析	76
4.4.1 两种退火工艺对显微组织的影响	76
4.4.2 两种退火工艺对性能的影响	78
4.5 氢渗透实验结果对比	79
4.6 本章小结	80

5 氢渗透行为测试及析出物对抗鳞爆性能的影响	82
5.1 氢渗透实验材料及方法	82
5.1.1 实验钢的化学成分	82
5.1.2 显微组织观察及析出物分析	82
5.2 氢渗透实验结果与分析	83
5.2.1 显微组织特征	83
5.2.2 氢渗透行为及抗鳞爆性能	84
5.3 析出物对抗鳞爆性能探讨	86
5.4 本章小结	92
6 涂搪工艺对低碳搪瓷钢 MTC3 组织性能的影响	93
6.1 实验材料及方法	93
6.2 力学性能检测分析	93
6.3 低碳搪瓷钢 MTC3 涂搪及密着性研究	95
6.3.1 涂搪后的显微组织	96
6.3.2 涂搪后成分分布的分析	98
6.3.3 模拟涂搪对渗氢时间的影响	103
6.4 分析与讨论	108
6.4.1 相同模拟涂搪温度下不同的保温时间对氢渗透的影响	108
6.4.2 相同保温时间下不同模拟涂搪温度对氢渗透的影响	110
6.5 本章小结	111
参考文献	112

摘 要

本项研究工作对热轧和冷轧搪瓷用钢的微观组织特征、织构演变、成型性能和抗鳞爆性能进行了系统的研究与分析。通过实验室条件下的工艺模拟,重点研究了低碳冷轧搪瓷用钢化学成分对组织性能的影响,退火工艺对超低碳冷轧搪瓷用钢第二相粒子的析出规律及其对织构演变、成型性能和抗鳞爆性能的影响。具体研究内容和主要结果如下:

(1) 在实验室研究了模拟搪瓷烧制工艺对 210、330 两个系列热轧搪瓷钢的组织演变和力学性能的影响规律,并分析热轧搪瓷钢中存在的各类型第二相粒子。结果表明:

1) 210 实验钢热轧板组织为单相铁素体,在低于 830℃ 模拟搪烧后,组织没有明显的变化;850℃ 模拟搪烧时,随搪烧时间的延长,铁素体逐渐粗化;890℃ 模拟搪烧保温 5min 以上时,铁素体晶粒发生了明显的长大。因此,210 实验钢的搪烧温度应当低于 890℃,否则,搪烧后组织会发生明显的变化,严重影响搪瓷板质量,导致鳞爆的产生。

2) 330 实验钢热轧板组织主要以铁素体为主,少量珠光体分布于晶界的三相交界处。经模拟搪烧后,组织没有明显的变化,随搪烧时间的延长,铁素体晶粒尺寸呈增大趋势,珠光体含量逐渐降低。

3) 210 实验钢热轧板模拟搪烧后,钢板强度升高,塑性下降。随着搪烧温度的升高,保温时间延长,实验钢的强度逐渐下降,塑性提高。其中,850℃ 保温超过 10min 和 890℃ 超过 5min 模拟搪烧后的实验钢抗拉强度低于原板。

4) 330 实验钢热轧板模拟搪烧保温时间为较短的 2min 时,钢板强度升高,塑性下降;随着保温时间的延长,实验钢的强度逐渐下降,塑性提高。860℃ 保温超过 10min 和 890℃ 保温超过 5min 模拟搪烧后的实验钢屈服强度低于 330MPa,无法达到强度性能指标。因此,330 实验钢搪烧温度应低于 860℃,若需要在较高温度搪烧时,应缩短保温时间。同时,也可适当提高 C

含量,调整工艺,提高原板的强度。

(2) 以低碳且适当增加 S、Mn 含量为基础,设计了不添加 B 和添加微量 B 元素及只添加 Ti 元素的 3 种低碳搪瓷实验钢。通过实验室条件下的工艺模拟,研究了热轧及退火工艺对实验钢组织性能的影响。对含 Ti 超低碳搪瓷钢进行了罩式退火和连续退火工艺研究,对其进行了力学性能测试,并利用光学显微镜及电镜对实验钢的显微组织及微观织构进行了研究。结果表明:

1) 含 B 低碳搪瓷钢在不同温度罩式退火获得的均为单相铁素体组织,且分布均匀,晶粒尺寸在 $10\sim 50\mu\text{m}$ 范围。当 680°C 模拟罩式退火后,铁素体晶粒逐渐粗化;经 710°C 模拟罩式退火,组织明显长大,尺寸约为 $50\mu\text{m}$ 。

2) 含 B 低碳搪瓷钢在 620°C 、 650°C 退火后的屈服强度分别为 452MPa 、 445MPa ,抗拉强度分别为 491MPa 、 489MPa ,未发生明显变化。在 680°C 和 710°C 退火后,实验钢的强度明显下降,屈服强度分别为 368MPa 、 325MPa ,抗拉强度分别为 419MPa 、 389MPa 。模拟罩式退火后的 n 值分别为 0.1 、 0.12 、 0.12 、 0.22 ,退火后的断后伸长率分别为 9.6% 、 15.5% 、 14% 、 18.5% 。

3) 随着退火温度的提高,2 号低碳搪瓷钢的屈服强度和抗拉强度变化的整体趋势是逐渐降低的,屈服强度的变化较为明显,抗拉强度的变化不是非常明显,因此,实验钢的屈强比逐渐降低。适宜于 2 号实验钢的罩式退火工艺为 $710\sim 730^\circ\text{C}$,保温 5h 。

4) 在退火温度由 650°C 升至 730°C 过程中,低碳搪瓷钢的氢渗透时间有着明显的降低。在 2 号钢中添加了合金元素 Ti,会和钢中的 S、C 形成大量粗大弥散的第二相粒子 $\text{Ti}_4\text{C}_2\text{S}_2$,提高钢板的贮氢性能,因此添加微量合金元素 Ti,可以有效提高实验钢的氢渗透时间。

5) 超低碳搪瓷钢连退组织主要以铁素体为主,晶粒尺寸为 $5\sim 30\mu\text{m}$,随着退火温度的提高,铁素体晶粒尺寸逐渐增大。实验钢晶内的析出物尺寸随着保温温度的升高而增大,同时,由于析出物的聚集长大而导致数量减少。随着保温时间的延长,晶粒逐步趋于均匀。

6) 超低碳搪瓷钢的连续退火工艺中,提高均热温度,可使力学性能得到优化,晶粒尺寸增大, γ 织构加强。延长均热阶段的保温时间也有利于 γ 织构的增强以及力学性能的优化。在实验钢的连续退火工艺中最佳制度为

850℃均热并保温 60s。实验钢经 730℃罩式退火后的力学性能最佳,随着退火温度的升高,力学性能得到优化,晶粒尺寸增大, γ 组织强度逐渐增加。

7) 随着退火温度的改变, α 和 γ 纤维组织均发生变化,但是,整体的趋势还是基本一致的,即 α 纤维组织始终很弱,而 γ 纤维组织很强。说明退火后的组织以 γ 纤维组织为主。随着退火温度的升高,氢渗透时间 t_b 缩短。在退火温度提升到 850℃之前,氢渗透时间 t_b 缩短趋势比较缓慢。

8) 在采用两种退火工艺的超低碳搪瓷钢中均存在大量析出物,其中小尺寸的析出物为 $Ti(C, N)$,大尺寸的析出物主要为 $Ti_4C_2S_2$ 和 MnS 。在连续退火工艺中,随着均热温度的升高及保温时间的延长,析出物经过聚集长大,尺寸均有明显的增大。与连续退火相比较,罩式退火后的析出物由于保温时间长,得到充分的长大,其尺寸及体积分数大于连续退火后的实验钢。

(3) 研究了超低碳冷轧搪瓷用钢中析出相尺寸和分布的影响,分析了 $Ti_4C_2S_2$ 和 $Ti(C, N)$ 析出粒子对钢板抗鳞爆性能的影响规律和机理。

1) 实验钢的组织均以铁素体为主,SPCC 及宝钢 2.0 钢中,在晶界处可观察到少量珠光体,STC1 中没有珠光体,组织更加细小。M380AS 实验钢铁素体组织明显更加细小,具有一定含量的珠光体,晶界处存在明显的粗条状渗碳体。DC01 实验钢组织为以等轴铁素体为主,晶粒尺寸稍大于宝钢 2.0 实验钢。

2) 含有 Ti 、 Nb 的搪瓷专用钢板 M380AS 的 H 渗透时间 t_b 明显大于其他试样,钢中含有较多的“氢陷阱”,可提高抗鳞爆性能指标。

3) 实验钢中都添加了 Mn 元素,会生成析出物 MnS ,而大部分实验钢中都添加了 Ti 元素,会生成 TiN 、 $Ti(C, N)$ 等析出物。这些析出物作为“氢陷阱”,使氢渗透的能力降低。

4) 从 80 钢的透射电镜照片中,可以看到,里面存在着大量的位错,而析出物 TiS 起到了钉扎位错的作用。析出物 TiS 和大量的位错都起到了“氢陷阱”的作用,有效提高实验钢的抗鳞爆性能。

5) 实验钢中加入少量 Nb ,可以起到细化晶粒的作用,增加氢渗透时间,提高抗鳞爆性能。

关键词: 搪瓷用钢; 氢陷阱; 连续退火; 第二相析出; H 渗透行为; 抗鳞爆性能

1 绪 论

搪瓷制品具有金属的牢固性和玻璃的耐用性及装饰性，是一种性能先进的复合材料。由于其具有耐腐蚀、耐酸碱、耐高温、易洗涤、无毒、无味、光滑耐磨和卫生清洁等良好的特性，是许多其他产品无法替代的，因此被广泛用于家用电器、厨房用具、建筑搪瓷和卫生设备等，如图 1-1 所示^[1-5]。随着现代科学技术的进步，新金属材料层出不穷，新瓷釉材料也不断出现，促使搪瓷生产开发出许多新产品，在更多的领域发挥着特殊的作用。使搪瓷这个传统的先进材料焕发新的生命力，这也是今后搪瓷工业的发展方向。中国目前已成为世界上公认的搪瓷制品生产大国，年产值达到 240 亿元，拥有 600 多家企业。日用搪瓷制品的生产规模从 3 万吨发展到现在的近 30 万吨。产品出口世界各国，出口额每年达 12 亿美元之多，特别是进入 21 世纪以后，每年出口额以大于 10% 的速度增长着。

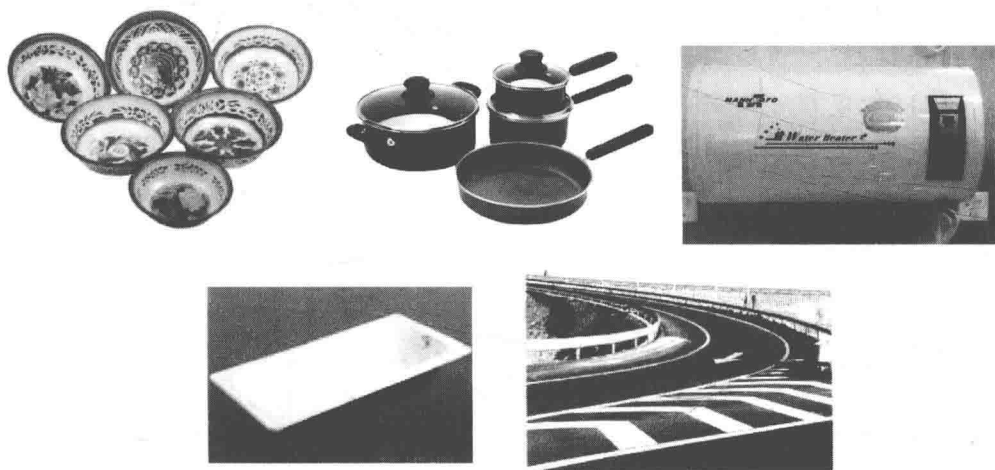


图 1-1 日常生活中常见的搪瓷制品

搪瓷制品的鳞爆问题一直以来是影响其质量的主要问题之一，而搪瓷基板的抗鳞爆性能即钢板的贮氢性能是控制鳞爆现象发生的主要环节。钢板的

贮氢性能的大小受到贮氢陷阱（晶界、位错密度和第二相粒子）数量影响，贮氢陷阱越多，钢板的贮氢能力越强，抗鳞爆性能越强^[6~8]。国外搪瓷制品生产都采用特殊的专用搪瓷钢板，如日本、韩国等行业规定 SPP 冷轧板为搪瓷专用钢板，其性能质量完全符合搪瓷用钢七要素。我国上海宝钢 BTC1 冷轧板近年使用状况基本与 SPP 相同。但 SPP 冷轧板价格比国产普通板（SPCC 或 DC）价格高出许多，最高每吨差价 2000 元，最低差价每吨也有 500~600 元。且 SPP、BTC1 一般为期货交易或大宗采购，在市场零星采购很难购得。近年来搪瓷企业大多采用了 SPCC 或 SPCD、08AL 等普通板应用于搪瓷生产。成本较低、货源充足，但质量不稳定，经常会有搪瓷鳞爆现象发生，见表 1-1。

表 1-1 国内外搪瓷用钢抗鳞爆性能

生产厂家	牌 号	板厚/mm	鳞爆程度
马钢	SPCC、DC01、DC03	0.6、0.8	无鳞爆
马钢	DC04	0.6、0.8	严重鳞爆
首钢	DC01	0.6、0.8	无鳞爆
邯钢	SPCC	0.6、0.8	无鳞爆
包钢	SPCC	0.6、0.8	少许（3%~5%）可控制
本钢	SPCC	0.6、0.8	不稳定，时有时无
涟钢	SPCC	0.6、0.8	严重，不可控制
鞍钢	SPCC/SPCD	0.6、0.8	严重，不可控制
宝钢	SPCC/SPCD	0.6、0.8	5%~10%鳞爆，可控
宝钢	BTC1	0.6、0.8	无鳞爆
唐钢	08AL	0.6、0.8	10%~20%鳞爆，可控
日本	SPCC	0.6、0.8	严重鳞爆
韩国	SPCC	0.6、0.8	严重鳞爆
中国台湾中钢	SPCC	0.6、0.8	严重鳞爆
日本新日铁	SPP	0.6、0.8	无鳞爆
中国台湾中钢	SPP	0.6、0.8	无鳞爆
韩国	SPP	0.3~1	无鳞爆

因此，开发出成本低廉、生产工艺简单、性能优良、抗鳞爆性及密着性能良好的搪瓷基板已成为搪瓷生产发展的必然要求。

1.1 搪瓷用钢的国内外研究现状

搪瓷钢板的种类很多，按生产工艺分热轧板（即酸洗板）、冷轧板和覆

层板等；按搪瓷工艺分一次搪瓷和二次搪瓷，单面搪瓷和双面搪瓷，湿法搪瓷和静电干粉搪瓷等；按成型性能分 CQ、DQ、DDQ 到 EDDQ 等不同冲压级别；按强度分有 245MPa、330MPa 等不同强度级别^[9-12]。搪瓷钢板的要求主要包括强度、成型性、抗鳞爆性、密着性等方面，不同用途的搪瓷钢板要求具有不同的综合性能。

日本开展搪瓷用钢的研究相对较早。20 世纪 70 年代日本开发加 B 搪瓷钢，其成分为：小于 0.01% C、小于 0.5% Mn、0.01%~0.08% Al、0.001%~0.01% B、0.007%~0.05% Ti、0.01%~0.08% Zr。20 世纪 80 年代日本又开发出鳞爆抗力及深冲性能优良的搪瓷钢，其中加入了 0.001%~0.01% B。80 年代末研究开发了一种连铸深拉冷轧搪瓷钢板。钢中含 0.11% Ti+0.01% Sb，预处理酸洗时形成 Sb-Cu 沉淀物，防止了钢板表面残余沉积物过多，同时 TiC、TiN 增加了贮氢陷阱，提高了抗鳞爆能力，降低了搪烧翘曲。在深入研究的基础上开发出一种新型连铸铝镇静冷轧搪瓷钢板。钢中具有 0.03% C、0.15% Mn，再引入硼添加剂。实验表明，具有良好的抗搪烧下垂性和抗鳞爆能力；钢中碳化物细小且均匀分布、晶粒度 8~10 级，具有优良的深冲加工性和涂搪性。

欧洲一些技术人员目前对双面搪瓷用高强度热轧钢板开展了研究，提出了可以利用 TiC 同时提高热轧钢板的抗鳞爆性能和强度。生产工艺上采用高温轧制（1250℃开轧）和高温卷取（750℃卷取）。文献中报道的屈服强度低的样品，C 含量低于 0.02%。同时报道了具有较高屈服强度的 SPEX600 实验结果。提出了高 Ti 和低 S 的成分设计思路，但没有给出 C 的含量控制范围和具体的工艺方法。

20 世纪 90 年代中后期，国内楼堂馆所建设方兴未艾，大量的宾馆、酒店建造需要用到搪瓷浴缸，作为浴缸的基板，搪瓷钢的需求日益高涨。在这一背景下，宝钢积极研发，于 1997 年成功开发出 BTC1 高端搪瓷钢，并在 2000 年实现量产。随后还相继开发出热轧高强度搪瓷钢板、热轧深冲用搪瓷钢等产品。其产品种类、性能和用途见表 1-2。目前，宝钢已成为国内搪瓷钢品种最多、级别最全的企业。长期以来，宝钢搪瓷钢以过硬的性能和质量领先于国内同行，受到用户青睐，需求稳定。