300 MPa 级搪瓷钢的开发

张 奇[1],刘 妍[1],路 璐[1],宋文钟[1],王亚男[1],王 斌[2],孙梦晨[1]

(1. 内蒙古包钢钢联股份有限公司技术中心,内蒙古 包头 014010;
2. 内蒙古包钢钢联股份有限公司工程服务公司,内蒙古 包头 014010)

摘 要:300 MPa 级搪瓷钢采用低碳成分设计,添加 Mn、Nb、Ti 等合金元素,热轧加热炉出炉温度控制在 1 200 ~ 1 230 ℃,终轧温度≥890 ℃,卷取温度≤580 ℃,冷轧压下率≥65%,连续退火温度选择 830 ℃。开发的高强搪瓷钢屈服强度为 367 MPa,搪烧后屈服强度仍大于 300 MPa,其微观组织主要由均匀的等轴铁素体构成,并伴随有 Fe_3C 及弥散分布的 TiC 析出相,TiC 可有效钉扎晶界,抑制高温处理过程中的晶粒粗化。产品抗鳞爆敏感性 TH 值为 6.80 ~ 7.23 min/mm^2,满足 EN 10209—2013 标准(TH > 6.7 min/mm^2)要求。

关键词:300 MPa 级搪瓷钢;力学性能;抗鳞爆性能
中图分类号:TG335.56 **文献标识码**:B **文章编号**:1009 - 5438(2026)01 - 0046 - 05

Development of 300 MPa Grade Enamel Steel

Zhang Qi[1], *Liu Yan*[1], *Lu Lu*[1], *Song Wenzhong*[1], *Wang Yanan*[1], *Wang Bin*[2], *Sun Mengchen*[1]

(1. *Technical Center of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*;
2. *Engineering Service Co. of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*)

Abstract: The 300 MPa grade enamel steel is with low - carbon composition design, such alloy elements as Mn, Nb and Ti are added, tapping temperature of heating furnace in hot rolling is controlled at 1 200 ~ 1 230 ℃, finishing temperature ≥ 890 ℃, coiling temperature ≤ 580 ℃, cold rolling reduction ratio ≥ 65% as well as continuous annealing temperature is selected to be 830 ℃. The yield strength of developed high strength enamel steel is 367 MPa, which is still over 300 MPa after enameling as well as its microstructure mainly consists of uniform equiaxed ferrite with Fe_3C and dispersed TiC precipitates. The TiC could effectively pin grain boundaries to prevent grain coarsening during high temperature treatment process. TH (sensitivity of resistance to scute burst) is 6.80 ~ 7.23 min/mm^2, which could meet the requirements of EN 10209—2013 standard (TH > 6.7 min/mm^2).

Key words: 300 MPa grade enamel steel; mechanical properties; resistance to scute burst

热水器内胆采用搪瓷钢制作,早期采用搪瓷钢 强度级别为 200 MPa,厚度为 1.8 ~ 2.0 mm。随着

收稿日期:2025 - 10 - 01
作者简介:张 奇(1989 -),男,内蒙古包头市人,硕士,高级工程师,现从事板材产品开发等工作。

客户对使用年限的要求越来越高,搪瓷钢耐疲劳性能已无法满足要求,同时家电行业的竞争日趋激烈,热水器内胆减重成为主流发展方向,200 MPa 级搪瓷钢应用于热水器内胆已不满足用户的实际需求。因此开发强度更高、抗鳞爆性能较佳的搪瓷钢具有良好的应用前景[1]。在此背景下,包钢自主研发了 300 MPa 级高强度搪瓷钢,产品性能指标满足客户要求。

1　关键试制工艺

1.1　化学成分

为保障材料具备良好的焊接性能,产品采用低碳成分设计。300 MPa 级高强搪瓷钢主要添加 Mn、Nb、Ti 元素实现强度与抗鳞爆性能的提高。Mn 元素能够增加 Nb 在奥氏体中的固溶度,推迟碳氮化铌在后续冷却过程中的析出[2]。Nb 与 Ti 的复合添加能够产生显著的析出强化效果,抑制再结晶过程中晶界的迁移,从而在高温处理中维持组织稳定。钢中氢陷阱类型包括空位、位错、晶界及析出相界面等,这些缺陷位置对氢的捕捉能力直接影响材料的抗鳞爆性能。300 MPa 级高强搪瓷钢添加以上合金元素能够形成细小弥散的析出相,可作为有效氢陷阱,有助于提高搪瓷钢的抗鳞爆能力[3]。由于客户对高强搪瓷钢屈服强度范围要求较窄,目标强度范围为 320 ~ 370 MPa,并且搪烧后钢板强度必须大于 300 MPa,因此有害元素 P、S 含量控制较低,避免力学性能大范围波动。具体化学成分设计如表 1 所示。

表 1　化学成分设计(质量分数)　　%

C	Si	Mn	P	S	Al_t	Ti	Nb
≤0.08	≤0.2	≤0.5	≤0.015	≤0.008	≥0.020	≤0.04	≤0.030

1.2　热轧

由于加入较多合金元素,热轧工序加热炉采用较高的出炉温度,温度控制在 1 200 ~ 1 230 ℃,均热时间不少于 30 分钟,确保铸坯温度均匀。终轧温度按照大于 890 ℃设计,保证整个钢带在单相奥氏体区轧制,使得铁素体相变时形核率增加,起到降低变形抗力的作用。低温卷取的析出物 TiC 尺寸更细小,数量更多,具有更多的 TiC/Fe_3C 界面,提供了更多的氢陷阱[4],因此,300 MPa 级搪瓷钢采用低温卷取,卷取温度≤580 ℃。

1.3　冷轧退火

冷轧过程中储存的变形能是后续再结晶的主要驱动力,由于高强搪瓷钢添加的合金元素含量较高,对退火再结晶抑制作用明显,因此采用大压下率轧制(≥65%)以促进再结晶过程。退火温度对性能影响显著,温度过高将导致再结晶晶粒过度长大,材料强度下降;温度过低则再结晶不完全,产品塑性和成形性降低。本研究针对 300 MPa 级搪瓷钢,分别测试了 810 ℃与 830 ℃两种退火温度下的组织与性能。

2　结果分析

2.1　力学性能

客户要求搪瓷钢屈服强度范围为 320 ~ 370 MPa,退火温度采用 810 ℃时钢带屈服强度为 382 MPa,采用 830 ℃时钢带屈服强度为 367 MPa,退火温度升高后,屈服强度呈现降低的趋势,当退火温度为 830 ℃时,钢带屈服强度满足协议要求,如图 1 所示。

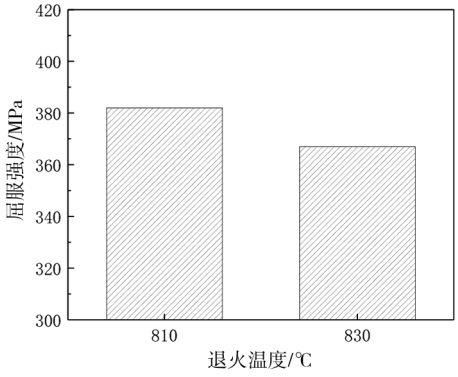
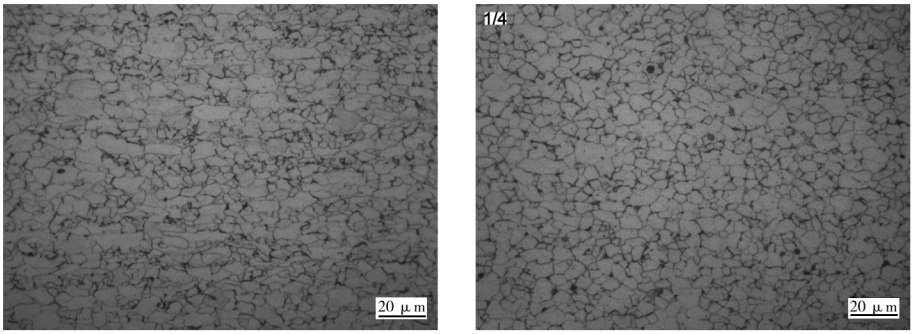


图 1　屈服强度随退火温度的变化

2.2　微观组织

采用光学显微镜进行组织检验,1# 试样为 810 ℃退火试样,2# 试样为 830 ℃退火试样,1# 试样晶粒略显长条状,2# 试样晶粒呈现等轴状,见图 2。



（a）810 ℃退火　　（b）830 ℃退火

图 2　微观组织

分别采用横向与纵向截线法测量晶粒尺寸。1#试样横向平均晶粒尺寸为 8.70 μm，纵向平均晶粒尺寸为 5.32 μm，横向与纵向平均晶粒尺寸比值为 1.64；2#试样横向平均晶粒尺寸 7.33 μm，纵向平均晶粒尺寸为 6.25 μm，横向与纵向平均晶粒尺寸比值为 1.17，说明 2#试样再结晶晶粒长大更充分。退火温度越高，原子活动能力越强，扩散速率呈指数增长，再结晶形核率和长大速率越高，采用830 ℃退火时，再结晶过程更迅速、更彻底，从而获得完全均匀、等轴、无畸变的再结晶组织，由于组织内应力低，钢带屈服强度更低。

对 830 ℃退火试样进行扫描电镜检测，300 MPa 级高强搪瓷钢晶界处存在 Fe_3C 析出相，如图 3 所示。透射电镜 TEM 分析结果表明，在铁素体基体中均匀分布有纳米尺度的 TiC 析出相，如图 4 所示。析出温度是决定 TiC 尺寸的关键因素，TiC 在热轧层流冷却过程中发生相间析出，而在随后的卷取阶段，Ti 在铁素体中过饱和，进一步促使 TiC 析出。卷取温度降低有助于析出相更为弥散，且尺寸更为细小，从而显著增强析出强化效应。透射电镜所观测到的 TiC 析出相均处于纳米量级，证实所采用的热轧卷取工艺参数设置合理。弥散分布的 TiC 第二相颗粒能够对位错产生显著的“钉扎”效应。作为硬质相，TiC 遵循 Orowan 强化机制，位错难以直接切过 TiC 颗粒，只能通过弯曲绕行的方式继续运动。该过程导致位错环不断形成，使位错滑移阻力增大，从而有效提高材料的强度。

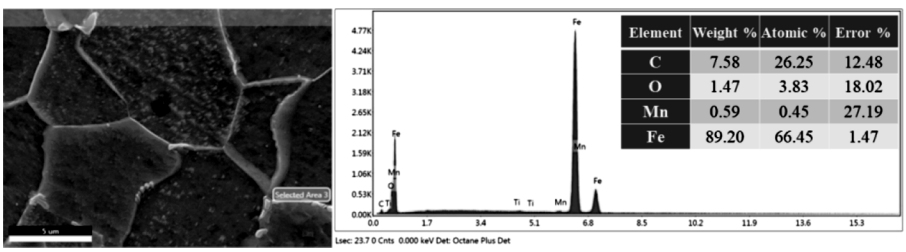


图 3　扫描电镜检测结果

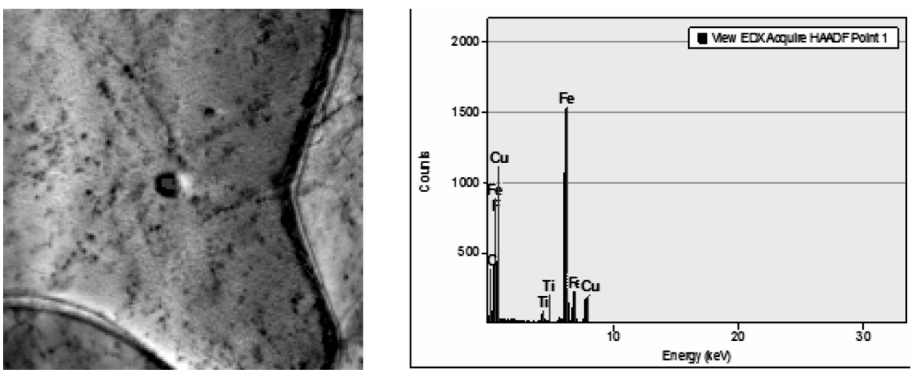


图 4　透射电镜检测结果

研究发现金属或合金中的位错、晶界、夹杂物界面、碳化物界面等晶体缺陷与氢原子的结合能不同[5]，表 2 所示为钢中常见的氢陷阱种类及其结合能。300 MPa 级高强搪瓷钢析出相包括 Fe_3C 和 TiC，Fe_3C 结合能为 84.0 kJ/mol，TiC 结合能在 46.0 kJ/mol以上，均具有较强的氢原子捕获能力，对材料抗鳞爆性能的提高起到积极作用。

表 2　常见氢陷阱结合能

氢陷阱钟类	结合能/(kJ·mol^{-1})	材料
单个空位	46.0～79.0	纯铁
C 原子	3.0	纯铁
Mn 原子	11.0	纯铁
位错	27.0	纯铁
晶界	17.2	纯铁
微孔洞	35.2	纯铁
Fe_3C	84.0	中碳钢
TiC(共格)	46.0～59.0	低碳钢
TiC(不共格)	86.0	中碳钢
MnS	72.3	低碳合金钢
V_4C_3	33.0～35.0	低碳合金钢
NbC	63.0～68.0	低碳钢
残余奥氏体	59.9	双相钢

2.3　抗鳞爆敏感性

依据 EN 10209—2013 标准[6]，采用双电解法测试高强搪瓷钢抗鳞爆性能，TH 值为鳞爆时间与试样厚度平方之比。标准要求 TH 值不低于 6.7 min/mm^2。两次试验所得 TH 值为 6.80～7.23 min/mm^2，见表 3。

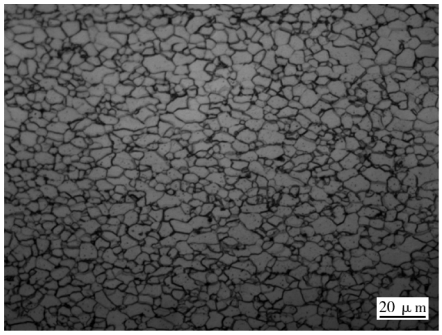
表 3　抗鳞爆敏感性测试

试验编号	厚度/mm	测试温度/℃	测试电流/A	氢渗透时间/s	抗鳞爆敏感性(TH)/(min·mm^{-2})
1#	1.6	25	1.57	1 031	6.80
2#	1.6	25	1.57	1 110	7.23

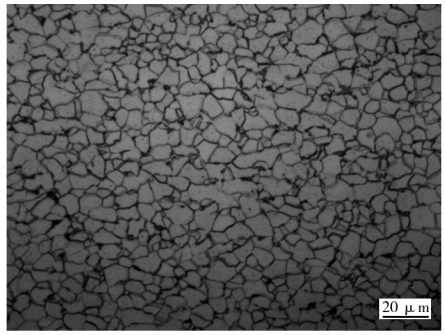
3　搪烧后组织与性能

为保证搪烧后热水器内胆仍有足够的强度，客户要求高强搪瓷钢搪烧后屈服强度大于 300 MPa。采用箱式炉模拟搪烧工艺，搪烧试验温度为 860 ℃，保温 5 分钟，随后出炉空冷至室温。

搪烧后搪瓷钢的微观组织如图 5 所示，搪烧前与搪烧后搪瓷钢的微观组织均为铁素体，搪烧前晶粒度为 11 级，搪烧后晶粒度为 10.5 级，晶粒度仅降低 0.5 级。



（a）搪烧前



（b）搪烧后

图 5　高强搪瓷钢搪烧前后微观组织对比

高强搪瓷钢搪烧前后力学性能变化如表 4 所示，屈服强度由 367 MPa 降低到 354 MPa，抗拉强度由 454 MPa降低到429 MPa，伸长率由 29.0% 提高 32.0%，搪烧后屈服强度大于 300 MPa，满足客户要求。

表 4　高强搪瓷钢搪烧前后力学性能变化

工艺	厚度/mm	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%
搪烧前	1.6	367	454	29.0
搪烧后	1.6	354	429	32.0

通过对高强搪瓷钢搪烧前后的组织与力学性能分析可知，具备高屈服强度和断后伸长率的冷轧高强搪瓷钢，在高温搪烧后仍能保持较高的屈服强度和断后伸长率。

钢的强化机制通常可归纳为五种基本类型：细晶强化、析出强化、位错强化、固溶强化与相变强化，材料整体强度来源于多种强化机制的共同作用，而非单一机制的作用结果。依据 Hall－Petch 关系，材料的屈服强度与晶粒尺寸存在明确的负相关性，即

晶粒越细小,屈服强度越高。对于常规低碳钢而言,在加热温度升高或保温时间延长的情况下,铁素体晶粒容易发生粗化。然而,本文开发的300 MPa级搪瓷钢由于添加Ti元素,促使TiC析出相形成,该相能够对铁素体晶界产生有效的钉扎效应,从而抑制其在搪烧过程中的晶粒长大行为。值得注意的是,TiC颗粒尺寸越小,其对晶界的约束作用越强。因此,即使在860 ℃保温处理后,该钢种仍能保持高于300 MPa的屈服强度。

4 结论

(1)通过添加Mn、Ti、Nb等合金元素,并制定相应热轧、冷轧及退火工艺,成功开发出300 MPa级高强搪瓷钢。

(2)热轧加热炉出炉温度1 200~1 230 ℃,采用高温终轧与低温卷工艺,冷轧压下率≥65%,连续退火温度选择830 ℃,产品屈服强度为367 MPa,满足客户要求。

(3)300 MPa级高强搪瓷钢具有优异的搪烧后性能,满足热水器内胆搪烧后对强度与塑性的使用要求。TiC析出相的晶界钉扎作用有效阻止了搪烧过程中的晶粒长大。

(4)抗鳞爆性能测试表明,300 MPa级高强搪瓷钢的抗鳞爆敏感性TH值为6.80~7.23 min/mm^2,高于EN 10209—2013标准规定的6.7 min/mm^2,具备抗鳞爆能力,可有效避免热水器内胆在使用过程引发的鳞爆问题。

参 考 文 献

[1] 刘友荣,孙全社. 深拉型搪瓷内胆用热轧钢带开发及应用[J]. 特殊钢,2019,40(3):23-27.

[2] 雍岐龙,裴和中,田建国,等. 铌在钢中的物理冶金学基础数据[J]. 钢铁研究学报,1998,10(2):66-69.

[3] 徐春,赵曼羚,曹红. 搪瓷用钢抗鳞爆性能研究进展[J]. 应用技术学报,2019,19(3):222-228.

[4] 黄学启,刘相华,张志敏,等. 热轧搪瓷钢中析出物与抗鳞爆性能[J]. 材料热处理学报,2017,38(12):57-62.

[5] 刘清华,唐慧文,斯庭智. 氢陷阱对钢氢脆敏感性的影响[J]. 材料保护,2018,51(11):127-132.

[6] European Committee for Standardization. BS EN 10209:2013 Steel products for enamelling - Technical delivery conditions [S]. Brussels: CEN,2013.