热水器内胆用耐疲劳搪瓷钢的开发与应用*

张秀青,陆 斌,尚秀廷,华国龙

(内蒙古包钢钢联股份有限公司薄板坯连铸连轧厂,内蒙古 包头 014010)

摘 要: 文章阐述了新一代耐疲劳冷轧搪瓷内胆用钢的关键技术。设计了低碳冷轧板的化学成分和罩式退火工艺,对制备的冷轧板进行力学性能、金相组织分析,将实验钢板制作成热水器内胆做了搪瓷和打压实验,结果表明,冷轧板加入适量铌和稀土元素后,与退火工艺配合,把钢板力学性能控制在屈服强度220~270 MPa、伸长率≥38%范围时,可显著提高热水器内胆耐疲劳性,达到了打压次数15万次以上,兼具良好的搪瓷性、冲压成型性和耐疲劳性。

关键词: 耐疲劳; 稀土; 罩式退火; 力学性能; 金相组织

中图分类号: TG142.1 **文献标识码:** B **文章编号:** 1009-5438(2020)03-0050-04

DOI:10.13647/j.cnki.btgkj.2020.03.013

Development and Application of Fatigue-resistant Glassed Steel for Inner Container of Water Heater

Zhang Xiu-qing, Lu Bin, Shang Xiu-ting, Hua Guo-long

(*CSP Plant of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*)

Abstract: In this paper, the key technology of a new generation of cold-rolled fatigue-resistant glassed steel for inner container is described. The chemical composition and cover annealing process of cold-rolled low carbon plate are designed as well as the mechanical properties and metallographic structure of the cold-rolled plate prepared are analyzed. The experimental steel plate is made into inner container of water heater as well as the enamel and bulge tests are carried out. The results showed that the fatigue resistance of inner container of water heater was significantly improved and the times of pressuring could reach more than 150 000 when the mechanical properties of the cold-rolled steel plate were controlled at yield strength of 220~270 MPa, elongation≥38% by adding proper amount of Nb and rare earth element as well as with the annealing process so that it is with good enamel property, stamping formability and fatigue resistance.

Key words: fatigue-resistant; rare earth; cover annealing; mechanical property; metallographic structure

热水器市场技术革新步伐加快,产品种类的细分也在加速,如储水式电热水器、空气能电热水器等,而储水式电热水器则是消费者青睐的产品,占所有热水器产品销量的80%,储水式电热水器内胆主要有两种类型:搪瓷内胆和不锈钢内胆,以搪瓷内胆为主流,不锈钢内胆正在被淘汰。据市场调查,仅广州地区热水器内胆用钢量近30万t。根据热水器行业标准QB/T 4101—2010中要求,内胆脉冲压力循环次数达到8万次,随着消费升级,以延长热水器服役周期作为竞争焦点,国际上对内胆脉冲压力循环

* 收稿日期:2020-03-18

作者简介:张秀青(1980-),女,内蒙古呼和浩特市人,工程师,现从事冷轧产品质量工作。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

次数达到 15 万次以上的更高要求，需要开发新一代的耐疲劳冷轧搪瓷内胆用钢。

耐疲劳搪瓷用钢板不同于一般冲压用钢板，不仅要求良好的冲压成型性和耐疲劳性能，还必须具有良好的搪瓷性能，即搪瓷钢板与瓷釉具有良好的密着性和抗鳞爆性[1]。搪瓷钢板的抗鳞爆性体现在基体钢板的储氢能力[2]。钢板的储氢能力与钢中硫化物、氮化物和碳化物等夹杂物和第二相粒子的数量有关，钢中夹杂物和第二相粒子数量增加，储氢能力提高，但势必损害钢板的成形性能[3]。因此，在确保良好的成形性的同时提高储氢能力，提高搪瓷钢板的抗鳞爆性，是研究冷轧搪瓷钢板的关键。

1　冷轧耐疲劳搪瓷钢板的技术要求

耐疲劳内胆搪瓷用钢制作的热水器内胆打压次数达到 15 万次以上，显著提高搪瓷钢的耐疲劳性能，实现搪瓷性、耐疲劳性能和冲压性能的有效结合，满足热水器内胆用钢升级换代的要求。冷轧耐疲劳搪瓷钢板的力学性能要求见表 1。

表 1　力学性能要求

屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	延伸率/%
220 ~ 270	≥270	≥38

2　冷轧耐疲劳搪瓷钢板试验方法

以 CSP 铸机 72 m 厚板坯为原料，轧制 4.5 mm 厚度板带，冷轧再轧成 1.5 ~ 1.8 mm 的罩退母材，经罩式炉退火及后序平整工序得到最终成品；为提高钢板表面洁净度，可增加过清洗线脱脂处理，热水器内胆用钢的具体生产工艺流程包括：KR 脱硫→转炉→LF 精炼→CSP 连铸连轧→酸轧→清洗→罩退→平整。对试样采用 Zwick - Z050 实验机测试力学性能，并利用蔡司显微镜观察晶粒情况，用所制备的钢板冲压成型，制成热水器内胆，对内胆经搪瓷试验后，再进行脉冲打压实验。

2.1　成分设计

采用 Nb 和 Nb + RE 元素两个方案，成分如表 2 和表 3 所示。

表 2　含 Nb 成分设计方案 1（质量分数）　%

项目	C	Si	Mn	P	S	Al_s	Nb
上限	0.05	0.03	0.20	0.020	0.009	0.033	0.010
目标	0.04		0.17		0.005	0.030	0.008
下限	0.03		0.15			0.020	0.006

表 3　含 Nb 和 RE 成分设计方案 2（质量分数）　%

项目	C	Si	Mn	P	S	Al_s	Re	Nb
上限	0.05	0.03	0.20	0.020	0.009	0.033	0.002 0	0.010
目标	0.04		0.17		0.005	0.030		0.008
下限	0.03		0.15			0.020	0.000 5	0.006

2.2　热轧及冷轧退火工艺设计

热轧轧制厚度为 4.5 mm，公差 ±0.2 mm，热轧工艺控制参数见表 4，退火曲线设定参数见表 5。

表 4　热轧工艺参数

出炉温度/℃	头尾温差/℃	终轧温度/℃	卷取温度/℃	冷却模式
>1 060	±10	880 ±10	570 ±15	前、分散

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表5 罩式退火工艺

方案	保温温度/℃	保温时间/h	缓冷时间/h
1	680	8	6
2	680	10	6

3 试验结果及讨论

3.1 力学性能影响因素分析

(1) Nb 含量对性能的影响。开始少量加入铌铁合金,逐步增加 Nb 含量,探明合适的加入量范围,具体见表6。

表6 不同 Nb 含量成品性能

w[Nb]/%	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	延伸率/%
0.004	222	330	43.2
0.006	234	346	42.8
0.008	250	351	39.7
0.010	257	362	38.1

由表6可看出,随着钢中 Nb 含量的增加,成品带钢强度升高,延伸率有所下降,钢中 Nb 含量控制在0.004%~0.010%时,可达到耐疲劳搪瓷用钢对性能要求。

随着 Nb 含量的增加,强度呈上升趋势,其作用机理是,一是在钢种添加 Nb 会形成细小均匀分布的析出物 NbC,为析出强化作用。二是 Nb 元素的微合金化,即细化了晶粒,提高产品的强度,为细晶强化作用。而且,这些强化效果在冷轧及后续的退火后被保留下来。

(2) 稀土对性能的影响。加稀土后,可同时提高钢的强度和延伸率。其中,屈服强度均值由250 MPa提高至267 MPa,抗拉强度均值由351 MPa提高至357 MPa,伸长率均值由39.7%提高至41.4%,提高1.7个百分点。但对 n、r 值影响不大,具体见表7。

表7 加稀土后成品性能

样板	卷号	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%	屈强比	n 值	r 值
含 Nb	1	256	355	38	0.72	0.18	2.17
	2	239	344	42	0.69	0.18	2.45
	3	253	355	40.5	0.71	0.17	2.65
	均值	250	351	39.7	0.71	0.17	2.18
含 Nb + Re	4	266	359	42.5	0.74	0.17	2.25
	5	260	355	43	0.73	0.17	2.17
	6	263	357	42.5	0.74	0.17	2.21
	均值	263	357	42.5	0.73	0.17	2.21

加入稀土提高钢板强度机理是微合金化作用,微合金化的强韧化程度决定于微量稀土元素的固溶强化、稀土元素与其它溶质元素的交互作用、稀土的存在状态和分布、特别是在晶界的偏聚,以及稀土对钢表面和基体组织结构的影响等。稀土加入低碳钢,起到纯化和细化晶粒组织,提高塑性的作用。稀土影响杂质元素的溶解度和减少脱溶量,降低碳氮的活度,增加碳氮的溶解度,使它们不能脱溶进入内应力区或晶体缺陷中去,减小了钉扎位错的间隙原子数目,因而提高了钢的塑性和韧性[4]。

3.2 金相组织分析

由表8和图2可见,实验钢显微组织为多边形铁素体,晶粒度为8级,与 SPCC-TC 比较,晶粒尺寸更细。

表8 显微组织检测结果

材料	晶粒度/级	组织	游离渗碳体/级
试验钢	8	F	1
SPCC-TC	6	F	1

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

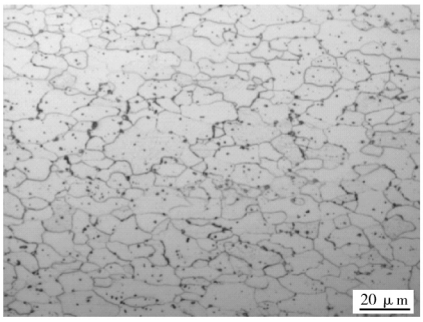


图 1　试验钢组织

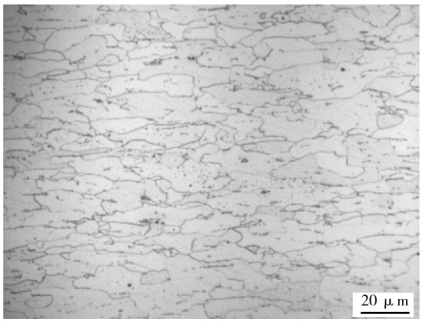


图 2　SPCC – TC 组织

图 1 和图 2 为两种钢退火试样的金相组织，试验钢和 SPCC – TC 钢的组织都为铁素体，晶粒度分别为 8 级和 6 级。由于试验钢中添加了 Nb，可形成大量碳氮化物，这些析出物在钢板热处理过程中起到抑制奥氏体晶粒粗化和再结晶铁素体晶粒长大的作用，使退火后的组织细化，而含铌析出物细化晶粒效果比未添加铌析出物更强，导致试验钢比 SPCC – TC钢的晶粒更细小。由于晶界是贮氢的有效陷阱，而晶粒越细，晶界所占比例越大; Nb 的加入使得钢中有了析出相 NbC，二相粒子 NbC 弥散在基体增加微空穴比例，改善了钢板的抗鳞爆性能和贮氢能力，有利于钢板的搪瓷性能[5]。

3.3　内胆试用结果

(1) 耐疲劳测试。分多批次共进行加工测试 1110 个内胆，冲压性良好，疲劳寿命均达到 15 万次以上。

(2) 搪瓷性能测试。“鳞爆”是搪瓷产品最致命的缺陷，衡量搪瓷钢抗鳞爆性能的方法，一种是氢扩散时间试验，另一种是对钢板试样进行“鳞爆”检测。通过测试试样是否存在“鳞爆”，作为同一批次能否使用的标准，如图 3 所示。

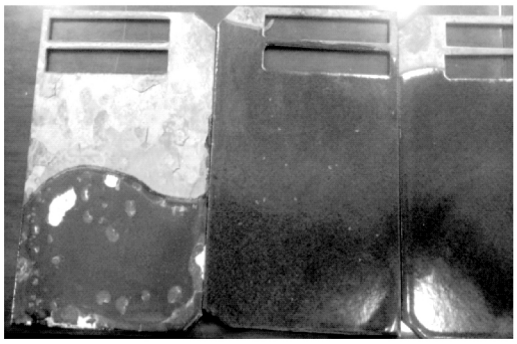


图 3　试样“鳞爆”测试合格

4　结论

(1) Nb 元素的加入，通过析出强化和细晶强度的共同作用，提高钢的强度，但塑性随加入量的增加呈下降趋势。本研究探明了耐疲劳搪瓷钢强度和伸长率达到平衡点时，钢中 Nb 含量控制在 0.004% ~ 0.010% 时，可达到耐疲劳搪瓷用钢对性能要求。

(2) 稀土元素的加入，冷轧板试样的屈服强度均值由 250 MPa 提高至 267 MPa，抗拉强度均值由 351 MPa 提高至 357 MPa，伸长率均值由 39.7% 提高至 41.4%。通过稀土的微合金化作用，提高钢强度的同时，塑性和韧性也得到提高。

(3) 通过工艺控制，结合大量力学性能数据分析，钢板力学性能可控制在屈服强度 220 ~ 270 MPa 范围，伸长率 ≥38% 时，热水器内胆打压测试达到 15 万次以上，可同时满足搪瓷性、耐疲劳性能和冲压性能的要求。

参　考　文　献

[1] 孙全社. 加钛超低碳钢的成形性能和贮氢性能的研究 [J]. 钢铁，2000，(1)：39 – 42.

[2] 孙全社. 冷轧搪瓷钢板的抗鳞爆性能的研究 [J]. 钢铁，2000，(4)：44 – 52.

[3] 徐春，李晓杰. 钛对冷轧超低碳搪瓷钢鳞爆性的影响 [J]. 热处理，2011，(03)：16 – 21.

[4] 王龙妹，杜挺，卢先利，等. 微量稀土元素在钢中的作用机理及应用研究 [J]. 稀土，2001，(8)：37 – 40.

[5] 宋乙峰，杨宏武，杜蓉，等. 冷轧搪瓷钢的夹杂物与抗鳞爆性能 [J]. 钢铁研究学报，2015，(9)：68 – 72.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net