

深拉型搪瓷内胆用热轧钢带开发及应用

刘友荣¹ 孙全社²

(1 宝钢股份研究院梅钢公司技术中心,南京 210039;2 宝山钢铁股份有限公司中央研究院,上海 201900)

摘要 热水器搪瓷内胆结构由三段式升级为二段式,内胆毛坯的成形方式由卷圆成形+冲压成形方式转变成深拉成形方式,相应的钢板也必须满足深拉成形要求。由于搪瓷内胆结构的变化,对钢板提出了更高的要求,在保障涂搪性能的基础上还需更好的深拉性能。宝钢运用钢厂工业数据与试验设计(DOE)工具,建立钢种设计优化模型,开发出了深拉型搪瓷内胆专用热轧钢板。经工业大生产验证,深拉件报废比例可以控制在千分之四以内,涂搪性能优良。

关键词 搪瓷内胆 深拉成形 热轧钢带 DOE(试验设计)

Development and Application of Deep Drawing Hot-Rolled Steel for Enameling Water Tank

Liu Yourong¹ and Sun Quanshe²

(1 R&D Center for Meisteel, Baosteel Research Institute, Nanjing 210039;
2 Research Center Institute, Baosteel Co. Ltd., Shanghai 201900)

Abstract The structure of enameling water tank is upgraded from three-segment type to two-segment type. The manufacturing process of water tank is changed from sheet curling and stamping craft to the sheet deep drawing craft. Because of the structure change of water tank, there are much more requirements on enameling property and formability for steel sheet. Baosteel industrial data and Design of Experiments (DOE) method are used to establish the steel designing and optimizing model, and the special deep drawing hot-rolled steel for enameling water tank is developed successfully. It has been proved by large industrial production that, the reject ratio of deep drawing parts can be controlled down the level of 0.4%, at the same time, the enameling property is excellent.

Material Index Enamelled Water Tank, Deep Drawing, Hot-Rolled Steel, DOE (Design of Experiment)

热水器搪瓷内胆结构,传统的结构设计是封头+桶身+封头结构,称为三段式结构,此种内胆结构方式有一条直线焊缝和两条环形焊缝。三段式内胆结构的优点是,采用DQ级钢板即能满足封头冲压成型要求。缺点是直缝与环缝交接处的T型焊缝,易成为内胆漏水点,影响搪瓷内胆使用寿命。为避免T型焊缝易漏水的缺点,有人提出了二段式热水器搪瓷内胆结构,采用封头深拉成型方式制成封头,直接由封头+环缝焊接的方式实现。相比三段式搪瓷内胆结构,可以减少一条直缝和一条环缝,彻底避免了直缝与环缝的T形焊接点,可显著降低搪瓷内胆漏水的发生概率,提高热水器的使用寿命。所以越来越多的热水器制造企业,将内胆结构改为二段式。因搪瓷内胆结构变化,造成成型工艺也随之发生变化,同时也必然引起钢种性能特性的变化。现有热轧搪瓷用钢不能满足深拉成型的工艺要求,在此背景下开发了深拉成型用热轧搪瓷钢。

1 热水器搪瓷内胆用钢的现状与发展趋势

搪瓷内胆功能需求分析:内胆的整体有耐压要

求,则需要基板有较高的强度。采用冲压成型加工,要求钢板具有较高的成型性能。对连接方式,要求钢板具有优良的焊接性能。同时,还必须满足用户现有搪瓷工艺及配套的原材料(瓷粉,前处理工艺等)匹配性。在搪瓷性能方面,要求钢板对搪瓷工艺有一定的适应性,具有较好的密着性和抗鳞爆性能^[1]。

目前,热水器搪瓷内胆生产制造常选用的钢材有热轧板与冷轧板。热轧板和冷轧板的加工状态不同,两者在氢渗透时间方面差异很大,主要原因是经过冷轧加工以后在钢板内部产生大量的显微空穴,并且冷轧总压下率越大产生的空穴越多,即使经过后续的退火处理这些空穴仍然保留并且成为有利的不可逆贮氢陷阱,能够显著提高钢板的氢渗透时间。反过来也说明,要提高热轧板的氢渗透时间难度较大^[2]。目前,市场上对搪瓷内胆品质要求较高的企业,为保证内胆具有一定的机械强度,通常选用高强度的热轧板或热轧酸洗板。为提高搪瓷性能,采用在钢种的成分设计中添加合金元素^[3-5],增加钢种二

相粒子的析出提高氢渗透时间的方式来提高钢种的搪瓷性能,同时也提高了钢板的机械强度。

内胆用钢发展趋势:易加工成型的冷轧板→高强度的热轧板(酸洗)→高强度深拉成型热轧搪瓷用钢。

从热水器使用寿命及安全性考虑,消除搪瓷内胆漏水是关键。因此,在结构设计上也会有升级换代的需求。结构发展趋势:三段式→二段式→整体式。

2 深拉成型搪瓷内胆制造对钢板性能要求

为满足深拉成型搪瓷内胆生产制造的加工需要,要求钢板具备以下各项基本的性能要求:优良的涂搪性能,包括抗鳞爆性能、密着性能、抑制气泡能力。深拉成型加工工艺造成钢板的变形更大,相应的钢板的基体组织变形更大,易造成搪瓷鳞爆。较好的成型性能,满足深拉成型、冲孔和翻边等加工要求。良好的焊接性能,深拉伸内胆的联接方式为焊接。焊接性能包括焊接后焊缝和焊接热影响区(HAZ)具有较高的强度和良好的低温韧性以及经过高温搪烧后焊缝和 HAZ 的强度和韧性,特别是焊接后焊缝和 HAZ 的涂搪性能是至关重要的,对深拉成型搪瓷内胆来说焊接质量的好坏在很大程度上决定了整个搪瓷内胆质量的好坏。具有较高的机械强度。搪瓷内胆主要用于储水,需承受一定的液体压力,特别是搪瓷内胆在蓄水,放水过程中,搪瓷内胆壁承受加压,泄压交替应力的作用产生疲劳失效。具有一定的机械性能强度是十分重要,较高的机械强度是提高疲劳寿命最直接有效的解决措施。良好的耐温急变性,热水器在使用过程中冷热水频繁在不同温差范围内变化时,会造成本体钢板和瓷层之间内应力和裂纹而失效。耐高温变形。在高温搪烧时,本体钢板要承受自重带来的变形。表面质量要求,钢板的表面缺陷会影响搪瓷件外观,严重的缺陷会影响内胆使用寿命。

3 钢种设计方案的选择

3.1 热水器内胆材料的成分与性能

检索国内外热轧搪瓷用钢的成分与性能,了解

到热轧搪瓷用钢的元素组成主要是 C、Mn、Ti 等元素作为强化元素添加到钢种,保证了钢种具有一定的强度性能。常见热轧搪瓷用钢的成分及性能范围^[7]见表 1。为钢种元素组成设计提供了相应的选择方向。

3.2 钢种设计

钢种设计思路。新钢种的设计必须保证搪瓷性能,再适当提高钢种的成型性能,来满足二段式内胆制造的要求。

钢种的成分设计思路。根据已有的热轧搪瓷用钢的工业大数据,分析主要元素组成与搪瓷性能的对应关系,确定钢种成分设计元素组成。

钢种的性能设计。深拉成型工艺对钢种性能范围提出相应的适应性范围。由用户提出,是钢种性能设计的主要依据。

成分与性能对应关系的建立。试验设计(DOE)是钢种设计优化的主要工具与依据。

3.3 钢种成分的选择

钢中锰元素可提高钢的强度,当然 Mn 含量的提高也降低了钢的成形性能。锰含量最少 0.05%,过低会引起热间脆性。锰含量也不宜过高。研究认为,钢板中锰含量过高,在搪烧时会导致搪瓷的密着性变差等。

碳是确保钢板强度目标的关键元素。碳的含量要适当,以确保钢板的成形性、焊接性和涂搪性等综合性能要求。研究认为,随着碳含量的提高,钢的强度上升,但钢板的成形性能、焊接性能变差,当钢板的碳含量过高时,钢板的抗鳞爆性能降低,在搪瓷过程中易产生气泡缺陷,大量的气泡会严重损害产品的使用性能。反之,碳含量降低,钢的强度下降,而且由于钢中有效析出物减少,钢板的抗鳞爆性能变差。所以碳含量的合理控制对于控制强度、成形性和涂搪性能都具有十分重要的意义。

钢板要取得高强度和优良的涂搪性尤其是抗鳞爆性,钛是非常必要的元素。钛元素等分别与钢中碳、氮、硫的结合以夹杂物和析出相的形式存在。这

表 1 热轧搪瓷用钢的化学成分及性能
Table 1 Chemical component and properties of hot rolled enamel steel

厂家	化学成分/%						力学性能		
	C	Si	Mn	S	P	Ti	σ_s /MPa	σ_b /MPa	A/%
川崎	0.02~0.10	-	0.05~0.40	-	≤0.015	0.10~0.50	-	420~700	-
新日铁	0.05~0.15	≤1.0	0.3~1.5	0.02~0.05	≤0.015	0.10~0.50	-	500~540	24~44
索拉克	0.07	≤0.03	0.29	0.012	≤0.025	0.015	220	330	45
索拉克	0.15	≤0.03	0.74	0.011	≤0.025	-	295	415	35
国内实例	0.06	≤0.03	0.63	0.012	≤0.020	≤0.005	365	440	32

些夹杂物,特别是弥散分布的第二相粒子成为良好的贮氢场所,以吸收钢板在搪烧过程中产生的氢气,防止钢板在搪烧过程中发生磷爆。当钢中含碳量相对较高而氮、硫的含量较低时,钛在钢中主要析出微细的 TiC、TiN 和 Ti(CN),当然,析出物量与钛含量有关。钛固定了钢中碳元素,有效地防止了搪瓷烧结时钢板表面钢种 C 元素与 O 元素反应生产 CO 易造成瓷层气泡缺陷。添加钛还有利于提高钢板的抗拉强度和延伸率。

铌是碳、氮化合物形成元素,在钢中即可与碳、氮化合物形成化合物,又可以固溶形式存在,对基体起强化作用。为保证强度,Nb 元素加入是非常必要的。

3.4 设计优化-DOE (Design of Experiments, 试验设计)

合金元素与生产制造工艺共同作用决定产品性能。一般情况下,产品成分确定后,工艺对产品性能影响也基本确定。通常情况下,采用回归分析方式研究成分与性能的相关性。统计软件中回归分析一般情况下两个因子的回归分析的相关性分析结果,可靠性较高。超过两个因子的回归分析,可靠性急剧下降,甚至会得到与理论相背的回归结果。而钢种设计中元素成分与性能相关的元素会超过两个或更多,因此,需要有功能更强的统计工具来分析多因子的回归分析。DOE (Design of Experiments) 可以实现二水平多因子正交试验的结果进行回归分析,得到与理论相符的因子影响系数,解决常用的直线回归方程不能解决的多因子试验的问题。DOE 的设计中随着因子数的增加,其需要的试验数量按 2^n 次方增加,需要大量的试验。相应的试验费用也成倍增加。在已有的工业生产中会有相应的生产数据能够满足试验中的条件,也有一些不满足试验条件的数据,针对缺少数据的试验通过增加中试的方式来获得。

结合工业生产的大数据,选择 2015 年~2016 年近两年的工业生产实绩数据。按设计钢种元素组成,钢种规格范围等条件作为数据筛选条件。再从数据仓库中找出对应的产品性能,作为 DOE 的试验结果。在工业大数据中没有相应的元素组成钢种的试验数据,再采用中试的方式得到钢种元素组合和性能。通过这种方式处理,可以节约大量的试验经费,而且试验数据与工业生产的结果也十分吻合。

钢种常遇到的化学元素有 C、Mn、Nb、Ti、P、Al、S、Cu、Si 等多种元素。不同的元素成分对产品的性

能影响较大。虽然钢种的元素组成有许多种组合,而且各种元素对性能强度的贡献也不相同。所以需要将各种元素对强度的贡献,按一定的条件加以筛选,通过筛选后,再进行 DOE 试验。钢种元素成分中还有 P、Al、S、Cu、Si 等常用到的元素,其波动范围基本要求必须控制在要求的范围以内,不作为性能强度的调整元素,所以就没有做为试验元素列入试验考察对象。对已知钢种元素成分组合分析,再结合国内外搪瓷用钢的元素组成,以及宝钢热轧搪瓷用钢的元素组合与性能相关性回归分析,挑选出了 C、Mn、Nb、Ti 四种强化元素,采用 DOE 方法来考察成分对性能的影响。应用 Minitable 软件中的“二水平多因子正交试验”模块安排试验及结果见表 2。

实验中的工业生产的大数据为:生产工艺流程-铁水预处理→转炉→LF 精炼炉→连铸→230 mm 板坯→加热炉→二机架粗轧→七机架精轧→卷取→冷却→酸洗→成品卷。产品厚度规格为 1.80~2.50 mm 的热轧宽带卷。中试实验的生产工艺流程-25 kg 中频感应炉→100 mm×150 mm×200 mm 铸锭→锻成 20 mm×100 mm×300 mm 钢锭→单机架试验轧机→2.5 mm×100 mm×2 000 mm 的热轧板。

由 DOE 得到成分与性能对应关系,建立成分与性能之间的传递函数,并采用水晶球软件建立性能预测模型(见表 3)。优化所需的偏差数据来自将工业大数据的统计分析结果。将设定成分控制目标值,代入性能预测模型进行模拟优化,得到性能目标值。由 DOE 工具建立起的成分/性能对应关系的传

表 2 DOE 试验及结果

Table 2 Design of experiment and result

试验 顺序	钢中成分/%				$R_{cl}/$ MPa	$R_m/$ MPa	$A/$ %	备注
	C	Mn	Nb	Ti				
1	0.04	0.8	0.02	0.06	420	500	28	中试
2	0.08	0.4	0	0.06	380	460	32	生产 数据
3	0.04	0.4	0	0.06	360	440	34	
4	0.04	0.8	0	0.06	380	480	30	
5	0.04	0.8	0	0	290	390	37	试验室
6	0.08	0.4	0	0	280	400	38	生产 数据
7	0.08	0.8	0.02	0.06	440	510	34	
8	0.08	0.8	0.02	0	405	485	28	
9	0.04	0.8	0.02	0	400	460	30	
10	0.04	0.4	0	0	250	360	45	
11	0.08	0.8	0	0.06	430	500	23	中试
12	0.08	0.8	0	0	330	420	32	
13	0.08	0.4	0.02	0	460	490	29	
14	0.04	0.4	0.02	0	350	400	38	
15	0.04	0.4	0.02	0.06	425	438	29	
16	0.08	0.4	0.02	0.06	445	480	22	

注:表中数据主要采自工业生产的大数据实绩。大数据中不满足设计要求的数据,通过中试进行补充。

表 3 热轧搪瓷用钢的性能预测模型

Table 3 Prediction mode of mechanical properties of hot rolled enamel steel

因子	σ 说明	分布	均值	σ 偏差	Lsl	Usl	定义	
成分	C				0.04	0.08		
	Mn	统计值	正态	设定值	统计值	0.40	0.80	预设值
	Nb				0.01	0.02		
	Ti				0.02	0.06		
R_{el}								
性能	R_m	设计值	正态	设计值	统计值	设定值	设定值	计算值
	A%							
回归 偏差	S1		0	31.3				
	S2	统计值	正态	0	22.1			
	S3			0	1.95			
$R_{el} = R_{el0} + 922C + 45.3Mn + 4031Nb + 1073Ti + S1$ 屈服强度 (MPa)								
$R_m = R_{m0} + 866C + 86.6Mn + 1956Nb + 840Ti + S2$ 抗拉强度 (MPa)								
$A\% = A_0 - 103C - 7.81Mn - 206Nb - 93.8Ti + S3$ 延伸率 (%)								

递函数为产品设计优化的提供了很好的量化的设计依据。

4 设计验证及应用情况

4.1 钢种的抗搪瓷鳞爆性能评估

搪瓷鳞爆是搪瓷内胆生产制造质量管控的主要缺陷。一般认为氢是发生鳞爆的根源^[8], 钢板在搪烧之后, 由于瓷层是一种致密的玻璃质物质, 氢在瓷层中的扩散困难。钢中的氢元素析出聚集造成鳞爆。

搪瓷鳞爆的影响因素有钢板/瓷釉/工艺 3 个要素。钢板仅是影响要素中一个重要因素。因此, 解决搪瓷鳞爆缺陷, 需 3 个要素协同解决。而鳞爆缺陷又是必须解决的问题。搪瓷行业进行钢种搪瓷性能评估方法有多种, 但是还没有形成统一的评估标准与方法。钢板预防鳞爆的措施有两种: 氢渗透时间测试和搪瓷挂片试验两种方式, 而这两种方式都各自有其局限性。

针对采用热轧钢板做原料的搪瓷企业, 为预防因钢板供应商切换造成批量鳞爆缺陷。预防搪瓷鳞爆常用的措施是挂片试验, 将钢板经正常搪瓷生产工艺流程走一遍, 工况条件与现场完全一致, 经多轮搪瓷挂片验证, 没有出现搪瓷鳞爆时, 才可切换相应的钢种与供应商。

氢在钢板中穿透时间越长或氢扩散系数越小, 钢板的抗鳞爆性能越好。根据国外的研究, 要保证钢板不产生鳞爆, 氢穿透时间 TH 值至少为 8 min (以 1 mm 厚的钢板为标准), 氢的扩散系数 $Deff$ 小于 $2.0 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$ 。钢板具有优良的抗搪瓷鳞爆

性能。需要指出的是此种方式仅适用于冷轧板。冷轧压下率与退火工艺是氢渗透时间主要影响因素, 而对于热轧钢板, 因其没有冷轧与退火工序加工, 所以还不能直接采用氢渗透时间评估热轧状态的钢板在搪瓷过程中是否会发生鳞爆。

4.2 优化模型验证

假定工艺控制参数等对性能影响简化为固定条件, 仅考虑成分对性能的影响, 采用 DOE 正交试验的方法, 将试验室中试数据、生产实绩大数据及预生产度验数据, 共计 16 组试验结果, 拼成 DOE 所需的所有数据, 并采用 Mintable 软件中的 DOE 模块进行分析, 得到了与理论分析非常吻合的传递函数, 应用传递函数进行模拟计算并与生产工业试验得到的数据(表 4)进行对比验证, 结果显示采用 DOE 方式得到的传递函数模型与生产实绩非常的吻合。

4.3 搪烧试验性能验证

搪瓷钢与一般用途的钢种相比, 有一个显著特点, 钢板须经 800 ~ 900 °C 搪烧冷却过程, 钢板强度会明显降低^[6]。所以, 在钢种设计时必须考虑这一因素, 并采取相应的措施加以解决。一般情况下, 可以通过模拟搪烧试验摸索出强度下降规律。在试验室研究加热温度与保温时间对钢板性能强度的变化情况。绘制出保温时间/加热温度对性能的影响。

从性能变化曲线图(图 1)可以得出相应的变化趋势。不同加热温度对性能的影响, 加热温度越高, 性能下降的越多, 但下降到一定程度后, 趋于平缓。加热保温时间对性能的影响, 随着保温时间的延长, 性能强度也逐渐下降, 但保温时间达到 10 min 以后, 强度下降不明显。搪瓷后钢种的性能强度满足搪瓷内胆设计要求的最小强度值。

4.4 钢种的组织形貌及二相粒子检测分析

二相粒子析出是搪瓷用钢的典型特征。从图 2 中可以看出, 金相组织为等轴状的铁素体及少量的珠光体构成, EDS 扫描组织中观察到片层状的珠光体, 是为热轧态组织。析出物尺寸大于 1 μm 的为长条状的 MnS、以及颗粒状圆形 TiS 的析出, 达到设

表 4 热轧搪瓷用钢的化学成分与力学性能试验结果

Table 4 Experiments result chemical component and mechanical properties of hot rolled enamel steel

钢号	化学成分/%							力学性能		
	C	Si	Mn	P	S	Al	Ti	R_{el} / MPa	R_m / MPa	A/ %
BTC330R	0.08	0.02	0.80	0.015	0.05	0.07	0.04	360	440	28
BTC245R	0.05	0.01	0.40	0.015	0.08	0.07	0.04	265	360	32
HTC2	0.07	0.01	0.60	0.015	0.02	0.07	0.04	290	400	35

计钢种的预期目标。目前钢种的组织形貌和二相粒子检测分析仅是设计的验证内容,还没有达到作为钢种设计评估的主要依据。

4.5 钢种应用情况

深拉伸搪瓷内胆因其漏水率低正逐渐被市场和用户所认可。深拉伸搪瓷内胆将成为高端热水器承压水箱的首选机型。冷轧板的因强度性能低,延伸率高,有利于深拉成型工艺,但不足之处是深拉件的直壁部分减薄增厚问题严重。随着深拉件的深度增加,深拉件的起皱缺陷越严重,严重影响成品制成率,特别是大容积薄壁容器,壁厚减薄增厚问题突出。而采用热轧板,因其强度高,深拉件的壁厚均匀性更高,更有利于提高整胆的使用寿命。宝钢新开发的热轧深拉伸搪瓷内胆专用钢,生产的搪瓷内胆已达 5 万台以上。深拉件报废比例可以控制在千分之四以内,搪瓷性能良好,满足大容积深拉伸搪瓷内

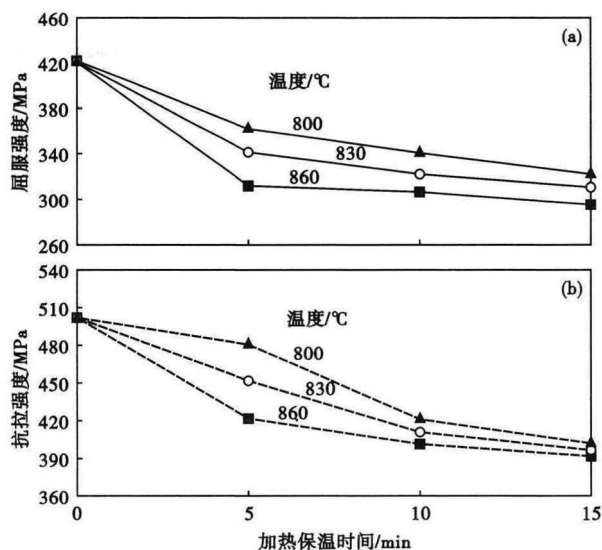


图 1 搪瓷后屈服 (a)、抗拉 (b) 性能变化曲线

Fig. 1 Curve graphs of yield (a) and tensile (b) strength of enamel steel after enameling

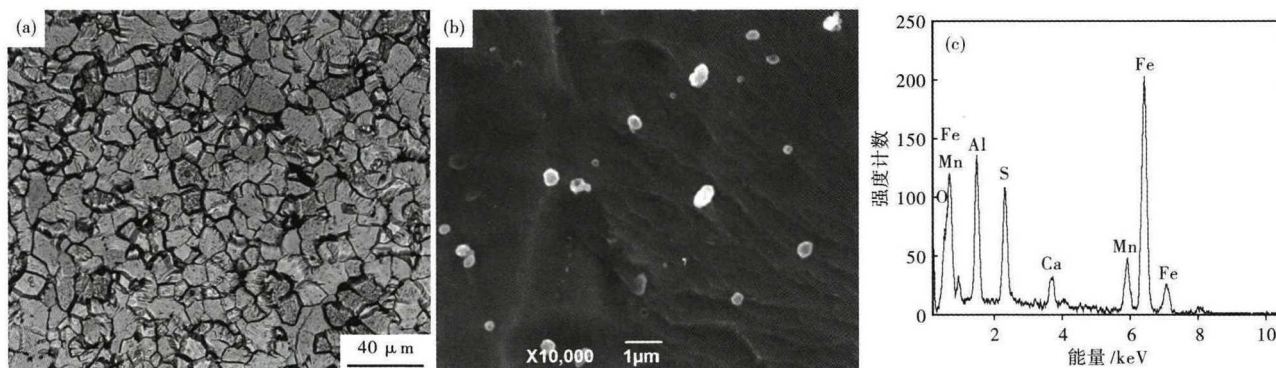


图 2 搪瓷钢组织和析出物 EDS(X 射线能谱仪) 分析结果

Fig. 2 Result of morphology and precipitated phase analyzed by EDS (Energy Dispersive Spectrometer)

胆的生产制造要求。

5 结论

根据深拉成型热水器搪瓷内胆生产制造对钢材功能提出的新要求,运用工业大数据与 DOE 工具进行钢种设计优化,既保证搪瓷性能,又满足深拉成型功能。宝钢新设计开发生产的热轧深拉成型搪瓷内胆专用钢,深拉件报废比例可控,搪瓷性能良好,经工业大生产验证,满足深拉成型搪瓷内胆的使用要求。

参考文献

[1] 孙全社,王双成. 宝钢双面涂搪用热轧钢板和中厚板的研发及应用[J]. 玻璃与搪瓷,2017(2):6-9.
 [2] 孙全社,徐春,蒋伟忠. 合金元素对冷轧钢板涂搪性能的影响[J]. 玻璃与搪瓷,2015(12):1-5.
 [3] Sun Quanshe, Jin Lei. Study on Hydrogen Permeability of Titanium-

Bearing Ultra Low Carbon Sheet Steel[R]. Liu Guoquan, Wang Fuming, Wang Zubin, et al. Proceedings of HSLA Steels 2000 [C]. Xi'an: Metallurgical Industry Press, 2000:635-638.

[4] 徐春,李晓杰. 钛对冷轧超低碳搪瓷钢磷爆性的影响[J]. 热处理,2011(3):16-21.
 [5] 孙全社. 加钛超低碳钢成形性能和贮氢性能的研究[J]. 钢铁,2000(3):39-42.
 [6] 董福涛,薛飞,杜林秀,等. 搪瓷烧制工艺对 330 MPa 级热轧搪瓷钢组织性能的影响[J]. 材料保护(增刊),2016(11):96-98.
 [7] 许亚华,周焕勤. 国外搪瓷用钢板生产技术及宝钢的应用[R]. 宝钢情报,1991(1):44-48.
 [8] 毕锦侯. 解决钢板搪瓷磷爆缺陷的技术途径[J]. 华东搪瓷,1990(4):1-7.

刘友荣(1969-),男,硕士(2007 年安徽工业大学),高级主任研究员,1995 年西安建筑科技大学(本科)毕业,热轧板带产品开发。E-mail:liuyyr@163.com

收稿日期:2018-11-12