

搪瓷用钢抗鳞爆性能的研究现状

葛玉静, 徐春

(上海应用技术大学 机械学院, 上海 201418)

摘 要: 介绍了鳞爆形成机理, 分析了材料成分和加工工艺 2 个主要因素对析出相种类及数量、晶粒级别和抗鳞爆性能的影响。通过改善搪瓷用钢的组成成分、制定合理的轧制和退火工艺等措施来增加钢中不可逆陷阱数量, 可以提高钢的贮氢性能, 减少鳞爆的发生。并对国内外抗鳞爆性能评价技术的发展现状以及最常用的评价抗鳞爆性能的方法进行了相关介绍。

关键词: 搪瓷用钢; 鳞爆; 析出相; 不可逆陷阱; 贮氢性能

中图分类号: TQ173 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2016)12-0129-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2016.12.021

Research Status of Enameled Steel Fish-scaling Resistance

GE Yu-jing, XU Chun

(School of Mechanical and Power Engineering, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China)

ABSTRACT: Enameled steels feature in attractive appearance, easy cleaning and corrosion resistance. They have been widely used in daily life, industrial production, architectural decoration and other applications. However, enameled steels are often subject to fish-scaling, which leads to failure of enamel coatings. The formation mechanism of fish-scale was introduced. In addition, the effects of material composition and processing technology on precipitated phase type and quantity, grains grade and fish-scaling resistance were analyzed. Irreversible traps were added by improving the composition of enameled steel, planning rational rolling and annealing processes. In this way, hydrogen storage property of enameled steels was improved and occurrence of fish-scaling was reduced. Moreover, development status of evaluation technologies concerning fish-scaling resistance home and abroad as well as most common methods used in evaluating fish-scaling resistance were introduced as well.

KEY WORDS: enameled steel; fish-scaling; precipitated phase; irreversible trap; hydrogen storage property

搪瓷用钢是搪瓷制品中的金属坯体, 成形性好, 经涂搪后具有外表美观, 表面光洁细腻, 色彩丰富, 耐腐蚀、易洗涤等优点, 现已被广泛应用于日常厨房用品、家电产品、建筑装饰搪瓷面板和一些大型管道、地铁站等重要场合。北京 2008 年奥

运会、酒泉卫星发射中心、泉州市区污水处理工程等建设中也用到了双面搪瓷用钢板。由此可见, 搪瓷用钢在国家建设中扮演着相当重要的角色。

搪瓷用钢的质量直接关系到搪瓷制品的使用寿命, 而鳞爆缺陷一直是搪瓷用钢生产商想克服的

收稿日期: 2016-05-02; 修订日期: 2016-11-10

Received: 2016-05-02; Revised: 2016-11-10

作者简介: 葛玉静 (1989—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为搪瓷用钢抗鳞爆性能评价技术。

Biography: GE Yu-jing(1989—), Female, Master graduate, Research focus: the technology of enameling steel fish-scale resistance evaluation.

通讯作者: 徐春 (1963—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为搪瓷用钢抗鳞爆性能检测设备的研发。

Corresponding author: XU Chun(1963—), Female, Ph. D., Professor, Research focus: the research and design of enameling steel fish-scale resistance testing equipment.

难题。鳞爆是瓷釉层产生的大小不等、深度不一的鱼鳞状碎片的现象,可能在搪瓷制品放置很长时间后发生,也可能在搪瓷涂完后当场出现,而且事前毫无征兆,所以具有延迟性和隐蔽性的特点,这也是搪瓷制品报废的主要原因之一^[1-5]。鳞爆的发生会造成严重的经济损失,应从根源着手,了解其产生原因及影响因素,进而采取有效的预防措施。

文中对搪瓷用钢抗鳞爆性能的研究现状进行了介绍,综合了目前国内外的抗鳞爆措施及评价方法,以期为搪瓷用钢生产企业给予指导性意义。

1 鳞爆形成机理

有资料研究认为爆瓷是由瓷层与钢板之间结合不良导致的。Zapffe 和 Sweo 等研究发现鳞爆主要由氢导致。搪烧前,钢板因酸洗会存有一定量的氢。在 800~900 °C 搪烧阶段中,炉中的水分解产生 H 原子,由于晶体结构发生转变,大量氢被钢板吸收并暂存在晶格畸变区、晶界、渗碳体和铁素体之间的相界及非金属夹杂物孔隙里。随着温度的降低,钢中氢达到过饱和,部分逸出至钢板和搪瓷的结合界面上并不断聚集。当钢板和瓷釉层之间的压力超过搪瓷粘结强度时就会发生鳞片状的搪瓷层脱落,即形成鳞爆^[6-8]。

2 鳞爆影响因素

鳞爆的级别和发生时间与搪瓷用钢的抗鳞爆性能密不可分。搪瓷用钢贮氢能力的大小决定着其抗鳞爆性能的好坏,贮氢性能取决于钢内捕获氢的陷阱种类和数量,陷阱分可逆陷阱和不可逆陷阱。在高温条件下作为氢的暂时贮存场所,而温度降低之后,氢会逸出的陷阱称为可逆陷阱,如晶界、位错等;不可逆陷阱则是氢的永久贮存场所,与氢的结合能较大,氢很难再逃出,常见的不可逆陷阱主要是第二相粒子,因而,改善搪瓷用钢的抗鳞爆性能应从增加不可逆陷阱的数量方面着手。有资料显示鳞爆主要受搪瓷用钢本身质量和加工工艺的影响。

2.1 搪瓷用钢本身质量

当钢板表面存在严重的夹杂物或其他缺陷时,涂搪后将会引起爆瓷。张涛^[9]等发现 Al, Si 氧化物

是管线钢产生裂纹的主要因素,尤其是氧化铝类夹杂。轧制过程中氧化铝类夹杂具有硬度高、不易变形等特点,故易产生应力集中并导致微裂纹出现,钢表面的点蚀坑也会加促氢致裂纹的产生。

钢中化学成分(尤其是 C, P, S, Si, Al 的含量)对钢板的贮氢性能也有一定作用。宋乙峰等^[10]研究发现,当钢中 $w(O) > 0.019\%$ 时,由于氧化物夹杂质量分数下降,减少了氢渗透时间使得抗鳞爆性能降低; $w(O) < 0.019\%$ 时,随着 $w(O)$ 增加,钢中氧化物夹杂质量分数增大,氢渗透时间加长,抗鳞爆性能增强。

由于氢原子半径小,可顺利穿过铁素体的原子晶格逸出、集聚,所以铁素体的晶粒度和形态也影响着钢板的抗鳞爆性能。铁素体应呈等轴晶型,等级为 5—10 级。对于薄钢板(厚度小于 0.5 mm),等轴晶型铁素体等级最好为 8—10 级。钢板内等轴晶的存在会使氢扩散系数减小,呈带状分布排列的铁素体会影响钢板的冲压性能和搪瓷性能。铁素体晶粒延伸度不应超过 2 级,否则会使搪瓷质量低劣。

2.2 轧制和退火工艺

轧制和退火工艺会影响析出物的种类、尺寸和分布以及铁素体的再结晶率和晶粒大小,所以轧制和退火工艺也会影响搪瓷用钢的抗鳞爆性能。在生产搪瓷用钢过程中,应消除钢板表面夹杂等缺陷,严格控制退火工艺和热轧卷取温度,保证获得良好的金相组织^[11-30]。冷轧搪瓷钢板的抗鳞爆性能和热轧阶段温度控制的稳定性有关,应保证温度控制的稳定性,以使冷轧搪瓷钢贮氢性能均匀。冷轧压下量对搪瓷用钢抗鳞爆性能效果也是不容忽视的,随冷轧压下量的增大,钢板的抗鳞爆性能愈强。

钟振前^[31]等研究了条状夹杂物对 0Cr16Ni5Mo 钢中氢扩散过程的影响。研究发现当条状夹杂物长度方向平行于氢渗透方向时,会加快氢的扩散,即氢扩散系数增大;夹杂物长度方向与氢渗透方向垂直时,夹杂物对氢扩散起阻碍作用,增加了氢穿透钢板的时间。此外,条状夹杂物的变形延伸量也对氢的扩散有一定影响,在与夹杂物长度平行的方向上,夹杂物变形量越大,氢表现扩散系数也越大。

3 提高抗鳞爆性能的措施

有关鳞爆的研究资料显示增加搪瓷用钢中的

氢陷阱(尤其是不可逆陷阱)的数量是提高其抗磷爆性能的一项强有力措施。合理设计钢的成分、添加合金元素并制定适宜的轧制和退火工艺可以改善搪瓷用钢中析出相的种类及数量,这些析出相作为氢的贮存场所,可以提高搪瓷用钢的贮氢性能,从而减少磷爆的发生。

3.1 改善搪瓷用钢的成分

搪瓷用钢应具有良好的抗磷爆性能,超低碳钢的组织为铁素体,应通过增加贮氢场所来提高其贮氢性能。孙全社^[32]等对加钛超低碳钢的成形性能和贮氢性能进行了研究,结果表明,Ti 的添加不只提高了钢的强度,而且与钢中 C, N, S 元素形成的 TiC, TiN, $Ti_4C_2S_2$ 等化合物作为钢中的不可逆陷阱,显著提升了钢板的贮氢能力。随着钢中 Ti 含量的增加,析出相所占的体积分数也随之增大,但是 Ti 含量过高就会降低钢板的成形性能,因此要添加适量的 Ti 元素,以保证在不影响钢板成形性能的条件下使搪瓷用钢具有良好的磷爆敏感性。

在低合金钢中加入 V, Ti 或稀土等活性元素也能降低钢板发生磷爆现象的可能性。由于在加工过程中,V, Ti 等元素会析出 VC(TiC), VCN(TiCN)等氢陷阱,减小了氢的扩散系数,故 06VTi 钢具有较好的抗磷爆性。

东北大学利用 B 对冷轧低碳钢抗磷爆性和冲压成形性能的双重作用,通过在钢中添加少许 B 元素来提高低碳冷轧搪瓷用钢的抗磷爆性。在常规冷轧深冲钢成分中,由于 MnS 夹杂物是氢的不可逆陷阱,故可通过适当增加 Mn 和 S 元素的含量,以提高钢板的磷爆敏感性。

3.2 合理制定加工工艺

搪瓷用钢板的磷爆敏感性与钢板的贮氢能力密切相关,而贮氢陷阱(晶界、位错密度和第二相粒子)的种类和数量是影响钢板贮氢能力的主要因素。钢中陷阱越多,其贮氢性能越好,则抗磷爆性愈强^[33—38]。由于加工工艺对析出相的种类和数量有一定的影响,所以改进加工工艺显得尤为重要。

钢中 Ti, S, N 的含量较高时,会因夹杂物粗大降低钢板的成形性能,故需选用合理的冷轧、热轧及退火工艺来阻止粗大夹杂物的出现。此外,合理的工艺设计可以使作为贮氢陷阱的第二相粒子呈

弥散分布且尺寸细小,从而改善钢板的搪瓷性能。

冷轧工艺的控制主要是冷轧压下量的控制。李小权^[39—40]等研究发现,冷变形导致的位错可作为贮氢的可逆陷阱。冷轧压下率越大,氢穿透钢板所需的时间越长,氢扩散系数越小,钢板磷爆敏感性愈强。因为冷轧压下率较大时,不仅可以使退火阶段的第二相粒子再析出和长大,而且可以使粗大颗粒细化。

Sanagi S^[41]研究了含 Ti 深冲钢板的第二相粒子析出行为与钢板的再加热温度和卷取温度之间的关系。研究发现选用低的再加热温度和高的卷取温度不仅会减少 TiC 细小粒子,而且容易析出粗大的 $Ti_4C_2S_2$ 粒子。这是因为低的再加热温度减少了第二相粒子的反向溶解量和 TiC 的析出量,并为 $Ti_4C_2S_2$ 粒子的更加粗大化创造了条件。此外,实验发现 $Ti_4C_2S_2$ 粒子的捕氢能力强于 TiC 粒子。

赵辉^[42]研究发现高速、大压下量和低的终轧温度是增加第二相粒子的析出量、促进晶粒细化、使卷取后的第二相粒子变得更加粗大的有利条件。因为较高的卷取温度会使析出物再析出并提高其扩散能力,进而在缓冷过程中聚集并粗大化。

卷取温度的变化会对第二相粒子的析出及铁素体晶粒有影响,所以最终卷取温度的控制十分重要。热轧选用高温卷取的方式,不仅增大了贮氢表面积,而且通过减小钢中的位错密度,促进了 C, N 化物的粗化和析出,并且导致钢中第二相粒子集聚、长大。在热轧过程中,影响 C, N 化物析出比例的因素有变形温度、冷却速度和冷却终止温度。此外,卷取温度的升高可使晶粒更加均匀化,因此,要提高搪瓷用钢成形性能并增加钢中第二相粒子的析出数量,热轧时应选用高温终轧和高温卷取的方式。

退火工艺对钢中晶粒也有影响。实际生产中,退火分罩式退火和连续退火 2 类。研究表明,与连续退火相比,罩式退火后的钢板贮氢性能更好。这是由于钢中析出相密度较大,而且随着退火温度的提高和保温时间的延长,铁素体晶粒也随之长大,且晶粒由沿轧制方向拉长状态向等轴晶粒转变,数量不断增多,这对钢板的抗磷爆性能也十分有益。当钢中晶粒较粗且为等轴晶,晶粒度为 8—10 级时,对其成形性和抗磷爆性能有利。此外由于细晶粒使钢具有较高的屈服强度,会导致成形性能下降,故不适合制作搪瓷品。经退火处理的搪

瓷用钢其显微组织主要为铁素体和少许游离渗碳体。为了提高涂搪表面质量,应尽量使渗碳体呈颗粒状弥散分布或短链状,避免渗碳体趋于网状或呈网状分布在铁素体晶界上^[43—53]。

4 抗鳞爆性能评价方法

为检验搪瓷用钢是否满足抗鳞爆性能的要求,钢板贮氢性能的评价方法由涂搪实验、强制鳞爆等方法发展到以电化学为基础的评价方法。目前,钢板抗鳞爆性能评价技术主要有国家标准、国际标准和欧洲标准 3 种。由于国家标准和国际标准步骤复杂,而且有一定的使用局限性,所以国内外市场大多采用欧洲标准来测试钢板的氢渗透时间来判断其抗鳞爆性能的好坏,并通过涂搪实验来进一步验证。

将试验用钢板加工成尺寸为 100 mm×70 mm 的试样,采用搪瓷用钢板抗鳞爆性能评价标准 EN 10209: 2013,进行抗鳞爆性能检测实验。

把试样放入温度为 70~75 ℃的(30±5) g/L 的硅酸钠溶液进行脱脂,脱脂时间 5 min,脱脂后用自来水冲洗 30 s。重复上述步骤,直到试样表面干净。然后将试样置于氢渗透试验装置。将样板用紧固螺栓固定在测试装置底部,在测试仪上部加入电解液。被测样品作阴极,多孔铂片作阳极。采用整流器在样板与多孔铂片间提供 0.125 A/cm² 的直流电流,电压为 6 V 的直流电压,测试温度为(25±0.5) ℃,试验电解液由体积分数为 6% 的 H₂SO₄ 和 0.25 g/L 的 HgCl₂ 和 0.5 g/L 的 As₂O₃ 配制而成。在试样上的侧漏斗中加入电解液。通过装置底部活塞调节毛细管液面到达起始位置。让电解液与钢板接触 10 min,以保证析氢溶液温度达到目标值。然后,施加析氢电流,电流开始施加的时间点为氢渗透曲线时间起点。

采用光电设备及与之连接的记录仪记录毛细管液面上升情况,根据获得的毛细管液面与时间曲线,采用切线法确定氢渗透时间。冷轧钢板氢渗透值 T (即欧洲标准中的 TH 值)的计算见式(1):

$$T=t_b/d^2 \quad (1)$$

式中: t_b 为样品的氢渗透时间(min); d 为样品的厚度(mm)。

Okuyamas 研究发现,0.8 mm 厚的搪瓷钢板不发生鳞爆的条件是氢穿透时间大于 5 min;当换算成 1 mm 厚的钢板时,氢穿透钢板的时间 t_b 需大于

7.8 min 才能防止鳞爆的产生。氢穿透钢板所用时间愈长,愈不容易发生鳞爆。

5 展望

目前,大多搪瓷用钢生产商通过加入合金元素(如 Mn, S, Ti 等)以及改善加工工艺来提高搪瓷钢的抗鳞爆性能,由于搪瓷钢运用场合不同,像在环境较恶劣的情况下,其质量要求也相对较高,为了能制造出更好的搪瓷钢,科研工作者还需要做进一步的研究,使搪瓷钢的运用更加广泛,希望鳞爆缺陷能早日得到彻底解决。

参考文献:

- [1] 杨萍. 钢板搪瓷鳞爆缺陷探讨[J]. 中国搪瓷, 1998, 19(5): 27—29.
YANG Ping. The Discussion about Enamelled Steel Fishscale Defects[J]. China Enamel, 1998, 19(5): 27—29.
- [2] 凌治泓. 钢板搪瓷的鱼鳞爆[J]. 玻璃与搪瓷, 1951, 19(4): 46—51.
LING Yi-hong. Fishscale of Enamelled Steel[J]. Glass and Enamel, 1951, 19(4): 46—51.
- [3] 王禹. 鳞爆分析与防止措施[J]. 中国搪瓷, 1997, 18(3): 11—15.
WANG Yu. Fishscale Analysis and Prevention Measures[J]. China Enamel, 1997, 18(3): 11—15.
- [4] 徐研. 浅谈搪瓷鱼鳞爆的形成及防止措施[J]. 中国搪瓷, 1997, 18(1): 20—23.
XU Yan. Introduction about the Formation of Enamel Fishscale and Prevention Measures[J]. China Enamel, 1997, 18(1): 20—23.
- [5] 封治民, 傅玉兰, 赵克清. 搪瓷用钢鳞爆的研究[J]. 金属学报, 1986, 22(4): 189—191.
FENG Zhi-min, FU Yu-lan, ZHAO Ke-qing. The Study on Enamelled Steel Fishscale[J]. Acta Metallurgica sinica, 1986, 22(4): 189—191.
- [6] 王柏林. 搪烧过程中抗鳞爆的机理探讨[J]. 中国搪瓷, 1995, 16(3): 5—9.
WANG Bai-lin. Discussion on Mechanism of Resisting Scaling in Firing[J]. China Enamel, 1995, 16(3): 5—9.
- [7] GRABKE H J, RIECKE E. Absorption and Diffusion of Hydrogen in Steels[J]. Materiali in Tehnologije, 2000, 34(6): 331—342.
- [8] 孙全社. 冷轧超低碳搪瓷钢板的试验研究[J]. 宝钢技术, 2000(3): 22—24.
SUN Quan-she. Experimental Research on Cold Rolled Ultra-low Carbon Enameling Steel Sheets[J]. Baosteel Technology, 2000(3): 22—24.
- [9] 张涛, 王长朋, 刘静. X80 管线钢在酸性环境下的氢致开裂行为研究[J]. 表面技术, 2014, 43(6): 48—52.
ZHANG Tao, WANG Chang-peng, LIU Jing. Hydrogen Induced Cracking Behavior of X80 Pipeline Steel in

- Acidic Environment in China[J]. Surface Technology, 2014, 43(6): 48—52.
- [10] 宋乙峰, 杨宏武, 郎丰军, 等. w(O)对冷轧搪瓷钢抗鳞爆性能的影响[J]. 钢铁研究, 2015, 43(5): 17—20.
SONG Yi-feng, YANG Hong-wu, LANG Feng-jun, et al. Effect of Oxygen Content on Fish-scaling Resistance Performance of Cold Rolled Enamel Steel[J]. Research on Iron and Steel, 2015, 43(5): 17—20.
- [11] YUAN Xiao-min. Precipitates and Hydrogen Permeation Behavior in Ultra-low Carbon Steel[J]. Materials Science and Engineering, 2007(452/453): 116—120.
- [12] 金蕾, 孙全社. 含钛超低碳搪瓷钢板的退火工艺[J]. 钢铁, 2007, 19(4): 65—68.
JIN Lei, SUN Quan-she. Annealing Process of Ultra-low Carbon Enameling Steel Containing Titanium[J]. Iron and Steel, 2007, 19(4): 65—68.
- [13] 孙全社. 宝钢搪瓷用钢的开发与应用[J]. 上海金属, 2005, 11(6): 47—50.
SUN Quan-she. The Development and Application of Baosteel Enamelled Steel[J]. Shanghai Metals, 2005, 11(6): 47—50.
- [14] 袁晓敏, 张庆安, 孙全社. 搪瓷钢板中析出物的测定[J]. 钢铁研究学报, 2000, 12(5): 58—60.
YUAN Xiao-min, ZHANG Qing-an, SUN Quan-she. Determination of Enamelled Steel Sheet Precipitates[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2000, 12(5): 58—60.
- [15] SUN Quan-she, JIN Lei, LYU Feng, et al. Study on Hydrogen Permeability of Titanium-Bearing Ultra Low Carbon Sheet Steel[J]. Proceedings of the 4th International HSLA Steels, 2000: 635—638.
- [16] 王东明, 张万山, 董恩龙, 等. 鞍钢搪瓷用热轧带钢的开发与应用[J]. 鞍钢技术, 2009(3): 28—32.
WANG Dong-ming, ZHANG Wan-shan, DONG En-long, et al. Development and Application of Enamel Hot Rolled Strip Steel in Angang[J]. Angang Technology, 2009(3): 28—32.
- [17] WEI F G, TSUZAKI K. Hydrogen Absorption of Incoherent TiC Particles in Iron from Environment at High Temperatures[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2004, 35(10): 3155—3163.
- [18] HORN LUND E, FOSSEN J K T, HAUGER S, et al. Hydrogen Diffusivities and Concentrations in 520M Carbon Steel under Cathodic Protection in 0.5 M NaCl and the Effect of Added Sulphite, Dithionite, Thiosulphate, and Sulphide[J]. International Journal of Electrochemical Science, 2007(2): 82—92.
- [19] DONG Fu-tao, DU Lin-xiu, LIU Xiang-hua, et al. Effect of Ti(C,N) Precipitation on Texture Evolution and Fish-scale Resistance of Ultra-low Carbon Ti-bearing Enamel Steel[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2013, 20(4): 39—45.
- [20] MAUGIS Philippe, GOUNE Mohamed. Kinetics of Vanadium Carbonitride Precipitation in Steel: A Computer Model[J]. Acta Materialia, 2005(53): 3359—3367.
- [21] 洗爱平, 李培基, 王仪康. 低碳钢中沉淀 TiC 对氢的捕集[J]. 金属学报, 1986, 22(3): 181—188.
XIAN Ai-ping, LI Pei-ji, WANG Yi-kang. TiC as Hydrogen Trap in Low Carbon Steel[J]. Acta Metallurgica Sinica, 1986, 22(3): 181—188.
- [22] 赵克清. 钢中钛与氢的作用[J]. 鞍钢技术, 1991(9): 35—37.
ZHAO Ke-qing. The Effect of Titanium and Hydrogen in Steel[J]. Angang Technology, 1991(9): 35—37.
- [23] 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, 26(3): 16—21.
XU Chun, LI Xiao-jie. The Impaction of Titanium on Cold-rolled Ultra-low Carbon Steel Fish-scale Property[J]. Heat Treatment, 2011, 26(3): 16—21.
- [24] 张万灵, 刘建容. 冷轧搪瓷钢板抗鳞爆性能检测方法评述[J]. 武钢技术, 2009, 47(6): 44—47.
ZHANG Wan-ling, LIU Jian-rong. Review on Test Method for Fish-scaling Resistance of the Cold Rolled Enamel Steel Sheet[J]. WISCO Technology, 2009, 47(6): 44—47.
- [25] 孙全社. 添加钛、铌的超低碳钢在不同工艺过程中的析出相分析[J]. 钢铁研究学报, 2006, 18(2): 41—45.
SUN Quan-she. Analysis of Precipitate Phase in ULC Steel with Titanium and Niobium for Different Processes[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2006, 18(2): 41—45.
- [26] 孙全社, 王先进. 稀土、钛和铌对冷轧超低碳搪瓷钢性能的影响[J]. 钢铁, 2004, 39(5): 59—62.
SUN Quan-she, WANG Xian-jin. Effect of Re, Ti and Nb on Properties of ULC Cold-rolled Steel Sheets for Enameling Use[J]. Iron and Steel, 2004, 39(5): 59—62.
- [27] 原鲜霞, 徐乃欣. 稀土系 AB5 型贮氢合金电极中氢扩散行为的电化学研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2003, 32(1): 27—31.
YUAN Xian-xia, XU Nai-xin. Electrochemical Study of Hydrogen Diffusion Behavior of Rare Earth AB5 Hydrogen Storage Alloy Electrode[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2003, 32(1): 27—31.
- [28] 戴丽娟, 郭静茹, 段连钢. 09MnVTiN 钢中钛的存在形态分析[J]. 兵器材料科学与工程, 2001, 24(6): 27—29.
DAI Li-juan, GUO Jing-ru, DUAN Lian-gang. The Presence Morphological Analysis of Titanium in 09MnVTiN Steel[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2001, 24(6): 27—29.
- [29] 王海燕, 程麟. 钢板处理工艺对搪瓷性能的影响[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2008, 30(2): 90—93.
WANG Hai-yan, CHENG Lin. Effect of Treatment Techniques on Enamel's Properties[J]. Journal of Nanjing University of Technology(Natural Science Edition), 2008, 30(2): 90—93.
- [30] 董福涛, 杜林秀, 刘相华, 等. 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.
DONG Fu-tao, DU Lin-xiu, LIU Xiang-hua, et al. Influence of Continuous Annealing Process on Microstructure and Properties of Containing Boron Enamel Steel[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2013, 49(10): 1160—1168.
- [31] 钟振前, 田志凌, 唐树平. 0Cr16Ni5Mo 钢中条状夹杂物对氢扩散过程的影响[J]. 材料热处理学报, 2016, 37(2): 84—89.
ZHONG Zhen-qian, TIAN Zhi-ling, TANG Shu-ping. Effect of Strip Inclusion on Hydrogen Diffusion in

- 0Cr16Ni5Mo Steel [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2016, 37(2): 84—89.
- [32] 孙全社, 陆匠心, 金蕾, 等. 加钛超低碳钢成形性能和贮氢性能的研究[J]. 钢铁, 2000, 35(1): 39—42.
SUN Quan-she, LU Jiang-xin, JIN Lei, et al. Study on Mechanical Properties of Ti-stabilized Ultra Low Carbon Sheet Steel[J]. Iron and Steel, 2000, 35(1): 39—42.
- [33] VALENTINI R, SOLINA A, TONELLI L, et al. Reversible and Irreversible Hydrogen Trapping in Metals: New Computer-based Code THYDA[J]. Journal of Nuclear Materials, 1996, S233/234/235/236/237(1): 1123—1127.
- [34] 顾国成, 李润生. 搪瓷用钢板的综合研究[J]. 钢铁, 1982(9): 65—70.
GU Guo-cheng, LI Run-sheng. The Comprehensive Research of Enamelled Steel[J]. Iron and Steel, 1982(9): 65—70.
- [35] SVOBODA J, MORI G, PRETHALER A, et al. Determination of Trapping Parameters and the Chemical Diffusion Coefficient from Hydrogen Permeation Experiments[J]. Corrosion Science, 2014(82): 93—100.
- [36] ESCOBAR D P, VERBEKEN K, DUPREZ L, et al. Evaluation of Hydrogen Trapping in High Strength Steels by Thermal Desorption Spectroscopy[J]. Materials Science and Engineering A, 2012(551): 50—58.
- [37] 姚大平, 胡壮麒, 师昌绪. 金属中氢陷阱捕集行为研究的发展[J]. 机械工程材料, 1989(1): 1—4.
YAO Da-ping, HU Zhuang-qi, SHI Chang-xu. The Development of Hydrogen Trapping Behavior in Metals[J]. Materials for Mechanical Engineering, 1989(1): 1—4.
- [38] 雷聚超. 陷阱对电化学氢渗透的影响[J]. 西安工业学院学报, 1995, 15(3): 179—185.
LEI Ju-chao. Trap Influence on Electrochemical Hydrogen Permeation[J]. Journal of Xi'an Industrial College, 1995, 15(3): 179—185.
- [39] 李小权. Ti-IF 冷轧搪瓷钢的贮氢机理和氢渗透试验研究[J]. 山东冶金, 2013, 35(2): 35—37.
LI Xiao-quan. Study on the Hydrogen Storage Mechanism and Hydrogen Permeation of Ti-IF Cold Rolled Steel for Enameling[J]. Shandong Metallurgy, 2013, 35(2): 35—37.
- [40] KIM M T, CHANG S Y, WON J B, et al. Effect of Hot Isocratic Pressing on the Microstructure and Mechanical Properties of Vitreous Enamel Coatings on Low Carbon Steel[J]. Surface Coatings Technology, 2006, 54(6): 3281—3288.
- [41] SANAGI S, KAWANO T, TAKAHASHI N, et al. Effect of Hot Rolling Condition and Chemical Composition on Mechanical Properties of Extra Low Carbon Continuous Annealed Steel Sheets[J]. CAMP-ISIJ, 1990, 3(11): 1768—1771.
- [42] 赵辉, 王先进, 王德诚, 等. 热轧工艺对 IF 钢析出物析出行为的影响[J]. 钢铁研究, 1994(1): 27—31.
ZHAO Hui, WANG Xian-jin, WANG De-cheng, et al. The Influence of Hot Rolling Process on IF Steel Precipitates Precipitation[J]. Iron and Steel, 1994(1): 27—31.
- [43] GYU Tae-park, SUNG Ung-koh, JUNG Hwan-gyo, et al. Effect of Microstructure on the Hydrogen Trapping Efficiency and Hydrogen Induced Cracking of Line-pipe Steel[J]. Corrosion Science, 2008(50): 1865—1871.
- [44] 王征, 王禹华, 李连杰, 等. 氢在钢中晶格间隙和氢陷阱之间的扩散模式[J]. 材料开发与应用, 2009, 24(4): 85—89.
WANG Zheng, WANG Yu-hua, LI Lian-jie, et al. The Hydrogen Diffusion Model between the Gap and Hydrogen Trap[J]. Development and Application of Materials, 2009, 24(4): 85—89.
- [45] 赵克清, 肖纪美, 胡茂圃. 稳定奥氏体不锈钢氢渗透的研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 1984, 4(3): 179—186.
ZHAO Ke-qing, XIAO Ji-mei, HU Mao-pu. The Research of Austenitic Stainless Steel Hydrogen Permeation[J]. China Corrosion Science and Protection Technology, 1984, 4(3): 179—186.
- [46] 孙全社, 金蕾, 张庆安. 冷轧搪瓷钢板的抗鳞爆性能的研究[J]. 钢铁, 2000, 35(4): 44—46.
SUN Quan-she, JIN Lei, ZHANG Qing-an. The Research on Cold-rolled Enamelled Steel Sheet Fish-scale Performance[J]. Iron and Steel, 2000, 35(4): 44—46.
- [47] 马方容, 李金许, 褚武扬, 等. 搪瓷钢的氢扩散研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2010, 30(4): 269—272.
MA Fang-rong, LI Jin-xu, CHU Wu-yang, et al. The Study on Enamelled Steel Hydrogen Diffusion[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2010, 30(4): 269—272.
- [48] 殷雄心. 谈搪玻璃制品鳞爆的原因和预防[J]. 中国搪瓷, 1998, 19(1): 18—19.
YIN Xiong-xin. Discussion about the Causes and Prevention of Glass Products Fishscale[J]. China Enamel, 1998, 19(1): 18—19.
- [49] 宋乙峰, 田德新, 涂元强, 等. 超低碳冷轧搪瓷钢表面缺陷原因分析[J]. 武钢技术, 2013, 51(5): 36—38.
SONG Yi-feng, TIAN De-xin, TU Yuan-qiang, et al. Analysis of Surface Defects on Cold Rolled Ultra Low Carbon Enameling Steel[J]. WISCO Technology, 2013, 51(5): 36—38.
- [50] GUEDES D, OUDRISS D, FRAPPART S, et al. The Influence of Hydrostatic Stress States on the Hydrogen Solubility in Martensitic Steels[J]. Scripta Materialia, 2014, 85(8): 23—26.
- [51] FRAPPART S, FEAUGAS X, CREUS J, et al. Hydrogen Solubility, Diffusivity and Trapping in Tempered Fe-C-Cr Martensitic Steel under Various Mechanical Stress States[J]. Materials Science and Engineering, 2012, 534(2): 384—393.
- [52] 唐景平, 蒋伟忠. 氧化镍在搪瓷密着及抑制鳞爆中的作用[J]. 中国搪瓷, 2003, 24(4): 22—27.
TANG Jing-ping, JIANG Wei-zhong. The Function of Nickel Oxide in Enamel Adhesion and Fish-scale Resistance[J]. China Enamel, 2003, 24(4): 22—27.
- [53] SHIEU F S, LIN K C, WONG J C. Microstructure and Adherence of Porcelain Enamel to Low Carbon Steel[J]. Ceramics International, 1999, 25(1): 27—34.