

doi:10.3969/j.issn.1001-4837.2024.11.010



管板带极电渣堆焊双相不锈钢工艺

邢卓

(沈阳仪表科学研究院有限公司, 沈阳 110168)

摘要:为了提高管板的耐蚀性,需要在管板上堆焊耐蚀合金。选择合适的焊接材料和堆焊工艺是获得奥氏体(γ)和铁素体(δ)两相平衡的双相不锈钢堆焊层的关键。双相不锈钢的铁素体含量高,堆焊层不能进行常规的600~900℃的消除应力热处理。当管板材料的淬硬性较高,需要焊后热处理时,应以奥氏体不锈钢作为过渡层,过渡层堆焊后进行热处理。双相不锈钢的线膨胀系数与碳素钢或低合金钢接近,适于在焊接性较好的管板上直接堆焊,可不需要过渡层,也不能进行常规的消除应力热处理。通过试验检测和应用实例说明,带过渡层和不带过渡层的焊接工艺均适用于管板堆焊,工艺适宜均可获得40%以上的铁素体堆焊层,其具有良好的综合性能。

关键词:双相不锈钢;管板;带极堆焊;电渣堆焊;过渡层;热处理

中图分类号:TH142;TG142.71;TG448

文献标志码:B

Overview of surfacing duplex stainless steel on tubesheets by electroslag strip welding

XING Zhuo

(Shenyang Academy of Instrumentation Science Co., Ltd., Shenyang 110168, China)

Abstract: The tubesheet is a critical pressure-bearing component in heat exchangers, typically thick and predominantly made from carbon steel or low-alloy steel. To enhance corrosion resistance, corrosion-resistant alloys are often surfacing-welded onto the tubesheet. Duplex stainless steel is widely used in the surfacing of heat exchanger tubesheets due to its high strength and exceptional resistance to stress corrosion cracking. The selection of appropriate welding materials and surfacing processes is key to achieving a balanced austenitic (γ) and ferritic (δ) two-phase structure in the duplex stainless steel surfacing layer. Because of the high ferrite content in duplex stainless steel, harmful phases may precipitate from the ferrite at elevated temperatures, significantly degrading the material's overall performance. Therefore, conventional stress relief heat treatments in the range of 600 °C to 900 °C cannot be applied to duplex stainless steel surfacing layers. When the tubesheet material has high hardenability and post-welding heat treatment is required, austenitic stainless steel should be used as a transition layer, and heat treatment should be performed after the transition layer is surfacing-welded. The linear expansion coefficient of duplex stainless steel is similar to that of carbon steel or low-alloy steel, allowing for direct surfacing welding onto tubesheets with good weldability. In such cases, no transition layer or conventional stress relief heat treatment is needed. Experimental comparisons and practical applications demonstrate that both welding processes with and without a transition layer are suitable for tubesheet surfacing. If the process parameters are properly selected, a surfacing layer with a ferrite content of over 40% can be achieved, ensuring excellent overall performance. Notably, the surfacing process without a transition layer offers significant advantages and should be prioritized whenever conditions permit.

Key words: duplex stainless steel; tubesheet; strip surfacing welding; electroslag welding (ESW); transition layer; heat treatment

0 引言

20世纪对以压力容器为主的化工设备调查显示,不锈钢的应力腐蚀失效事故占有所有不锈钢设备腐蚀失效事故的50%以上,应力腐蚀开裂成为对不锈钢压力容器威胁最大的腐蚀形态^[1]。为了应对应力腐蚀开裂研发了双相不锈钢。双相不锈钢由奥氏体(γ)和铁素体(δ)组成,兼有两相组织的特征,耐氯化物应力腐蚀开裂的能力明显优于300系列的奥氏体不锈钢,而且强度也高于奥氏体不锈钢,同时表现出良好的延展性和韧性。在石油化工领域双相不锈钢成为替代奥氏体不锈钢的金属材质,并得到广泛应用,例如用于制造容器、管道以及零部件等。

目前,双相不锈钢已经发展到第四代^[2],包括低合金钢 S32304,中合金钢 S32205,高合金型钢 2507,超高合金型钢 S32707等,耐点蚀当量 PREN 值从约25提高到了大于45,耐应力腐蚀开裂的能力不断提高。其中 S32205是应用最多的双相不锈钢,约占双相不锈钢用量的80%以上,被称为标准型的双相不锈钢。

管板是换热器的主要受压元件,通常管板较厚,为了降低成本,节省贵重金属,常采用爆炸复合和堆焊两种方法制造管板。当换热管受轴向压应力时,宜采用堆焊复合管板。堆焊的管板基层与覆层是熔焊的状态,结合强度高,不易产生剥离。目前,高压、高温、临氢的热壁加氢反应器壳体还没有采用爆炸复合板的,均是采用内壁表面堆焊^[3]。对于中低压容器,壳体板厚在50 mm以下宜选用复合板,50 mm以上宜选用堆焊^[4]。实际应用上只要是直径大、参数高的管板,均宜采用堆焊结构。在管板堆焊上,带极堆焊因其熔深浅、稀释率小、熔敷效率高而得到普遍应用。双相不锈钢以其强度高和耐应力腐蚀开裂的特性,已在化工行业得到广泛应用,管板堆焊双相不锈钢也越来越多,掌握双相不锈钢带极堆焊技术显得十分必要。

1 带极堆焊方法比较

从产热原理上分,带极堆焊有埋弧堆焊(SAW)和电渣堆焊(ESW)两种。电渣堆焊表面更光滑,熔敷效率更高,有取埋弧堆焊之势,但电渣堆焊也存在着熔深浅,抗氢剥离能力差的缺点。为了防止堆焊层与基层的剥离,对于加氢反

应器筒体内壁,带极埋弧+电渣堆焊是目前常用的堆焊技术,就是第1层堆焊采用埋弧堆焊,第2层之后采用电渣堆焊^[5]。双相不锈钢的扩散氢含量不及奥氏体不锈钢,当周围环境中氢的质量分数较高时,更会出现氢致剥离现象和脆化^[6]。

带极电渣堆焊和带极埋弧堆焊都使用焊剂,焊剂形成保护渣壳,但产热原理不同,埋弧堆焊是电弧热,电渣堆焊是电阻热。与带极埋弧堆焊的熔渣不同,带极电渣堆焊的熔渣在液态时是导电的,产生电阻热,为该焊接方法提供所需的热量。仅当带极电渣堆焊起始时,可见电弧出现。当在电弧热作用下产生了足够多的具备导电性的熔渣,同时熔渣的电阻比电弧的电阻更小时,电弧就会消失,电流通过熔融的熔渣产生电阻热形成熔池,焊带伸入到熔池中被熔化。在带极电渣堆焊中,焊剂仅供给在焊带的前方,在焊带的后面可以看见敞开的熔池,并可看见发光的熔渣如图1所示。敞开式熔池容易排出杂质和气体。带极埋弧堆焊是电弧完全埋在焊剂里,看不到可见光如图2所示。



图1 带极电渣堆焊操作图

Fig.1 Operation of electroslag strip welding

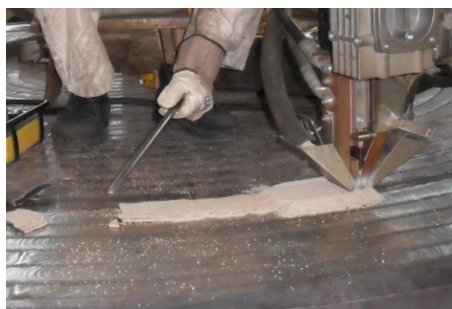


图2 带极电弧堆焊操作图

Fig.2 Operation of arc strip welding

与埋弧堆焊相比,电渣堆焊有如下优点:熔敷效率高,可比埋弧堆焊高50%^[7];熔深浅且均匀,稀释率低,埋弧堆焊的稀释率一般为20%左右,而电渣堆焊的稀释率可控制到10%左右,单层电

渣堆焊即能满足耐蚀性要求;电渣堆焊表面成形美观,焊波成形比埋弧堆焊细腻,光滑平整,搭接处熔合平滑,无特殊要求堆焊表面可不需要加工。研究结果^[8-11]表明,对于熔合区增碳层宽度、脱碳层宽度和马氏体带宽度,带极电渣堆焊均小于带极埋弧堆焊;电渣堆焊的气孔、裂纹等缺陷少,焊道搭接部位不易产生咬边和夹渣等缺陷,堆焊质量高。可见,除了熔深外,电渣堆焊各项性能指标都优于埋弧堆焊。

2 双相不锈钢组织和性能特点

双相不锈钢在室温下具有近似相等比例的铁素体(δ)和奥氏体(γ),兼有两相组织特征,使其兼具奥氏体不锈钢良好的塑性韧性和耐均匀腐蚀性能,以及铁素体不锈钢的高强度和耐应力腐蚀性能^[12]。与奥氏体不锈钢焊接相比,双相不锈钢的焊接热裂纹敏感性明显减弱;与铁素体不锈钢焊接相比,双相不锈钢焊接接头焊后脆化程度较低^[13]。

2.1 相比例要求

通常认为双相不锈钢理想的相平衡为“50-50”,奥氏体与铁素体等量。然而,严格说来这是不正确的,双相不锈钢的组织设计以铁素体占40%~50%为佳,奥氏体略占优势。通常认为,当含有至少25%的铁素体时,就可以获得双相不锈钢特有的优点^[14]。

因此,平衡铁素体和奥氏体两相组织在焊缝金属中的比例,防止有害相的析出,保证焊缝金属耐蚀性能和力学性能是对双相不锈钢焊接最基本的要求。耐点腐蚀性能是关系到双相不锈钢使用性能的重要指标,两相PREN(耐点蚀当量指数)值平衡是双相不锈钢设计的准则之一^[15],使奥氏体和铁素体具有相同的耐点腐蚀能力。

2.2 性能特点

双相不锈钢S22053的屈服强度(GB/T 713.7—2023《承压设备用钢板和钢带 第7部分:不锈钢和耐热钢》规定塑性延伸强度 $R_{p0.2}>450$ MPa)比奥氏体不锈钢S30408($R_{p0.2}>230$ MPa)的高近1倍,同样的压力等级下,可以节约材料。

一般情况下,堆焊层与基层的化学成分差别很大。为了防止堆焊层与基层间在堆焊、热处理或使用过程中产生较大的热应力或组织应力,若堆焊层与基层的线性热膨胀系数或相变温度宜接近,否则,容易造成堆焊层开裂或与基层

剥离。

双相不锈钢S32205的线性热膨胀系数 $[13.7 \mu\text{m}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})]$,20~100 $^\circ\text{C}$]比奥氏体不锈钢S30408 $[16.6 \mu\text{m}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})]$,20~100 $^\circ\text{C}$]的低,与低碳钢Q345R $[12.6 \mu\text{m}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})]$,20~100 $^\circ\text{C}$]接近,使得双相不锈钢与碳钢的直接焊接较为合适,无特殊要求时不需要以奥氏体不锈钢作为过渡层,这给工程应用带来了极大的便利。

3 相比例影响因素

影响双相不锈钢焊接铁素体(δ)含量的首要因素是母材、焊材的化学成分和冷却速度^[16],其次是热输入和堆焊层数。

3.1 焊材成分

在NB/T 47018.5—2017《承压设备用焊接材料订货技术条件 第5部分:堆焊用不锈钢焊带和焊剂》标准中新增了EQ2209和EQ2205焊带。EQ2205是专为提高带极堆焊铁素体含量研发的。在NB/T 47018.5—2017发布之前,双相不锈钢填充金属化学成分是针对钨极氩弧焊、焊条电弧焊、熔化极气体保护焊等焊接方法设计的,这些焊接方法有一个共同的特点即形成的焊接熔池小,散热快,当焊材与母材的化学成分相同时,焊缝金属的铁素体含量急剧增加,极端条件下甚至出现纯铁素体组织。带极电渣堆焊形成的熔池比焊丝或焊条焊时形成的熔池大得多,熔池冷却速度慢,堆焊金属中析出奥氏体多,保留的铁素体少(或低于40%),这是由于在高温下双相不锈钢的金相组织全部由铁素体组成,奥氏体是在冷却过程中析出的。工程实际中EQ2209型带极堆焊的堆焊金属铁素体含量一般为20%~35%^[17],2507型焊带也是如此^[18]。堆焊金属中铁素体含量难以达到的理想状态的40%~60%。因此,不论是国内国外厂家都建议达到30%以上即可。为了提高铁素体含量,邹力维等^[17]已研制出含镍量5.0%~7.5%的H2205焊带,镍含量的适当降低对熔敷金属铁素体含量的提升作用显著。H2205焊带不仅利于提高铁素体含量,而且起到弱化焊接参数和散热条件(冷却)的作用。由此可见,焊带的化学成分是影响熔敷金属铁素体含量的内在因素。

焊带化学成分标准值和焊带与焊剂组配后的堆焊金属化学成分标准值,以及堆焊金属实测值见表1。

表1 双相不锈钢焊带及堆焊金属化学成分

项目	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo	N	Cu
EQ2209焊带标准值	≤ 0.030	≤ 0.90	0.5~2.0	≤ 0.020	≤ 0.030	21.5~23.5	7.5~9.5	2.5~3.5	0.08~0.20	≤ 0.75
F×2209 - E 堆焊标准值	≤ 0.035	≤ 1.00	≤ 2.00	≤ 0.020	≤ 0.030	21.5~23.5	7.5~9.5	2.5~3.5	0.08~0.20	≤ 0.75
EQ2205焊带标准值	≤ 0.030	≤ 0.90	0.5~2.0	≤ 0.020	≤ 0.030	21.0~23.5	5.0~7.5	2.5~3.5	0.08~0.20	≤ 0.75
F×2205 - E 堆焊标准值	≤ 0.035	≤ 1.00	≤ 2.00	≤ 0.020	≤ 0.030	21.0~23.5	5.0~7.5	2.5~3.5	0.08~0.20	≤ 0.75
EQ2209堆焊实测值 ^[19]	0.020	0.50	1.26	0.008	0.030	22.90	8.06	3.03	0.14	0.070

3.2 冷却速度

双相不锈钢焊缝及热影响区焊接后冷却快,铁素体含量升高,如换热器换热管+管板的焊接接头;反之降低,如带极堆焊层。

焊件的散热条件影响着熔池冷却速度,即影响着铁素体含量。影响焊件散热条件的因素很多,如环境温度、焊件的大小和导热性、焊前预热温度、道间温度、水冷等。带极堆焊形成的熔池比钨极氩弧焊或焊条电弧焊时形成的熔池大得多,熔池冷却速度慢,堆焊金属中析出的奥氏体多,铁素体相应就少(或低于40%)。带极堆焊时水冷可以提高铁素体含量5%左右^[20],并提高了耐蚀性。为提高水冷效果,需在高温下熔敷金属还呈暗红色之前揭掉熔渣壳立即浇水。为了获得高的冷却速度,可在堆焊EQ2209耐蚀层时将工件的底部浸在水中焊接^[21]。

3.3 热输入

焊接热输入对双相不锈钢焊缝和热影响区的铁素体含量有重要影响。由于双相不锈钢是铁素体凝固模式(F模式),初生相是铁素体,随着温度的降低,铁素体转变为奥氏体。当热输入过小,则冷却速度过快,不利于铁素体向奥氏体转变,造成焊缝和热影响区中铁素体过多,甚至形成纯铁素体组织。当热输入过大,冷却速度过慢,导致焊缝金属和HAZ晶粒粗大,以及 σ 相析出脆化,韧性下降。由于形成的熔池较大,热输入对带极堆焊的铁素体含量的作用并没有像熔池小的焊接方法那么明显,只能起到微调的作用^[22]。

用于计算带极堆焊热输入的公式需作修正,见式(1)^[23]。因为所产生的热量要传递给一个很宽的表面上,因此增补了一个修正因素到分母中,即熔敷焊道的宽度(可取为焊带宽度)。带极电渣堆焊是开放式熔池,堆焊过程伴随着强烈的热辐射而产生热损失,应乘以一个以 η 表示的有效系数,带极电渣堆焊 η 值在0.70左右,而带极埋弧堆焊的热系数为0.97。

$$Q = \eta \frac{IU}{VW} \quad (1)$$

式中, Q 为热输入, J/cm^2 ; η 为热系数; I 为堆焊电流,A; U 为电弧电压,V; V 为焊接速度,mm/min; W 为焊带宽度,mm。

3.4 堆焊层数

带极电渣堆焊无过渡层的双相不锈钢的层数应不少于两层,堆焊第1层的铁素体含量少,或不超过30%。若基层母材需要焊前预热,则熔池或熔敷金属的散热速度更慢,铁素体将更少。第2层堆焊应在焊件完全冷却之后再进行,并应控制道间温度,使熔池或熔敷金属快速冷却,增加铁素体含量。第2层铁素体含量比第1层提高的原因:一是第2层堆焊前管板冷却得较透;二是第2层堆焊后焊道总厚度增加,堆焊层的稀释率降低。

在焊接参数不变的前提下,若用H309L做过渡层,再用H2209堆焊层,铁素体含量会更低,主要原因是采用H309L堆焊过渡层后,H2209的堆焊层中的Ni元素相对更高,Cr/Ni比降低,导致铁素体含量进一步降低。H2209堆焊层的铁素体含量会比第1层提高5%~10%,这是由于耐蚀层熔敷金属被稀释程度低,铁素体含量相对较高。

4 关于过渡层

从瑞典的Sandvik公司和比利时的Soudokay公司的焊接资料上看均有以H309L做过渡层和直接以H2209堆焊的工艺,说明在国外两种工艺都是可行的,国内孔令伟等^[24]的试验也证明了这一点。以高铬高镍的H309L做过渡层的目的是有两个:其一是防止堆焊层中合金元素稀释和含碳量增高,同时防止熔合区产生脆硬的马氏体组织;其二是对于淬硬倾向较大的有发生冷裂风险的母材,如低合金高强钢可进行堆焊后消除应力热处理。

双相不锈钢在常温下具有较高的冲击韧性,但在300℃以上的环境中持续长时间工作,金相

组织会发生475 °C脆化和 σ 相脆性,导致冲击韧性下降。另外,-50 °C是双相不锈钢低温脆性转变温度。因此,双相不锈钢在压力容器应用的温度范围较窄,高温不超过300 °C,低温不低于-20 °C。温度的限制完全是由于双相不锈钢铁素体含量决定的。

正是由于温度的限制,双相钢堆焊的多是淬硬倾向不高的碳素钢或低合金钢材料,如Q245R, Q345R, 20III, 16MnIII等,热处理不是那么重要。根据文献[22, 25-27],国内双相不锈钢堆焊工艺均以高铬高镍的奥氏体不锈钢(309L或309LMo)作为过渡层,过渡层堆焊后进行消除应力热处理,然后再堆焊双相不锈钢耐蚀层。

某公司在双相不锈钢带极堆焊管板的技术协议中明确提出,直接堆焊双相不锈钢,焊后不需要也不能做消应力热处理。不带过渡层的管板堆焊工艺在国内已有成功应用的案例^[19],而且优势明显。

5 关于焊后热处理

若管板堆焊后需要热处理,应有过渡层,并可在过渡层堆焊后进行热处理,堆焊双相不锈钢覆层后不再进行热处理;直接以双相不锈钢堆焊的管板不能做焊后热处理。

5.1 焊后热处理的危害

双相不锈钢堆焊层不能做600~900 °C的常规消应力热处理,这是由双相不锈钢本身材质特点决定的。若做热处理将导致铁素体含量下降;堆焊表面硬度显著升高;耐蚀性显著下降^[28]; α' 相^[24]和 σ 相等有害相析出^[29]。这种有害相会使堆焊金属的塑性和韧性显著下降,侧弯试验不合格,严重降低低温(-40 °C)冲击韧性^[30]。

焊态下的堆焊层铁素体数最高,具有最好的相比例^[31]。随着热处理时间的延长,堆焊层铁素体数逐渐下降。

5.2 热处理的有害相析出

双相不锈钢在300~500 °C停留时间较长时,会发生“475 °C脆性”;在600~900 °C温度停留时间长时,会出现 σ 相脆性和高温晶粒长大脆性^[32]。长时间热处理后微观金相组织有明显的 σ 相析出(见图3^[19]黑点^[33])。

双相不锈钢组织转变主要发生在铁素体相中,在加热过程中析出的 α' 相或 σ 相均由铁素体分解而来,严重影响材料抗晶间腐蚀性能,并且使

得双相不锈钢堆焊层硬度升高。高温工作下当铁素体的体积分数超过5%时,很快就会形成 σ 相。因此,为了防止析出 σ 相,应控制铁素体的含量。

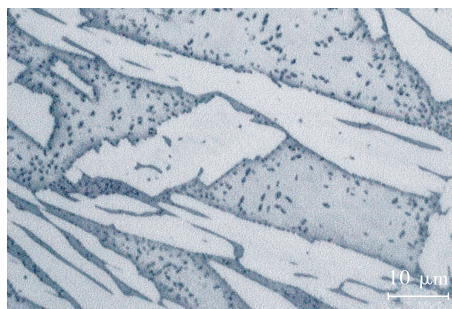


图3 热处理析出有害相的金相

Fig.3 Microstructure of harmful phase precipitated by heat treatment

5.3 焊后热处理的选择

是否需要热处理,也是由管板母材的焊接性能决定的。当管板母材(淬硬性高,需要预热和焊后热处理,如低合金高强度、耐热钢)有热处理要求时^[34],应采用H309LMo或H309L做过渡层堆焊,过渡层堆焊完成后进行消除应力热处理,然后再堆焊双相不锈钢,之后不再进行热处理。当管板母材(含碳量低的碳素钢,碳当量小的低合金钢,不需要预热和焊后热处理)没有热处理要求时,就可以不需要过渡层,直接堆焊双相不锈钢,不进行热处理^[19]。对于焊接性很好的管板母材,无需加过渡层和热处理。因为,即使按传统的做法采用奥氏体不锈钢做过渡层,进行消应力热处理也不能消除管板的残余应力。当堆焊耐蚀层之后,第二次产生焊接应力,且应力较大(奥氏体不锈钢与双相不锈钢的线性热膨胀系数相差较大)。从产生残余应力上看,将线性热膨胀系数较大的奥氏体不锈钢夹在线性热膨胀系数较小的低合金钢和双相不锈钢之间,这是不合理的。

6 防变形方法

堆焊管板的焊接热循环引起的热应力会使管板变形,采用常用的环焊道堆焊时,堆焊行进方向产生环向收缩,堆焊垂直方向产生径向收缩,管板最终成浅锅底状^[35]。控制变形是管板堆焊面临的难题。将刚性固定法或预留变形量法等外加措施与堆焊方式和顺序结合起来才能取得最佳的效果。

6.1 外加措施

外加措施是控制管板堆焊变形的主要方法。控制变形的办法:(1)刚性固定法〔见图4(a),

适于双管板,过渡层焊后热处理^[22]];(2)预留变形量法,在待堆焊面侧车制出凸台作为预留反变形量〔见图4(b),适于单管板^[19,35]];(3)预留变形量法和刚性固定法联合〔见图4(c),适于双管板,焊后不热处理^[36]];(4)反变形法,在管板堆焊变形趋势的反方向进行预变形,使之成球缺状,作为堆焊变形余量〔见图4(d),适于单管板〕。

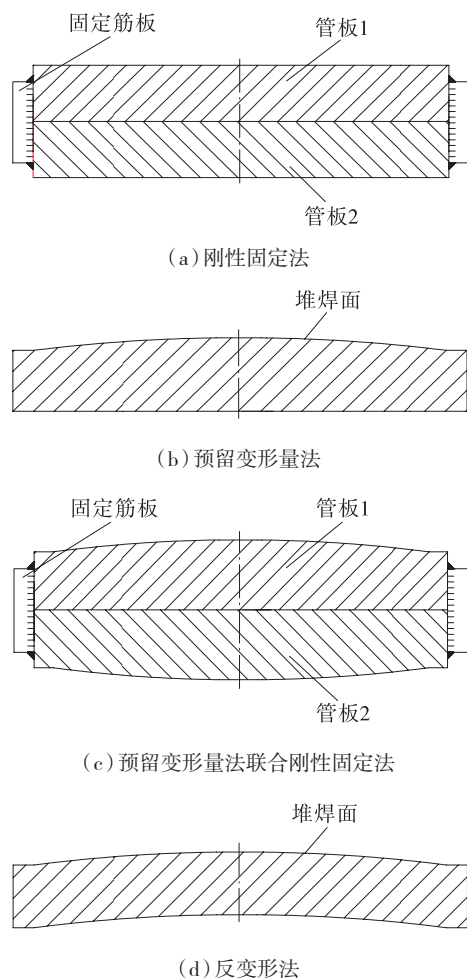


图4 防变形方法

Fig.4 Anti-deformation method

6.2 焊接措施

堆焊行进方式和环焊道堆焊顺序是控制管板堆焊变形的次要方法,也影响着变形量。

6.2.1 堆焊行进方式

堆焊行进方式有2种:直焊道堆焊(见图5)和环焊道堆焊(见图6)。直焊道堆焊的变形趋势是角变形,环焊道堆焊是锅底变形。

乌顺平等^[37]为防止管板旋转堆焊造成锅底变形,采用直线方式堆焊,沿管板平面从中间向两侧交替堆焊,第2层的焊接方向垂直于第1层。



图5 直焊道堆焊管板

Fig.5 Surfacing tube sheet with straight bead



图6 环焊道堆焊管板

Fig.6 Surfacing tube sheet with ring weld bead

采用直焊道堆焊的方式并不多,多数采用环焊道堆焊^[38-39]。

6.2.2 环焊道堆焊方向

梁珊初等^[38]得出从内向外的环焊道堆焊产生的锅底变形量小。郭海荣等^[22]在实际生产中采用从外向内的环焊道堆焊法,尤其在芯部焊道的处理上获得了平整的外观。

卢仲海等^[40]采用每层堆焊方向相反,即第1层从外向内堆焊,第2层则从内向外堆焊。

6.3 热处理措施

双管板的刚性固定法应在过渡层堆焊后进行消除残余应力热处理,减少去除筋板后的变形量,但残余应力并不能完全消除,只能降低峰值,同时耐蚀层的堆焊又会重新产生残余应力。因此,热处理也不能有效解决变形问题。

7 堆焊工艺

7.1 工艺参数

堆焊工艺参数是保证电渣堆焊过程稳定和良好焊道成形的关键。工艺参数主要有焊接电流、电弧电压和焊接速度,其次是焊带干伸长度,焊剂层厚度,焊道间搭接量等。对于0.5 mm×60 mm的标准焊带,焊接工艺参数见表2,同是0.5 mm厚度而宽度不同的焊带可按宽度变化的

正比调节焊接电流。焊接电流过小或电弧电压过低,会使电弧燃烧不稳定、焊道过窄等;焊接电流过大或电弧电压过高,使焊道熔深、熔宽、堆高增加,稀释率增大,影响堆焊层化学成分及耐腐蚀性。焊接速度与焊接电流同时发生作用,对堆焊层的尺寸、熔深、稀释率都有重要影响,随着焊接速度的提高,熔宽、堆高减小,熔深、稀释率增大^[40]。

表2 带极电渣堆焊工艺参数

Tab.2 Process parameters of electroslag strip welding

焊带规格/ mm	焊接电流/ A	焊接电压/ V	焊速/ (mm·min ⁻¹)
0.5×60	800~950	25~30	160~180

焊前将焊带端部剪呈30°尖角(见图7^[24]),以利于引弧和控制搭接量。

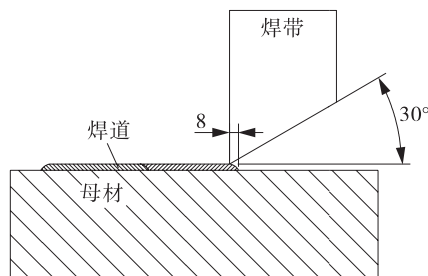


图7 焊带剪角和焊道搭接量

Fig.7 The shearing angle of the welding strip and the overlap of the weld bead

当堆焊层厚度低于3 mm时,稀释率将显著增加,同时焊道成形变差,出现咬边(见图8)。当堆焊层厚度大于5.5 mm时,将很难在搭接处保证良好地熔合并更难脱渣,导致夹渣^[39]。

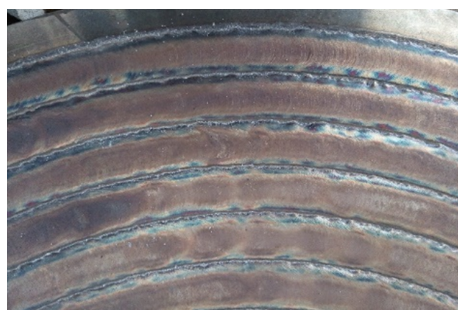


图8 焊接速度快出现的咬边

Fig.8 Undercut with fast welding speed

为获取最佳的操作性能,埋弧带极堆焊及电渣带极堆焊均采用直流反接(DCEP,工件接焊机负极)的电流极性。如采用直流正接,将导致更浅的熔深及更厚的堆焊层,不利于防剥离,并在焊道

搭接处易出现夹渣。

7.2 磁场控制

对于电渣堆焊60 mm宽的焊带,视焊道成形状况,是否需要加磁控装置。当焊带宽度大于60 mm时,焊接电流较大电渣堆焊易产生咬边,这种状况可以通过在堆焊机头上加装磁控装置产生的磁场来解决,以保证焊道成形良好,避免产生咬边现象。对于0.5 mm×90 mm的带极,如果不加外部磁场,产生的咬边深度达到3 mm^[22]。

8 检测项目

按NB/T 47014—2011《承压设备焊接工艺评定》的要求和双相不锈钢的特点进行常规的检测项目包括:无损检测、侧弯试验、化学成分分析、硬度检测、铁素体含量检测、腐蚀试验等。

8.1 无损检测

首层堆焊和面层堆焊后应各进行一次UT和PT检测,堆焊表面应没有裂纹和气孔,堆焊层和基层没有分层现象。

8.2 侧弯试验

按NB/T 47014取4个10 mm厚侧弯试样进行试验,弯轴直径 $d=40$ mm,弯曲角度 $\alpha=180^\circ$ 。

带过渡层弯曲试样(见图9^[22])和不带过渡层弯曲试样(见图10^[19])各4个试样均完好无开裂现象,且熔合线平滑,表明双相不锈钢带极堆焊有没有过渡层均具有良好的塑性。

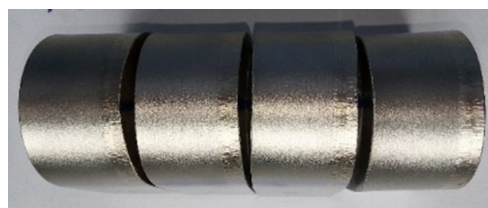


图9 带过渡层弯曲试样效果图

Fig.9 Bending sample with transition layer



图10 不带过渡层弯曲试样效果图

Fig.10 Bending sample without transition layer

8.3 化学成分分析

赵杰等^[19]在 Q345R 的试板上直接以 H2209 焊带电渣堆焊 2 层,堆焊层厚度 8 mm。堆焊层表面向下 2 mm 处进行光谱化学成分分析,结果见表 1 中“EQ2209 堆焊实测值”。

8.4 硬度检测

郭海荣等^[22]检测双相不锈钢堆焊层的表面硬度均值为 HBW 276,小于技术协议要求的 HBW 293。

8.5 相比例检测

8.5.1 铁素体检测方法

双相不锈钢的铁素体检测有 3 种方法:金相法、图谱法、磁测法。3 种检测方法都会产生一定的误差,不能认为是绝对准确,金相法和磁测法以多点取样的平均值为佳。

金相法范围在 $\pm 20\%$ ~ $\pm 60\%$,图谱法波动范围在 $\pm 30\%$ ~ $\pm 60\%$,磁测法波动范围在 $\pm 20\%$ 。磁测法能迅速得到结果,并且误差较小,是目前检测铁素体含量的最便捷方法^[41]。

8.5.2 金相法

赵杰等^[19]按 ASTM E562 对直接以 H2209 双相不锈钢的堆焊层表面进行铁素体含量测定,10 个视场的铁素体平均含量为 43.7%,接近铁素体/奥氏体 = 45/55,这是非常理想的两相比。图 11 是其中的一帧金相图片,铁素体含量为 43%。

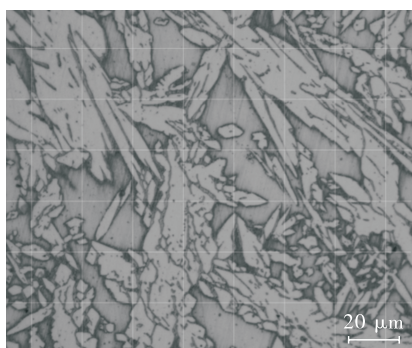


图 11 铁素体含量为 43% 的金相图

Fig.11 Microstructure with ferrite content of 43%

郭海荣等^[19]也按 ASTM E562 对以 H309LMo 为过渡层的 H2209 双相不锈钢堆焊层表面进行铁素体含量测定,10 个视场的铁素体体积平均含量为 47%。

8.5.3 磁测法

赵杰等^[22]以 FERITSCOPE MP30E - S 仪器测量同一件焊接工艺评定堆焊表面的铁素体含量,取 10 点的平均值为 40.6%,略低于金相法的

测量值。

8.6 腐蚀试验

按 ASTM A923—2006《检测奥氏体/铁素体双相不锈钢中有害金属间相的标准试验方法》,方法 C(氯化铁,试验温度 22℃)进行腐蚀失重试验,要求 < 10 mdd (microgram per square decimeter per day)。

按 GB/T 4334—2020《金属和合金的腐蚀 奥氏体及铁素体 - 奥氏体(双相)不锈钢晶间腐蚀试验方法》,方法 E(硫酸-硫酸铜晶间腐蚀试验)进行晶间腐蚀试验,堆焊金属两个晶间腐蚀试样弯曲后应无开裂现象。

8.7 析出相检验

孔令伟等^[24]按 ASTM A923—2006,方法 A 进行有害析出相检验,显示相界和晶界平滑,未见有害沉淀相析出,评定为未受影响组织(见图 12)。对于未做热处理的双相不锈钢堆焊层这是很正常的结果。

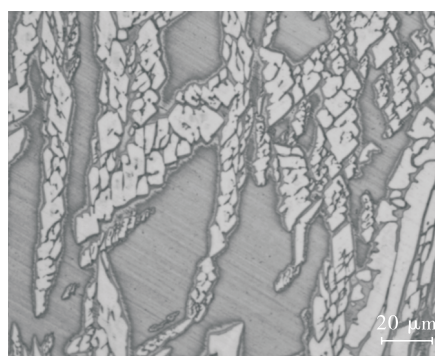


图 12 无有害相析出的金相图

Fig.12 Microstructure without harmful phase precipitation

9 结论

(1) 双相不锈钢带极堆焊层不能做 600~900℃的常规消应力热处理。

(2) 对于基层淬硬倾向小的钢种,可以不采用以奥氏体不锈钢为过渡层的堆焊方式,以双相不锈钢焊带直接堆焊,从而取消焊后热处理。

(3) 工程应用证明,带过渡层和不带过渡层的双相不锈钢带极堆焊的管板均可满足使用要求,不带过渡层的堆焊工艺具有十分突出的优点,可减少焊材种类和简化工序。

参考文献:

- [1] 黄嘉骥.压力容器用双相不锈钢(三)[J].压力容器,2015,32(4):1-21.

- HUANG J H. Duplex stainless steels for pressure vesse (3) [J]. *Pressure Vessel Technology*, 2015, 32 (4) : 1 – 21.
- [2] 黄嘉琥. 压力容器用双相不锈钢(一) [J]. *压力容器*, 2015, 32 (2) : 1 – 20.
- HUANG J H. Duplex stainless steels for pressure vesse (1) [J]. *Pressure Vessel Technology*, 2015, 32 (2) : 1 – 20.
- [3] 刘宝剑, 孔凡红, 王天先, 等. 宽带极单层高速电渣堆焊应用性的研究 [J]. *压力容器*, 2019, 36 (5) : 14 – 20.
- LIU B J, KONG F H, WANG T X, et al. Research on application of monolayer high-speed electroslag surfacing with wide strip electrode [J]. *Pressure Vessel Technology*, 2019, 36 (5) : 14 – 20.
- [4] 任金锁. 压力容器壳体复合材料的研究应用与探讨 [J]. *山西化工*, 2020, 40 (4) : 149 – 151.
- REN J S. Research and application of composite materials for pressure vessel shell [J]. *Shanxi Chemical Industry*, 2020, 40 (4) : 149 – 151.
- [5] 成林, 董安霞, 王振雷. 国产不锈钢带极堆焊材料的堆焊工艺 [J]. *焊接*, 2002 (1) : 25 – 28.
- CHENG L, DONG A X, WANG Z L. Research of strip surfacing process using chinese stainless strip electrode [J]. *Welding & Joining*, 2002 (1) : 25 – 28.
- [6] 张瑞华, 朱旻, 李岩. 国内不锈钢焊带的研究现状 [J]. *材料导报*, 2010, 24 (9) : 97 – 100.
- ZHANG R H, ZHU M, LI Y. Research status of stainless steel strip electrode in china [J]. *Materials Reports*, 2010, 24 (9) : 97 – 100.
- [7] 徐锴, 胡希海, 廖永平, 等. 国内带极堆焊技术的现状及展望 [C] // 中国机械工程学会压力容器分会. 压力容器先进技术——第七届全国压力容器学术会议论文集. 北京: 化学工业出版社, 2009: 594 – 597.
- XU K, HU X H, LIAO Y P, et al. Current situation and prospect of electrode surfacing technology in China [C] // Pressure Vessel Branch of Chinese Society of Mechanical Engineering. *Advanced Technology of Pressure Vessel—Proceedings of the 7th National Pressure Vessel Academic Conference*, Beijing: Chemical Industry Press, 2009: 594 – 597.
- [8] 王家淳, 孙敦武. 厚壁压力容器不锈钢带极电渣堆焊与埋弧堆焊对比 [J]. *焊接*, 1997 (7) : 12 – 14.
- WANG J C, SUN D W. Comparison between ESW and SAW process for cladding of vessels with stainless steel strip [J]. *Welding & Joining*, 1997 (7) : 12 – 14.
- [9] 高俊峰, 李伟, 杨玲玲, 等. 基于响应面法的全焊接球阀密封结构参数多目标优化 [J]. *机电工程*, 2023, 40 (11) : 1718 – 1726.
- GAO J F, LI W, YANG L L, et al. Multi-objective optimization of sealing structure parameters of all-welded ball valves based on response surface method [J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2023, 40 (11) : 1718 – 1726.
- [10] 徐世敏, 王立华, 陈太茂, 等. 堆垛机柱脚焊接接头疲劳寿命分析及优化 [J]. *机电工程*, 2023, 40 (11) : 1794 – 1802.
- XU S M, WANG L H, CHEN T M, et al. Fatigue life analysis and optimization of welded joints in stacker column-footing [J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2023, 40 (11) : 1794 – 1802.
- [11] 燕昭锟, 姚新改, 郭瑞鹏, 等. 长小径不锈钢管内表面的磁性珩磨工艺 [J]. *机电工程*, 2022, 39 (5) : 705 – 712.
- YAN Z K, YAO X G, GUO R P, et al. Process of magnetic honing for long and small diameter stainless steel tube surface [J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2022, 39 (5) : 705 – 712.
- [12] 张志强, 荆洪阳, 徐连勇, 等. 铁素体 / 奥氏体双相不锈钢焊接接头组织和性能的研究进展 [J]. *材料热处理学报*, 2020, 41 (5) : 13 – 27.
- ZHANG Z Q, JING H Y, XU L Y, et al. Research progress on microstructure and properties of welded joint of ferrite/austenite duplex stainless steel [J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2020, 41 (5) : 13 – 27.
- [13] 孙咸. 双相不锈钢焊接材料的选择及应用 [J]. *电焊机*, 2019, 49 (4) : 102 – 110.
- SUN X. Selection and application of welding consumables for duplex stainless steel [J]. *Electric Welding Machine*, 2019, 49 (4) : 102 – 110.
- [14] International Molybdenum Association (IMOA). *Practical guidelines for the fabrication of duplex stainless steels [M] (Third edition)*. London, 2014: 42.
- [15] 宋志刚, 丰涵, 吴晓涵, 等. 中国双相不锈钢的发展及研究进展 [J]. *中国冶金*, 2022, 32 (6) : 2 – 14.
- SONG Z G, FENG H, WU X H, et al. Development and research progress of duplex stainless steel in china [J]. *China Metallurgy*, 2022, 32 (6) : 2 – 14.
- [16] 孙咸. 双相不锈钢焊缝金属中的 δ -铁素体 [J]. *电焊机*, 2019, 49 (8) : 14 – 22.
- SUN X. Delta ferrite in weld metal for duplex stainless steel [J]. *Electric Welding Machine*, 2019, 49 (8) : 14 – 22.
- [17] 邹力维, 徐锴, 廖永平, 等. 2205型双相不锈钢带极电渣堆焊材料的研制 [J]. *机械制造文摘(焊接分册)*, 2013 (3) : 13 – 16.
- ZOU L W, XU K, LIAO Y P, et al. Development of

- 2205 type duplex stainless steel electroslag strip cladding consumables [J]. *Mechanical Manufacturing Abstracts (Welding Volume)*, 2013 (3): 13 - 16.
- [18] 雒永军,王丛元,徐生东,等. 2507型超级双相不锈钢带极电渣堆焊可行性研究[J]. *中国化工装备*, 2017, 19 (5): 3 - 5.
LUO Y J, WANG C Y, XU S D, et al. Study on 2507 super duplex stainless steel with electroslag surfacing [J]. *China Chemical Industry Equipment*, 2017, 19 (5): 3 - 5.
- [19] 赵杰,邢卓. 不带过渡层双相不锈钢带极电渣堆焊工艺的应用[J]. *现代焊接*, 2015 (4): 35 - 40.
ZHAO J, XING Z. Application of strip electroslag welding for duplex stainless steel overlaying without buttering layer [J]. *Modern Welding Technology*, 2015 (4): 35 - 40.
- [20] 王刚,胡希海,张超,等. 双相钢带极堆焊的试验研究[J]. *压力容器*, 2008, 25 (6): 32 - 34.
WANG G, HU X H, ZHANG C, et al. Study on strip cladding of duplex steels [J]. *Pressure Vessel Technology*, 2008, 25 (6): 32 - 34.
- [21] 苏韩. S22053管板堆焊铁素体含量的提高[J]. *化学工程与装备*, 2022 (7): 235 - 237.
SU H. Increase of ferrite content in surfacing welding of S22053 tubesheet [J]. *Chemical Engineering & Equipment*, 2022 (7): 235 - 237.
- [22] 郭海荣,邢卓. 带过渡层双相不锈钢带极电渣堆焊管板工艺[J]. *压力容器*, 2015, 32 (12): 51 - 58.
GUO H R, XING Z. Strip electroslag welding of duplex stainless steel for tubesheet overlaying with buttering layer [J]. *Pressure Vessel Technology*, 2015, 32 (12): 51 - 58.
- [23] 李晓清,刘志颖,张堃. 90 mm 宽带极不锈钢双层电渣堆焊工艺试验研究[J]. *压力容器*, 2006, 23 (5): 17 - 21.
LI X Q, LIU Z Y, ZHANG K. Experimental study of stainless electroslag cladding process with 90 mm strip electrode [J]. *Pressure Vessel Technology*, 2006, 23 (5): 17 - 21.
- [24] 孔令伟,刘爱民,郑艳,等. 双相不锈钢带极电渣堆焊工艺比较及选用[J]. *管道技术与设备*, 2014 (3): 54 - 55.
KONG L W, LIU A M, ZHENG Y, et al. Comparison and selection of strip electroslag welding process for duplex stainless steel [J]. *Pipeline Technique and Equipment*, 2014 (3): 54 - 55.
- [25] 刘玉华. S31803 (SAF2205) 双相不锈钢带极堆焊焊接工艺的确定[J]. *现代焊接*, 2008 (10): 41 - 43.
LIU Y H. Determination of welding process of S31803 (SAF2205) duplex stainless steel surfacing [J]. *Modern Welding Technology*, 2008 (10): 41 - 43.
- [26] 王丽,高军松,吴道文. 自动焊堆焊双相不锈钢2205工艺[J]. *焊接技术*, 2010, 39 (2): 61 - 63.
WANG L, GAO J S, WU D W. Automatic welding surfacing duplex stainless steel 2205 process [J]. *Welding Technology*, 2010, 39 (2): 61 - 63.
- [27] 刘玉华. 带极堆焊2205双相不锈钢焊材应用研究[J]. *金属加工(热加工)*, 2020 (3): 32 - 34.
LIU Y H. Research on welding materials of 2205 duplex stainless steel with strip surfacing [J]. *Metal Working (Hot Working)*, 2020 (3): 32 - 34.
- [28] 郭保平,朱敏,任世宏,等. 焊后热处理对双相不锈钢带极堆焊层组织性能的影响[J]. *石油化工设备*, 2013, 42 (增刊1): 50 - 54.
GUO B P, ZHU M, REN S H, et al. Influence of post weld heat treatment to duplex stainless steels overlaying layer [J]. *Petro-chemical Equipment*, 2013, 42 (Sup. 1): 50 - 54.
- [29] 张家伟,黄美平,胡传顺,等. σ 相对双相不锈钢堆焊层组织和性能的影响[J]. *热加工工艺*, 2007, 36 (19): 7 - 9.
ZHANG J W, HUANG M P, HU C S, et al. Influence of σ phase on microstructure and properties of duplex stainless steel surfacing layer [J]. *Hot Working Technology*, 2007, 36 (19): 7 - 9.
- [30] 杨莉,史伟,赵江涛,等. 焊后热处理对双相钢SAF2507带极堆焊层组织与性能的影响[J]. *金属热处理*, 2014, 39 (8): 41 - 43.
YANG L, SHI W, ZHAO J T, et al. Effect of PWHT on microstructure and properties of strip surfacing layer of SAF2507 duplex stainless steel [J]. *Heat Treatment of Metals*, 2014, 39 (8): 41 - 43.
- [31] 高成龙,李宪爽. 热处理工艺对双相钢带极埋弧堆焊层组织及性能的影响[J]. *机械制造文摘(焊接分册)*, 2020 (5): 11 - 15.
GAO C L, LI X S. Effect of heat treatment on microstructure and properties of surfacing layer of duplex stainless steel by submerged arc welding with strip [J]. *Mechanical Manufacturing Abstracts (Welding Volume)*, 2020 (5): 11 - 15.
- [32] 史维琴. 双相不锈钢换热管管板脉冲钨极氩弧堆焊工艺[J]. *焊接技术*, 2013, 42 (10): 28 - 30.
SHI W Q. Pulse tungsten-argon arc welding process of duplex stainless steel heat exchange tube plate [J]. *Welding Technology*, 2013, 42 (10): 28 - 30.
- [33] 孔秋元,方煜钦. 2507双相不锈钢的性能与金相组织[J]. *科技创新与应用*, 2022, 12 (11): 128 - 131.
KONG Q Y, FANG Y Q. Properties and metallographic

- structure of 2507 duplex stainless steel [J]. Technology Innovation and Application, 2022, 12 (11): 128 – 131.
- [34] 王顺花,倪昱,张建晓,等. 2209和2507双相不锈钢堆焊层组织结构及耐蚀性对比[J]. 金属热处理, 2016, 41 (12): 19 – 24.
- WANG S H, NI Y, ZHANG J X, et al. Comparison on microstructure and corrosion resistance of 2209 and 2507 duplex stainless steel surfaced layers [J]. Heat Treatment of Metals, 2016, 41 (12): 19 – 24.
- [35] 贾立建. 大厚度管板的堆焊[J]. 焊接技术, 2003 (6): 55 – 56.
- JIA L J. Surfacing welding of large thickness tube sheet [J]. Welding Technology, 2003 (6): 55 – 56.
- [36] 林雅岚, 苏韩. 大直径薄管板热交换器制造过程中的管板变形控制[J]. 化学工程与装备, 2023 (12): 177 – 179.
- LIN Y L, SU H. Deformation control of large diameter thin tube sheet heat exchanger [J]. Chemical Engineering & Equipment, 2023 (12): 177 – 179.
- [37] 乌顺平, 李权柄, 钦军伟. 管板带极堆焊工艺[J]. 机械制造文摘(焊接分册), 2016 (1): 31 – 34.
- WU S P, LI Q B, QIN J W. Research on welding technology of tube plate strip surfacing [J]. Mechanical Manufacturing Abstracts (Welding Volume), 2016 (1): 31 – 34.
- [38] 梁珊初, 林仁波, 唐照国. 换热器管板带极堆焊的变形控制[J]. 电焊机, 2015, 45 (4): 179 – 182.
- LIANG S C, LIN R B, TANG Z G. Deformation and control about heat exchanger tube sheet welding [J]. Electric Welding Machine, 2015, 45 (4): 179 – 182.
- [39] 张良成, 印鹤平. 工艺参数对带极电渣堆焊的影响[J]. 中国化工装备, 2002, 4 (1): 22 – 33.
- ZHANG L C, YIN H P. The influence of the process parameters to electroslag strip cladding [J]. China Chemical Industry Equipment, 2002, 4 (1): 22 – 33.
- [40] 卢仲海, 文成, 罗晓军, 等. 管板不锈钢带极埋弧堆焊的研究与应用[J]. 焊接技术, 2021, 50 (3): 40 – 42.
- LU Z H, WEN C, LUO X J, et al. Research and application of submerged arc surfacing of tube plate stainless steel strip [J]. Welding Technology, 2021, 50 (3): 40 – 42.
- [41] 栗卓新, 焦俊, KIM H J. 不锈钢焊缝铁素体含量测试方法与精度的现状及进展[J]. 机械工程学报, 2014, 50 (12): 89 – 96.
- LI Z X, JIAO J, KIM H J. Progress in methods and precision of ferrite content determination for stainless steel weld [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50 (12): 89 – 96.

作者简介: 邢卓 (1968), 男, 教授级高级工程师, 主要从事压力容器和膨胀节焊接技术工作, 通信地址: 110168 沈阳市浑南区浑南东路49 – 29号沈阳仪表科学研究院有限公司, E – mail: xingzhuo0802@sina.com。

本文引用格式:

邢卓. 管板带极电渣堆焊双相不锈钢工艺[J]. 压力容器, 2024, 41 (11): 74 – 84.

XING Z. Overview of surfacing duplex stainless steel on tubesheets by electroslag strip welding [J]. Pressure Vessel Technology, 2024, 41 (11): 74 – 84.

(上接第65页)

- [16] 高阳, 傅连东, 邓江洪, 等. 基于BP-PSO的智能阀门定位器控制算法研究[J]. 流体机械, 2023, 51 (5): 49 – 54.
- GAO Y, FU L D, DENG J H, et al. Research on control algorithm of intelligent valve positioner based on BP-PSO [J]. Fluid Machinery, 2023, 51 (5): 49 – 54.
- [17] CHEN Q, XU K L, TA D. High-resolution Lamb waves dispersion curves estimation and elastic property inversion [J]. Ultrasonics, 2021, 115: 106427.

作者简介: 李沁霏 (1997), 女, 主要研究方向为基于超声导波的无损检测技术、损伤定位及定量研究, 通信地址: 200237 上海市徐汇区凌云路街道梅陇路130号华东理工大学机械与动力工程学院, E – mail: liqinfei@mail.ecust.edu.cn。

通信作者: 周邵萍 (1966), 女, 教授, 主要研究方向为设备及结构健康监测与诊断, 通信地址: 200237 上海市徐汇区凌云路街道梅陇路130号华东理工大学机械与动力工程学院, E – mail: shpzhou@ecust.edu.cn。

本文引用格式:

李沁霏, 张蒲根, 罗志, 等. 基于导波频散补偿的多腐蚀损伤无基线智能检测方法研究[J]. 压力容器, 2024, 41 (11): 57 – 65.

LI Q F, ZHANG P G, LUO Z, et al. Research on intelligent detection method for multiple corrosion defects without baseline based on guided wave dispersion compensation [J]. Pressure Vessel Technology, 2024, 41 (11): 57 – 65.