

压力容器异种钢焊接工艺及无损检测方法探究

万贵根（江西省检验检测认证总院特种设备检验检测研究院南昌检测分院，江西 南昌 330000）

摘要：压力容器作为一种特殊设备能够适用于极其特殊的工作环境当中，在石油化工生产的过程当中充当着重要角色。整个压力容器制造过程当中焊接是主要工序，异种钢焊接也最为常见，异种钢焊接工艺程度比较复杂，一旦掌握不当不仅焊接质量难以达标，且严重的焊接缺陷会导致容器设备的使用性能难以达标，甚至会造成严重的爆炸泄漏事故。因此，完成异种钢焊接之后对其进行质量检测也是重要的流程之一。在不影响压力容器本身结构保证材料完整的情况下，进行焊接质量无损检测有助于及时发现焊接缺陷，提升压力容器内部质量。本文从压力容器异种钢焊接工艺特点出发，对其工艺要点进行分析，提出焊接完成之后无损检测方法的应用，以期望为提升压力容器制造异种钢焊接质量提供参考。

关键词：压力容器；异种钢焊接；无损检测

无损检测技术是指在不破坏设备材料内部以及表面结构性能的前提下，通过物理以及化学方法的合理运用，在先进设备仪器的辅助之下完成设备材料的全覆盖缺陷检查，并对检查的结果作出客观评价，能够有效避免设备使用过程中因为损伤而导致的安全风险。为满足特定的使用性能压力容器异种钢焊接十分常见，所谓的异种钢焊接是指两种不同钢型之间的焊接，压力容器异种钢焊接的过程当中因为难度较大、质量要求较高，只有通过对其进行无损检测，才能够及时地发现焊接缺陷并采取相应的手段进行质量完善。而TSG21-2016《固定式压力容器安全技术监察规程》当中，也明确规定了在压力容器异种钢焊接接头的过程中必须进行表面无损检测。

1 压力容器异种钢焊接工艺特点

异种钢焊接在压力容器制造的过程当中非常常见，所谓的异种钢焊接是指将两种不同化学成分的母材进行焊接融合，因其存在差异性，所以同种钢焊接相比更容易产生焊接缺陷。异种钢焊接分为同类异种钢焊接以及异类异种钢焊接两种情况，同类异种钢是指组织成分也就是金相组织相同但合金化强度等级不同的钢型，而异类异种钢则是指金相组织成分以及合金强度等级皆不相同的钢型。压力容器当中的异种钢焊接为奥氏体和非奥氏体钢之间的焊接，其中非奥氏体钢包含铁素体以及珠光体，因此属于异类异种钢焊接，以下焊接特点十分明显：

1.1 化学成分不均匀

无论是同种钢焊接还是异种钢焊接，焊接过程主要通过焊熔加热来保证两侧母材以及焊条的熔化进而实现焊接融合。在此过程当中焊条以及母材熔化区内的化学成分会在稀释以及碳迁移的作用下发生变化。而就异种钢而言，其母材成分本就各不相同，所以互相稀释迁移的过程当中会因为一系列化学变化的产生导致化学成分的不均匀性。实际上，该种不均匀程度不仅在于母材以及焊条各自的原始成分，同时也会受到焊接坡口形式、焊接参数以及融合比等影响。相关研究表明，钢焊接接头由于加热时间和温度的差异性，其融合线两侧的碳迁

移程度也会随之会产生明显的差异性，而且该种差异倾向会随着时间以及温度的累积而延长，而该种碳迁移会直接导致焊接母材的原始化学成分发生改变。

1.2 组织得不均匀性

无论是同种钢焊接还是异种钢焊接接头内的区域组织不均匀性都比较明显。对于异种钢而言其本身组织成分就有所差别，这些不同的组织成分在焊接加热的过程当中会在热循环以及环境温度的共同作用下导致某个特定的区域内出现复杂程度更高的组织结构。这是因为两种不同的焊接母材拥有着不同的膨胀系数以及导热性，二者的作用会使母材产生热应力且这种热应力难以消除。实际上，对于异种钢型焊接而言，焊接方法、层次以及焊后的热处理方式都会对其组织得不均匀性产生明显的影响。

1.3 性能的不均匀性

在组织成分变化的基础之上，异种钢焊接的性能必然会产生，相应程度的改变。而伴随着两种母材本身性能差异化的叠加，导致焊接接头不同区域之间的性能影响呈现出倍数的变化关系，这种变化在焊缝两侧热影响区冲击值上体现十分明显。而且随着性能的改变，相应的持久强度以及蠕变强度也会发生一定程度的改变。另外，在异种钢型焊接加热过程当中，碳迁移能力有所加强，低合金钢的一侧的母材会发生脱碳而相应碳元素会逐渐朝向高合金的母材一侧迁移扩散，这种现象直接导致融合区内接头硬度的提升，不过随着硬度的提升塑性会有所降低。

1.4 应力场分布不均匀

在成分、组织以及性能的共同作用下异种钢焊接接头会产生不同的残余应力，而且由于接头处的热膨胀系数以及导热系数的差异性，整个组织应力以及热应力在不断叠加之后会产生一个应力峰值，而应力峰值的产生直接导致异种钢焊接接头非均匀体特征的形成。

2 压力容器异种钢焊接缺陷以及成因

2.1 外部缺陷

压力容器异种钢焊接的外部缺陷包含咬边、焊接变

形以及焊瘤等肉眼可见的缺陷。产生外观缺陷的主要原因在于焊接过程操作不当或者是参数选择不合理而造成的。因为就异种钢焊接本身而言,其母材和焊条拥有不同的性能必须对其实现详细地掌握才能够保证外观质量的完美。例如对于咬边缺陷而言,由于焊条和焊接中心的偏离会直接导致熔池停留时间的延长,在此过程当中必然会产生咬边现象。对于焊接变形而言受母材以及焊条材料性能影响较为明显,而且其在焊接过程当中会因为热量吸收得不均匀造成局部的收缩或舒张进而引发尺寸的变形。压力容器异种钢焊接的外观缺陷不仅会影响容器整体的美观度,也会导致焊接无效截面积的增大,这样一来设备的承载性随之下降,而接头附近应力的集中会导致直接导致裂纹产生。

2.2 内部缺陷

压力容器异种钢焊接内部缺陷包含气孔、内部裂纹、夹渣等肉眼难以识别的质量缺陷。该种缺陷只能通过无损检测方式完成检验,所以为了有效保证压力容器异种钢型的焊接质量,在完成相关焊接程序之后对其进行无损检测十分有必要。异种钢焊接内部缺陷产生原因针对性较强。例如,气孔的产生主要由于焊接过程当中母材表面未进行及时清理导致少量的杂质或油污存在,而且随着作业环境湿度的增加以及操作的不标准性也会产生内部气孔。而未融合以及未焊透也是一种钢焊接常见的内部缺陷之一,这两种缺陷会对整个压力容器的密封性造成直接影响,产生该种缺陷的主要原因在于焊接过程中的电流选择不当或者坡口设计的不合理性。这样一来两端母材未能实现完全融合导致间隙产生。值得注意的是,整个焊接内部缺陷当中裂纹的产生影响最大,也是最不容忽视的缺陷。焊接裂纹产生的主要原因在于金属原子相互作用力的破坏,该种破坏之下会形成全新的两个界面最终导致焊接断裂,这是在焊接应力以及脆性因素的共同作用下而产生的。

3 压力容器异种钢焊接注意事项

在焊接流程上异型钢管焊接同种钢焊接并无区别,但由于母材与焊条成分差别较大焊接过程当中碳迁移现象不容忽视。所以焊接过程当中需要考虑金属本身的性质,同时对相关的焊接参数进行详细地掌握,而焊接之后的热处理也是十分关键的步骤。

3.1 焊条的选择

焊条的选择直接影响着焊接接头的质量以及力学性能,同时对于压力容器使用性能以及使用寿命也有着不容忽视的影响。一旦焊条选用不当会导致裂纹等焊接缺陷,若母材的金相组织比较接近在进行焊条材料选择的过程当中应该以母材的成分性能作为参考,以母材金属力学性能较低的一方为参考标准。若母材金相组织拥有较大的差别,焊条选择的过程当中应考虑稀释后的接头性能,同时综合腐蚀性以及耐高温性进行强度匹配。

3.2 焊接方法的选择

大部分焊接方法都适用于压力容器异种钢型的焊

接,不过随着技术的发展各类新型焊接技术在传统焊接方法基础之上衍生而来,而且其自动化程度也实现了明显的提升。传统的焊接坡口较大因此焊接缝隙金属表现为较大的填充量,所以需要耗费更多的焊接能量,而各类新型焊接技术则有效避免了该种问题,其中激光电弧焊技术最为突出,激光电弧焊能够保证异种钢型组合的灵活选用,同时具有较强的适应能力,这种技术巧妙地结合了激光焊和电弧焊,有效地提升了焊接的质量和效率。

3.3 确定焊接规范

焊接规范是一种标准性的操作也是整个焊接作业的基础。标准制定的过程当中应该综合异型钢材的产品性能以及质量要求完成科学合理的制定。整个焊接规范包含一下多方面内容:

3.3.1 预热措施的采取

异种钢材焊接过程当中对于两种母材而言皆应采取相应的预热措施。预热的目的在于有效降低焊接接头淬火裂纹的产生,整个预热过程当中温度的确定参照母材当中要求高的一方。

3.3.2 坡口角度的选择

焊接过程当中对于坡口角度的设置首先应该考虑母材厚度,其次要考虑融合比,在异种钢行完成焊接的过程当中只有满足较多焊材焊缝的融入才能够实现焊接质量的保证。融合比直接影响着焊接接头的化学成分以及力学性能,焊接时应该以适当地降低融合比为基础,选用小直径焊材,采用小电流的方式快速完成焊接。

3.3.3 焊后热处理

焊后热处理的目的在于完成焊接部分残余应力的消除,同时促进焊缝金属当中的氢元素溢出,实现接头组织性能的完善。焊后热处理的工艺系数以要求较高的母材为参考。若两种母材的热物理性能比较接近,应优先选用退火工艺来实现残余应力的消除。

3.4 焊接质量检查

压力容器异种钢焊接质量检查工作是排除焊接缺陷保证焊接质量的最后一步,该过程主要以无损检测为主要手段。

4 压力容器异种钢焊接质量的无损检测方法

在对压力容器异种钢焊接质量进行检测的过程当中,无损检测是最有效也是最直接的办法,整个无损检测技术在应用的过程当中不会对压力容器造成损伤,同时在保证生产利益的同时能够完成诸多肉眼无法识别焊接缺陷的探测,并对缺陷位置进行准确地判断,避免了压力容器在使用过程当中因为裂纹等缺陷而造成的容器损伤,也避免了生产过程当中的诸多安全隐患。

4.1 渗透检测

渗透检测也被称为PT检测原理为毛细作用,检测的过程当中将染料渗透剂均匀涂施在异种钢焊接压力容器工件上,因为质量达标的焊接质量是连续性的,但由于缺陷的存在,会导致一定的不连续产生。此时将多余

渗透液及时清除,再通过显像剂的显像作用,就能够直接显示出缺陷存在的区域以及大小形状等。在对包含奥氏体的压力容器异种钢焊接件检测过程当中由于异种钢本身具备不连续的磁力线,所以难以采用磁粉检测法进行检测,而此时渗透检测就成为了开口缺陷检测的良好方法。渗透检测的最基本优势就是操作简单且操作成本较低。

渗透检测分为多种类别,最常见的是着色渗透检测以及荧光渗透检测,就是在检测的过程当中以荧光染料或者着色染料作为渗透剂完成对焊接件的施涂。不过值得注意的是,渗透检测过程当中对于温度的要求较高通常要求处于 10~40℃ 的温度之间才能够保证良好的显像效果。另外对于包含奥氏体的异种钢型性而言渗透剂的选择应该选择裂纹检出率较高、渗透能力较强且灵敏度较高的溶剂,而且选择的过程中应该注意其中硫氟以及氯等有害离子的含量控制,防止这些有害离子因为残留而对奥氏体产生晶间腐蚀。

为确保检查结果的准确性,检测之前应该对异种钢焊接压力容器表面进行清理保证无污染残留。可以选用静电喷涂的方式进行渗透剂的涂施,该种方式能够实现均匀喷涂且防止渗透液集中堆积的现象。渗透时间选择上要保证在 10min 以上。另外,多余残留渗透剂的去除也是十分关键的步骤,最好采用擦拭法尽量一次性完成擦拭。显像的过程当中,要保持显像喷雾的均匀喷洒形成薄雾避免水柱产生,保证显像时间大于 7min 即可,计算机观察现象结果完成对异种钢焊接的开口裂纹缺陷的判断。

4.2 射线检测

射线检测的原理在于利用 X 射线或者是 γ 射线的穿透力完成缺陷探测,因为就射线本身而言,其在完整工件内的穿透过程中是具备连续穿透性的,当穿透过程中遇到阻力会导致穿透强度减弱,影响穿透强度减弱的根本在于穿透物质的衰减系数以及穿透本身的厚度决定,因此检测过程中利用缺陷位置与工件本身衰减系数的不同完成缺陷判断。射线检测能够对异种钢的埋藏性缺陷进行有效检测,检测过程当中不受金属金相组织以及晶粒度的影响。射线检测的过程中射线穿透一部分能量会被吸收,一部分可以直接穿透能够直接形成影像,达成长期记忆保存。

射线检测能够渗透于其他检查无法开展的内部领域,其中 X 辐射是一类比紫外线短的电波具备光的特征具有强大的穿透力, γ 射线是一种波长短的电波,由放射性同位素发出。研究表明异种钢焊接裂纹同坡口发展有着极其紧密的关系,为保证检测的精准度应该对射线检测的工艺进行优化,检测过程当中需沿着融合区分别进行两次检测,且两次检测相距 180° 才能够保证沿着缺陷的发展方向进行深度检测。

当前的摄像检测技术包含多种检测技术和成像技术,数字成像工艺最为常见,能够将检测到的信息转化

成数字信号直接地储存或还原显示。伴随着人工智能化的识别发展,射线检测成像也逐渐趋于科学化和智能化,在压力容器异种钢焊接检测中发挥关键作用。

4.3 超声检测

超声检测的检测原理在于对超声波的合理运用,利用超声波能量完成对异种钢焊接件的穿透,因为空气与待检测异种钢焊接件声阻的不同特征,会得到不同的反射回波信号反馈。尤其在接触到缺陷处的异质介质面时发生的反射现象差异现象最为明显。因此可以根据反射的内容完成缺陷判断。很多时候,异种钢型焊接接头的缺陷埋藏较深,而且由于结构以及厚度的限制难以用射线检测完成精准的判断,此时的超声检测能够发挥出较好的检测作用。

超声波有着不同的波形,不同的波形有着不同的检测范围,纵波的探头叫做直探头产生以及接收比较容易;产生横波的叫斜探头多用于焊缝的探伤;表面波的传播过程会沿着金属表面进行对表面缺陷较为敏感,可以完成复杂表面缺陷的探测;板波主要探测对象为薄板。超声波能够完成不连续缺陷的探测,并提供不连续三维位置信息给出综合评估数据,展现出直接的检测结果。对于包含奥氏体的异种钢而言,超声检测的过程当中首先要进行对比试块的制作完成测试,同时结合压力容器设备的结构进行探头的选择。

超声检测过程中脉冲发射法以及衍射时差法最为常见,脉冲检测的原理在于利用高频声波的介质传入脉冲发射法根据回波来进行缺陷情况的判断,检测仪器体积小质量轻成本低的优势且能够完成快速检测。但检测过程当中无法做出精准定位以及直观的图像展示;衍射时差法超声检测主要的原理在于声波经过缺陷时,会有一定的衍射波的产生,通过衍射波的收集完成缺陷检测,该种检测方法能够精准地计算出缺陷尺寸和形状,并且完成表面延伸裂纹的识别以及垂直方向缺陷的定量定位检测。但该种方式对缺陷的走向并不敏感,因此脉冲发射法以及衍射时差法结合检测能够实现良好的检测覆盖。

5 结语

压力容器异种钢焊接由于母材的本质区别以及焊接热影响的存在,有着化学成分、组织结构、力学性能以及应力场分布不均匀的基本特性,为有效保证焊接质量,整个焊接流程应该实现严密的控制,从焊条的选择和焊接工艺的选择入手,规范焊接操作严格执行参数标准确保焊接质量的提升以及使用性能的提升并有效降低焊接缺陷。在对焊接质量检验的过程当中,无损检测工艺有着非破坏性、高效、全面、安全的检测特点,相应的超声检测、射线检测以及渗透检测能够有效地对异种钢材焊接的裂纹以及缺陷位置完成详细的检测,从根本上确保压力容器使用质量的提升。

参考文献:

- [1] 胡洁靓,李斌.压力容器异种钢焊接工艺及无损检测方法探究[J].特种设备安全技术,2021(06):51-52+55.