堆焊隔离层在承压设备制造中的应用

包文红[1]，陈宏伟[2]，王岑[2]，武靖伟[2]，梁瑞锋[2]，张建晓[2]
（1. 甘肃省特种设备检验检测研究院，兰州 730050； 2. 兰州兰石重型装备股份有限公司，兰州 730314）

摘要：针对承压设备制造过程中低合金耐热钢与低合金高强钢（两焊件热处理制度不同）、低合金耐热钢与奥氏体不锈钢（第一焊件需热处理，第二焊件不需热处理）以及低合金耐热钢（两焊件热处理制度相同）之间采用堆焊隔离层分别进行不同金属材料焊件之间焊接的典型案例，通过制定合理的焊接工艺以及热处理制度成功解决了异种金属材料之间的焊接难题。结果表明，选用正确的隔离层焊材，在不同热处理制度下采用堆焊隔离层的方法焊接接头质量均得以保证，案例的成功应用为同类产品制定合理的焊接工艺提供了依据。

关键词：承压设备；异种金属焊接；堆焊隔离层；焊接工艺评定；镍基合金

中图分类号：TG457　　**文献标识码：**A　　**doi：**10.12073/j.hj.20221203001

Application of dissimilar steel welding with surfacing isolation layer in pressure equipment manufacturing

Bao Wenhong[1], Chen Hongwei[2], Wang Cen[2], Wu Jingwei[2], Liang Ruifeng[2], Zhang Jianxiao[2]
(1. Gansu Provincial Special Equipment Inspection and Testing Institute (Group), Lanzhou 730050, China; 2. Lanzhou Lanshi Heavy Equipment Co., Ltd., Lanzhou 730314, China)

Abstract: In view of the typical cases of welding between weldments of different metal materials by surfacing isolation layer between low-alloy heat-resistant steel and low-alloy high-strength steel (the two weldments have different heat treatment systems), low-alloy heat-resistant steel and austenitic stainless steel (the first weldment needs heat treatment, the second weldment does not need heat treatment), and low-alloy heat-resistant steel (the two weldments have the same heat treatment system) in the process of pressure equipment manufacturing, through the formulation of reasonable welding process and heat treatment system, the welding problems between dissimilar metal materials have been successfully solved. The results indicate that the quality of welded joints can be guaranteed by selecting the correct isolation layer welding material and using the method of overlaying the isolation layer under different heat treatment systems. The successful application of the case provides a basis for developing reasonable welding processes for similar products.

Key words: pressure vessel, dissimilar metals welding, surfacing isolation layer, welding procedure qualification, nickel based alloy

0　前言

在承压设备设计过程中，为了能够最大限度地发挥焊接件两侧钢的各自优势，有时选用两种不同的钢[1]，具有节约成本等一系列优点，但制造时必须解决不同钢之间的焊接难题。不同钢焊接接头存在两种情况，一种为同类组织、不同合金成分钢材组成的焊接接头，如同属铁素体类钢、奥氏体类钢；另一种由不同类、不同钢组成，即焊接接头的母材属于两种不同类钢，如铁素体类钢与奥氏体类钢之间。对于母材同属铁素体类的钢，若填充金属由奥氏体不锈钢焊条或镍基焊条的焊缝金属连接[2－3]，也属于第二类接头，由于不同类钢种组成的焊接接头，无论从合金成分上还是物理化学性能上两侧均存在较大差异，导致焊接接头中必然存在合金成分分布不均匀、接头熔合区组织和性能不稳定以及焊后热处理困难等

收稿日期：2022-12-03

一系列问题，因此制定合理的焊接工艺，才能保证不同类钢种焊接接头组成的构件整体稳定、安全可靠的运行[4－5]。

能源行业标准 NB/T 47015 对于不同类钢焊接时焊接材料的选用作了明确规定，特别是当碳素钢与奥氏体高合金钢、低合金钢之间焊接时，焊接材料的选择应该确保焊缝金属具有良好的力学性能。当接头服役温度低于 370 ℃时，选用高铬、镍奥氏体材料作为填充材料可保证焊缝金属为奥氏体，同样能够满足服役要求，而当接头服役温度高于 370 ℃时，选用镍基材料作为焊接填充材料。

结合承压设备制造工程实际，分别针对低合金耐热钢与低合金高强钢（两焊件热处理制度不同）、低合金耐热钢与奥氏体不锈钢（第一焊件需热处理，第二焊件不需热处理）以及低合金耐热钢（两焊件热处理制度相同）之间采用堆焊隔离层进行焊接，通过制定合理的焊接工艺以及热处理制度成功解决了不同金属材料之间的焊接难题，保证了焊接接头质量。

1　2.25Cr1Mo 与 13MnNiMoNbR 钢焊接

图 1 为带隔离层焊接接头示意图，δ_c 为堆焊面加工后所保留的隔离层厚度.

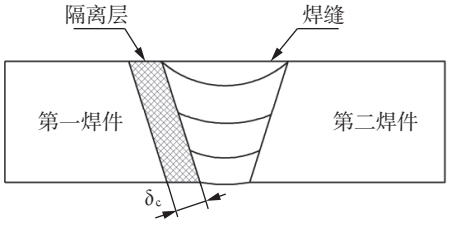


图 1　带堆焊隔离层焊接接头示意图

锅炉给水预热器为高压 U 形管式换热器，设计温度为 340 ℃，设计压力为 15.0 MPa；管程换热管材料为 SA182GrF22Cl3（2.25Cr-1Mo），设计温度为 355 ℃，设计压力为 25.0 MPa，管板材质为 SA336GrF22Cl3（2.25Cr-1Mo 锻），壳程筒体材料为 13MnNiMoNbR，壁厚为 56 mm。

管板材料为 SA336GrF22Cl3 钢，属于 2.25Cr-1Mo 类，合金元素含量较高，焊接接头热影响区组织通常为贝氏体，焊态下硬度高、韧性低。为改善接头的组织和性能，2.25Cr-1Mo 钢焊接接头需经 690 ℃焊后消除应力热处理，但会造成 13MnNiMoNbR 钢焊接接头出现强度大幅下降，因此焊接材料及焊接工艺的选择对 13MnNiMoNbR 钢与 2.25Cr-1Mo 钢之间的焊接尤为关键。由于 2.25Cr-1Mo 钢材中的 Cr 和 Mo 元素含量较高，淬硬倾向大，且管板的厚度大，在焊接及热处理过程中容易产生各种裂纹等缺陷，因此为了避免产生裂纹和降低 2.25Cr-1Mo 钢热影响区的硬度等缺陷，首先选用 J607 焊条在 2.25Cr-1Mo 侧（第一焊件）预先堆焊隔离层（图 2），并进行无损检测合格后，按 2.25Cr-1Mo 钢侧进行 690 ℃的焊后热处理，然后与 13MnNiMoNbR 钢制筒体组对，采用钨极氩弧焊进行封底（焊丝 H08Mn2Si）、埋弧焊（H08Mn2NiMo + HJ250G）填充盖面，再按 13MnNiMoNbR 钢（第二焊件）焊后热处理制度对总装缝进行 600 ℃的最终热处理（PWHT），如图 2 所示，焊接工艺评定过程如下。

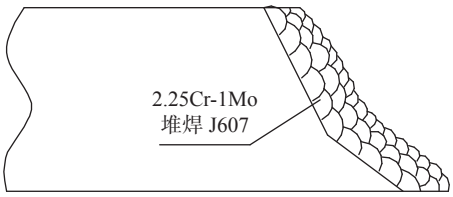


图 2　2.25Cr-1Mo 锻件坡口处堆焊隔离层

2.25Cr-1Mo 钢焊接坡口预热温度 $T \geqslant 150$ ℃，采用 J607 焊条堆焊隔离层厚度不小于 5 mm（图 2），道间温度 150 ~ 250 ℃，进行（250 ~ 300）℃ × 2 h 后热；对堆焊层进行 100%超声（UT）检测合格后，进行 690 ℃ × 8 h 焊后热处理.

带隔离层的 2.25Cr-1Mo 钢与 13MnNiMoNbR 钢的对接，预热温度 $T \geqslant 150$ ℃，采用 ϕ2.5 的 H08Mn2Si 手工钨极氩弧焊打底 2 层，3 ~ 6 层采用 ϕ4.0 的 J607 焊条焊接，采用 H08Mn2NiMo + HJ250G 进行埋弧焊，层间温度均控制在 150 ~ 250 ℃，最后进行（250 ~ 300）℃ × 2 h 的后热，焊缝 100%超声（UT）检测合格后，按 600 ℃ × 8 h 进行 PWHT。焊接工艺评定试验结果见表 1，从

表 1　低合金耐热钢侧带低合金钢堆焊隔离层焊接工艺评定试验结果

抗拉强度 R_m/MPa	断裂位置	弯曲试验（$d = 4a$, 180°）	冲击吸收能量（0 ℃）A_{KV2}/J		
			焊 缝	2.25Cr-1Mo 侧热影响区	13MnNiMoNbR 侧热影响区
625, 630	13MnNiMoNbR 侧母材	侧弯 4 件，合格	55，74，65	263，271，287	95，115，116

表 1 中可以看出，焊接接头拉伸试验断于 13MnNiMoNbR 侧母材，且有较大富裕量；侧弯及冲击试验结果表明，焊接接头塑韧性良好，证明所选焊接材料、制定的焊接工艺及热处理制度正确合理。

2 2.25Cr-1Mo 与 06Cr18Ni11Ti 钢的焊接

加氢裂化装置中的换热器，管程设计温度为 454 ℃，设计压力为 16.7 MPa，换热管材质为 06Cr18Ni11Ti，壳程壳体材质为 12Cr2Mo1R + 不锈钢堆焊层（309L + 347L），设计温度为 424 ℃，设计压力为 17.7 MPa。

由于 12Cr2Mo1R 低合金耐热钢侧热影响区必须进行焊后热处理，但焊后热处理会引起奥氏体钢侧耐腐蚀性能下降等问题，因此应选用 Cr 和 Ni 元素含量高的焊接材料作为填充材料，以防焊缝金属稀释后产生马氏体、缩小碳迁移层[6－8]。

综上所述，采用 ENiCrFe-3 焊条在 12Cr2Mo1R 侧（第一焊件）预先堆焊一层镍基隔离层（图 3），接管内壁的耐蚀堆焊层过渡层为 309L，盖面层为 347L，并进行无损检测，检测合格后按 12Cr2Mo1R 侧进行焊后热处理 690 ℃ × 8 h PWHT，然后同 06Cr18Ni11Ti 钢（第二焊件）进行焊接，两焊件焊接接头形式如图 4 所示，采用 ERNiCr-3 焊丝手工钨极氩弧焊打底，ENiCrFe-3 焊条电弧焊填充盖面，焊接工艺评定过程如下。

12Cr2Mo1R 焊接坡口预热温度 $T \geqslant 150$ ℃，堆焊首层，进行（250 ~ 300）℃ × 2 h 后热，堆焊层 100% 着色（PT）检查合格后，堆焊第 2 ~ 3 层（道间温度 $T_c \leqslant 100$ ℃），堆焊隔离层厚度不小于 5 mm，堆焊层 100% 着色（PT）检查合格，按 12Cr2Mo1R 侧进行 690 ℃ × 8 h PWHT。

带隔离层的 12Cr2Mo1R 与 06Cr18Ni11Ti 对接。焊

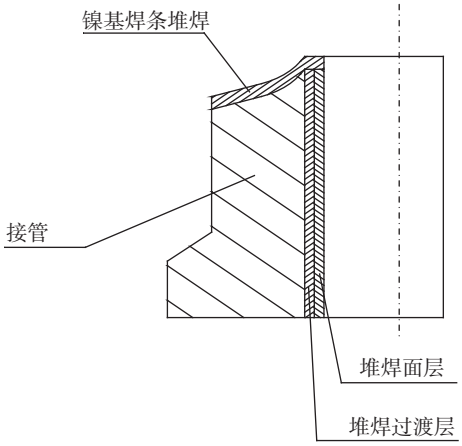


图 3　12Cr2Mo1R 接管坡口处堆焊镍基隔离层

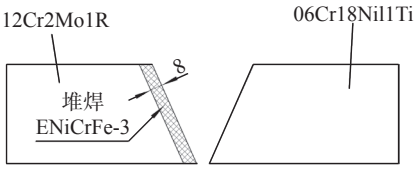


图 4　焊件带堆焊隔离层焊接接头形式

接坡口 100%着色（PT）检查合格后，采用 ϕ2.5 的 ERNiCr-3 手工钨极氩弧焊，焊接 1 ~ 2 层（层间温度 $T_c \leqslant 100$ ℃），焊缝 100%着色（PT）检查合格，再采用 ϕ4.0 的 ENiCrFe-3 焊条填充盖面（层间温度 $T_c \leqslant 100$ ℃），焊缝 100%RT 和 PT 检测。

焊接工艺评定试验结果见表 2，从表 2 中可以看出，焊后未经热处理的焊接接头抗拉强度高、侧弯两件不合格以及 12Cr2Mo1R 侧热影响区硬度高、冲击韧性低，不能满足产品使用要求，但经 690 ℃ × 8 h PWHT，耐热钢侧热影响区塑韧性及硬度均得到明显改善，焊接工艺评定合格，可以指导生产。

表 2　低合金耐热钢侧焊件带镍基堆焊隔离层焊接工艺评定试验结果

状态项目	抗拉强度 R_m/MPa	断裂位置	弯曲试验（$d = 4a$, 180°）	冲击吸收能量（−30 ℃）A_{KV2}/J	显微硬度 H/HV10
热处理态	570, 580	12Cr2Mo1R 侧母材	合格	285, 228 , 276	210 , 205 , 215
焊态	615, 620	06Cr18Ni11Ti 侧母材	两件合格、两件不合格	98 , 210 , 156	260 , 275, 255

3 14Cr1MoR 构件双侧带堆焊隔离层金属材料焊接

年产 100 万吨甲醇工程用进出口换热器，管程设计温度为 340 ℃，设计压力为 9.0 MPa，壳程设计温度为 280 ℃，设计压力为 9.0 MPa，管程介质为热合成气，壳程介质为冷合成气，主体材质为 14Cr1MoR + S30403 复合板，规格 ϕ2 200 mm × （77 mm + 5 mm） × 24 205 mm。为保证焊接接头质量，在焊总装焊缝坡口两侧分别采用 ϕ4.0 的 ENiCrFe-3 焊条堆焊镍基隔离层，并分别进行 690 ℃ × 4 h 焊后热处理，再采用 ϕ2.5 的 ERNiCr-

3 手工钨极氩弧焊打底，ϕ4.0 的 ENiCrFe-3 焊条填充、ϕ2.5 的 HS600 焊丝 + SJ608 焊剂继续填充和盖面，焊接接头检测合格后，构件整体不再热处理[9－10]，构件两侧带堆焊隔离层焊接接头形式如图 5 所示，焊接工艺评定试验结果见表 3.

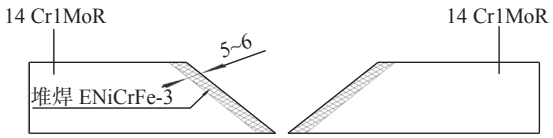


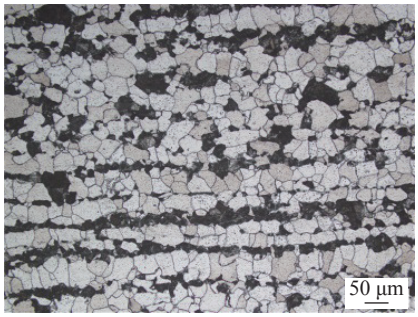
图 5　构件双侧带堆焊隔离层焊接接头形式

表 3　构件双侧带堆焊隔离层焊接工艺评定试验结果

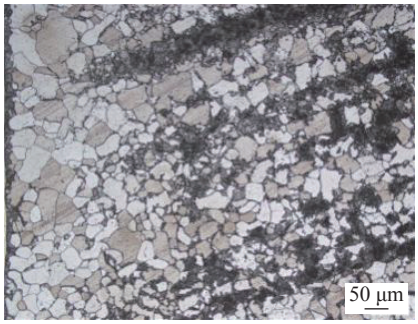
抗拉强度 R_m/MPa	断裂位置	弯曲试验（$d = 4a$, 180°）	显微硬度（距正表面 2 mm 处）H/HV10	
			焊缝	热影响
560，552	母材	合格	203, 206, 209	159, 162, 168

从表 3 可以看出，焊接接头抗拉强度平均值可以达到 556 MPa，在母材区断裂，弯曲试验结果表明焊接接头塑性良好，满足实际应用要求。

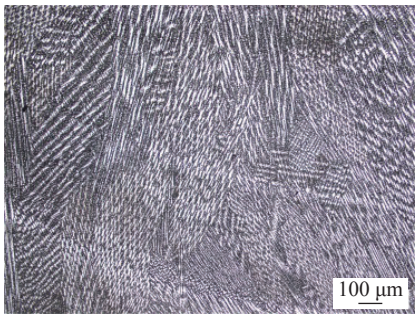
焊接接头不同区域的微观组织形貌如图 6 所示，



(a) 母材区



(b) 焊接热影响区



(c) 焊缝区

图 6　焊接接头的微观组织

从图 6a 中可看出母材组织由铁素体 + 珠光体相组成；从图 6b 可看出热影响区的晶粒在焊接热的作用下有一定的长大，并且珠光体相有减少；从图 6c 可看出焊缝区主要是针状的 γ 相，γ 相的形成增加了焊缝区的硬度。

14Cr1MoR 构件双侧堆焊隔离层后分别进行 690 ℃ × 4 h 的焊后热处理，有效地降低了 14Cr1MoR 与隔离层热影响区的强度，改善了组织和韧性，采用镍基焊材进行焊接，解决了产品无法进行整体热处理的难题，该方法在工程上具有重要的实际意义。

4　结论

（1）2.25Cr-1Mo 钢与 13MnNiMoNbR 钢的焊接，隔离层焊材的选用应着眼于经低合金耐热钢较高温度热处理规范（690 ℃ × 8 h）和低合金高强钢热处理规范（600 ℃ × 8 h）PWHT，焊接接头的力学性能依然能够满足产品使用要求。

（2）2.25Cr-1Mo 低合金耐热钢与 06Cr18Ni11Ti 奥氏体不锈钢的焊接，隔离层焊材的选用主要考虑 12Cr2Mo1R 低合金耐热钢侧热处理规范（690 ℃ × 8 h）焊后热处理，焊缝金属稀释产生马氏体、缩小碳迁移层，因此应选用 Cr 和 Ni 元素含量高的焊接材料作为填充材料，以保证焊后热处理后焊接接头性能满足设计要求。

（3）对于因结构的原因无法进行整体热处理的产品，隔离层选用 Cr 和 Ni 元素含量高的焊接材料作为填充材料，分别进行焊后热处理，可有效地解决现场热处理的难题。

参考文献

［1］　李亚江，王娟. 异种难焊材料的焊接及工程应用［M］. 北

京: 化学工业出版社, 2014.
[2] 郑韶先, 徐龙强, 赵锡龙, 等. 预置镍基合金片对异种钢UNGW接头组织及性能的影响[J]. 焊接, 2021(1): 1－7.
[3] 孙连北, 魏坤霞, 孟涛, 等. 等离子弧焊Q345B和430不锈钢异种接头的微观组织与性能[J]. 焊接, 2022(5): 19－23.
[4] 靳红梅, 任世宏, 李永红, 等. 镍基合金在异种钢焊接中的应用[J]. 电焊机, 2009, 39(4): 148－150.
[5] 陈太军, 谢进, 谭云华, 等. 带隔离层镍基异种钢环缝无损检测应用[J]. 西部特种设备, 2020, 3(3): 40－49.
[6] 高利和, 里杨, 高博, 等. 镍基合金换热器的焊接要点[J]. 压力容器, 2015, 32(5): 75－79.
[7] 闫飞, 周一凡, 唐本刊, 等. 基于磁控冶金的铝/钢异种金属焊接特性[J]. 焊接学报, 2022, 43(5): 98－103.
[8] 孙国辉, 邹迪婧, 谢彦武. 镍基690合金管子与管板焊接技术[J]. 动力工程学报, 2016, 36(5): 82－86.
[9] 邓为民, 董生, 杨挺. 镍基合金堆焊和管子管板焊接工艺的研究[J]. 电站辅机, 2015, 36(4): 22－26.
[10] 袁浩, 马成勇, 齐彦昌, 等. 690镍基合金焊条熔敷金属的组织与性能研究[J]. 材料科学与工程, 2016, 24(2): 41－46.

第一作者: 包文红, 学士, 高级工程师; 主要从事压力容器的制造监督检验及承压类特种设备鉴定评审工作; 492342271@qq.com。

(编辑: 郑红)

本文引用格式:
包文红, 陈宏伟, 王岑, 等. 堆焊隔离层在承压设备制造中的应用[J]. 焊接, 2023(5): 35－39.
Bao Wenhong, Chen Hongwei, Wang Cen, et al. Application of dissimilar steel welding with surfacing isolation layer in pressure equipment manufacturing[J]. Welding & Joining, 2023(5): 35－39.

(上接第 34 页)

[11] 方远方, 张丽娜, 米彦龙, 等. 焊接位置对5083铝合金搅拌摩擦焊T形接头性能的影响[J]. 焊接, 2021(11): 52－56.
[12] Jesus J S, Gruppelaar M, Costa J M, et al. Effect of geometrical parameters on friction stir welding of AA5083-H111 T-joints[J]. Procedia Structural Integrity, 2016, 33(2): 242－248.
[13] Fratini L, Buffa G, Micari F, et al. On the material flow in FSW of T-joints: Influence of geometrical and tecnological parameters[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, 44(5-6): 570－578.
[14] 屈志军, 宫文彪, 刘杰, 等. 搅拌头尺寸对铝合金T型接头搅拌摩擦焊组织与性能的影响[J]. 长春工业大学学报, 2018, 39(1): 20－25.
[15] 国际标准化组织委员会(ISO). 铝合金搅拌摩擦焊焊接工艺规程及鉴定: ISO25239—2020[S]. 瑞士: 瑞士出版社, 2020.

第一作者: 刘杰, 博士, 教授; 主要从事先进焊接技术的科研和教学工作; liujieququ@126.com。

(编辑: 郑红)

本文引用格式:
刘杰, 屈志军, 遇境润. 装配间隙对铝合金搅拌摩擦焊接头力学性能的影响[J]. 焊接, 2023(5): 29－34, 39.
Liu Jie, Qu Zhijun, Yu Jingrun. Effect of assembly gaps on mechanical properties of aluminum alloy friction stir welding joints[J]. Welding & Joining, 2023(5): 29－34, 39.