

引用格式: 郭未昀, 丁光柱, 孙松涛, 等. 不同感应加热方法对 T91 管座焊缝焊后热处理温度分布的影响[J]. 热加工工艺, 2025, 54(13): 143-147.

DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.20212831

<http://www.rjgy.net> rjgy@vip.163.com

不同感应加热方法对 T91 管座焊缝焊后 热处理温度分布的影响

郭未昀, 丁光柱, 孙松涛, 胡传华, 梁浩, 李报, 王伟

(中国电建集团河南工程有限公司, 河南 郑州 450000)

摘要:采用贴面式感应加热和缠绕式感应加热方法分别进行 T91 管座焊缝的焊后热处理, 测定了不同感应加热方法的焊后热处理温度曲线, 分析了温度分布特征。结果表明: 由于贴面式感应加热时电磁抵消严重, 致使要加热到设定温度所需要的电流急剧增大, 超过设备额定电流, 不适用于管座焊缝热处理; 采用缠绕式感应加热时, 小管上缠绕圈数越少, 则上下管温差越小, 当小管不缠绕电缆时, 经过 760 °C 保温 20 min 后, 温度在 750~760 °C, 可以获得良好的退火效果。不同升温速度对温度分布影响不大, 因此可在满足设备使用的前提下, 加快升温速度, 缩短加热时间。为了应对电流突变现象, 当加热温度达到 700 °C 时, 设定升温速度为 200 °C/h, 加热至 760 °C, 各点温差在 10 °C 以内, 加热效果良好。

关键词: T91 钢管座; 焊后热处理; 贴面感应加热; 缠绕式感应加热

中图分类号: TG441.8

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2025)13-0143-05

Effect of Different Induction Heating Methods on Temperature Distribution of T91 Pipe Seat Weld during Post Weld Heat Treatment

GUO Weiyun, DING Guangzhu, SUN Songtao, HU Chuanhua, LIANG Hao, LI Bao, WANG Wei

(Power China Henan Engineering Co., Ltd., Zhengzhou 450000, China)

Abstract: The post weld heat treatment of T91 pipe seat weld was carried out by using veneer induction heating and winding induction heating, respectively. The temperature curves of post weld heat treatment using different induction heating methods were measured and the temperature distribution characteristics were analyzed. The results show that due to serious electromagnetic offset with veneer induction heating, the current required to heat to the set temperature increases sharply, exceeding the rated current of the equipment, and it is not suitable for pipe seat weld heat treatment. When winding induction heating is used, the smaller the number of winding coils on the small tube, the smaller the temperature difference between upper and lower tubes. When the number of winding coils on the small tube is 0, after insulation at 760 °C for 20 min, the temperature is 750-760 °C, and good annealing effect can be obtained. Different heating speeds have little effect on the temperature distribution. Therefore, on the premise of meeting the use of the equipment, the heating speed can be accelerated and the heating time can be shortened. In order to deal with the sudden change of the current, when the heating temperature reaches 700 °C, set the heating speed of 200 °C/h during heating to 760 °C, the temperature difference of each point is within 10 °C, and the heating effect is good.

Key words: T91 steel pipe seat; post weld heat treatment; veneer induction heating; winding induction heating

众所周知, 火力发电厂超临界或超超临界机组大量使用了 T91、T92 马氏体耐热钢管道, 而焊接热处理质量是影响 T91、T92 钢焊接接头质量的重要因素^[1-2]。随着电子科技快速发展, 移动式中频感应加热处理设备实现了国产化, 管道的中频感应热处理方法也被越来越多应用在电厂建设中^[3-4]。目前, 国

内外对中频感应热处理加热研究主要集中在大径厚壁 P91、P92 管道焊接接头的热处理^[5-8], 但是针对薄壁小径管, 如锅炉受热面管排、联箱接头管座焊缝等的中频感应热处理研究未见相关报道。本文采用中频感应加热方法对电厂联箱接头、三通管道等 T91 管座焊缝进行热处理, 通过改变感应加热方法以及温度场的测试, 为解决该类焊缝焊后热处理提供依据。

收稿日期: 2021-10-19

修回日期: 2024-04-22

基金项目: 中国电力建设集团有限公司科技项目(DJ-TGYY-2017-10)

作者简介: 郭未昀, 男, 硕士, 主要研究方向: 先进材料连接;

E-mail: 931794649@qq.com

1 试验方案

本次试验选用 AtecFTR-2X40/380T-K1F10 中频

感应加热电源,加热对象为非对称结构管座件,如图1所示。管座规格为 $\phi 320\text{ mm}\times 12\text{ mm}\times 320\text{ mm}$, $\phi 50\text{ mm}\times 10\text{ mm}\times 485\text{ mm}$ 。共有两条焊缝,小管对接焊缝距大管高度为50mm。本研究的目的是对小管对接焊缝进行热处理,同时考虑两条焊缝(焊缝1、2)同时处理的可能性,为处理类似焊缝提供试验依据和方法。

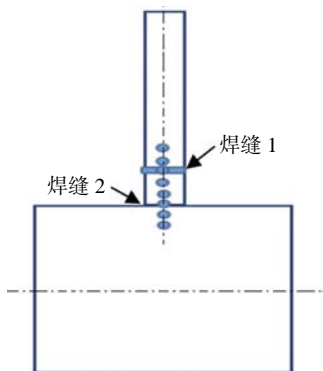


图1 管座及测温点位置示意图

Fig.1 Schematic of pipe seat and temperature measuring points

采用不同加热方法,通过对温度场的分析,提供最佳的加热方法。为了检测温度分布,共布置了8个测温点(根据实验需求增减热电偶测温点):大管圆周向上距焊缝2距离为10、20mm处各布置一个测温点;小管上距焊缝2分别为0、20、40、50、60和80mm共6个测温点,如图1中的圆点所示。采用不同加热方法,通过对温度场的分析,提供最佳的加热方法。根据感应器样式的不同,共制作两种感应器,分别为贴面式感应加热和缠绕式感应加热。

1.1 贴面式感应加热

对本次试验管座件,由于两个工件尺寸不同、厚度不同,故采用一个感应加热器加热时焊缝两侧传热条件不同,无法保证加热过程以及保温阶段在焊缝处温度最高和温度的均匀性。为解决这一问题,以焊缝为分界线,分别做两个感应器,在焊缝两边分别安装两个测温热电偶。采用两个感应器分别加热,分别进行温度控制,以保证焊缝处温度最高且其两侧温度一致,解决了传统管材丁字形焊接接头的难热处理问题。采用贴面式感应加热方法,共安装6个热电偶,它们的位置是:小管上分别距焊缝2距离40、50、60、80mm,焊缝2、大管圆周上距焊缝2距离10mm,分别标记为T1~T6。图2为贴面式感应加热器成品图。

选用贴面式感应加热时,外层保温材料选用纳米气凝胶绝热毡,共3层,每层厚度10mm。该



图2 贴面式感应加热器成品

Fig.2 Finished products of veneer induction heater

材料具有良好的保温性能,适合用于外侧保温,如图3所示。



图3 加热小管和加热大管用的感应加热器

Fig.3 Induction heater for heating small tube and large tube

1.2 缠绕式感应加热

本次缠绕式感应加热试验的保温层共分为4层,其中紧贴试件层为第一层,保温材料选用高纯硅酸铝纤维毡,该材料有较高的耐高温性能,规格为宽度600mm、厚度20mm(压实后为10mm),第二、三、四层保温材料选用纳米气凝胶绝热毡,每层厚度10mm。该材料具有良好的保温性能,适合用于外侧保温,保温层总厚度为40mm。采用感应线圈缠绕方式加热,沿小管垂直方向在大管表面上缠绕8圈,缠绕宽度100mm,内侧的一头沿小管向上缠绕1~3圈,缠绕高度(距焊缝距离)80~120mm。逐次减少圈数,分析小管上电缆缠绕圈数对温度场的影响。管座缠绕线圈后的实物照片如图4所示。



图4 管座缠绕线圈后的实物照片

Fig.4 Physical photo of pipe seat after winding coil

为了测量加热时的温度场,采用缠绕式感应加热方法时,在大管和小管上不同位置共安装了9个热电偶,热电偶安装位置见表1。

表1 热电偶安装位置
Tab.1 Thermocouple installation position

离焊缝距离/mm	记录编号	备注
-20	T3'	大管圆周上离焊缝2距离
-10	T2'	大管圆周上离焊缝2距离
-10	T1'	大管圆周上沿轴线方向离焊缝2距离
0	T1	焊缝2
20	T2	小管上离焊缝2距离
40	T3	小管上离焊缝2距离
50	T4	焊缝1
60	T5	小管上离焊缝2距离
80	T6	小管上离焊缝2距离

1.3 工艺程序参数

本研究使用的感应加热电源设备具备4种运行控制模式,分别是恒电流控制、恒功率控制、恒温控制 and 工艺程序运行。本次试验选定工艺程序运行模式,设定工艺程序参数:以400℃/h恒温度速率升温,加热到760℃保温1h,然后以300℃/h恒温度速率降温至室温。

2 试验结果与分析

2.1 贴面感应器加热小管试验结果

图5(a)是6个测温点的升温曲线。从图中可以看出,除大管和焊缝这两点温度比较低外,装在小管上的4个测温点的温度相差不大。如果大管也进行加热,大管和焊缝这两处与小管上的温度差会大大减小。但是,由于贴面感应器中电磁抵消严重,致使在升温过程中实际电流随温度升高迅速增大,如图5(b)所示。当温度升到600℃时电流已达到400A,已是本设备的额定电流,故此方案不适用。

2.2 缠绕式感应加热试验结果

2.2.1 小管上缠绕电缆圈数对温度场的影响

小管上缠绕不同圈数电缆时的温升曲线相近。在此仅给出缠绕3圈的温升曲线,如图6所示。在图中有黑色十字线,对应到达760℃的时间。从结果可以看出,随温度升高,各点的温度差增大,当最高温度大约升到720℃时,温度差最大,随后温度差迅速减小。

图7给出了最高温度为700℃时,小管上缠绕不同圈数电缆对应的各点温度,其中横坐标的距离

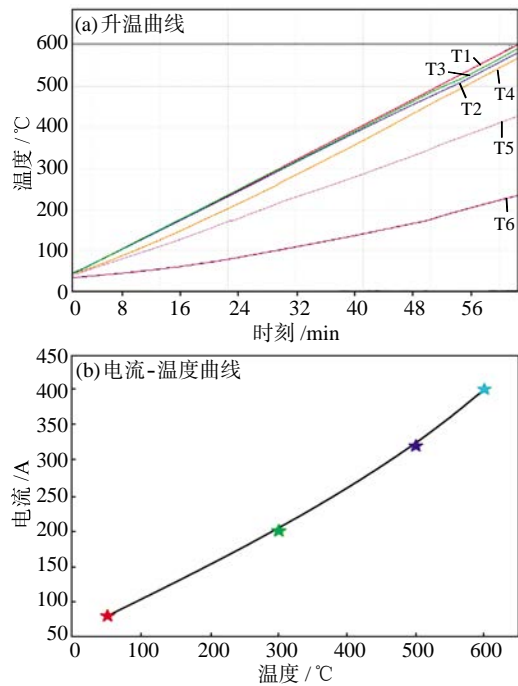


图5 贴面感应器加热的升温曲线及电流-温度曲线
Fig.5 Heating curves and current-temperature curve during veneer induction heater heating

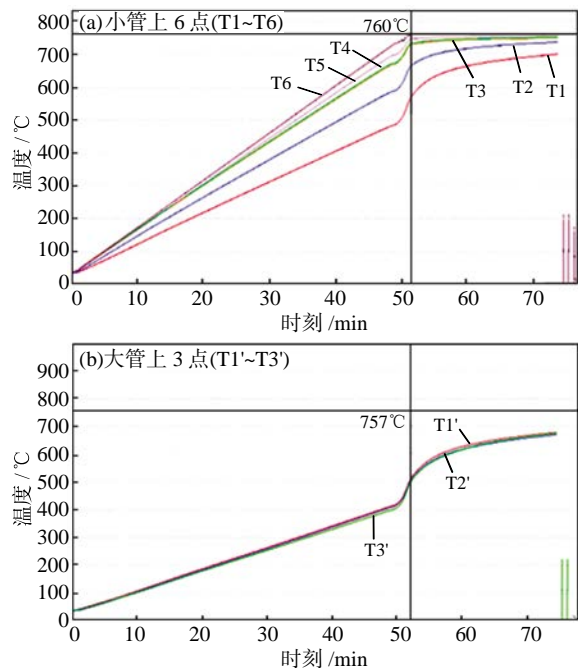


图6 小管上缠绕3圈的温升曲线
Fig.6 Temperature rise curves of winding 3 turns on small pipe

见表1。可以看出,随小管上缠绕电缆圈数的减少,各点的温度差减小,但总的来说,温度差还非常大,最大温差(即小管上缠绕3圈)为337℃,最小的温差也相差200℃(即小管上缠绕0圈)。

当最高温度升到720℃以上,温度差迅速减小。这是因为该材料的居里温度约为720℃,高于720℃

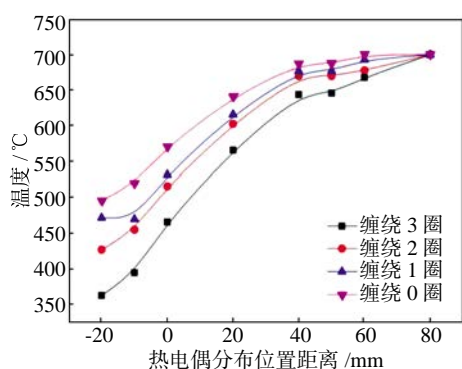


图7 最高温度700 °C时小管上缠绕不同圈数电缆时的温度分布

Fig.7 Temperature distribution of cables with different turns on small tube at highest temperature of 700 °C

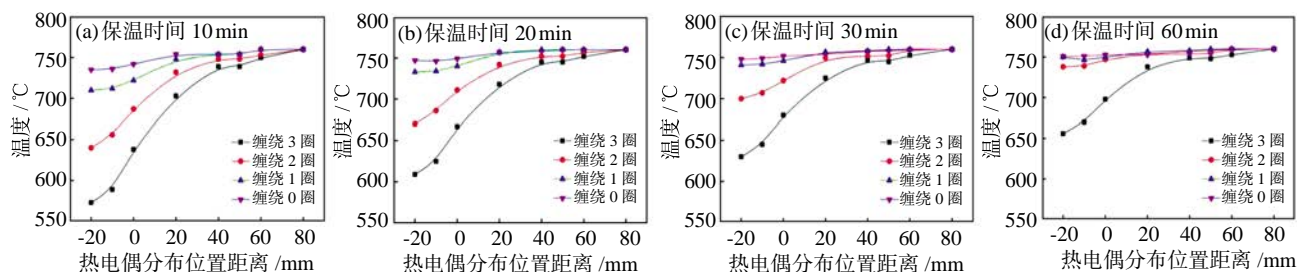


图8 760 °C保温不同时间小管上缠绕不同圈数电缆时的温度分布

Fig.8 Temperature distribution of cables with different turns on small tubes at 760 °C for different time

2.2.2 升温速度对温度场的影响

为研究不同升温速度对温度场的影响,在升温速度试验中进行了两点改进:

(1) 为了降低小管上80 mm处的温度,将小管上的保温层去掉100 mm,增大小管上的散热。

(2) 当温度升到720 °C以上,进入顺磁状态,如果采用相同的加热速度升温,电流将急剧增大,严重时可能超过设备的额定电流,导致停机。为了防止这一现象的出现,在700~760 °C采用200 °C/h的升温速度升温。

表2给出了升温速度试验时热电偶安装位置。

不同升温速度的温度曲线如图9所示。对比可以看出,升温速度从300 °C/h增大到500 °C/h,对温度分布的影响并不大。在700~760 °C之间采用200

相对导磁率迅速减小,为了保证相同的加热速度,电流急剧增大,而处于居里温度以下的低温区由于相对导磁率大而迅速升温,从而减小了温度差。为了更好地反映各点的温度差别,分别取温度升到760 °C,保温10、20、30和60 min时温度与距离的关系如图8所示。从图中可看出,小管上缠绕电缆圈数越多(0~3圈范围内),则温度差越大,即0圈或直接在在大管保温层上缠绕电缆温度差别最小。在该条件下,经过20 min保温后,从大管焊缝到小管上80 mm之间的温度在750~760 °C,即在该范围的焊缝都可以获得良好的退火效果。

表2 升温速度试验时热电偶安装位置

Tab.2 Installation position of thermocouple during temperature rise rate test

离焊缝距离/mm	记录编号	备注
-20	X1	大管圆周上离焊缝2距离
-10	X2	大管圆周上离焊缝2距离
0	X3	焊缝2
20	X4	小管上离焊缝2距离
50	X5	焊缝1
80	X6	小管上离焊缝2距离

°C/h的升温速度升温,各点的温度差迅速减小,同时也大大减小了电流的突变,没有出现太大的电流变化,对保证正常加热起到了一定作用。

图10是最高温度达到700、760 °C时的分布曲线。从图10(a)可看出,距焊缝50 mm处的温度最

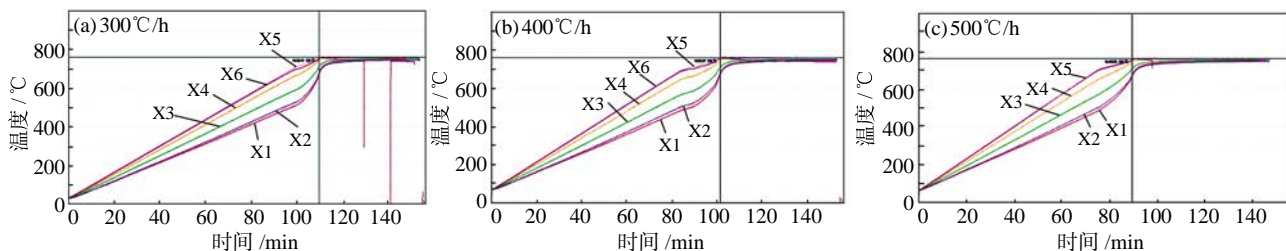


图9 不同升温速度的温度曲线

Fig.9 Temperature curves at different heating rates

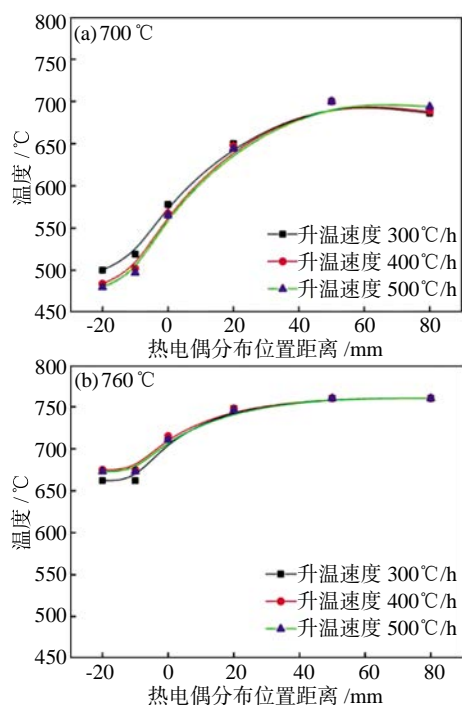


图 10 升到不同温度时的温度分布

Fig.10 Temperature distribution when rising to different temperature

高,80mm 处的温度略低一点,说明减小小管上保温层厚度对降低 80mm 处的温度起到了一定作用。而大管上温度最低,与小管上 50mm 处温度相比低了约 220℃。三种加热速度的温度分布没有显著差异,说明加热速度对温度分布的影响不大。

当以 200℃/h 从 700℃ 升到 760℃ 的过程中,处于较低温度的四个测温点的温度迅速升高,当最高温度达到 760℃ 时,其温度分布如图 10(b) 所示,各点温差大大减小,尤其在距离焊缝 20~80mm 范围内的温差只有 10℃ 左右,达到了良好的加热效果。当进入保温阶段后,随保温时间的延长,温差进一步减小。

3 结论


(1) 采用贴面感应加热、缠绕式感应加热方法对 T91 管座焊缝进行热处理,获得了 T91 管座焊缝的最优感应加热方法,析了不同位置的温度变化规律。

(2) 贴面感应加热中由于电磁抵消严重,致使随温度升高,电流急剧增大,超过现有设备的额定电流,因此不适用于管座焊缝热处理。

(3) 缠绕感应加热时,小管上缠绕电缆圈数越多(0~3 范围内),则温度差越大,即 0 圈或直接在大管保温层上缠绕电缆温度差别最小。在 760℃ 经过 20min 保温后,从大管焊缝到小管上 80mm 之间的温度在 750~760℃,即在该范围的焊缝都可以获得良好的退火效果。

(4) 电磁感应加热升温速度对温度分布的影响并不大。为了应对电流突变现象,在 700~760℃ 之间采用 200℃/h 的升温速度升温,各点的温度差迅速减小,只有 10℃ 左右,达到了良好的加热效果。

参考文献:

- [1] 杨露,黄安国,杨格. 超超临界机组用 T/P92 钢焊接性能研究现状[J]. 电焊机,2014,44(5):154-160.
- [2] 胡磊,王学,孟庆云. 9%Cr 钢厚壁管道局部焊后热处理温度场的数值模拟[J]. 焊接学报,2015,36(12):13-16.
- [3] 袁清晨. 电磁感应加热锅炉电源设计与控制研究[D]. 恩施:湖北民族大学,2019.
- [4] 王明亮,刘毅,张景刚. 中频感应加热焊后热处理工艺现场应用[J]. 焊接技术,2018,47(3):57-59.
- [5] 徐忠峰,王淦刚,鲁立. 焊后热处理对 P92 钢焊接接头显微组织和力学性能的影响[J]. 金属热处理,2019,44(1):148-151.
- [6] 鹿启权,李绪连. 中频感应和远红外热处理对 P91/92 钢焊接接头的影响对比[J]. 焊接技术,2019,48(S1):35-40.
- [7] 唐洪磊. 中频电磁感应加热线圈参数对核电大型工件焊后消氢温度分布的影响[D]. 青岛:青岛科技大学,2019.
- [8] 卢新生,郭新芳,万夫伟. 不同加热方法对大径厚壁 P91 管道焊后热处理温度分布的影响[J]. 焊接技术,2019,48(S1):46-48. 

(上接第 142 页)

- [6] 何卫,马恒,王利民,等. 大功率长时间超声熔体处理对铝硅合金组织的影响[J]. 热加工工艺,2023,52(19):53-57.
- [7] 王文礼,林鑫,龚卫东,等. 振动条件下晶体游离模型探讨及实验验证[J]. 铸造技术,2007,28(7):918-921.
- [8] 邢书明,陈维视,马静,等. 搅拌条件下晶体游离模型探讨[J]. 河北科技大学学报,1999,20(3):41-46.
- [9] 钱小兵,陈乐平,周全. 机械振动对 H62 黄铜凝固组织和硬度的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2013,33(11):1054-1056.
- [10] 杜立成,王猛,张莹,等. 振动激冷细晶效应的试验研究及力学分析[J]. 特种铸造及有色合金,2009,29(4):327-330.
- [11] 卢柯,刘学东,胡壮麒. 纳米晶体材料的 Hall-Petch 关系[J]. 材料研究学报,1994,8(5):385-391. 