华能电厂 P91、P92 管道现场焊后热处理工艺导则（试行）

公司内部资料 玉环电厂样本

华能国际电力股份有限公司

二〇〇五年九月

目　　次

前言.....II
1.　范围.....1
2.　规范性引用文件.....1
3.　术语.....1
4.　管道整圈局部焊后热处理的技术条件.....3
5.　提高温度均匀性的措施.....4
6.　温度的测量.....6
7．加热器与保温材料.....10
8.　热循环.....10
9.　质量控制与技术文件.....11

公司内部资料　玉环电厂样本

前　　言

.火力发电厂承压管道在制作、安装和检修过程中存在大量的焊接接头，其中很大一部分受到各种因素的限制只能在现场进行局部热处理，热处理的质量直接影响焊接接头的性能和服役寿命。国内已有几个相应的焊接热处理规程，但在这些技术规程中对许多控制热处理质量的重要因素没有严格加以规范，在实施过程中很难保证质量。近些年机组建设中大量采用 P91、P92 等马氏体耐热钢，其焊接接头的性能对热处理工艺非常敏感，而局部热处理与炉内热处理相比温度均匀性较差，没有严格的规范无法保证接头的性能。为此参照国际上相关规程和对 P91、P92 钢焊接以及使用过程中积累的经验，更充分地体现了现场局部热处理的特点，制定出本导则作为华能国际电力股份有限公司所属电厂 P91、P92 钢管道在制作、安装和检修过程中进行焊后局部热处理的要求。其它材料的管道的局部热处理也可参照本标准相关条款执行。

本标准由华能国际电力股份有限公司工程部提出并归口。

本标准由西安热工研究院有限公司负责解释。

本标准的起草单位：华能国际电力股份有限公司工程部 西安热工研究院有限公司 华能浙江分公司

本标准的起草人：周荣灿 范长信

公司内部资料 未经许可

华能电厂 P91、P92 管道现场焊后热处理工艺导则（试行）

1. 范围

本导则规定了华能国际电力股份有限公司所属电厂 P91、P92 钢管道在制作、安装和检修过程中进行焊后局部热处理的要求。其它材料的重要管道在进行局部热处理时可参照本导则有关条款的技术要求执行。

2. 规范性引用文件

ASME 锅炉压力容器规范 B31.1－2004 动力管道
ASME 锅炉压力容器规范 B31.3－2004 工艺管道
ASME 锅炉压力容器规范 第 3 节－2004：核设施元部件制造规则，第 1 分册第 NB 子节，1 级元件；
GB/T 18591-2004 焊接预热温度、道间温度及预热维持温度的测量指南;
BS 2633－1987 Standard Specification for Class I Arc Welding of Ferritic Steel Pipework for Carrying Fluids；
API 570－1998，Piping Inspection Code: Inspection, Repair, Alteration, and Rerating of In-Service Piping Systems；
AWS D10.10/D10.10M－1999 Recommended Practices for Local Heating of Welds in Piping and tubing；
DL/T 869-2004 火力发电厂焊接技术规程；
DL/T 819-2002 火力发电厂焊接热处理技术规程；
GB 2974-1982 工业用热电偶丝检验方法；
JB T 6046-1992 碳钢、低合金钢焊接构件焊后热处理方法；
GB/T 2614-1998 镍铬－镍硅热电偶丝；
GB/T 16839.1-1997 热电偶 第 1 部分：分度表；
GB-T16839.2-1997 热电偶 第 II 部分：允差；
GB/T4989-1994 热电偶用补偿导线。

3. 术语

3.1 焊后热处理

焊接工作完成后，将焊件以一定的升温速率加热到某一温度(通常是材料的相变温度 A_{C1} 以下)，保温一定时间，然后使焊件以一定速率冷却下来，以改善焊接接头的金相组织、性能或消除残余应力的一种焊接热处理工艺。

3.2 局部焊后热处理

局部焊后热处理是采用各种加热方式对焊件的局部（包括焊缝、热影响区以及一部分母材）加热到一定温度保温一定的时间，然后冷却，以达到热处理的目的和效果。图 1 是对管道焊接接头进行局部加热的示意图。管道局部焊后热处理的控制参数如图 2 所示。

公司内部资料 未经许可 样本

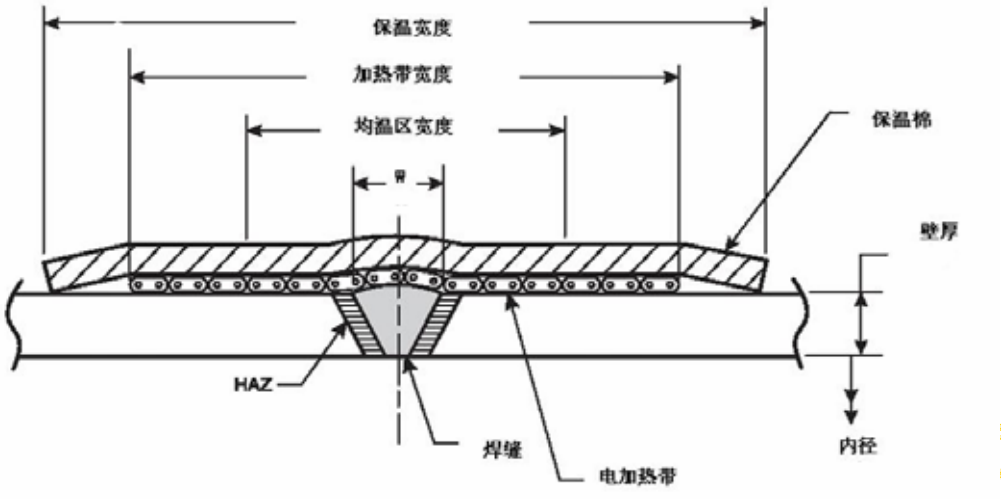


图 1 管道局部焊后热处理示意图

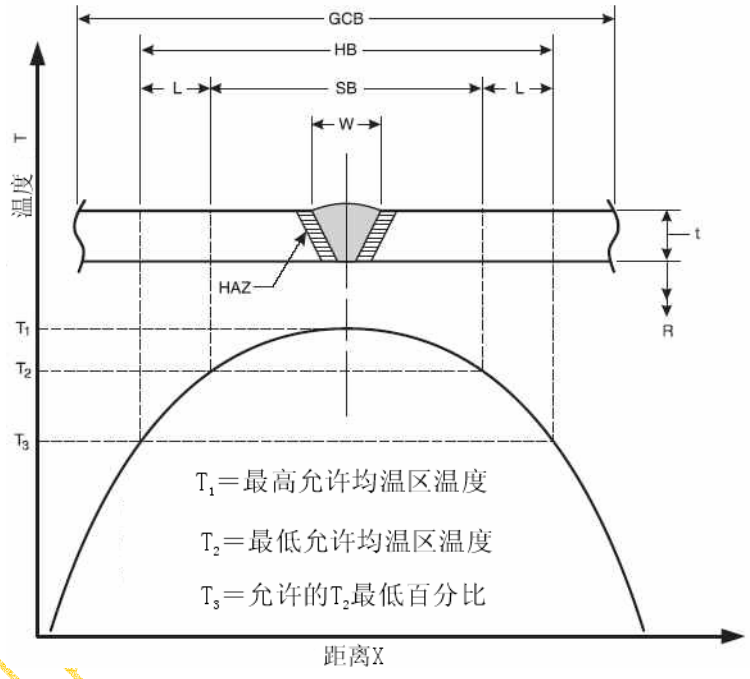


图 2 管道局部焊后热处理控制参数示意图

在图 2 中，各参数的定义如下：

W：对接焊缝的最大宽度；

HAZ（Heat-Affected Zone）：热影响区；

SB（Soak Band）：均温区（恒温温度在要求温度范围之内的材料）；

L：温度降至均温区边缘温度一定百分数的最短距离；

HB（Heated Band）：加热区，是为了保证均温区内材料达到所需的温度且限制焊缝相邻区域产生的应力在一定范围所需的加热器接触的表面；

GCB（Gradient Control Band）：温度梯度控制区，是由保温层和附加加热源所覆盖的表面，包括均温区、加热区以及足够的相邻母材以保证在加热区内的轴向温度梯度在许可范围内；

CZ（Control Zone）：控温加热区，一个控温加热区由一个或多个加热器组成，并由同一个温度测量传感器（通常是一支热电偶）所控制。在管道的焊后热

处理中可能沿轴向或圆周方向有一个或多个控温加热区。

t：管道的名义壁厚；

R：管道的内径。

4. 管道整圈局部焊后热处理的技术条件

4.1. 均温区宽度

均温区宽度 SB 是为了保证所需体积的金属达到设定的温度范围，实现焊后热处理的目的。

推荐的焊后热处理均温区最小宽度：

在焊缝最宽处的边缘算起，每侧增加 t 或 50mm 二者中的最小值，其中 t 为管道的名义厚度。

4.2. 加热区宽度

加热区宽度的确定出于两方面的考虑，其一是由于从管道外部加热，必然存在径向温度梯度，为了使均温区域内的金属在厚度方向达到所需的最低温度，加热区必须达到一定的宽度；其次管道的局部加热会导致弯曲位移和切向应力，从而产生接头变形和残余应力，应力的大小和分布受到加热带宽度和轴向温度分布的影响。

推荐的最小加热区宽度取下面三式的最大值：

$$HB_0 = SB + 50\text{mm} \quad (1)$$

$$HB_1 = SB + 4\sqrt{Rt} \quad (2)$$

$$HB_2 = \frac{H_i\left[\frac{OD^2 - ID^2}{2} + (ID)(SB)\right]}{OD} \quad (3)$$

其中：

H_i 为管道加热带面积与散热面积之比，$Hi = Ae/(2A_{cs}+A_i)$；

OD：管道的外径；

ID：管道的内径；

SB：均温区宽度;

A_e：外表面加热带的面积；

A_{cs}：管壁的横截面积；

A_i：均温区内表面积（假定为 4t 范围内，以焊缝为中心）

上述三式中，HB_0 是为了避免均温区的边缘过于接近加热区的边缘致使温度降低过快，显然只有当管道的直径很小时，加热区的宽度才可能由 HB_0 决定。HB_1 是诱导应力判据所确定的最小加热区宽度；HB_2 是由径向温度差判据确定的最小加热区宽度。

HB_2 的计算的依据是经验性的径向温度差判据，因此 H_i 的选择与管道的布置位置、控温区的数量、加热温度均有关系。对水平布置的、公称直径在 150DN 以下的管道，且只有一个周向加热控制区时其 H_i 可取 5；对公称直径 150DN 以上的管道、尺寸 150DN 以下但有两个以上周向加热控制区的水平管道以及所有的垂直管道，H_i 取 3。

4.3. 温度梯度控制区宽度

该区域的主要功能是控制管道轴向的温度梯度，同时还可以减小加热区的热损失。保温材料的技术参数（包括厚度和隔热性能）直接影响加热元件所需的功率，隔热材料的宽度直接影响轴向温度梯度。

推荐的最小温度梯度控制宽度：

$$HB + 4\sqrt{Rt} \qquad (4)$$

其中 HB 为加热区域宽度。

保温层的隔热性能也影响温度的分布，推荐的保温层最小的热阻：0.35-0.70 ℃m^2/W，热阻可表示为保温层的导热性的倒数，即保温层的厚度与热导率之比（t/k）。可以通过各种不同的保温材料类型和厚度组合来满足推荐的热阻值。

如果在温度梯度控制区内有法兰、阀门等，还需要在该区域增加额外的加热器来弥补“ 冷阱 ”带来的热损失。

4.4. 轴向温度梯度

轴向温度的分布在限制 PWHT 过程中诱导应力的产生具有重要的作用。事实上，前面介绍的一些参数确定后，轴向温度梯度也就确定了。

推荐的最大轴向温度梯度：

在升温、保温和降温过程中加热区边缘的温度不低于均温区边缘温度的一半。

4.5 加热带与保温层安装

如果选用电阻加热方式进行加热，如采用一片电加热带时，加热带的中心应布置在管道的下部（如管道是水平布置），而将接口间隙留在管道上部，如采用多片加热带，应使加热带间的间隙均匀分布。应尽量选择合适尺寸的加热带以减小加热带间的间隙（但应有足够的热膨胀余量），间隙的最大允许值为管道壁厚与 50mm 二者间的较小值，否则间隙处应加装监视热电偶。加热带应用不锈钢丝绑扎固定结实。

保温层允许拼接，但接口处不允许有间隙。

5. 提高温度均匀性的措施

5.1 水平布置的管道对接接头

对水平布置的管道，由于对流的存在，必然会导致管子上 12:00 位置的温度比 6:00 位置特别是内壁的温度更高，如采用只有一个控温加热区（控温热电偶在 12:00 位置）的电阻加热方式时，6:00 位置特别是内壁的温度将可能低得多，造成这些部位回火不充分。可以采取以下一种或多种方法减小这种温度不均匀性：

a）当管道直径变大时增加周向控温加热区的数量；
b）采用能够弥补对流和其它热损失的最小加热区宽度计算方法(如 HB_2 等)；
c）控制 12:00 点的温度在许可温度范围的高侧；
d）在 6:00 位置增加额外的保温；
e）采用偏心加热器（6:00 位置比 12:00 位置更宽）；
f） 增加内部保温。

通常采用的方法是增加加热带控制区的周向分布数量来减小这种温度偏差。

对水平布置的管道，焊后热处理时推荐的控温区的数量和热电偶的布置如表

1 所示。

表 1 水平布置管道 PWHT 的推荐控温加热区数量和热电偶的布置

管道公称尺寸（DN）	推荐的控温区数量和热电偶的位置
150 以下	1 个控温区，控温热电偶位于 12:00
200-300	2 个控温区，控温热电偶位于 12:00 和 6:00
350-450	3 个控温区，热电偶位于 11:00、1:00 和 6:00
500－700	4 个控温区，热电偶位于 12:00、3:00、6:00 和 9:00
750 以上	控温区的数量和热电偶由加热器的周向宽度确定

控温热电偶一般位于相应控温区预期温度最高的地方以防止超过最高的允许温度，不管采用上述何种途径，必须同时对 12:00 和 6:00 位置的温度进行监测。

5.2 垂直布置管道的对接接头

由于对流的存在，垂直管道加热带上半侧的温度将高于下半侧的温度，可以采取以下方式减小上下区域的温度偏差：

a）采用 4.2 中的推荐方式确定加热带的宽度，对垂直布置的管道 H_i 取 3；

b）在焊缝的上下部采用独立的控温加热区；

c）对电阻加热方式加热带的中心向下侧偏移以平衡热流，如加热带的 60% 布置在焊缝的下部；

d）保温向焊缝下部偏移。

不管采取上述什么方式，在焊缝的上部和下部区域安装监测热电偶能够确定温度是否达到设定值。

5.3 管道与法兰、阀门的焊接接头

在管道与法兰或阀门等的对接接头的焊后热处理中，在焊缝两侧将产生不对称的热传导，法兰或阀门等部件将吸收大量的热量，即产生“冷阱效应”。在壁厚不同的部件上采用各自独立的控温加热区是最理想的。在这种方法无法实现的情况下，可将加热区向壁厚大的部件偏移，但对管道/阀门、管道/法兰的焊接接头，往往达不到所需的偏移量。对于上述几种方法均无法实现，且不能在厚壁部件上布置额外的加热器时，必须通过加装监控热电偶来保证薄壁部件不能过热，同时厚壁部件达到了预定的温度，此时可以减小薄壁部件上的保温层来使均温区的正好落在预定的温度范围之内。

根据 4.2 中计算加热区宽度的方法可以确定加热带的偏移量。以焊缝为中心，每一侧所需的加热区宽度为：

$$HB_2(1/2)=\frac{H_i\left[\frac{OD^2-ID^2}{4}+(ID)(\frac{SB}{2})\right]}{OD} \qquad (5)$$

计算得到的 $HB_2(1/2)$需要与以式（2）计算的 HB1 的一半进行比较，每侧取 HB2(1/2)和 HB1 半值中的较大的一个作为该侧的加热区宽度。

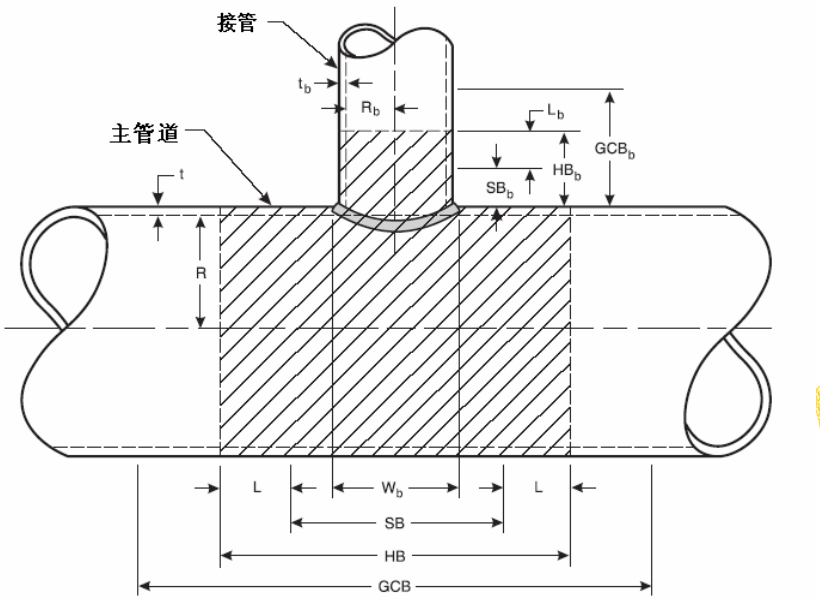


图 3 接管座的焊后热处理

5.4 接管座焊缝

对接管、吊耳等与管道的焊接接头热处理，应尽可能采取整圈环形加热的方式（图 3），在图 3 中所有的参数定义与图 2 相类似，其中的带下标“ b ”的参数即为接管的参数，计算时同样按第 4 节推荐的公式，但壁厚、直径等参数取接管的。如果接管的尺寸较小，应将整个接管包括在均热区内。

对接管座的热处理，加热器很难完全贴合在管壁的表面，导致该部分加热强度降低，需要在这些区域增加监测热电偶，而控温热电偶安装在预期温度比较高的区域。或者在接管、主管道上布置各自独立的加热器和控温热电偶。

6. 温度的测量

温度的测量中，表计能正确反映对应位置的真实温度非常重要，特别是对 P91、P92 等高合金的材料，与传统的碳钢和合金钢不同，如果温度计量上带来 10℃的误差，这些材料的热处理效果和性能就可能难以满足要求。

温度的精确测量与热电偶、补偿导线、温度控制和记录仪表组成的系统设计是否合理有很大的关系。

6.1 热电偶的选择

根据加热方式和热处理温度的不同，可以选择接触式或非接触式测温。在管道的焊后热处理中，通常采用 K 型热电偶作为温度检测元件。一般可选用工业用 I 级、II 级热电偶丝。新热偶丝使用前要经过具有温度计量资质单位的检定并提供温度或热电势偏差值，设定温度时需将热电偶的偏差扣除。

热电偶在使用过程中会产生热电势的漂移，因此热电偶丝每半年或每累计使用 200 小时后需重新进行检定。重要部件的焊后热处理建议采用已经使用 200 小时以上并重新检定或者厂家已经进行时效处理的热电偶。设定温度时需将热电偶的偏差扣除。

热偶丝的使用温度和寿命与偶丝直径有关，偶丝粗使用寿命高，可靠性高，但灵敏度降低。根据电厂部件焊后热处理的温度范围，一般以 0.8mm 左右为宜。

6.2 热电偶的安装和拆卸

热电偶推荐采用储能焊接的方法将热电偶丝直接压焊在管道外表面（图 4）。焊接前必须将热电偶线和/或补偿导线与所有温度监控仪表断开，管道表面以砂轮、钢丝刷等打磨除去油污、氧化层等，形成一小块平整光滑的表面，并露出金属光泽。焊接时能量<125J，两个结点的距离为 6mm 左右，焊接需要制定工艺，但不需要进行工艺评定，焊接操作人员根据工艺在与管道相同的材料上进行焊接练习，熟练后方能在工件上进行焊接。

通过轻拽热偶丝来检查结点是否焊接可靠。离测量结点 150mm 内的热电偶丝需用 2mm 以上厚度的隔热材料覆盖以避免热量从加热带沿着热偶丝向结点传递。隔热材料需要有足够的强度和厚度，推荐采用硅酸铝纤维纸，并固定可靠，避免在安装加热元件时碰落和移位。热偶丝之间需要电绝缘，除了测量结点外，热偶丝与其它导体如管壁电绝缘。

热处理完毕后，用记号笔在每个结点周围以圆圈作记号，剪除热偶丝，用锉刀或砂轮机轻轻磨去结点，然后进行目视检查同时进行液体渗透或磁粉检测。

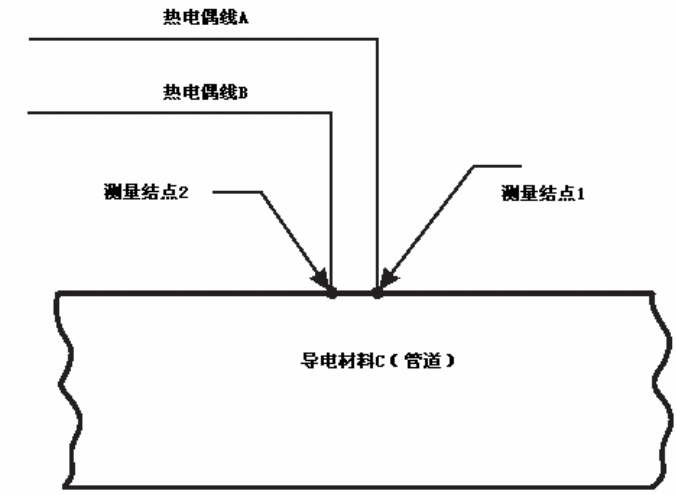


图 4 储能焊安装热电偶示意图

6.3 热电偶的布置

热电偶的合理布置是正确反映部件温度的前提。根据其作用，可以分为控温热电偶和监测热电偶。

控温热电偶是为了控制对应的控温加热区的温度在设定范围之内。通常控温热电偶布置在相应控温区域中的温度最高点，除非是为解决壁厚差异大等问题特意增加的控温热电偶。对以焊缝为中心布置的环向电阻加热带，控温热电偶通常沿着焊缝中心线布置，同时位于对应控温加热区中心加热带的中央（表 5）。

表 5 管道整圈热处理时热电偶的布置

位置	目的
焊缝中心	保证没有超过最高允许温度
均温区边缘	确定整个均温区内都达到了最低允许温度
加热区边缘	确定是否超过最大的允许轴向温度梯度

每个平面上布置的热电偶的数量取决于部件的具体尺寸、空间布置和几何

形状等。图 5－图 8 为不同名义直径的水平布置管道对接接头 PWHT 时推荐的控温热电偶的数量和布置。为防范控温热电偶出现故障，要求在每支控温热电偶的附近安装一支备用热电偶。

监测热电偶主要是为了及时反映所关心的区域内温度、温度梯度是否超出预定范围，同时可反映控温热电偶是否工作正常。通常监测热电偶布置在焊缝中心线、均温区的边缘、加热带边缘。如果对温度梯度的控制要求较高时，建议安装监测热电偶，否则可将备用热电偶接入温度仪表作为监测热电偶以反映控温热电偶是否工作正常。

根据 Shifrin 的研究结果，只要加热带的宽度在 5 倍壁厚以上，外表面距焊缝中心线的轴向距离为 t 的位置大致与内表面焊缝根部的温度相等。由于在内表面安装监测热电偶在现场热处理中通常无法实现，因此可通过外表面安装一只“ 等效热电偶 ”接监测内壁温度是否达到最低的设定温度范围（图 9），上述“ 等效热电偶 ”的位置是在一定条件下试验获得的，对重要部件可根据其实际热处理条件、部件尺寸等通过有限元模拟或试验的方式更精确地确定部件的热场分布以及“ 等效热电偶 ”的安装位置。

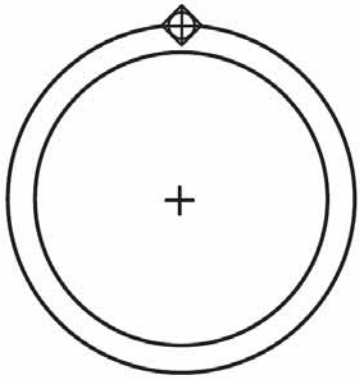


图 5 水平布置管道（≤150DN）对接焊缝焊后热处理热电偶数量和分布

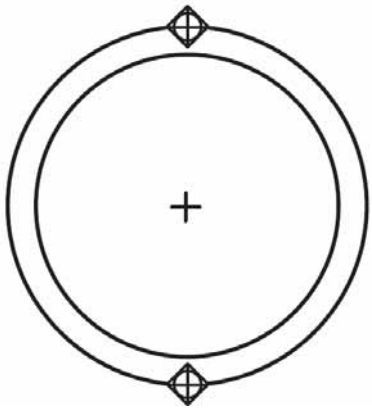


图 6 水平布置管道（200-300 DN）对接焊缝焊后热处理热电偶数量和分布

公司内部资料

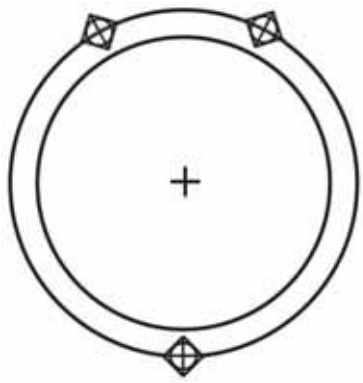


图 7 水平布置管道（350-450DN）对接焊缝焊后热处理热电偶数量和分布

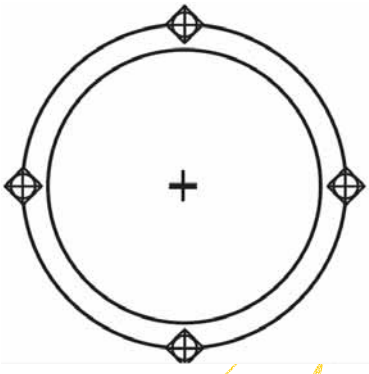


图 8 水平布置管道（500-750DN）对接焊缝焊后热处理热电偶数量和分布

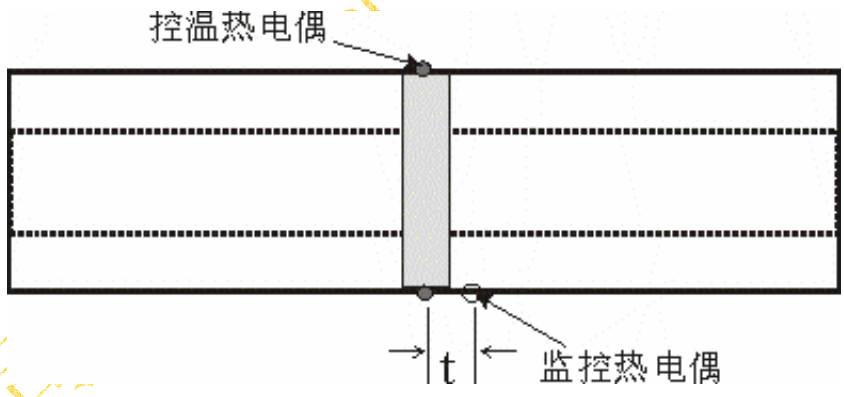


图 9 等效热电偶布置方式

6.4 补偿导线

补偿导线分为延长型和补偿型两种。

延长型导线合金丝的名义化学成分及热电动势标称值与配用热电偶偶丝相同，它用字母 X 附加在热电偶分度号之后表示。

补偿型导线又称补偿型补偿导线其合金丝的名义化学成分与配用热电偶偶丝不同，但其热电动势值在 0-100℃或 0-200℃时与配用热电偶的热电动势标称值相同，它用字母 C 附加在热电偶分度号之后表示。

应尽可能采用带屏蔽层的精密级补偿导线。选用的补偿导线必须与热电偶丝相匹配。

在设计补偿线系统时，需要选择合适的直径，使一定长度的往复电阻尽可能

电厂样本

小，通常 20 号（0.965mm）K 型补偿导线允许最长 183 米。

补偿导线的布置应远离供电线路，以避免产生噪声。同时应尽可能将补偿导线布置在温度较低的环境，最高环境温度不得超过允许使用温度范围。补偿导线与热电偶的两个接头以及与仪表端子的接头必须分别处于相同的环境温度。

使用和储存中避免对补偿导线产生机械、热、潮湿环境造成的损伤，补偿导线不允许有小曲率半径弯曲、冷加工和过度的绕卷。

补偿导线与热电偶线连接时，必须保证极性正确。

补偿导线与热偶丝连接必须采用接线座，连接必须可靠，不得将两根导线直接拧接在一起。

6.5 温度控制和记录仪表

热偶丝、补偿导线必须与温度控制和记录仪表型号相匹配。

温度控制和记录仪表的显示精度要求在±0.3%之内，冷端补偿精度±2℃以内。要求设备运行可靠，并按规定定期对仪表进行检定。控温系统中的变送器还应该设有断偶保护电路，避免出现超温。

6.6 系统误差

在条件许可的情况下，用高精度的电子电位差计、温度检定仪表对包括补偿导线、温度控制和记录仪表在内的系统误差进行标定，温度设定时扣除相应的数值。

7．加热器与保温材料

加热器可根据工件的形状、大小、材料、周围环境等选择电阻加热、感应加热和火焰加热等方式。加热器的功率能满足热处理升温、恒温等的要求，同时要求可靠、安全。对同一控温加热区内的加热器其单位面积功率相差不得大于 5%。具体的技术要求可参见《DL/T 819－2002 火力发电厂焊接热处理技术规程》

保温材料的性能要求能满足工艺和安全的要求。通常根据热处理温度选用玻璃纤维、硅酸铝纤维、氧化铝纤维等，其技术条件参见火力发电厂热力设备和管道保温材料技术条件与检验方法（SDJ 68—85）。使用时根据产品提供的性能参数确定保温层的厚度，推荐的热阻为 0.35-0.70℃m^2/W，对于耐火陶瓷纤维，25mm 厚的一层保温层可最高用于 649℃，两层（50mm）可用于 649℃以上。

8. 热循环

8.1 温度均匀性

在升温和降温过程中，在加热带区域内的最大允许温度差别为 139℃或由最大轴向温度梯度允许值限制；在恒温过程中，均温区域中的最大温差由热处理工艺允许的温度范围决定，但不得超过 55℃。

恒温期间，在均温区以外的加热区内，任一环向平面内的外表面最大温差小于 55℃。

8.2 升、降温速率

允许的最高温度由根据材料、管径、壁厚等制定的 PWHT 文件决定。除了规定上述最高升、降温速率外，也不能任意降低升温和降温速率，过于缓慢的升降

温将可能导致实际的等效热处理时间的延长。对某些材料，缓冷还可能导致回火脆性的出现，此时在特定的温度范围内需要快冷。

8.3 恒温时间

焊后热处理的恒温时间控制最大误差为 10min。

9. 质量控制与技术文件

9.1 过程异常情况的响应

施工方需要对各种可能出现的意外情况进行分析，提出紧急处理预案，并报业主方审核批准。

9.2 检验

BIII 类材料参照《华能电厂 P91、P92 焊接质量检验导则》检查热处理后焊缝、母材的硬度。其余材料参照 DL/T869－2004 执行。

如果业主提出金相或其它检验措施，按相关规程或双方协议执行。

9.3 技术文件

施工单位需要向业主方提供局部热处理的技术文件，包括：

（1） 热电偶、加热器、保温层布置图；
（2） 热电偶、补偿导线合格证和检定证书（备查）；
（3） 温度控制和记录仪表检定记录（备查）；
（4） 检验报告；
（5） 完整的热处理记录曲线，同时包括以下信息：

- 工作日期、时间；
- 工作人员名单；
- 工件识别号；
- 温度和时间刻度；
- 热电偶号在图表中的对应位置；
- 升温速率
- 恒温温度和时间；
- 冷却速率

公司内部资料 华环电厂样本