

12Cr1MoVG 厚壁珠光体耐热钢管的焊接

瑞星集团有限公司 (山东东平 271509) 吴文慧

1. 概述

12Cr1MoVG 是我国使用最广泛的珠光体耐热钢之一,具有较高的热强性和抗氧化性,主要用于制造温度小于 580℃ 的高压、超高压锅炉过热管、联箱和主蒸汽管道等。

我公司 2011 年 12 月份安装的 260t/h 锅炉主蒸汽管道,锅炉的蒸汽出口温度为 510℃,工作压力为 8.6MPa,图样设计采用 12Cr1MoVG 珠光体耐热钢管,执行标准为 GB 5310—2008《高压锅炉用无缝钢管》,规格为 $\phi 325\text{mm} \times 25\text{mm}$ 。

鉴于我们首次焊接该种材质规格的管道,为此高度重视,在查阅了大量书籍资料和借鉴兄弟单位施焊经验的基础上,我们按照 NB/T 47014—2011《承压设备焊接工艺评定》的要求,进行了焊接工艺评定,编制了焊接工艺规程(WPS)和焊接作业指导书(WWI),对管道的焊接施工起到了较好的指导效果。

2. 焊接性分析

12Cr1MoVG 为低合金耐热钢,是在 Cr-Mo 合金的基础上,加入 $w_v = 0.15\% \sim 0.30\%$ 的耐热钢,此类钢的 Cr 含量较高,在 500~550℃ 时具有较高的热强性和持久强度,其化学成分如表 1 所示。

表 1 化学成分(质量分数) (%)

C	Si	Mn	Cr	Mo	V	S	P
0.08 ~0.15	0.17 ~ 0.37	0.40 ~ 0.70	0.90 ~ 1.20	0.25 ~ 0.35	0.15 ~ 0.30	≤ 0.010	≤ 0.025

由表 1 可见,12Cr1MoVG 钢的碳及合金元素含量较多,淬硬敏感性较大,焊缝及热影响区容易出现淬硬组织,使塑性降低,焊接性变差。当焊件刚度及接头应力较大时,容易产生裂纹;焊后热处理过程中,也容易产生再热裂纹。由于我公司使用

的 $\phi 325\text{mm} \times 25\text{mm}$ 主蒸汽管道是在较高温度下工作的受压管道,因此焊接时必须采取必要的工艺措施,使焊接接头有足够的热强性能,以保证主蒸汽管道安全运行。

3. 焊接准备

(1) 焊接方法 在蒸汽管道的管子对接时,对打底焊缝的质量要求较高,不仅要求焊缝熔透、背面齐平,还要求焊缝背面不得有内凹和焊瘤现象,否则会影响管道的安全运行。因此,采用手工钨极氩弧焊(TIG)打底,焊条电弧焊(SMAW)填充和盖面的焊接工艺方法。

(2) 坡口尺寸 按照能够保证焊接质量和减少填充金属量的坡口选用原则,我们选用单面 U 形坡口。坡口形式如图 1 所示,其中,坡口角度 $\alpha = 15^\circ$,钝边 $P = 2\text{mm}$,根部间隙 $b = 2.5\text{mm}$,圆弧半径 $R = 5\text{mm}$,壁厚 $\delta = 25\text{mm}$ 。用机械方法加工,应严格控制根部间隙和坡口钝边尺寸,以确保打底焊缝彻底熔透。

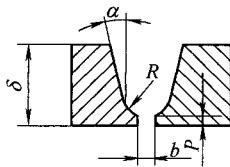


图 1 坡口形式和尺寸

(3) 焊接材料选择 按照 NB/T 47015—2011(JB/T 4709)《压力容器焊接工艺规程》中常用钢号推荐选用的焊接材料要求,我们选择的焊接材料如下:手工钨极氩弧焊(TIG)选用 H08CrMoVA 焊丝, $\phi 2.5\text{mm}$;焊条电弧焊(SMAW)选用 R317(E5515—B2—V)焊条, $\phi 3.2\text{mm}$ 、 $\phi 4\text{mm}$ 。

(4) 焊前准备 首先,按照 DL/T 869—2004《火力发电厂焊接技术规程》和 GB 50236—1998《现

场设备、工业管道焊接工程施工及验收规范》的要求，检查坡口表面质量，母材不得有裂纹、重皮、坡口破损及毛刺等缺陷。焊前应把坡口两侧管子内外各 15~30mm 打磨干净，直至露出金属光泽，确保无油渍、铁锈、水分、氧化物或其他有害的物质，以免焊接过程产生气孔等缺陷。

其次，焊接场所采取防风、防雨、防雪及防寒等措施，确保施焊环境符合焊接工艺的要求。当焊条电弧焊时风速 > 10m/s、气体保护焊时风速 > 2m/s、相对湿度 > 90%，以及遇到雨、雪环境时禁止施焊。施焊前将管道两端封闭，以防产生穿堂风。

第三，氩弧焊用焊丝表面不得有油脂、铁锈等污物。焊条电弧焊的焊条，在焊前须经 350~400℃ 烘干 1~2h，且在 120~150℃ 的焊条保温筒存放，随用随取。焊条在保温桶的存放时间不得超过 4h，剩余的焊材下班时要及时送回焊材烘干箱，不允许留在焊条保温桶内，且焊条的烘干次数不能超过两次。

最后，采用管道对口器进行对口，保证对接口平齐和同心，错边量 ≤ 1mm。定位焊采用手工钨极氩

弧焊（TIG），焊材、焊接参数和预热温度与正式施焊相同。定位焊后应检查各个焊点质量，如有缺陷应立即清除，重新进行定位焊。

（5）预热 预热是珠光体耐热钢焊接的重要措施。预热可以减慢焊缝及热影响区的冷却速度，有利于避免产生淬硬组织，有助于焊接区氢的逸出，防止产生焊接裂纹。由于 12Cr1MoVG 钢的碳含量及合金元素的含量较高，加之我们是在冬季施工，环境温度较低，故选择预热温度为 250~300℃，预热区域以焊缝为中心，两侧各为 150mm。保温材料选用硅酸铝纤维毡，保温厚度为 100~150mm，为降低温度梯度，保温宽度应宽于加热器每侧 100mm。采用电加热法进行预热，使用热电偶测量预热温度。在整个焊接过程中，应保持层间温度不低于预热温度，且 ≤ 300℃。

4. 焊接

（1）焊接参数 焊接 12Cr1MoVG 钢时，应采用较小的焊接热输入，以减小焊接应力，减少焊接过热区宽度，细化晶粒，提高焊缝金属的抗裂性能，焊接参数如表 2 所示。

表 2 焊接参数

焊接方法	层次	焊材牌号	焊丝（条）直径/mm	极性	电流 I/A	电压 U/V	氩气流量 Q/L·min ⁻¹
TIG	1	H08CrMoVA	2.5	直接正接	90~120	10~13	9~11
SMAW	2~3	R317（E5515—B2—V）	3.2	直流反接	100~120	20~22	—
SMAW	4~8	R317（E5515—B2—V）	4.0	直流反接	110~160	20~24	—

（2）焊接操作 12Cr1MoVG 钢的焊接，不但要严格控制焊接参数，而且焊接操作对焊接接头质量有着至关重要的影响。

首先，氩弧焊打底。将管件处于水平转动位焊接，焊接时采用短弧，焊枪尽可能与工件表面垂直，焊嘴与焊件间距离 ≤ 10mm，应提前送气、滞后停气，有利于氩气对焊接熔池的保护。焊枪和焊丝可稍作横向摆动，保证坡口两侧熔透。同时，要控制好熔池温度防止产生焊穿和焊瘤缺陷。收弧时将弧坑填满，防止出现弧坑裂纹、缩孔等缺陷，收弧可采用减慢焊速多加焊丝法完成。焊完后及时对焊缝进行检查，发现缺陷时应立即消除；在接头部位，要用磨光机打磨弧坑，将弧坑处的收弧裂纹和气孔等焊接缺陷清除。打底层焊接完后，用磨光机或锉刀清除表面氧化膜。

其次，焊条电弧焊填充。应采用短弧焊接，且热输入量不宜过大。施焊过程中电流要小，焊接速度不能太慢，注意接头和收弧的质量，收弧时应将熔池填满，焊缝边缘应圆滑过渡到母材。禁止在焊缝的非焊接部位引弧。因电弧擦伤而产生的弧坑、弧疤、割除临时附件后遗留的焊疤，均应打磨光滑，并按 JB/T 4730.4—2005《承压设备无损检测》要求进行 100% 磁粉检测，I 级合格。每层焊完后，应立即进行清理和目视检查，焊接层间的焊渣必须彻底清理，发现有气孔等焊接缺陷时，用磨光机将焊接缺陷打磨掉。各层间的接头应错开，不得有重叠。施焊时尽量连续完成，若被迫中断时，应进行层间保温，保证焊缝坡口及两侧各 150mm 范围内的温度不低于预热温度，直至焊接工作重新开始。注意要保证焊件内外表面均达到规定的预热温度。再焊时

应仔细检查并确认无裂纹后，方可按照焊接工艺要求施焊。

最后，焊条电弧焊盖面。焊接电流比填充层稍小些，应选择正确的焊条角度，运条要均匀，防止在坡口边缘产生咬边缺陷。焊缝余高要控制在 1 ~ 2mm，避免焊接接头在使用中产生应力集中。

5. 焊后热处理

12Cr1MoVG 钢的焊接接头，焊后需进行消除应力热处理，以消除或减少热影响区出现的淬硬组织，增加塑性和韧性，有效地减少焊接残余应力。同时有利于扩散氢的逸出，从而减少冷裂纹倾向。所以，焊接结束时，宜立即进行焊后消应力热处理。当不能及时进行焊后消应力热处理时，应在焊后立即将坡口均匀加热至 200 ~ 350℃，采用保温材料将焊缝和近缝区覆盖保温，使接头缓慢冷却，进行消氢热处理。

热处理时对直管段上的坡口可以采用履带式高铝电加热器，对弯头和法兰处的对接坡口，宜选用绳状电加热器。用履带式加热器时，可选用宽度为 300mm 的加热器缠绕加温。为防止穿堂风影响热处理升温 and 热处理效果，应将管子两端的敞口处用玻璃棉或石棉布进行封堵。注意选用的测温仪表应经计量检定合格并在检验有效期内。为保证热电偶测量到管道表面的真实温度，可以采用电容储能放电焊将热电偶直接焊接在管壁上，并在热电偶与加热器之间垫小块保温玻璃布进行隔离。热电偶去除后，应对焊点进行打磨，并检查焊点区域是否存在缺陷。热电偶及加热器的安装如图 2 所示。

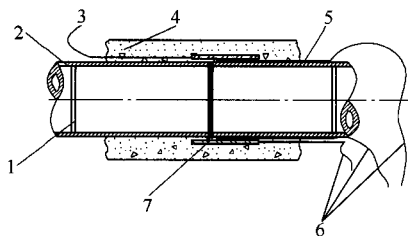


图2 热电偶及加热器安装示意

1. 挡物物 2. 钢管 3. 6. 导线
4. 保温材料 5. 热电偶 7. 电加热器

消应力热处理时应将焊件整体加热至 720 ~ 760℃，恒温 1.5 ~ 2h 后将工件温度降到 400℃ 以下，再进行自然冷却至常温。热处理时注意当温度升至 400℃ 以上时，应控制加热速率 $\leq 205^\circ\text{C}/\text{h}$ ；保温后

的冷却速率应 $\leq 260^\circ\text{C}/\text{h}$ 。在实际操作中，因为升温阶段可以依靠电加热器输入外加热量，而保温后冷却时只有靠钢管向外进行热辐射和热传导，在保温效果比较好的情况下，实际的冷却速率要比 400℃ 以上的升温速率低。我们实际选择的热处理保温为 740℃，恒温 1.5h。热处理过程如图 3 所示。

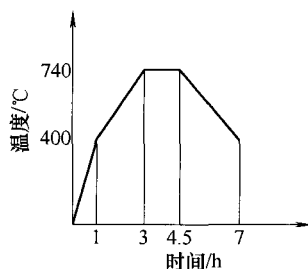


图3 热处理过程

6. 硬度检查

热处理完成后应对焊缝和热影响区进行硬度检查，热影响区的测量应紧邻熔合线。硬度值一般应不超过母材标准布氏硬度值 100HBW，且布氏硬度值 $\leq 270\text{HBW}$ 。对于因热处理温度或保温时间不够导致硬度值超标的焊口，应重新进行热处理，但重复热处理次数不得超过 3 次。因焊接热处理温度超标而导致焊接接头部位材料过热的焊缝，除非可以实施正火热处理工艺，否则应该割掉该焊缝及过热区域的材料，重新焊接。

7. 无损检测

按照 DL/T 869—2004《火力发电厂焊接技术规程》要求，对容易产生延迟裂纹和再热裂纹的钢材焊接热处理后必须进行无损检验。因此，不论热处理前是否进行过无损检验，热处理后还必须再进行一次无损检验。无损检测应在消应力热处理 24h 后进行。

我们按照上述工艺进行施工的焊接接头，经 γ 射线进行无损检测，底片一次探伤合格率达到 98%。对于探伤不合格的返修部位，在对其按照要求进行预热后，方可进行清根、补焊。补焊完成后，按照要求进行热处理和无损检测。

8. 力学性能及金相检验

依照上述焊接工艺进行试件焊接，试件经外观检查、磁粉探伤和 γ 射线探伤合格后，在试件上截取力学性能试样、金相检验试样进行检测。检测结果如表 3 所示。

