

# 工艺管道焊后热处理温度的选择

董雪玮

(中国石化集团第十建设公司, 山东淄博 255438)

**摘要** 以低合金耐热钢焊后热处理温度的选择为例, 对工艺管道的焊后热处理温度选择进行了探讨。

**关键词** 工艺管道 低合金耐热钢 焊后热处理 温度 选择

## 1 引言

石油化工装置的工艺管道多为高温、高压及输送腐蚀介质的管道。如我公司承担施工的中国石化股份有限公司济南分公司50万t/a延迟焦化装置, 其管道材质主要有20#、20G、15CrMo、1Cr5Mo、13CrMo44、0Cr18Ni9Ti等。该装置以减压渣油与催化油浆为原料, 生产干气、凝缩油、汽油、柴油、蜡油和焦炭等产品。其中1Cr5Mo和壁厚大于10mm的15CrMo、13CrMo44低合金耐热钢管道以及输送有应力腐蚀介质的20#钢工艺管道均需进行焊后热处理。

工艺管道焊后热处理的目的主要是消除焊接残余应力, 改善焊缝组织, 提高接头的综合力学性能, 包括提高接头的高温蠕变强度和组织稳定性, 降低焊缝及热影响区硬度等。作者拟在中国石化股份有限公司济南分公司50万t/a延迟焦化装置工艺管道热处理实践的基础上, 以低合金耐热钢工艺管道的焊后热处理温度选择为例, 对工艺管道焊后热处理温度如何确定进行探讨。

## 2 低合金耐热钢的特点和焊后热处理工艺对焊接接头性能的影响

### 2.1 低合金耐热钢的特点

低合金耐热钢大多是空淬钢, 钢的力学性能在很大程度上取决于钢的热处理状态。对于工艺管道来说, 设计标准规定的需用应力值均以完全热处理状态材料所能达到的强度性能为基础的。在焊接制造过程中, 必将使材料在焊缝和热影响区产生组织变化, 从而改变钢在原始状态的强度和韧性。低合金耐热钢焊接时有下列特点:

(1) 按其合金含量具有不同程度的淬硬倾向。在焊接热循环决定的冷却速度条件下, 焊缝金属和热影响区可能形成对冷裂敏感的显微组织;

(2) 耐热钢因其含有Cr、Mo、V、Nb、B等强烈

的碳化物形成元素, 从而使接头过热区产生再热裂纹的倾向;

(3) 某些耐热钢及其焊接接头, 当存在一定量的残余元素时, 具有明显的回火脆性。

### 2.2 焊后热处理温度对低合金耐热钢焊接接头性能的影响

焊后热处理的规范参数对低合金耐热钢焊接接头的性能产生极其复杂的影响, 通过了解这些影响, 对我们在如何选择热处理温度会有很大的帮助。通常是利用回火参数[P]来研究, 它由热处理温度和保温时间按下式计算而得:

$$[P] = T(20 + \log t) \times 10^{-3} \quad [2]$$

式中 [P] — 回火参数;

T — 加热温度, K;

t — 保温时间, h。

在低合金耐热钢的各种焊后热处理中, 回火参数[P]的变化范围约为18.04~21.04。严格地说, 对于每种低合金耐热钢均有一个最佳回火参数范围, 即最合适的热处理温度和保温时间范围。下面分别论述回火参数对焊接接头性能的影响。

#### 2.2.1 回火参数对焊缝金属冲击吸收功的影响

1.25Cr-0.5Mo钢焊缝金属冲击吸收功与回火参数的关系, 如图1所示。

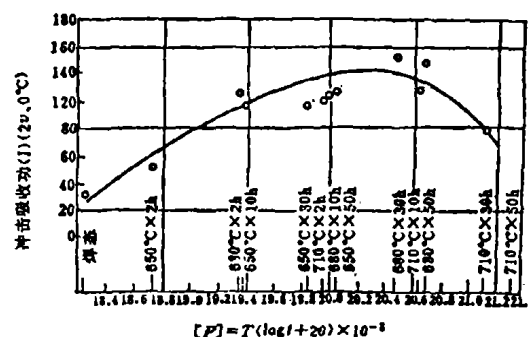


图1 回火参数对1.25Cr-0.5Mo钢焊缝金属冲击吸收功的影响<sup>[2]</sup>

由图中可以看出,当回火参数在20.0~20.6之间,焊缝金属的冲击吸收功达到最高值;当回火参数低于20.0,即在较低的回火温度和较短的保温时间下,焊缝金属的韧性明显下降;而当回火参数高于20.6时,则由于碳化物的沉淀和集聚而使韧性再度下降。

### 2.2.2 回火参数对焊缝金属强度性能的影响

2.25Cr-1Mo钢焊缝金属强度性能与回火参数的关系,如图2所示。

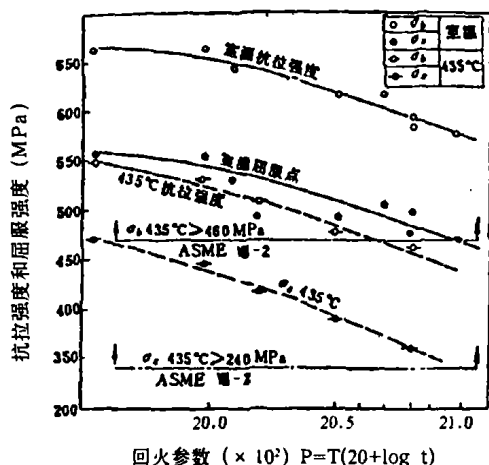


图2 回火参数对2.25Cr-1Mo钢焊缝金属强度性能的影响<sup>[2]</sup>

由图中可以看出,随着回火参数的提高,焊缝金属的抗拉强度和屈服极限不断下降。对于2.25Cr-1Mo钢焊缝金属,当回火参数超过20.65时,435℃的高温短时抗拉强度已降低到标准规定的下限值。回火参数20.65相当与690℃×30h的回火处理。这就是说,为保证2.25Cr-1Mo钢焊缝金属的强度,在690℃下的回火时间不应超过30h,如必须延长热处理时间,则要相应降低回火温度。

### 2.2.3 回火参数对焊接接头硬度的影响

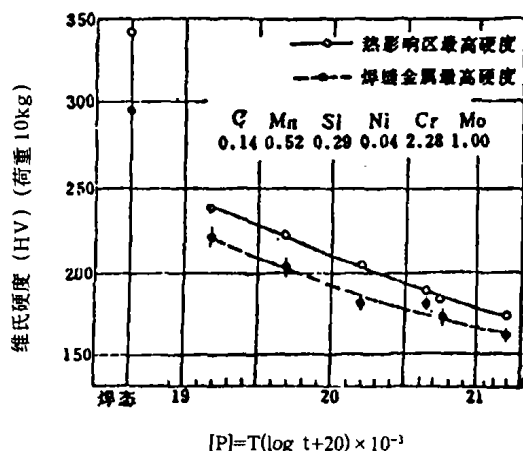


图3 2.25Cr-1Mo钢焊接接头的硬度与回火参数的关系<sup>[2]</sup>

2.25Cr-1Mo钢焊接接头的硬度与回火参数的关系,如图3所示。

由曲线可见,随着回火参数的增大,焊接接头的硬度逐渐降低。因此对于Cr-Mo含量较高的焊接接头,焊后必须经一定时间的回火处理,否则,硬度过高的焊接接头直接投入使用是很危险的。

### 2.2.4 焊后热处理温度对焊缝金属蠕变强度的影响

2.25Cr-1Mo钢焊缝金属蠕变强度与热处理温度的关系,如图4所示。

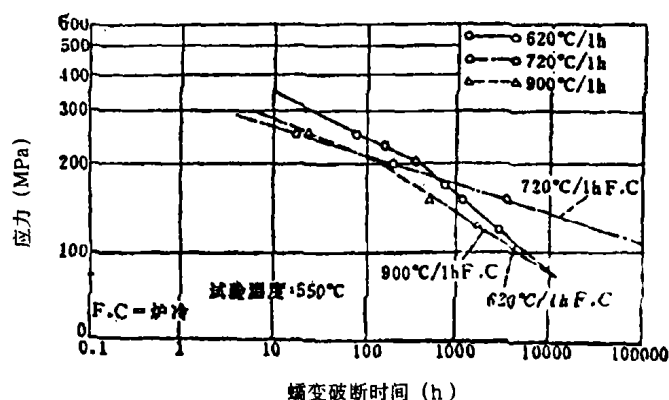


图4 焊后热处理温度对2.25Cr-1Mo钢焊缝金属蠕变强度的影响<sup>[2]</sup>

由图中可以看出,较高的回火温度由于提高了组织稳定性而延长了蠕变断裂时间,而且延长回火处理的保温时间有利于提高接头的高温持久强度。

根据以上分析,选择焊后热处理温度不能只考虑降低焊缝及热影响区的硬度,还要综合考虑其他因素,才能获得最佳的焊接接头性能,从而达到焊后热处理的目的。

## 3 焊后热处理的温度选择和要求

### 3.1 焊后热处理选择的材质厚度限制

3.1.1 对于厚度不大的碳钢管道,一般不要求进行焊后热处理。但对于输送有应力腐蚀介质的碳钢管道则需要做焊后热处理。《现场设备、工业管道焊接工程施工及验收规范》(GB 50236-98)中6.4.4条规定:“对有应力腐蚀的焊缝,应进行焊后热处理”。

3.1.2 对于某些合金成份较低、厚度较薄的低合金耐热钢焊接接头,如焊前正确地采取预热,使用低碳级焊接材料,而且焊接工艺评定试验证实焊接接头具有足够的塑性和韧性,则焊接接头在焊后不必做热处理。在遵守一些附加条件的前提下,各国压力容器和管道制造法规对一些常用低合金耐热钢规定了省略焊后热处理的厚度界限,如表1所列。

表1 各国制造法规对省略焊后热处理  
最大壁厚的规定 (mm)<sup>[2]</sup>

钢种	HPIS <sup>①</sup> /WES <sup>②</sup>	ISO <sup>③</sup> TC11	ASME <sup>④</sup> VIII	ASM EIII	ANSI <sup>⑤</sup> B31.3	BS <sup>⑥</sup> 5500	BS2633
0.5Mo	16/20	20	19	0	19	20	12.5
1Cr-0.5Mo 1.25Cr-0.5Mo	13/16	15	19	0	13	0	12.5
2.25Cr-1Mo	8/0	0	19	-	13	0	0

注：① 日本高压（技术）协会标准；② 日本焊接工程标准；③ 国际标准化组织；④ 美国机械工程师协会；⑤ 美国国家标准协会；⑥ 英国标准。

### 3.2 焊后热处理温度的选择

#### 3.2.1 低合金耐热钢焊后热处理温度的选择

根据低合金耐热钢的焊接特点，在拟定耐热钢焊接接头的焊后热处理温度时，应从以下几个方面综合考虑：

(1) 焊后热处理应保证近缝区组织的改善。

(2) 加热温度应保证接头的残余应力降低到尽可能低的水平。

(3) 焊后热处理不应使母材及焊接接头各项力学性能降低到设计规程规定的最低限度以下。

(4) 焊后热处理应尽量避免在所处理钢材回火脆性敏感的及对消除应力裂纹倾向敏感的温度范围内进行。

(5) 如果热处理温度选得过低，要想得到理想的焊接接头性能，势必要延长保温时间，会造成一些不必要的损耗，如果热处理温度选得过高，则会使奥氏体晶粒粗化，粗大的奥氏体晶粒导致钢的强韧性降低，脆性转变温度升高，增大焊接接头的畸变开裂倾向。

(6) 选择热处理温度时还应考虑合金元素对热处理工艺的影响。合金元素对热处理工艺的影响见表2。

表2 合金元素对热处理工艺的影响<sup>[3]</sup>

影响方面	合金元素
1、对热处理加热温度的影响 提高退火、淬火、回火温度 增加过热敏感性 降低过热敏感性 不宜在高温加热	Cr、Co、V、Al、Ti C、Mn、Cr W、Mo、Ti、V、Ni、Si、Ta、Co Mo
2、对热处理加热时间的影响 不宜长时间退火，以免降低淬火硬度 必须适当延长淬火加热时间 对反复热处理不敏感	含W钢 含Cr、W、V钢 W钢
3、对回火稳定性的影响 提高回火稳定性 作用不明显	V、W、Ti、Cr、Mo、Co、Si Al、Mn、Ni
4、对回火脆性的影响 促使回火脆性 防止或延迟回火脆性	Mn、Cr、N、P、V、Cu、Ni Be、Mo、W
5、对回火二次硬化的影响 残余奥氏体转变 沉淀硬化	Mn、Mo、W、Cr、Ni、Co、V V、Mo、W、Cr、Ni、Co

(7) 热处理温度的选择还应根据运行条件、材料的供货状态、接头的性能要求以及焊接残余应力的水平

等，并通过焊接工艺评定试验来选定。有资料表明，英国BS标准已考虑了上述原则。它根据材料应达到的性能，如最大程度的软化焊缝及热影响区的硬度，最高常温抗拉强度和最高的蠕变强度等，规定了不同的热处理温度。表3是各国制造法规规定的最低焊后热处理温度。

表3 各国制造法规要求的最低焊后热处理温度 (°C)<sup>[2]</sup>

钢种	各国常用标准						推荐温度
	ANSI B31.1	ASME VIII	BS 3351	BS 5500	JIS <sup>①</sup> B8243	ISO TC11	
0.5Mo	600~650	>595	650~680	650~680	>600	600~620	600~620
0.5Cr-0.5Mo	600~650	>595	—	—	>600	620~660	620~640
1Cr-0.5Mo	700~750	>595	630~670	630~670 <sup>②</sup> 650~700 <sup>③</sup>	>680	620~660	640~680
1.25Cr-0.5Mo	—	>595	630~670	630~670 <sup>②</sup> 650~700 <sup>③</sup>	>680	620~660	640~680
2.25Cr-1Mo	700~750	>680	680~720 <sup>②</sup> 700~750 <sup>③</sup>	630~670 <sup>②</sup> 680~720 <sup>③</sup> 700~750 <sup>④</sup>	>680	625~700	680~700
1Cr-Mo-V	—	—	—	—	—	—	720~740
2Cr-MoWVTiB	—	—	—	—	—	—	760~780

注：① 以提高蠕变强度为主；② 以软化焊缝区为主；③ 以提高高温性能为主；④ 以提高常温抗拉强度为主；⑤ 日本工业标准。

#### 3.2.2 国内规范对焊后热处理温度选择的规定

《现场设备、工业管道焊接工程施工及验收规范》(GB 50236-98) 中规定：“6.4.6 调质钢焊缝的焊后热处理温度，应低于其回火温度”；“6.4.11 焊前预热及焊后热处理温度应符合设计或焊接作业指导书的规定，当无规定时，常用管材焊接的焊后热处理温度应符合表6.4.11的规定”。见表4<sup>[5]</sup>。

表4 常用管材焊后热处理工艺条件

钢种	焊后热处理	
	壁厚 $\delta$ (mm)	温度 (℃)
C	> 30	600~650
C-Mn	> 20	
Mn-V		
Cr-0.5Mo		560~590
0.5Cr-0.5Mo	> 10	600~650
1Cr-0.5Mo	> 6	650~700
1Cr-0.5Mo-V	> 6	700~750
1.5Cr-1Mo-V		
2.25Cr-1Mo		
5Cr-1Mo	任意壁厚	750~780
9Cr-1Mo		
2Cr-0.5Mo-WV		
3Cr-1Mo-VTi		
12Cr-1Mo-V		

对于石油化工装置的管道施工还常常要求执行《石油化工剧毒、可燃介质管道工程施工及验收规范》(SH 3501-2001) 的规定。该规范5.4.6条规定：“管

道焊接接头的热处理,应在焊后及时进行。常用钢材焊接接头的热处理温度,宜按表5.4.6的规定确定。”见表5<sup>[6]</sup>。

表5 常用钢材焊接接头热处理

钢种或钢号	壁厚(mm)	热处理温度(℃)
10,20	≥30	600~650
16Mn	≥19	600~650
12CrMo	≥19	650~700
15CrMo,12Cr2Mo,12Cr1MoV	≥13	700~750
1Cr5Mo	任意	750~780
2.25Ni,3.5Ni	≥19	600~630

注:① 有应力腐蚀的管道焊接接头,应按设计文件要求进行焊后消除应力的热处理。

② 非合金钢管道焊接接头,壁厚为19~29mm时,焊后应保温缓冷。

将上述两表与表1对比可以看出,(GB 50236-98)规定的省略焊后热处理的最大壁厚要求过高,如对于低合金耐热钢1Cr-0.5Mo、2.25Cr-1Mo钢种来说,(GB 50236-98)中要求壁厚 $\delta > 10\text{mm}$ 、 $\delta > 6\text{mm}$ ,就应做焊后热处理,明显高于其他国家标准。

从上述两表还可以看出,这两个规范对热处理温度的规定有一定出入,尤其是对低合金耐热钢热处理温度的选取范围差异较大,给实际应用带来了一定麻烦。

#### 4 焊后热处理工艺的实际应用

根据以上的分析论证,我们在制定中国石化股份有限公司济南分公司《50万t/a延迟焦化装置 工艺管道热处理施工技术方案》时,焊后热处理温度的选择见表6。

表6 焊后热处理温度一览表

钢号	壁厚 (mm)	热处理温度 (℃)
1Cr5Mo	任意	750~780
15CrMo,13CrMo44	≥10	650~700
20 <sup>a</sup> (输送有应力腐蚀介质)	任意	600~650

从表6可以看出,对于15CrMo的热处理温度选择,由于壁厚较小,没有按照《石油化工剧毒、可燃介质管道工程施工及验收规范》(SH 3501-2001)中要求的“焊后热处理温度700~750℃”来选择,而是按照《现场设备、工业管道焊接工程施工及验收规范》(GB 50236-98)中“1Cr-0.5Mo 壁厚 $> 10\text{mm}$ ,热处理温度650~700℃”来选择的。同时根据焊接工艺评定,在实际操作中根据壁厚对15CrMo的焊后热处理温度又做了一些调整,最终选择“630~680℃”来处理的,从现场操作结果看,焊接接头的各项性能达到了规范要求。其抽查的硬度试验报告数据见表7:

表7 硬度试验报告数据

试验区域	合格标准	抽查比例	硬度值 (HB)	
			热处理前	热处理后
焊缝	≤270	20%	259	250
热影响区	≤270	20%	198	191
母材	≤200	20%	172	161

#### 5 结束语

工艺管道的焊后热处理温度的选择,是焊后热处理工作的关键。鉴于标准规定,许多单位是按《钢制压力容器焊接工艺评定》(JB 4708-2000)评定合格的板材报告来编制相应材料的管道焊接工艺,在此值得一提的是《钢制压力容器焊接规程》(JB/T 4709-2000)中对低合金耐热钢的焊后热处理温度只规定了下限温度,而且除1Cr5Mo外,其他钢种均比原《钢制压力容器焊接规程》(JB/T 4709-1992)的下限温度提高了,其目的是向ASME规范靠拢。因此在选择低合金耐热钢焊后热处理上限温度时,还要根据实际的焊接工艺评定或相关标准规范来选择。

总之,参考有关的标准规范及根据焊接工艺评定的试验结果,结合每个钢种的焊接特点,合理地选择焊后热处理温度,做好焊后热处理工作对提高焊接接头的性能有着不可低估的作用。

#### 参考文献

- 1 中国机械工程学会热处理分会编《热处理手册》第3版 第4卷《热处理质量控制和检验》机械工业出版社,2001年
- 2 中国机械工程学会焊接学会《焊接手册》第2卷《材料的焊接》机械工业出版社,1992年
- 3 樊东黎主编《热处理技术数据手册》机械工业出版社,2000年
- 4 全国压力容器标准化技术委员会编《钢制压力容器焊接规程》(JB/T 4709-2000)
- 5 《现场设备、工业管道焊接工程施工及验收规范》(GB 50236-98)
- 6 《石油化工剧毒、可燃介质管道工程施工及验收规范》(SH 3501-2001)
- 7 中国石化集团第十建设公司《济南50万吨/年延迟焦化装置 工艺管道施工技术方案》,2002年
- 8 中国石化集团第十建设公司《济南50万吨/年延迟焦化装置 工艺管道热处理施工技术方案》,2002年

(收稿日期:2004-02-15)

作者简介:董雪玮,女,1966年6月出生,1996年石油大学(华东)毕业,参加过齐鲁乙烯一、二期工程及改扩建工程的建设,中国石化集团公司标准《球形储罐施工工艺标准》(SH/T3512-2002)的修订工作等,现在中国石化集团第十建设公司工作,高级工程师。