

文章编号:1002-025X(2004)04-0018-02

# 高强度焊缝焊后热处理参数的确定

谢少辉, 尹士科

(钢铁研究总院, 北京 100081)

**摘要:**介绍了空冷和炉冷条件下焊后热处理加热温度对高强度焊缝力学性能的影响。空冷时, 随着加热温度的提高, 焊缝韧性逐渐提高, 而强度逐渐降低。炉冷时, 若加热温度超过600℃, 焊缝韧性明显降低; 但在580℃以下加热, 焊缝韧性无明显变化。

**关键词:**高强度焊缝; 焊后热处理; 参数

**中图分类号:** TG441.8 **文献标识码:** A

在压力容器制造过程中, 有可能产生下述问题: 过量的冷卷、冷矫形等冷加工所引起的冷作硬化; 焊缝区组织和性能的变化; 焊接引起的残余应力等。残余应力的存在将影响到压力容器的使用性能。为了消除焊接区的残余应力, 目前经常进行焊后热处理。它既可松弛和缓和焊接残余应力, 改善因冷加工或焊接引起的硬化或脆化, 也可提高焊缝金属的延性和断裂韧性, 还能加速焊接区中氢的扩散逸出。

但焊后热处理并非是绝对有利的, 如果加热温度或冷却方式等选择不当, 将会导致焊接接头, 特别是焊缝金属的软化或脆化, 在热影响区的粗晶区还可能发生晶间开裂等。对高强度钢结构而言, 这方面的研究尚不多, 且无针对性强的热处理参数可借鉴, 必须根据具体的材料和产品要求进行试验研究, 因此, 笔者对高强度钢进行焊后热处理, 为高强度钢制压力容器的焊后热处理提供基础数据。

## 1 试验用材料及焊接条件

试验用焊条为 $\sigma_s \geq 785$  MPa级的低合金钢焊条, 熔敷金属在-50℃时的冲击吸收功为40~45 J。扩散氢含量达超低氢型。焊缝成分属Ni-Mn-Cr-Mo系, 成分范围与J857CrNi焊条相近<sup>[1]</sup>, 但C和Mn的上限含量更低些, Ni和Mo的含量更高些。配套母材是10Ni5CrMoV钢, 属调质型高强度高韧性钢。试验用焊条直径4 mm, 焊接电流160~170 A, 电弧电压22~24 V, 焊接热输入为15~17 kJ/cm, 道间温度控制在100~120℃。坡口尺寸和取样位置等均按照国标GB/T 5118—1995执行。

## 2 热处理参数的选择

### 2.1 加热温度、速度及保温时间

一般认为, 应力的消除起因于高温下的蠕变, 碳钢约450℃开始出现蠕变, 在含Mo的钢中, 约550℃开始出现。温度越高, 越易于消除应力。但若超过调质钢的原回火温度, 钢的强度便要降低。通常, 加热温度较低时, 屈服强度较高的钢, 残余应力较大, 但当加热温度接近600℃时, 屈服强度的影响已不明显, 其残余应力都处在很低的水平<sup>[2]</sup>。鉴于本研究用的

10Ni5CrMoV钢的原回火温度上限为650℃, 所以, 对母材而言, 较为合适的加热温度是620℃左右。

施工中, 一般都希望加热速度尽量快些, 这不仅可以节约能源与提高生产率, 还可以减少氧化。在考虑焊件的加热速度时, 下列情况应采用较低的加热速度。①脆性大或导热性差的焊件; ②形状复杂或截面相差比较悬殊的焊件; ③大尺寸或厚板焊件; ④合金成分较高或钢材偏析严重者。按照现行的国内外工艺要求, 最高加热速度不得超过220℃/h, 最低加热速度不得低于50℃/h。按板厚计算时, 可采用如下公式,  $v_{\text{加}} = 220 \times 25/t$  (℃/h);  $t$ 为板厚 (mm)。试验中, 加热速度取为 $v_{\text{加}} = 80 \sim 100$ ℃/h。

焊后热处理时, 还要求一定的保温时间, 延长保温时间有利于应力松弛和淬硬区的软化等。但不宜过长, 否则, 会对焊件的塑性和韧性带来不利影响。保温时间也可采用计算方法来确定, 公式为:  $H = t/25$  (h);  $t$ 为板厚 (mm), 国内也有人采用如下公式, 即 $H = (150+t)/100$  (h); 按此公式计算, 最短的保温时间也不会低于1.5 h。试验中, 焊件的板厚较小, 故将保温时间取为1.5 h。

### 2.2 冷却速度和冷却方式

焊件冷却过程中, 特别是厚壁焊件, 应避免外壁与内部温度相差过大而引起不均匀冷却。另外, 当焊件外形比较复杂时, 也易导致各部位的温差, 产生热应力, 有可能引起变形或开裂。所以, 冷速不宜太快。但冷速太慢将拖延工期, 造成不必要的人力、物力浪费。按照国内外的现行工艺参数, 最快冷速不得超过280℃/h, 最慢冷速应不低于55℃/h。通常, 根据板厚的不同, 采用下式计算确定:  $v_{\text{冷}} = 200 \times 25/t$  (℃/h);  $t$ 为板厚 (mm)。试验中因试样尺寸小, 断电后依靠炉体自身的热量散失冷却, 其冷速为50~80℃/h。

冷却方式主要有两种, 一是炉冷, 通常称为退火; 二是空冷, 通称回火。上述冷却速度的选择, 指的是退火情况下的冷速。若某些材质在缓慢冷却时引起断裂韧性下降, 则一定要加快冷却速度, 以避免材质脆化。空冷为经常采用的快速冷却方式, 为进一步加快冷却, 还可以采用吹风冷却等。空冷的弊端在于因冷却速度较快, 导致工件本身产生一定的热应力, 给产品的使用带来不利影响。

3 试验结果与分析

上面选择的热处理参数只是初步设定的参数。这些参数是否合理还需要通过具体的试验评定来加以确定。这里仅就焊条电弧焊时焊缝性能的变化与热处理参数的确定作一说明, 主要介绍空冷和炉冷条件下, 不同加热温度对焊缝性能的影响。加热速度、冷却速度和保温时间均采用前面选定的参数。为便于操作, 装炉温度应小于300℃, 此温度下的加热速度不做限制。炉冷时, 冷至300℃应出炉空冷。试验中采用计算机控温, 所以炉温波动很小, 在±2℃范围。

3.1 回火温度对焊缝力学性能的影响

在选择合适的回火温度范围时, 首先考虑与母材相一致的回火温度, 即620℃。另外选择一个更高的加热温度, 即640℃, 以确定其适用的温度上限。为便于比较热处理的效果, 焊态下的焊缝性能也做了检测, 试验结果列于表1。

表1 不同回火温度下的焊缝力学性能

编号	$\sigma_b$ /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	$\delta_5$ (%)	$\Psi$ (%)	$A_{KV}/J$		回火温度/℃
					-30℃	-50℃	
1	950	830	17	60	40~53(47)	36~41(38.3)	焊态
2	900	850	17	62	61~71(66)	37~50(42)	620
3	805	745	21	63	76~97(89.3)	51~71(60.5)	640

可以看出, 与焊态下的性能相比, 620℃回火后焊缝的抗拉强度( $\sigma_b$ )有所下降, 低温下的冲击吸收功有一定提高, 显示出回火处理对改善焊缝韧性有一定作用。640℃回火后, 与620℃相比, 焊缝的强度( $\sigma_b$ ,  $\sigma_{0.2}$ )有明显下降, 低温韧性大幅度提高。鉴于其屈服强度已达不到技术指标要求(≥785MPa), 所以, 该温度已超出了合适的回火温度上限范围。若按插值法计算, 只有回火温度不超过630℃, 其屈服强度才能满足技术指标要求。

3.2 退火温度对焊缝力学性能的影响

退火温度的选择比回火温度稍低, 为避免可能产生的焊缝脆化, 将退火温度的下限值降低到580℃。试验结果见表2。

表2 不同退火温度下的焊缝力学性能

编号	$\sigma_b$ /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	$\delta_5$ (%)	$\Psi$ (%)	$A_{KV}/J$		退火温度/℃
					-30℃	-50℃	
4	885	835	14	57	24~34(28)	16~40(24)	630
5	920	860	18	70	30~40(35.3)	22~30(26)	610
6	—	—	—	—	—	34~38(36)	580

试验结果表明, 退火温度在610~630℃条件下, 焊缝金属的低温韧性都有明显下降。与焊态相比较, 冲击吸收功降低了约40%, 产生了较明显的脆化现象。当退火温度下降至580℃时, 其韧性水平较加热610℃以上有了明显好转, 冲击吸收功已接近焊态下的性能水平。可以认为, 退火条件下的加热温度应不高于580℃为宜。

比较表1和表2可知, 回火处理可有效地改善焊缝金属的韧性, 其最佳回火温度为620℃。在这样高的温度下回火, 消除应力的效果良好。回火处理的不足之处是冷却过程中会产生热应力, 给消除残余应力带来了一定的负面效果。

退火处理可避免在冷却过程中产生热应力, 但加热温度在610~630℃时均产生了焊缝脆化现象, 对结构的使用性能会带来重大影响。只有把退火温度控制在580℃以下, 才能有效

地避免这种危害。580℃加热时, 其消除应力的效果较620℃有明显下降。为改善消除应力的效果, 可将580℃退火的保温时间延长, 如延至5h, 与保温时间为1.5h相比, 对消除应力有一定改善作用, 但作用可能不显著。

3.3 焊缝金属组织观察

采用光学显微镜对焊缝金属不同热处理状态下的金相组织进行观察, 焊态、640℃空冷和620℃炉冷条件下的焊缝金相组织见图1~3。

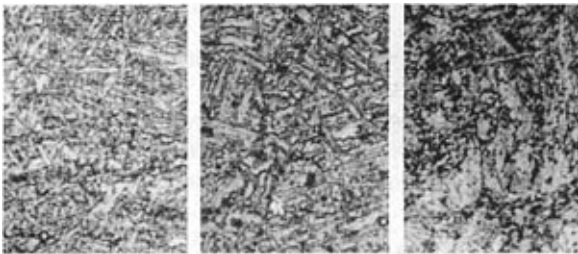


图1 焊态 400× 图2 640℃空冷 400× 图3 620℃炉冷 400×

可以看出, 焊态下的组织为板条马氏体, 板条界或晶界很少有析出物。经640℃空冷后, 沿晶界, 特别是柱状晶界有较大尺寸的析出物断续分布, 随着析出物的长大, 组织软化, 强度下降, 韧性提高。经620℃炉冷后, 除晶界有析出物外, 板条界和板条内也有颗粒状析出物, 晶界析出物尺寸较大, 晶内析出物尺寸较小, 但数量很多, 还有的析出物呈连续分布, 这些析出物的出现可能是韧性明显下降的主要原因。析出物的性质有待通过电子显微镜的电子衍射加以确定。

4 结论

(1) 空冷条件下, 焊缝金属的韧性随着加热温度的提高而增加, 但强度却逐渐下降, 为满足强度要求, 加热温度应控制在630℃以下。

(2) 炉冷条件下, 加热温度在610~630℃时, 焊缝金属的韧性较焊态下有明显下降, 出现了脆化现象。加热温度在580℃时焊缝韧性已接近焊态下的水平, 故退火时的加热温度应不高于580℃。

(3) 回火处理虽然产生一定的热应力, 但对焊接接头的韧性有改善作用; 所允许的加热温度也远高于退火时允许的加热温度, 有利于残余应力的消除。综合比较, 焊后回火处理更为可取。

(4) 金相观察表明, 焊态下为板条马氏体, 晶界、板条界及板条内均无明显析出物。640℃空冷处理后, 沿晶界特别是柱状晶界有较大尺寸的析出物; 620℃炉冷处理后, 在晶界、板条界和板条内均有颗粒状析出物存在。析出物的尺寸、数量和分布都直接影响到焊缝的力学性能。

参考文献:

[1] 机械工业部.焊接材料产品样本[M].北京:机械工业出版社,1997.  
[2] 陈泰炜.压力容器焊后热处理技术[M].北京:中国石化出版社,2002.

作者简介: 谢少辉 (1979—), 男, 大学, 主要从事焊接材料研究工作。