

30Cr3 钢壳体淬火状态下真空电子束焊接工艺*

潘丽华, 孙卫东, 陈旻

(上海新力动力设备研究所, 上海 200125)

摘要: 为解决淬火状态下 30Cr3 超高强度钢在真空电子束焊接时易产生冷裂纹、过热区脆化及热影响区软化等问题, 在对材料性能分析的基础上, 采取了提高真空度、提高加速电压、焊前预热、选择合适的焊接速度以及焊后回火处理等措施。结果表明, 金相分析未发现缺陷, 试样断口为塑性断裂, 试片焊缝强度系数达 0.96, 产品爆破压力 $p_b > 27\text{MPa}$ 。证明该方法可满足设计要求的焊接接头, 为固体火箭发动机壳体的生产提供了新的工艺方法。

关键词: 淬火硬化; 电子束焊; 真空焊; 预热; 回火

中图分类号: V462 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4055 (2003) 05-0478-03

Electron beam welding of quenched 30Cr3 ultrahigh strength steel case

PAN Li-hua, SUN Wei-dong, CHEN Min

(Shanghai Xinli Power Equipment Inst., Shanghai 200125, China)

Abstract: The tendency of cold crack, overheating area embrittlement and HAZ softening of 30Cr3 ultrahigh strength steel in quenching state after vacuum electron beam welding were introduced. A series of measures such as raising vacuum level, increasing acceleration voltage, preheating before welding, choosing suitable welding speed and tempering after welding were presented based on the material property analysis. The results showed that no defect was found through metallographic analysis of weld joint. It also showed that the sample fractured plastically, weld strength factor of the sample reached as high as 0.96 and the bursting pressure of the product was more than 27MPa. Thus, with the effective measures, qualified weld joint of 30Cr3 ultrahigh strength steel in quenching state can be manufactured, which will open a new way to the production of solid rocket motor case.

Key words: Quench hardening; Electron beam welding; Vacuum welding; Preheating; Tempering

1 引言

固体火箭发动机超高强度钢壳体制造过程中, 传统的工艺流程为: 分段筒体旋压-退火-真空电子束焊接-整体热处理(淬火+低温回火)。但随着发动机尺寸的加大、加长, 采用传统工艺, 将带来需增添大设备和延长生产周期等问题。为解决热处理炉的尺寸问题并简化生产工序, 提出了在淬火状态下进行真空电子束焊接的方案, 工艺流程则改变为: 分段筒体旋压-退火-热处理(淬火+低温回火)-真空电子束焊接, 即将电子束焊作为发动机壳体的最后一道工序, 焊后无需再进行热处理。本文针对焊接淬火状态下 30Cr3 钢易出现的问题, 研究了相应的工艺措施。

2 焊接工艺分析

钢材的可焊性与化学成分及热处理状态有关。30Cr3 钢的化学成分为: C (0.28% ~ 0.34%); Si (0.09% ~ 1.20%); Mn (0.05% ~ 0.80%); Cr (2.80% ~ 3.20%); Ni (0.80% ~ 1.20%); Mo (0.60% ~ 0.80%); V (0.05% ~ 0.15%); S, P (0.02%)。它类似于中碳调质钢。焊接调质状态的中、高碳调质钢是一个难点, 焊接淬火状态下 30Cr3 钢更易出现冷裂纹、过热区的脆化及焊接热影响区的软化等。30Cr3 钢壳体焊接的技术要求为: 焊缝 100% X 光拍片, 按 Q1972-86 标准 级焊缝验收; 焊接接头拉伸强度 σ_b 1.617GPa; 塑性断裂; 产品爆破压力 p_b 26.82MPa。

* 收稿日期: 2002-08-19; 修订日期: 2003-01-20。2001 年中国航天第三专业信息网第 22 届技术信息交流会优秀论文。
作者简介: 潘丽华 (1968—), 女, 高级工程师, 研究领域为固体火箭发动机制造工艺。

2.1 冷裂纹问题

焊接合金高强度钢时出现冷裂纹的主要原因为：一定的含氢量，一定的拘束度和对冷裂纹敏感的脆硬组织（其敏感程度决定于马氏体的类型和性能）。其中前两者取决于工艺和结构，后者则反映了每种材料所固有的一种特性。冷裂纹的敏感性主要取决于材料的淬硬倾向，即与其淬透性有关。此外，冷裂倾向还与碳当量有关^[1]，碳当量愈高，冷裂倾向愈大。按

$$C_{eq} = C + Mn/6 + Cr/5 + Mo/5 + V/5 + Ni/15 + Cu/15 \%$$

计算出 30Cr3 钢的碳当量为 1.2%，属于碳当量较高的材料，即对冷裂纹的敏感性较高。为了保证焊后不产生冷裂纹并得到满意的机械性能，所以必须采取预热、降低焊接速度、焊后加热或缓冷等措施。

2.2 过热区脆化问题

30Cr3 钢由于含碳量较高及含合金元素较多，有相当大的淬硬性，因而在焊接热影响区的过热区内很容易产生硬脆的高碳马氏体。冷却速度愈大，生成的高碳马氏体愈多，脆化也就愈严重。由于这种钢的淬硬倾向很大，仅通过加大线能量还难以避免高碳马氏体的形成，却增大了奥氏体的稳定性，促使形成粗大的马氏体，反而使过热区的脆化更为严重。因此，宜采用小线能量，以减少高温停留时间，避免奥氏体晶粒的过热，增加奥氏体成分不均匀性，从而降低奥氏体的稳定性，同时采取预热和缓冷等降低冷却速度，对改善过热区的性能是非常有利的。

2.3 热影响区的软化问题

焊接淬火后的钢，在加热到超过它热处理时的回火温度后出现软化问题是无法避免的，只是采用不同的焊接方法，软化带的大小及软化程度不同，图 1 为淬火状态下的 4340 钢分别采用氩弧焊和电子束焊时焊缝及热影响区的宽度及硬度的比较^[2]。尽管采用电子束焊接时热影响区的宽度明显小，但是引起的硬度下降值却不小，其硬度下降了 27%。

另外，30Cr3 钢热处理时采用低温回火，对于低温回火的材料，软化区的温度范围最大，它相对于母材的软化程度也愈大，且随强度级别的提高，软化问题也愈加突出，这将造成热影响区强度和硬度的大幅度下降。此外，线能量愈小，加热冷却速度愈快，受热时间愈短，软化程度愈小，软化区的宽度愈窄。

3 主要工艺措施和工艺参数

3.1 有关工艺措施

根据上述焊接工艺分析，在 EBW2100/15-150CNC

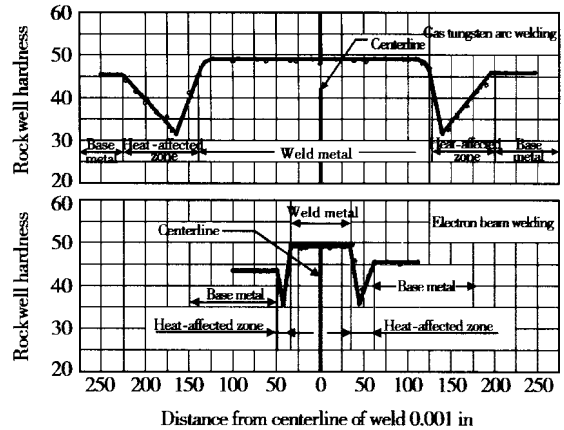


Fig. 1 Width and hardness of the weld and HAZ in EBW and GTAW

真空电子束焊机（最大加速电压 150kV；最大电子束流 100mA；最大功率 15kW），对淬火状态下的 30Cr3 钢进行真空电子束焊接时，确定了工艺措施。

(1) 高真空度：真空度 p_{vac} 要求小于 2×10^{-2} Pa。相同功率下，真空度越高，电子束越不易散射，束流的能量密度越集中，焊缝的热影响区越窄^[2]。

(2) 提高加速电压：利用焊机特性，借提高加速电压 U_a ，进一步提高电子束焦点的功率密度^[3]，使能量更为集中，从而使热影响区的软化带宽度更窄。

(3) 焊前预热：利用散焦电子束对被焊处进行一定时间的预热，不仅能避免产生冷裂纹，还可降低热影响区的硬度，改善焊接接头的塑性。

(4) 选择合适的焊接速度 V_w ：为避免焊接冷裂纹和过热区的脆化，焊接速度不宜太快，为减小热影响区的软化程度，不能选用太慢的焊接速度。

(5) 回火处理：焊接结束后用散焦电子束及时对焊缝进行类似回火的处理，有助于消除应力和改善接头性能，保证焊缝缓慢冷却，减少过热区的脆硬组织，减小了整个焊接接头冷裂纹倾向。

3.2 主要工艺参数

根据设计指标和要求，通过变换焊接速度、焊接电流、预热时间及回火时间等参数，分阶段进行了焊接试验，（焊接试件尺寸及接头形式见图 2），最终选取了能够满足设计要求的焊接参数，见表 1。

Table 1 Main parameters of welding

| | U_a/kV | I_b/mA | $V_w/mm \cdot s^{-1}$ | t_h/min | p_{vac}/Pa |
|---------------------|----------|----------|-----------------------|-----------|----------------------|
| Preheating | 150 | 1.5 | 20 | 5 | $< 2 \times 10^{-2}$ |
| Tack welding | 150 | 3.5 | 50 | | |
| Penetrating welding | 150 | 8.7 | 30 | | |
| Tempering | 150 | 1.0 | 20 | 5 | |

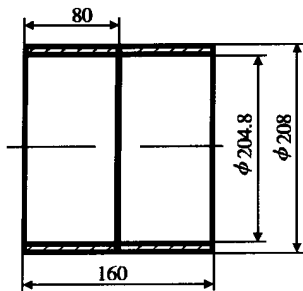


Fig. 2 Joint type of the test workpiece

4 试验结果与分析

4.1 机械性能

焊接试片机械性能(抗拉强度测试)测试结果与基体试片的抗拉强度的比较见表2。接头的抗拉强度 b_{j} 是1个试验件上切割3个试片测试的平均值,实测基体试片的抗拉强度 $b = 1.78 \text{ GPa}$,为与基体试片比较接头抗拉强度降低的百分数。

从上述结果看,焊缝强度降低基本稳定在4%(由

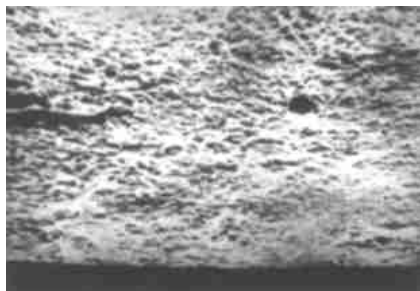


Fig. 3 Appearance of fracture section

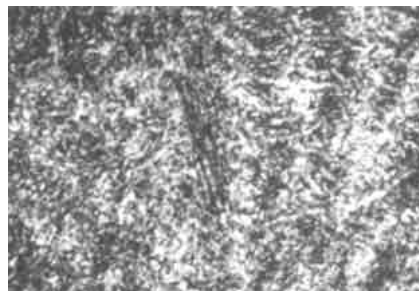


Fig. 4 Weld metallograph using original technic

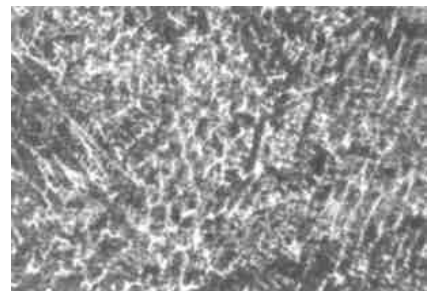


Fig. 5 Weld metallograph using new technic

4.3 产品焊接及爆破试验

在上述工作的基础上,按照设计要求进行1:1产品焊接及爆破试验,焊接工艺参数采用试验最终采用的规范,爆破试验结果 $p_b = 27 \text{ MPa}$ (未破)。

5 结论

(1)按本文提出的工艺措施,30Cr3钢淬火状态下真空电子束焊接试片拉伸强度及产品爆破压力均已达到设计指标,焊缝强度系数可达96%。金相分析未发现缺陷,试样断口为塑性断裂。

(2)本焊接工艺为固体发动机的生产制造提供了新的加工工艺方法,可替代原来先焊接后整体热处理的工艺,简化制造工艺流程,缩短生产周期。

(3)本方法在用于正式产品时尚需进一步做工艺

Table 2 Mechanical test results

| No. | b_{j}/GPa | Fracture position and shape | / % |
|-----|--------------------|--|------|
| 17 | 1.68 | Near the bead, the angle is 45° | 5.62 |
| 18 | 1.71 | Same | 3.93 |
| 19 | 1.71 | Same | 3.93 |

于工艺试验采用外箍式工装,局部错边较大,焊接过程中无法约束,使17号试片强度降低了5.62%。而国外同类钢42Cr2MnSiNiMo(厚度为4.5mm)淬火状态下真空电子束焊接,采用大线能量焊接参数及采用最佳工艺参数时,抗拉强度分别下降22%和6%^[4]。

4.2 焊接试片金相分析

对焊缝组织及断口进行金相分析,其结果为:

焊缝表面均未发现微裂纹;焊接试片断裂基本上发生在深色区域(热影响区与基体的交界处);试样断口形貌特征为韧窝(图3为17号试样的断口形貌);焊缝区金相组织(图4)与采用原工艺焊接试片金相组织(图5)基本一致,只是焊缝区树枝状晶均比采用原工艺焊接状态的晶粒要大一些。

试验,以完善工艺过程,并应采用内撑式工装。

参考文献:

- [1] 周振丰. 金属熔焊原理及工艺[M]. 北京:机械工业出版社,1988.
- [2] Cubberly William H. Electron beam welding & laser beam welding[M]. American Society For Metals, Metal Park, Ohio 44073,1983.
- [3] 王之康,高永华,徐宾,等. 真空电子束焊接设备及工艺[M]. 北京:原子能出版社,1990.
- [4] , , [M]. , , 1978.

(编辑:王居信)