低合金高强钢 SA 517Gr. F 的焊接

张家港市技术监督研究所 （江苏 215632） 黄志东
张家港中集圣达因低温装备有限公司 （江苏 215632） 王淑华

【摘要】 压力容器为特殊行业，对焊缝性能提出了更高的要求，而 SA 517Gr. F 的焊接性能相对较差，且焊后热处理温度对焊缝的冲击韧性影响大。通过多次焊接试验，确定了比较合适的焊接工艺及焊后热处理工艺，保证了焊缝的性能。

近期我公司生产了一批 ASME 产品，母材为 SA 517Gr. F，属低合金调质高强钢，此类母材在压力容器上的使用在国内还属首次。SA 517Gr. F 焊接性能尚可，但要成功地焊接这批产品，必须掌握母材的焊接特性，拟定正确的焊接工艺，并严格按工艺实施。

1. 材料

（1）材料性能 该材质的主要化学成分及力学性能如表 1、表 2 所示。

表 1 SA 517Gr. F 化学成份（质量分数）（%）

C.	Si	Mn	P	S
0. 1 ~ 0. 22	0. 13 ~ 0. 37	0. 55 ~ 1. 1	≤0. 035	≤0. 035
Ni	**Mo**	**Cr**	**V**	**Cu**
0. 67 ~ 1. 03	0. 36 ~ 0. 64	0. 36 ~ 0. 69	0. 02 ~ 0. 09	0. 12 ~ 0. 53

表 2 力学性能

板材规格 /mm	屈服强度 /MPa	拉伸强度 /MPa	伸长率 A_5 (%)
≤65	≥690	795-930	≥16

（2）焊接性分析 ①焊接冷裂纹：母材通过加入提高淬透性的合金元素，保证获得强度高、塑韧性好的低碳马氏体和部分下贝体。由于淬透性增加，连续冷却转变图大大右移，冷裂倾向较大，但由于低碳马氏体的形成温度较高，焊接过程中冷却速度较慢时，低碳马氏体可实现“自回火”过程，得到强度和韧性都较高的回火马氏体和回火贝氏体，避免冷裂纹的产生。但为了可靠地防止冷裂纹的产生，还必须严格控制焊接时的氢源并选择合适的焊接参数。②焊接接头的软化：焊接时，加热温度处于 A_{C1} 至回火温度范围的热影响区会出现强度降低即软化

四种相生成。

（3）TC4 钛合金钎焊的应用 采用以上 Ti-Zr-Ni-Cu 钎料及最佳焊接参数，实现了 TC4 钛合金航天发动机喷嘴的钎焊连接。经过地面试车考核验证了钎焊接头的可靠性，并将其应用于某型号航天发动机。

3. 结语

（1）在钎焊接头的界面反应层中共生成四种产物：灰白色块状 Ti 和 Al 的化合物相，深灰色 Ti 基固溶体相，以及由 Ti 基固溶体和脆性化合物构成灰白色突起相和浅灰色骨架相。

（2）随着钎焊温度和加热时间的增加，接头抗拉强度呈现先增大再降低的趋势，当钎焊温度为 940℃和保温时间为 15min 时，获得最大抗拉强度为 412MPa 的钎焊接头。

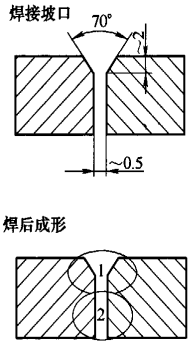
（3）采用本研究获得的最佳工艺参数及 Ti40% + Zr25% + Ni15% + Cu20% 钎料实现了 TC4 钛合金喷嘴的钎焊连接，并将其应用于某型号航天发动机。

MW （20110425）

现象，采用小热输入可以解决这一问题。③焊接再热裂纹：为加强淬透性和提高抗回火性能，加入了Cr、Mo、V等合金元素，这些合金元素都能引起再热裂纹倾向，焊接时应注意再热裂纹问题。④焊接热裂纹：热裂纹与含C、Mn、S、Ni有关，因SA 517 Gr. F含Ni量较高，应注意热裂纹的产生。焊接热输入越大，金属晶粒长得越大，热裂纹倾向越大。

2. 焊接参数的选择

（1）焊接方法　为保证焊缝质量、提高效率，筒体的纵环缝都选用埋弧焊。按常规工艺，先筒体内侧采用埋弧焊，筒体外侧用碳弧气刨清根砂轮机打磨后，再进行埋弧焊焊接。碳弧气刨清根不仅降低了生产效率，而且此工艺可能增加焊接坡口中的含碳量，降低了焊缝质量。基于此，我们对常规工艺进行了改进，省略碳弧气刨这一工艺。先焊侧焊缝，焊接时调整焊接参数，确保焊缝焊透。此焊接工艺特别容易焊穿，为防止背面焊穿，筒体外侧用焊剂作为衬垫。内侧焊妥后，外侧砂轮机打磨，再进行埋弧焊焊接。焊接坡口如附图所示。其他焊缝（如垫板、法兰、人孔等附件与壳体的角焊缝）采用焊条电弧焊。



坡口形式

（2）预热温度　为避免焊缝粗晶区脆化，不能选择较大的热输入。热输入的减小会加快焊缝的冷却速度，这增加了产生冷裂纹的可能性。为防止冷裂纹的产生，必须采取预热措施。但是预热温度过高，获得上贝体的可能性增加，焊缝的塑韧性会下降，所以预热温度一般不超过100℃。

产品工况、焊接热输入、预热温度决定了$t_{8/5}$，焊缝热影响区的组织随$t_{8/5}$变化而变化，通过试验，对于我公司产品工况采用较低热输入和较低预热温度时，焊缝才能获得良好的冷裂纹性能及韧性。

焊前预热还能使母材中的水分蒸发，降低了焊缝中氢的来源，这样不仅避免了焊缝产生冷裂纹倾向，而且还降低了焊缝产生气孔的可能性。

（3）焊接热输入　从防止冷裂纹的角度，希望热输入大一些。但是热输入过大，粗晶区会因出现混合脆性组织而脆化，所以选择合适的热输入尤其重要。通过多次试验，确定了合适的焊接参数（见表3）。

表3　焊接参数

焊层	焊接方法	极性	电流/A	电压范围/V	焊接速度/m·s^{-1}	热输入/kJ·cm^{-1}
先焊侧	SAW	直流反接	570～590	29～32	10	≤18.88
后焊侧	SAW	直流反接	570～590	29～32	10	≤18.88

（4）焊接材料　由于母材产生冷裂纹的倾向较大，所以应严格控制焊接材料中的氢含量。选用低氢型或超低氢型焊材，再按照等强匹配的原则，确定了焊材牌号：焊条，E11018—G；焊丝，EF6；焊剂，氟碱型高碱度烧结剂。为保证焊缝的力学性能，我们对多个品牌的焊材进行了试验，通过对比选择了冲击值相对较高、稳定的品牌。为降低焊材中氢含量，确保焊缝性能，施焊前必须按厂家规定的焊接温度进行焙烘。烘干后的焊材应放在保温筒内随用随取，并且在保温筒内的存放时间≤4h。

（5）焊后热处理　因封头压制过程中小R处变形较大，另外封头的压制工艺、热处理工艺对此处焊缝的冲击韧性影响也很大，为此我们做了大量的模拟试验，确定了封头对焊缝冲击韧性影响较小的压制工艺和热处理工艺。

3. 试验结果

按以上方案进行试验，试验结果都符合标准。参照此工艺施焊封头及封头试板，结果表明焊接试板的所有力学性能均满足要求。

4. 结语

这一批产品已经完成，产品的焊接试板一次合格，产品的焊缝合格率也高达98.6%，应该说此工艺是切实可行的，为此类钢种的焊接积累了经验。

MW　（20110415）