

熔化极混合气体保护焊工艺研究与应用

郭会民 赵仕哲 李万万
(西安航天发动机厂, 陕西 西安 710100)

摘 要: 为推广应用熔化极混合气体保护焊这一崭新的焊接工艺技术, 选择压力容器行业广泛使用的 16MnR 低合金钢进行试验, 通过试验分析确定出最佳的焊接工艺规范参数, 最后完成试件的焊接和焊接工艺评定, 并应用于容器生产中。通过试验, 用此方法所焊的焊接接头的各项力学性能指标均高于标准规定的下限值, 焊缝的使用性能良好, 可保证产品焊接质量, 同时可提高劳动生产率, 减轻劳动强度, 减小焊接应力与变形。此方法适合于 16MnR 低合金钢的焊接, 可推广应用于压力容器生产中。

关键词: 熔化极; 混合气体; 焊接; 工艺研究; 应用

中图分类号: V261

文献标识码: A

文章编号: (2007) 02-0053-06

Study and application on mixed gas shielded welding technique of fusion pole

Guo Huimin, Zhao Shizhe, Li Wanwan
(Xi'an Space Engine Factory, Xi'an 710100, China)

Abstract: A new welding technique, mixed gas shielded welding of fusion pole is popularized. A test is conducted with 16MnR low alloy steel used widely in pressure vessel industry. The welding of test piece and technical evaluation are finished with the best welding parameters defined by test and analysis. By way of the test, all mechanical property indexes are above the low limit value of standard stipulating for welded joint with good usage property, high welding quality and less welding stress and deformation. It is suitable for the welding of 16MnR low alloy steel and can be used into pressure vessel production.

Key words: fusion pole; fixed gas; welding; study and application

收稿日期: 2007-01-22; 修回日期: 2007-02-15。

作者简介: 郭会民 (1966—), 男, 高级工程师, 研究领域为焊接工艺。

1 熔化极混合气体保护电弧焊的特点

熔化极混合体保护电弧焊是用混合气体 (Ar+CO₂) 作为保护气体, 焊丝本身作电极, 焊接电流可以大大提高。由于焊丝较细、电流密度大、焊丝熔化速度快、热量集中、电弧穿透能力强及熔深大, 可以减小坡口角度, 增加钝边厚度, 节省焊接材料, 降低生产成本, 提高劳动生产率, 并且可以降低焊接应力与变形, 焊缝的焊波细密、成型美观, 飞溅小。

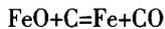
2 焊接工艺试验分析

2.1 几种气体保护电弧焊的比较

熔化极纯 Ar 气体保护电弧焊 (熔化极氩弧焊), 在射流电弧下容易产生指状熔深, 对熔池的保护要求较高, 如果保护不良, 焊缝表面便起皱皮, 成型不良, 表面不光滑, 所以喷嘴口径及气体流量比起钨极氩弧焊都要相应增大, 通常喷嘴口径为 20mm 左右, 氩气流量则在 30~60 L/min。

CO₂ 气体保护电弧焊由于 CO₂ 气体在电弧高温下会分解, 分解产生的原子态 O 具有强烈的氧化性, 原子态 O 与 Fe、Si、Mn 反应生成 FeO、SiO₂、MnO, 将导致焊缝金属中合金元素严重烧损, 焊缝机械性能较差。

溶入熔池的 FeO, 按下列方程与 C 元素作用产生 CO 气孔, 这个反应在熔池处于结晶温度时进行得比较剧烈, 由于这时熔池已开始凝固, CO 气体不易逸出, 于是在焊缝中形成 CO 气孔。



溶入熔滴中的 FeO 与 C 元素作用产生的 CO 气孔, 则在电弧高温下急剧膨胀, 使熔滴爆破而引起金属飞溅。

因此合金元素烧损、气孔及飞溅是 CO₂ 气体保护电弧焊的三个主要问题。

熔化极混合气体保护电弧焊用 Ar+CO₂ 混合保护气体, 既具有 Ar 弧的优点, 如电弧燃烧稳定, 飞溅小, 很容易获得轴向射流过渡等, 又因

为这种气体带有氧化性, 克服了用单一的 Ar 气焊接时产生的电弧漂移现象及液体金属粘稠, 表面张力大等问题, 同时使得焊缝指形熔深有所改善。同时保护气体的氧化性较小, 合金元素烧损较少, 焊接接头的机械性能较好。

在惰性气体 Ar 中, 添加二氧化碳, 有助于稳定电弧, 有利于金属过渡和减少焊接飞溅, 同时在焊接低合金钢时, 能改变熔深形状并促进焊缝金属沿熔化边缘的润湿和流动作用。因此, 大大地减少或防止了咬边现象。

所以用熔化极混合气体保护电弧焊可以解决用单一的 Ar 气或 CO₂ 气体作为保护气体的电弧焊存在的问题。

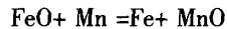
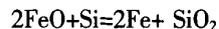
2.2 工艺试验

试验用设备: NBC-500 逆变式气体保护焊机; 试验用材料: 16MnR 低合金钢, 板厚 12 mm。

2.2.1 焊接材料选择

在焊丝中添加对氧亲和力比铁大的金属元素 Si、Mn 作为脱氧剂, 采用 Si、Mn 联合脱氧时能得到满意的结果, 提高焊缝质量, 因此我们采用 H08Mn2SiA 焊丝进行焊接, 就是采用 Si、Mn 联合脱氧的。

Si、Mn 脱氧的反应方程式如下:



SiO₂ 和 MnO 能结合成复合化合物 MnO·SiO₂ (硅酸盐), 其熔点只有 1270℃, 比重也较小 (3.6g/cm³) 且能凝聚成大块, 易浮出熔池, 凝固后成为渣壳覆盖在焊缝表面。

加入到焊丝中的 Si 和 Mn, 在焊接过程中一部分被直接氧化掉和蒸发掉; 一部分消耗于 FeO 的脱氧; 其余部分则剩留在焊缝金属中充作合金元素, 所以焊丝中加入的 Si 和 Mn, 需要有足够的数量。根据试验, 焊接低合金钢用的焊丝, 一般含 Si 量在 1% 左右; 含 Mn 量在 1%~2% 左右。

大气中的氧气被喷嘴中喷出来的混合保护气体 (Ar+CO₂) 排开, 从而有效地保护了焊接电弧区。

采用 H08Mn2SiA 这种焊丝的适应性非常强, 即使当母材不十分清洁 (事实上生产现场就是这种情况) 时, 因为这种焊丝含有比较高的脱氧

剂，它在高电流密度时的射流过渡和低电流密度时的短路过渡中都能获得满意的焊接接头质量。

2.2.2 坡口设计

接头的设计不应使焊枪的喷嘴与接头根部之间的间隙过大，因为间隙过大会减少保护气体的保护效果和影响根部熔透，保护不适当会使焊缝受到污染，飞溅过大和出现气孔等缺陷。又由于熔化极混合气体保护电弧焊焊丝较细，电流密度大，热量集中，电弧穿透能力强，熔深大，可以减小坡口角度，增加钝边厚度，故焊接坡口设计见图 1。

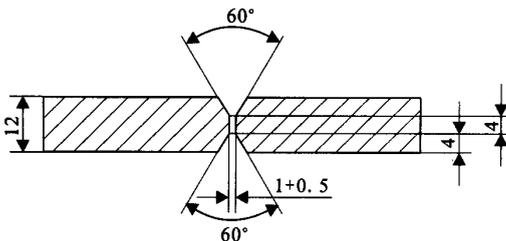


图 1 焊接坡口示意图

Fig.1 Welding groove diagram

2.2.3 富氩混合气体的选择

焊接低合金钢时选用 80%Ar+20%CO₂ 富氩混合气体作为保护气体。

2.2.4 焊丝直径的选择

熔化速度是电流密度的函数，如果两种不同直径的焊丝采用相同的电流，则其中小直径焊丝的熔化速度较高。

熔深也是电流密度的函数，如果比较两种不同直径焊丝的焊缝，在其他因素相同的情况下，则小直径焊丝的焊缝具有更大的熔深。

在相同行走速度、送丝速度和接头条件下，大直径焊丝熔敷的焊道比小直径焊丝来得宽。

根据以上原理，经过多次调试试验，我们选择了 $\Phi 1.6\text{mm}$ 的焊丝直径，焊丝牌号 ER49-1 (对应型号为 H08Mn2SiA)，GB/T8110-1995。

2.2.5 焊接电流

焊接电流对熔深、焊丝熔化速度及工作效率影响最大，随着焊接电流的增大，熔深显著增加、熔宽略有增加。

当电流较小 (200A 左右) 时为滴状过渡，

当电流再大一些时便产生不稳定的射滴过渡 (由于射滴过渡区间很小，几乎得不到稳定的射滴过渡)，当电流达到临界值 (对于 $\Phi 1.6\text{mm}$ 的焊丝临界电流值为 260A) 时就由滴状过渡转变为稳定的射流过渡。

2.2.6 电弧电压

电弧电压的变化影响焊接电弧的长短，决定了熔宽的大小，一般电弧电压增大，熔宽增大而熔深略有减小。焊接电流小时，电弧电压较低；焊接电流大时，电弧电压较高。电弧电压必须与焊接电流配合适当，电弧电压过高或过低都会影响电弧稳定性使飞溅增大。

2.2.7 焊接速度

焊接速度是焊接工艺参数中的重要因素之一。在一定的焊丝直径、焊接电流和电弧电压条件下，焊接速度增加时，焊缝宽度和熔深减少，焊接速度过快容易产生咬边、未熔合 (或熔合不良) 及未焊透等缺陷，且气体保护效果变差，易出现气孔；焊接速度过慢，焊接生产率降低，焊接接头晶粒粗大，焊接变形增大，焊缝成形差。

2.2.8 焊丝伸出长度

焊丝伸出长度主要取决于焊丝直径，一般为焊丝直径的 10~12 倍为宜。

2.2.9 气体流量

气体流量应根据焊接区的保护效果来选取，通常焊接电流在 200A 以下时，气体流量约为 10~15L/min；焊接电流大于 200A 时，气体流量约为 15~25L/min。

2.2.10 焊枪倾角

当焊枪倾角小于 10° 时，不论前倾还是后倾，焊接过程及焊缝成形都没有明显的影响，但倾角过大 (如前倾角大于 25°) 时，将增加熔宽并减小熔深，还会增加飞溅。

2.2.11 电源极性

一般采用直流反接，它具有电弧稳定性好、飞溅小且熔深大的特点。

2.2.12 焊接线能量

焊接质量与焊接时输入线能量有直接的关系，焊接线能量的公式如下：

$$E=IU/V$$

式中, E 为焊接时输入的线能量, J/mm; I 为焊接电流, A; U 为电弧电压, V; V 为焊接速度, mm/s。

由于熔化极混合气体保护电弧焊时, 焊丝连续送给, 直至一条焊缝连续焊完, 所以焊接速度较快。从上式可以看出: V 增大时, E 减少。由于减少了输入焊件的焊接线能量, 焊接完毕后, 得到了较小的焊接变形。板状对接试件焊接后角变形量小于 0.5mm; 同样条件下, 焊接变形比焊条电弧焊、氩弧焊、埋弧自动焊均要小, 所以特别适用于焊接变形要求严格的场合 (角焊缝和对接焊缝)。

表 1 焊接工艺评定规范参数

Tab.1 Welding evaluation parameters

参数 层面	焊接电流/ A	电弧电压/ V	焊接速度/ (cm/min)	干伸长/ mm	气体流量/ (L/min)	熔滴过渡形式
正面第一层	235	21.6	30	17	20	滴状过渡
正面第二层	264	21.6	45	17	20	射流过渡
反面第一层	280	23.4	45	17	20	射流过渡
反面第二层	303	24.7	50	17	20	射流过渡

其余层的熔滴过渡形式为射流过渡: 在我们选用的富氩保护气体 (80%Ar+20%CO₂) 中, 电流超过 260A 时, $\Phi 1.6$ mm 的焊丝在焊接中就会产生射流过渡。熔化金属从焊丝末端过渡到熔池是以轴向细小滴状形式进行的, 这些小熔滴是从圆锥形焊丝末端滴落的, 一个熔滴紧接着另一个熔滴, 且彼此之间并不相连。射流过渡时, 在短时间内具有很高的热输入量和熔深。

为了保证焊缝的焊接质量, 反面焊接前须进行打磨清根。焊接后, 焊缝表面鱼鳞纹细密, 成型光滑漂亮, 焊缝宽度、余高均匀一致, 飞溅极小, 易于清理, 未发现咬边, 焊缝能够向母材圆滑过渡。

熔化极混合气体保护电弧焊克服了焊条电弧焊时焊条长度受到限制的缺点, 焊接工作效率为焊条电弧焊的 3~4 倍, 也克服了埋弧自动焊时有些部位不可能施焊的缺点 (特别是角焊缝)。

3.2 焊缝 X 光探伤结果

100%符合 JB4730-94-RT-II 级标准要求。

3 焊接工艺评定

3.1 焊接工艺评定规范参数

用 16MnR 低合金钢进行焊接工艺评定, 板厚 12 mm, 板材标准: GB6654-96, 最后确定的焊接工艺评定规范参数见表 1。

正面第一层的熔滴过渡形式为滴状过渡: 低电流密度下, 在圆锥形焊丝末端形成尺寸相当大的熔化金属熔滴, 熔滴在焊丝末端形成, 直到重力克服焊丝表面张力, 熔滴便落到焊接熔池中 (此种过渡形式只适用于平焊)。

3.3 力学性能检查结果

(1) 焊接接头抗拉强度为 641/651MPa, 在焊接接头内断裂, 均高于标准规定的母材抗拉强度的下限值。

(2) 弯曲试验: 在支座距离为 63mm, 弯轴直径为 40mm, 弯曲角度为 180°的条件下进行 2 个面弯, 2 个背弯, 均无缺陷。

(3) 采用 10×10×55 的标准冲击试样进行室温 V 型缺口冲击试验, 焊缝的冲击韧性值为 64/68/64 (J); 热影响区的冲击韧性值为 86/102/104 (J), 均高于标准要求的 31J。

(4) 低合金钢热影响区最高的容许硬度为 350 Hv, 如超过此临界值就可能出现冷裂纹, 经过实际测试, 焊缝区的硬度值为 261HV₅, 熔合区的硬度值为 274HV₅, 热影响区的硬度值为 220HV₅, 可见热影响区不会出现冷裂纹。

(5) 金相试验检查结果

焊缝内为铸态重熔组织; 过热区为晶界上有网状铁素体的过热组织, 紧挨重熔组织和过热组

织的是热影响淬火区，为板条马氏体（低碳马氏体）组织（见图2）；母材组织为等轴的铁素体+珠光体组织，母材向热影响区出现过渡的半马氏体（低碳马氏体）组织（见图3）。焊缝宏观组织形貌见图4。

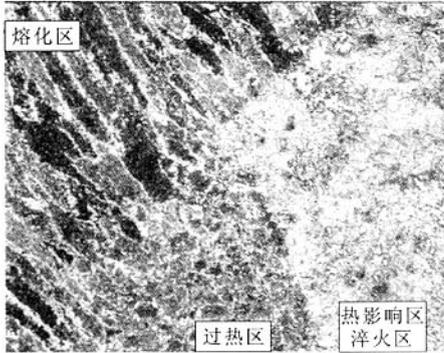


图2 焊缝熔合线附近的组织

Fig.2 Tissue near welds fusion line

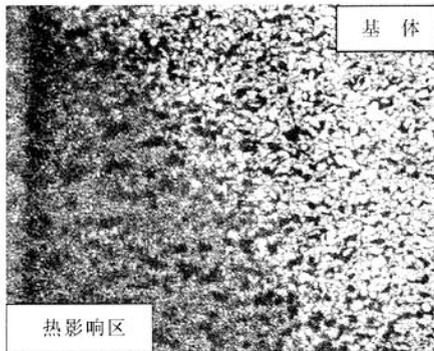


图3 热影响区组织

Fig.3 Tissue in heat effected area

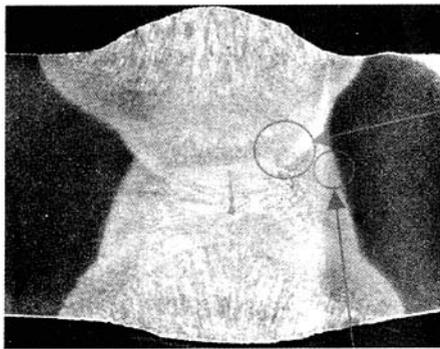


Fig.4 Welds macrostructure contour

对金相试验检查结果的说明：16MnR 低合金钢含碳量从 0.12%到 0.2%，当含碳量偏低时，过

热区的脆化主要是由于线能量偏高产生魏氏体组织造成的，在这种情况下，线能量偏小时，不仅不会引起脆化，相反，对冲击韧性还有好处，小线能量时即使生成马氏体也是韧性较好的低碳马氏体。

4 应用

此项技术成功应用于丙稀酸成套装置第一、二反应器（共 14 台）（Y05-5501/5502-1）的焊接、氟立昂替代品反应器（共 8 台）（ME8-397/398-1）的焊接、4 万吨/年苯酐反应器（共 1 台）的焊接，设备从开车到现在运行正常。

5 结论

(1) 用熔化极混合气体保护电弧焊所焊的焊接接头的机械性能（强度、塑性、冲击韧性）均高于标准规定的下限值，焊缝的使用性能良好，可保证产品焊接质量。

(2) 熔化极混合气体保护电弧焊焊丝较细、电流密度大、热量集中、电弧穿透能力强及熔深大，可减小坡口角度、增加钝边厚度、提高焊接速度及劳动生产率，并减轻了劳动强度。

(3) 富氩保护气体（80%Ar+20%CO₂）中，电流超过 260A 时， $\Phi 1.6\text{mm}$ 的焊丝在焊接中就会产生射流过渡。

(4) 节省焊接材料，CO₂ 保护气体来源广，而且不像焊条电弧焊有焊条头的浪费，大大降低了生产成本。

(5) 焊接热影响区较窄，可以降低焊接应力与变形，尤其特别适用于焊接变形量要求严格的焊件。

(6) 焊缝表面的焊波细密、成形美观、飞溅小，使产品焊接质量有所提高。

(7) 熔化极混合气体保护电弧焊焊接操作时，需控制好焊接工艺参数，注意使焊道之间及焊道与母材之间熔合良好。

(8) 熔化极混合气体保护电弧焊适合于 16MnR 低合金钢的焊接，应大力推广应用于压力

容器生产中。

参考文献:

[1] 姜焕中. 焊接方法及设备 [M]. 北京: 机械工业出版社,

1986.

[2] 周振丰. 金属熔焊原理及工艺(下册)[M]. 北京: 机械工业出版社, 1986.

[3] 陈裕川. 低合金结构钢的焊接 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1992.

[4] 单黎波. 波纹板夹层结构高温钎焊缝 X 射线影像分析 [J]. 火箭推进. 2006, 32(2).

(编辑: 马杰)

(上接第 11 页)

其中一个最大频繁项集 “A1 C1 K1 M1 N1 (2)” 的物理意义是氢泵转速 (A) 的下降, 引起了氢泵流量 (C), 氢泵出口温度 (K), 发生器氢喷前压力 (M), 发生器氧喷前压力 (N) 的下降, 这与实际试车中出现的氢涡轮破坏的故障现象相吻合。

通过以上测试可以看出 FP-Growth 算法很好地挖掘了液体火箭发动机试车数据中的故障数据, 与文献[5]中采用神经网络方法及文献[6]中采用的支持向量机方法进行对比, 所得结果也保持一致, 故该方法是可信的。

4 结束语

将数据挖掘应用于液体火箭发动机的故障检测和诊断中是一种新的思路。本文从数据挖掘的角度, 对传统的布尔型关联规则进行了改进, 利用数值型关联规则挖掘火箭发动机试车数据中的频繁项集。结果发现, 该方法能够准确地检测发

动机中发生的故障, 对于理论分析和工程应用都具有重要意义。但是关联规则主要用于事后分析试验得出的数据, 在故障预报和实时诊断方面的性能不是很好, 这些是将来继续有待深入研究的课题。

参考文献:

[1] 张育林, 吴建军. 液体火箭发动机健康监控技术[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1998.

[2] 张会容. 关联规则挖掘的研究及其应用[D]. 上海: 华东理工大学, 2004.

[3] 邓景毅, 张小康. 事务间数值型关联规则的挖掘[J]. 计算机应用, 2004, 24 (4) .

[4] 韩家炜, 等. 数据挖掘: 概念与技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.

[5] 黄敏超. 液体火箭发动机故障的神经网络诊断研究 [D]. 长沙: 国防科技大学研究生院, 1998.

[6] 韩泉东, 胡小平, 李舟军. 决策树和支持向量机方法在液体火箭发动机故障诊断中的应用[C].

(编辑: 马杰)