

焊缝金属铁素体含量对氢裂敏感性的影响

柯黎明

(南昌航空工业学院)

摘 要 采用试验室制造的不同成分的焊丝,用 $\text{Ar} + \text{H}_2$ 混合气体保护的 TIG 焊方法,通过纵向焊道拉伸拘束裂纹 (LB-TRC) 试验和焊缝金属恒应变速率拉伸 (WM-SERT) 试验,定量研究了双相不锈钢焊缝金属中铁素体含量对氢致裂纹敏感性的影响。结果表明,当双相不锈钢焊缝金属中 δ 铁素体含量小于 50% 时,焊缝金属对氢致裂纹不敏感;当 δ 铁素体含量大于 50% 时,随铁素体含量的增加,氢裂敏感性显著增加。

关键词 氢致裂纹; 双相不锈钢; 焊缝金属; 铁素体

0 序 言

由于双相不锈钢具有良好的强度和抗腐蚀性,它们在化学、造纸和石油工业中得到了广泛应用。在焊接双相不锈钢时,通常采用 $\text{Ar} + \text{H}_2$ 混合气体保护的钨极气体保护焊工艺^[1]。因为在保护气体中加入适量的氢,可以增加熔池的流动性、防止焊缝表面氧化。并且具有较高的生产率。然而,最近的研究指出,在双相不锈钢的焊缝金属和热影响区中会出现氢致裂纹。

研究表明,在低合金高强钢焊接接头中,氢致裂纹的产生主要取决于三个因素:扩散氢含量、应力和脆性组织。但是,到目前为止,双相不锈钢焊缝金属显微组织的变化对其氢裂敏感性的影响还很少见诸报道。本文通过改变焊缝金属化学成分以改变焊缝中 δ 铁素体含量,采用 $\text{Ar} + \text{H}_2$ 混合气体保护的 TIG 焊工艺,利用 LB-TRC 试验和 WM-SERT 试验,评价具有不同 δ 铁素体含量的双相不锈钢焊缝金属的氢裂敏感性,并借助扫描电镜分析试样断口,以期深入了解其氢致裂纹敏感性与显微组织、断口形貌的关系。

1 试验方法

1.1 材料

所用母材为含有 22%Cr、5%Ni、3%Mo 的 22-05 双相不锈钢。使用了 5 种试验室制

造的焊丝,以在熔敷金属中获得预期的 δ 铁素体含量。表 1 示出了母材和焊缝的化学成分以及相应的镍当量 (Ni_{eq})、铬当量 (Cr_{eq}) 和由它们获得 δ 铁素体含量。

δ 铁素体含量的测量是用“截点法”在放大倍数为 500 倍的金相显微镜下进行的。

1.2 裂纹试验

(1) LB-TRC 试验 本试验是一种恒载荷拉伸拘束裂纹试验,拉伸试样的形状与尺寸如图 1 所示,为两块开槽试板对接而成, B'-B' 面为它们的对接面,试验焊缝跨过此面,焊缝长 40mm。焊后当焊缝温度冷至 420K 时,在平行于焊缝方向施加一恒定拉伸载荷,并记录焊缝断裂时间,若经过 96h 焊缝金属不发生断裂,则此时所得到的应力定义为临界应力,并以此作为双相不锈钢焊缝金属氢裂敏感性的定量指标,所施应力由负荷除以焊缝横截面积计算。

表 1 试样的化学成分及其相应的 Ni_{eq} 、 Cr_{eq} 和 δ 铁素体含量

Table 1 Composition of specimen and their Ni_{eq} , Cr_{eq} and ferrite contents in weld metal (%)

Composition		C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	N	Ni_{eq}	Cr_{eq}	δ
Base metal		0.022	1.47	0.47	21.9	5.5	3.05	0.137	6.90	25.58	52
Electrode	FM-1	0.022	1.10	0.36	22.0	4.0	3.0	0.11	5.21	25.45	98
	FM-2	0.030	1.50	0.50	22.0	5.5	3.0	0.15	7.15	25.75	84
	FM-3	0.029	1.45	0.48	22.0	8.0	3.0	0.14	9.60	25.72	73
	FM-4	0.028	1.40	0.47	22.0	10	3.0	0.14	11.5	25.71	53
	FM-5	0.026	1.31	0.44	22.0	14	3.0	0.13	15.4	25.66	23

$$Ni_{eq} = 1(\%Ni) + 30(\%C) + 0.5(\%Mn) + 30(\%N)$$

$$Cr_{eq} = 1(\%Cr) + 1(\%Mo) + 1.5(\%Si) + 0.5(\%Nb)$$

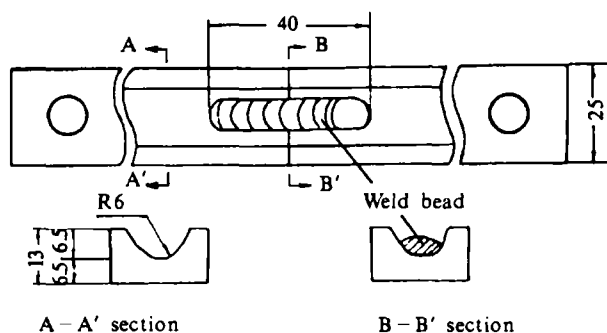


图 1 试样形状及尺寸

Fig.1 Configuration and size of specimen

试验焊缝用 TIG 焊焊接;保护气体为纯 Ar 及 Ar+10% H_2 的混合气体;焊接电流为 220A, 电压为 15V, 焊接速度为 1.67×10^{-3} m/s。

(2) WM-SERT 试验 由于在双相不锈钢中氢的扩散速度很低,以 LB-TRC 试验估计其氢裂敏感性时必须延长试验的持续时间,以使氢有足够的时间扩散聚集。研究表明,氢致裂纹对试样的拉伸应变速率很敏感^[4, 5],拟采用 WM-SERT 试验评价双相不锈钢的氢致裂纹敏感性。

本试验是一种焊缝金属恒应变速率拉伸试验,试样形状、尺寸及焊接规范与 LB-TRC 试验相同,焊后当焊缝金属温度降低到约 423K 时,将试样放入 MTS 液压伺服拉力试验机中,以“速率模式”控制对焊缝金属进行恒应变速率拉伸试验。选用不同的夹头运动速率来估计试样变形速率对试验结果的影响,以选择能反映氢对焊缝金属性能的影响的合适的变形速率。

焊缝无氢时焊缝金属的性能,采用以纯 Ar 作保护气体焊接的焊缝来估计。焊后 24h 以 10^{-3} m/s 的夹头运动速率进行 WM-SERT 试验,试验结果与含氢试样比较以判断氢对焊缝金属性能的影响。

1.3 金相分析

用成分为 10% 草酸 + 10% 盐酸 + 酒精的溶液对焊缝金属进行电化学腐蚀,以观察其显微组织。焊缝金属断口表面的准解理断裂面积分数,则在放大倍数为 20 倍的 SEM 照片上用数点法测定。

2 试验结果及讨论

2.1 焊缝金属中 δ 铁素体含量为 70% 时的裂纹敏感性

首先,用 LB-TRC 试验,检验了含有 70% δ 铁素体的焊缝金属氢致裂纹敏感性。图 2 为以 Ar + 10% H_2 混合气体保护焊接时,焊缝金属中所施应力与断裂时间的关系曲线。可见,随着外加应力的减小,断裂时间增加;当应力小于 800MPa 时,试样经 96h 未断。而断裂试样的断口呈准解理断口特征,如图 3 所示。当以纯 Ar 作保护气体焊接时,焊缝金属的拉伸断裂应力约为 980MPa,而且断口呈韧窝状。这些结果表明,含有 70% δ 铁素体的双相不锈钢焊缝金属在氢及应力的作用下会产生氢致延迟裂纹。

在 WM-SERT 试验中,用与前面试验成分相同的焊丝,研究了含氢试样拉伸时,

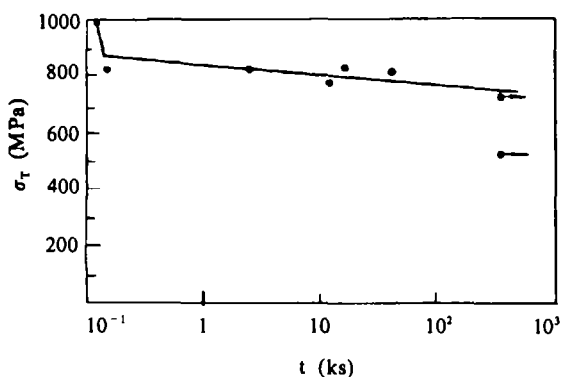


图 2 LB-TRC 试验时焊缝中的应力与断裂时间的关系

Fig.2 Relation between applied stress and fracture time in LB-TRC testing
Shielding gas: Ar + 10% H_2 , content of ferrite: 70%

试样的变形速率与拉伸断裂应力 $(\sigma_T)_H$ 和焊缝金属准解理断裂(Q.C.)面积分数的关系。结果表明,随焊缝变形速率下降, $(\sigma_T)_H$ 下降,断口的准解理断裂面积分数上升。当变形速率为 10^{-7} m/s时,由WM-SERT试验得到的 $(\sigma_T)_H$ 值与由LB-TRC试验得到的临界应力水平相似,并且两种试验的焊缝准解理断裂面积分数相似。

图4为当变形速率为 10^{-7} m/s时,在纯Ar和Ar+10%H₂气体保护下焊接的焊缝金属的“应力-变形”关系曲线。可以看出,无氢时焊缝可承受的最大拉伸应力 $(\sigma_T)_{Ar}$ 大大高于含氢时试样可承受的 $(\sigma_T)_H$,并且前者的“应力-变形”曲线下所包含的面积远大于后者,即氢使焊缝金属的断裂强度降低,脆性增大。

由此可见,用WM-SERT试验可以得到与LB-TRC试验相似的试验结果;最大拉伸应力 $(\sigma_T)_H$ 可以反映氢对焊缝金属性能的影响。因此,在进一步的试验中,以试样变形速率为 10^{-7} m/s时的WM-SERT试验的 $(\sigma_T)_H$ 作为本研究所用材料的裂纹敏感性指标。



×1100

图3 焊缝金属的准解理断口

Fig.3 Fracture surface of weld metal

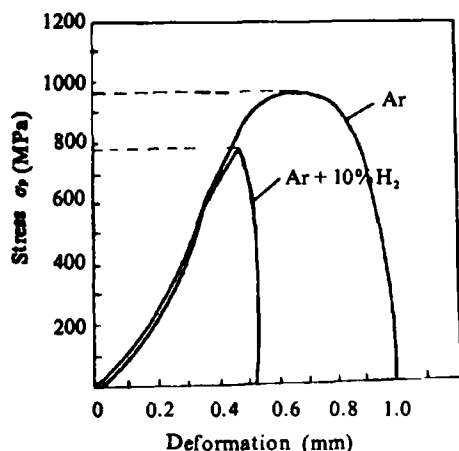


图4 WM-SERT 试验中应力与变形的关系

Fig.4 Relation between stress and deformation in WM-SERT test, ferrite content 70%

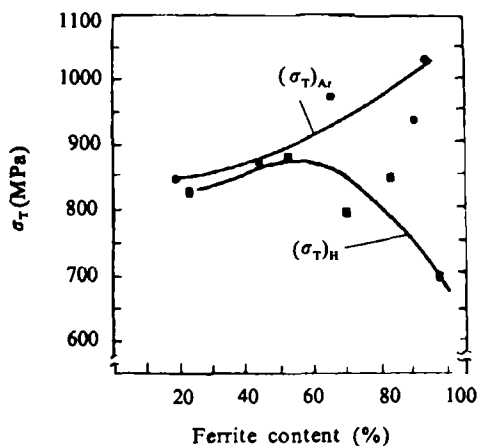


图5 焊缝金属 δ 铁素体含量对拉伸强度的影响

Fig.5 Effect of ferrite content on tensile strength in WM-SERT test

2.2 δ 铁素体含量与氢致裂纹敏感性的关系

图5示出了在Ar和Ar+10%H₂气氛中焊接时, σ_T 与焊缝金属 δ 铁素体含量间的关系。可见在无氢试样中, $(\sigma_T)_{Ar}$ 值随铁素体含量增加而增加;而对于含氢的焊缝金属,

$(\sigma_T)_H$ 值在 δ 铁素体含量超过 50% 时,随铁素体含量的增加而减小;焊缝中铁素体越多, $(\sigma_T)_H$ 下降得越多,如图 6 所示。图中 $\Delta\sigma_T$ 为在一定的 δ 铁素体含量时, $(\sigma_T)_{Ar}$ 与 $(\sigma_T)_H$ 的差值:

$$\Delta\sigma_T = (\sigma_T)_{Ar} - (\sigma_T)_H$$

以上结果说明,在保护气体中含氢量相同时,焊缝金属中 δ 铁素体含量越多,氢致裂纹敏感性越大。

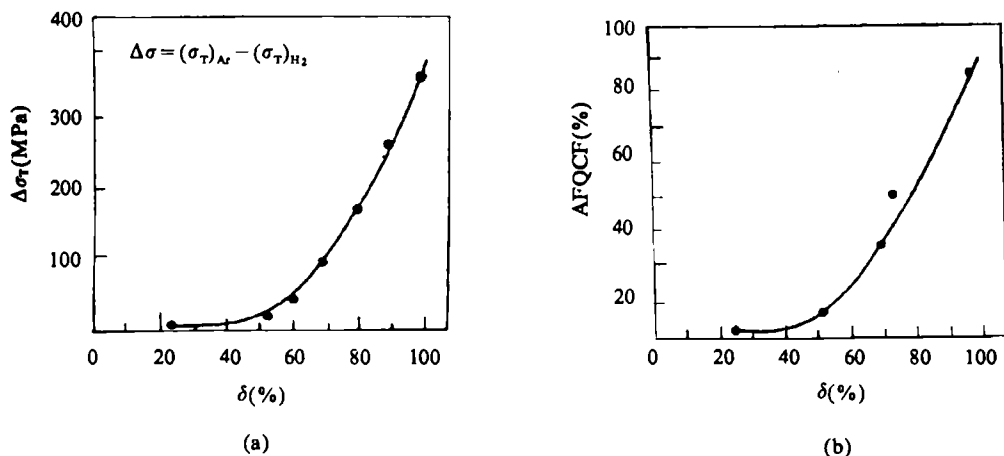


图 6 铁素体含量与 $\Delta\sigma_T$ (a) 和准解理断裂面积分数(b)的关系

Fig.6 Relation between ferrite contents and $\Delta\sigma_T$ (a) and area fraction of quasi-cleavage failure (AFQCF) (b)

铁素体含量与氢致裂纹敏感性的关系,一方面是由于焊接时,在保护气氛中氢分压不变的情况下,焊缝金属中吸收的氢大致相等;但氢在铁素体与奥氏体中的溶解度和扩散速度相差很大。这样,当焊缝金属 δ 铁素体含量增大时,氢在铁素体中的浓度也可能相应增大,加之其扩散速度快,导致焊缝金属的氢裂纹敏感性增大。尽管到目前为止,还没有一个很方便的办法测定双相不锈钢焊缝金属中各相所含氢量,但是,金属中含氢量增加时,拉伸试样断口的准解理断裂面积分数相应增加。通过分析本试验含氢试样断口上准解理断裂面积分数,可见随铁素体含量增加,准解理断裂面积分数增加(图 6b)。这与铁素体含量增加时 $\Delta\sigma_T$ 的变化趋势一致。由此可间接说明,当保护气体中含氢量一定时,焊缝金属氢裂敏感性随铁素体含量的增加而增加可能是由于铁素体中氢浓度增大所致。

另一方面, δ 铁素体含量增加时,奥氏体形态也发生了变化。图 7 示出了不同铁素体含量时焊缝金属的显微组织。可见,当 $\delta=23\%$ 及 53% 时,奥氏体为横穿整个铁素体晶粒的奥氏体板条(图 7a);当 $\delta=73\%$ 时,奥氏体主要为由铁素体晶界向晶内发展的魏氏体形态,并有少量奥氏体板条(图 7b);当 $\delta=84\%$ 时,沿晶界可发现少量魏氏体,没有横穿整个铁素体晶粒的奥氏体板条(图 7c);当 $\delta=98\%$ 时,则仅存在沿晶界析出的条状奥氏体(图 7d)。由于奥氏体塑性变形能力较大,可有效地阻止裂纹的扩展,即当铁素体中形成裂

纹并扩展到奥氏体区域时,奥氏体的塑性变形使裂纹尖端钝化,应力场强度因子降低,裂纹停止扩展;要使裂纹继续扩展,必须继续增加外力,使裂纹尖端应力场强度因子增大。如果奥氏体片与铁素体片交替排列且间距很小,则奥氏体对裂纹扩展的阻碍作用较大。因此当 δ 铁素体含量较少时(少于50%),奥氏体对裂纹扩展的阻力很大,焊缝对氢致裂纹不很敏感;但若 δ 铁素体含量较多(多于50%),奥氏体对裂纹扩展的阻力减小,一旦在铁素体中形成裂纹,就有可能较快地扩展而形成大裂纹,以致裂纹失稳扩展而断裂。

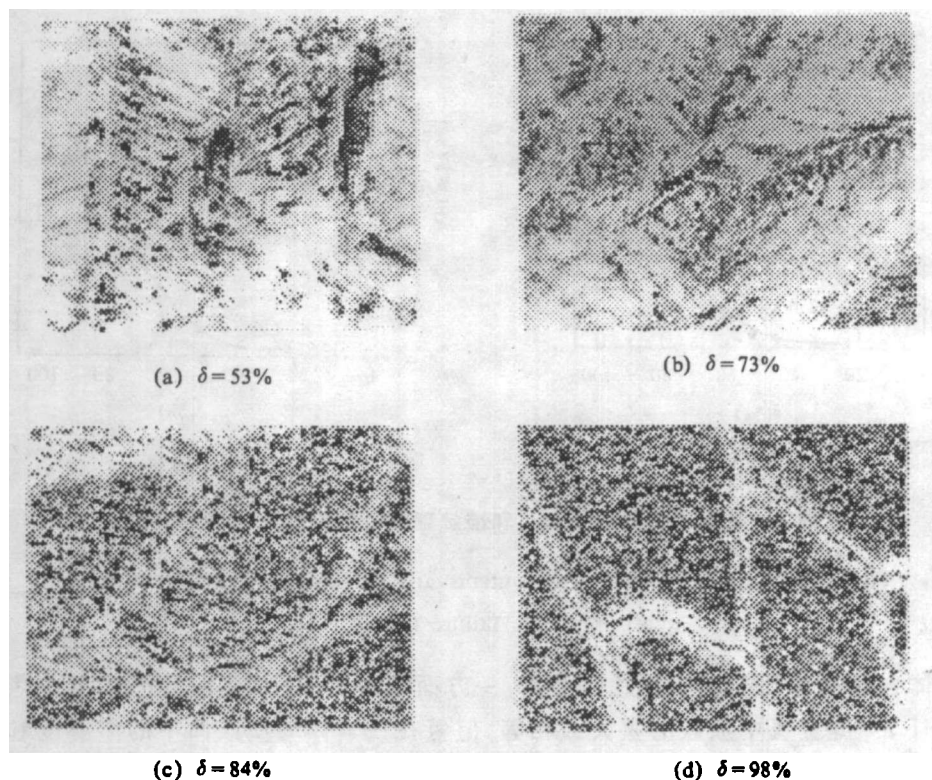


图7 不同铁素体含量时焊缝金属的显微组织

Fig.7 Microstructure of weld metal of different ferrite content

3 结 论

(1)含70% δ 铁素体的双相不锈钢焊缝金属,在LB-TRC试验条件下呈现氢致裂纹敏感性。可用WM-SERT试验代替LB-TRC试验监测这种裂纹敏感性。二者均可给出焊缝金属氢裂敏感性的定量指标。

(2)在双相不锈钢焊缝金属中,当 δ 铁素体含量超过50%后,随铁素体含量的增加,氢致裂纹敏感性大大增加。

(3)氢致裂纹的扩展,受原 δ 铁素体晶界处奥氏体板条或晶内奥氏体板条的抑制。奥氏体板条越多,对裂纹扩展的阻力越大。

参 考 文 献

- 1 Lau T and North T H. Canadian metallurgical quarterly, 1988, 27:65
- 2 Miura M and Ogawa. 1987, IIW Doc., IIX-1461-87.
- 3 Fekken U, Nassau Van L and Verwey M. Proc. of International Congress, Duplex Stainless steel, 86, Netherlands, October, 1986.
- 4 Peng T P and Altstetter C J. Cracking kinetics of two-phase stainless steel alloys in hydrogen gas. Metall. Trans. A, 1988, 19A(1):145 ~ 152
- 5 Costa J E, Williams J C and Thompson A W. The effect of hydrogen on mechanical properties in Ti-10V-2Fe-3Al. Metall. Trans. A, 1987, 18A(8):1421 ~ 1430

**Influence of ferrite contents in duplex stainless steel weld metal on hydrogen
cracking susceptibility**

Ke Liming

(Nanchang Institute of Aeronautical Technology)

Abstract The influence of ferrite contents in duplex stainless steel weld metal on hydrogen cracking susceptibility was investigated quantitatively by means of the Longitudinal Butt-Tensile Restraint Cracking (LB-TRC) test and the Weld Metal-Slow Extension Rate Test(WM-SERT) methods and by using laboratory made filler wire with various compositions and TIG welding method with Ar+H₂ mixed shielding gas. It is shown that the weld metal is not susceptible to hydrogen cracking until the ferrite content in duplex stainless steel weld metal reached 50%, and when ferrite content is more than 50%, its hydrogen cracking susceptibility markedly increases with the increase of ferrite content.

Key words hydrogen cracking; duplex stainless steel; welding metal; ferrite