

· 试验研究 ·

## 作用应力对 2.25Cr-1Mo 合金钢回火脆性的影响

周昌玉 胡桂明 孙宇

(南京工业大学机械与动力工程学院, 南京 210009)

**摘要** 在 146.7 MPa 的作用应力下, 对加氢反应器材料 2.25Cr-1Mo 合金钢( % : 0.15C, 2.32Cr, 0.95Mo, 0.011S, 0.009P, 0.0068As, 0.0035Sb, 0.0079Sn, 0.01V) 进行 468 °C 125 h 和 400 h 的等温回火脆化试验。根据加氢反应器母材试块脱脆、脆化和应力作用 3 种状态冲击功和温度关系曲线, 得出各状态回火脆性转变温度  $VT_{r54.2}$  (°C) 值和回火脆化度  $\Delta VT_{r54.2}$  (°C)。结果表明, 温度和等温时间是导致材料回火脆化的主要因素, 作用应力对 2.25Cr-1Mo 钢回火脆性的影响不显著。

**关键词** 2.25Cr-1Mo 钢 加氢反应器 作用应力 回火脆性

## Influence of Applied Stress on Temper Embrittlement of 2.25Cr-1Mo Alloy Steel

Zhou Changyu, Hu Guiming and Sun Yu

(College of Mechanical and Power Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009)

**Abstract** The isothermal tempering embrittlement test of 2.25Cr-1Mo alloy steel ( % : 0.15C, 2.32Cr, 0.95Mo, 0.011S, 0.009P, 0.0068As, 0.0035Sb, 0.0079Sn, 0.01V) for hydrogenation reactor with 146.7 MPa applied stress at 468 °C for 125 h and 400 h has been carried out. Based on the relation curves of temperature and impact energy of hydrogenation reactor parent metal sample at 3 kinds of status - de-embrittling, embrittling and applied stress, the temper embrittlement transition temperature  $VT_{r54.2}$  (°C) value at each status and temper embrittlement damage  $\Delta VT_{r54.2}$  (°C) were obtained. The results showed that temperature and isothermal time were main factors led to material embrittlement while the influence of applied stress on temper embrittlement of 2.25Cr-1Mo steel was not obvious.

**Material Index** 2.25Cr-1Mo Steel, Hydrogenation Reactor, Applied Stress, Temper Embrittlement

热壁加氢反应器的工作温度在 400 ~ 450 °C 范围内, 其材料 2.25Cr-1Mo 合金钢的回火脆化敏感性较高, 在反应器运行过程中, 材料产生回火脆化是不可避免的, 对加氢反应器的危害很大。随着反应器使用寿命的延长, 由于筒体材质的回火脆化而导致脆性破坏事故发生的可能性也在逐渐增大。因此, 对加氢反应器材料的回火脆化研究一直是工业界关注的问题。

测定材料的回火脆化程度, 一般通过对材料的脆化处理和脱脆处理获得, 即通过比较材料在脱脆和脆化情况下的断口转变温度 (FATT, Fracture Appearance Transition Temperature) 和回火脆性转变温度 ( $VT_{r54.2}$ ) 的增量比较材料的脆化度。过去对加氢反应器材料回火脆性的研究一般考虑了时间和温度的影响, 但对应力的影响讨论较少。

日本学者 Masahide 等<sup>[1]</sup> 曾研究了应力对 2.25Cr-1Mo 合金钢回火脆化的影响, 认为在合金钢中含有足够多的 P (P = 0.011%) 及在较高应力水平下 (331 MPa), 应力对 2.25Cr-1Mo 合金钢的脆化有

一定的影响。另一些学者则从金属材料热力学和动力学出发, 得到作用应力引起的溶质晶界偏聚和贫化的实验结果<sup>[2,3]</sup>, 提出低应力引起溶质晶界偏聚或贫化的模型<sup>[4,5]</sup>。

基于目前国内热壁加氢反应器材料回火脆化的研究现状, 开展了应力作用下的材料回火脆性研究。对 2.25Cr-1Mo 材料在高温 (468 °C) 下, 分别等温脆化 125 h 和 400 h, 在应力作用下 (应力水平 146.7 MPa), 探讨应力、温度对材料脆性的综合影响。

### 1 试验方法和步骤

#### 1.1 试验方法

应力对 2.25Cr-1Mo 合金钢材料回火脆性影响的试验设计, 采用应力作用试样并等温脆化试验方法。将 2.25Cr-1Mo 试样置于加热炉内, 作用一定的应力, 在一定温度下, 保持一定时间, 使材料产生回火脆化, 然后与同样条件下但未承受应力作用的试样加以比较, 通过冲击试验, 得出二者回火脆化度的差异, 从而判断作用应力对 2.25Cr-1Mo 合金钢回火脆化的影响。

试验的试样作用应力水平由加氢反应器操作压力引起的最大应力(146.7 MPa)确定。试验温度考虑 2.25Cr-1Mo 合金钢在试验条件下的回火脆性和尽量减少蠕变对回火脆性的影响。由此最终选择的试验温度为 468 °C;保温时间分别为 125 h 和 400 h。

试验材料来自加氢反应器内试块,试验材料

2.25Cr-1Mo 合金钢的化学成分见表 1。拉伸试样的尺寸,依据试样承载后截面应力与反应器筒体最大应力相等的原则进行设计。

脱脆试验在自制加热炉内进行;部分试样需要作用应力,其等温脆化试验在 RD2-3 型高温蠕变试验机上实施;冲击试验在 JBD-30C 型冲击试验机上完成。

表 1 2.25Cr-1Mo 钢的化学成分/%

Table 1 Chemical composition of steel 2.25Cr-1Mo / %

C	Si	Mn	S	P	Cr	Mo	As	Sb	Sn	Ni	Cu	V
0.15	0.07	0.50	0.011	0.009	2.32	0.95	0.006 8	0.003 5	0.007 9	0.19	0.01	0.01

## 1.2 试验步骤

(1)试样分割:将原放置于反应器内试块加工为承受拉伸载荷试样,共 6 组(X5101、X6101、X7101、X8101A、X8101B、X8101C 组),每组 12 个试样。

(2)脱脆:将 6 组试样分别放置加热炉中脱脆;脱脆工艺:630 °C 保温 2 h,空冷。

(3)等温脆化试验:X7101、X8101B 组试样脱脆后不再进行其它试验,其冲击试验转变温度作为其它组求取脆化度的基准。其它 4 组试样分别成对放置在 RD2-3 高温蠕变试验炉内进行等温脆化试验。各组的等温时间为:X5101 和 X6101 保温 125 h,其中 X5101 组试样有应力作用,X6101 组试样无应力作用;X8101A 和 X8101C 保温 400 h,X8101A 组试样有应力作用,X8101C 组试样无应力作用。在设定温度和保温时间下进行试验。等温脆化试验过程为:首先在 3 h 内升温(无应力)到 468 °C,之后再开始应力作用,使试样达到 146.7 MPa 的应力水平,并且保持 468 °C 温度达到 125 h 或 400 h 再卸载,然后炉冷。各组试样的等温脆化试验条件见表 2。

(4)冲击试验:待各组试样等温脆化试验完成之后,将全部试样按照 GB/T229-1994《金属夏比缺口冲击试验方法》加工成冲击小试样(mm:10×5×55),每组试样分别为 24 个,并进行冲击试验的测定,从而获得在脱脆、无应力作用脆化和应力作用脆化情况下,材料的冲击功性能曲线,并加以比较。由此,找出应力对回火脆性转变温度  $VT_{r54.2}$  的影响,即作用应力对材料回火脆性的影响。

## 2 小试样与标准试样冲击功的关系

夏比 V 型缺口冲击试样有标准试样(全尺寸试样 mm:10×10×55)和小尺寸试样(非全尺寸试样

表 2 2.25Cr-1Mo 钢 468 °C 125 h 和 468 °C 400 h 热处理的韧-脆转变温度及回火脆化度

Table 2 Toughness-embrittlement transition temperature and temper embrittlement damage for samples of steel 2.25Cr-1Mo heat treated at 468 °C for 125 h and 468 °C for 400 h

试样编组 代号	试样 数量/个	处理状态	$VT_{r54.2}/$ °C	$\Delta VT_{r54.2}/$ °C
X7101, X8101B	48	脱脆态(630 °C 2 h,空冷)	-79.1	
X6101	24	脱脆+468 °C 125 h 脆化	-63.7	15.4
X5101	24	脱脆+468 °C 125 h 应力作用脆化	-66.0	13.1
X8101C	24	脱脆+468 °C 400 h 脆化	-50.0	29.1
X8101A	24	脱脆+468 °C 400 h 应力作用脆化	-52.8	26.3

mm:10×5×55)两种类型。所以在绘制冲击功温度变化曲线图时,取合适的冲击功值十分重要<sup>[6]</sup>。

实验表明,在具有韧-脆转变温度特性的夏比 V 型缺口系列温度冲击试验中,在下平台温度下,试样处于平面应变状态,其冲击功几乎都耗费于产生两个新的自由表面而很少耗费于产生塑性变形。在这种情况下,标准试样由于截面积较大,其力学约束条件更严,一般情况下,冲击功也应略大;但相对其尺寸的增加,冲击功几乎没有增加,标准试样因此显得更脆一些。在下平台温度下,小尺寸试样冲击功与标准试样冲击功的差别很小,也就是说,  $(A_{K5}/A_{K10})_下$  最大。

在上平台温度下,试样处于全塑性断裂状态,其冲击功耗费于产生两个新自由表面和一定体积的塑性变形。显然,截面大的标准试样消耗的冲击功明显大得多,即标准试样的冲击功比小尺寸试样的大得多,也即  $(A_{K5}/A_{K10})_上$  最小。在上平台温度下,试样的冲击功受其截面尺寸的影响大,小尺寸试样冲击功与标准试样冲击功的比值,随小尺寸试样宽度

的减小而呈线性缩减,即  $A_{K5}/A_{K10} \approx 0.5$ 。

在过渡区温度下,小尺寸试样冲击功与标准试样冲击功的比值为中间值。对此,国际上通行的比例数是  $A_{K5}/A_{K10} = 2/3$ ,基本上等于包括上下平台温度在内的各系列温度下小尺寸试样冲击功与标准试样冲击功比值的平均值。即

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (A_{K5}/A_{K10})_i \rightarrow \frac{2}{3}$$

在本研究冲击功数据处理中,采用此转换关系,即以1.5倍的小试样冲击功值获取标准试样的冲击功值。

### 3 各种状态韧-脆转变温度的比较

根据上述加氢反应器母材试块脱脆态、脆化态、应力作用脆化态冲击试验结果与温度的关系曲线,可以获得各种状态的回火脆性转变温度  $VT_{r54.2}$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) 值,并由此获得各种状态的回火脆化度。以脱脆态韧-脆转变温度为基准,将脆化态与应力作用脆化态的韧-脆转变温度与之对比,可以求得它们的差值,从而显现不同等温脆化试验条件对材料回火脆性的影响。

图1利用 Boltzmann 函数<sup>[7]</sup>,给出了5种状态下冲击功曲线及其回火脆性转变温度  $VT_{r54.2}$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) 值,各种状态下材料的回火脆化度见表2。

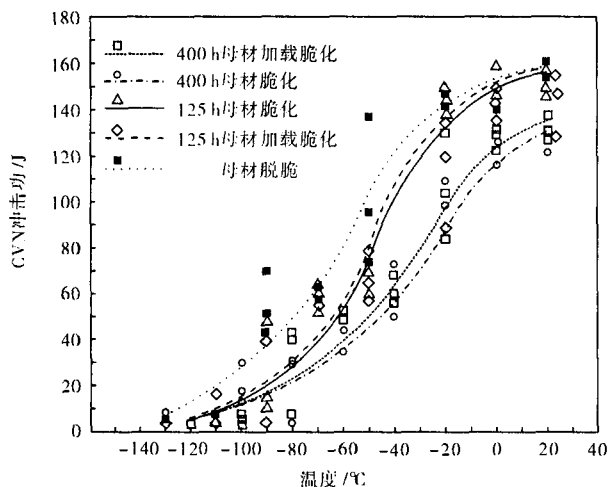


图1 2.25Cr-1Mo钢在不同处理状态下的试验温度-冲击功曲线

Fig.1 Test temperature-impact energy curves of steel 2.25Cr-1Mo at different heat treatment status

通过对试块的脱脆、再脆化和应力作用脆化试验,图1和表2的结果表明:

(1) 经过468  $^{\circ}\text{C}$  保温125 h的有应力作用或无

应力作用脆化试验,反应器试块材料均发生明显的脆化现象,韧-脆转变温度  $VT_{r54.2}$  升高至  $-66.0^{\circ}\text{C}$  和  $-63.7^{\circ}\text{C}$ ,脆化度  $\Delta VT_{r54.2}$  分别达  $13.1^{\circ}\text{C}$  和  $15.4^{\circ}\text{C}$ ,两者的回火脆化度接近;

(2) 经过468  $^{\circ}\text{C}$  保温400 h的有应力作用或无应力作用脆化试验,反应器试块材料进一步发生明显的脆化现象,韧-脆转变温度  $VT_{r54.2}$  升高至  $-52.8^{\circ}\text{C}$  和  $-50.0^{\circ}\text{C}$ ,脆化度  $\Delta VT_{r54.2}$  分别达  $26.3^{\circ}\text{C}$  和  $29.1^{\circ}\text{C}$ ,两者的回火脆化度接近;

(3) 经过468  $^{\circ}\text{C}$  保温400 h的应力作用或无应力作用脆化试验下,反应器试块材料的脆化度远大于468  $^{\circ}\text{C}$  保温125 h材料的脆化度;

(4) 通过应力作用脆化试样与无应力作用脆化试样脆化量的比较可知,应力对2.25Cr-1Mo合金钢的回火脆性的影响不显著。

### 4 结论

对于成分(%)为: 0.15C、2.32Cr、0.95Mo、0.011S、0.009P、0.0068As、0.0035Sb、0.0079Sn、0.01V的加氢反应器材料2.25Cr-1Mo钢,在468  $^{\circ}\text{C}$  保温125 h和400 h下,146.7 MPa的应力作用或无应力作用脆化试验的结果表明,温度和等温时间是导致材料回火脆化的主要影响因素,应力对2.25Cr-1Mo合金钢的回火脆性的影响不显著。

### 参考文献

- Masahide S, Kiyoshi F, Tastsuo O. Effect of Applied Stress on the Temper Embrittlement of  $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo Steel. Transactions of Iron and Steel Institute of Japan, 1982, 22(11): 862
- Shinoda T, Nakamura T. The Effects of Applied Stress on the Intergranular Phosphorus Segregation in a Chromium Steel. Acta Metall, 1981, 29: 1631
- Misra R D K. Issues Concerning the Effects of Applied Tensile Stress on Intergranular Segregation in a Low Alloy Steel. Acta Mater, 1996, 44(3): 885
- 徐庭栋,李庆芬,杨尚林.低作用应力引起的溶质在晶界非平衡偏聚或贫化.钢铁研究学报,2001,13(4): 28
- 徐庭栋.固体中应力产生和消除空位及非平衡晶界偏聚.中国科学(E辑),2003,33(2): 199
- 曹声驹.大小试样冲击功比值变化规律的研究.材料开发与应用,1999,14(4): 30
- 周昌玉,夏翔鸣. CrMo 钢材料韧脆转变温度曲线的回归分析.压力容器,2003,20(6): 13

周昌玉(1963-),男,博士,教授,从事化工设备的可靠性和寿命预测的研究。

收稿日期:2006-05-13