

# 分级加载试验评定氢脆敏感性研究

李西颜 刘春立 王晓薇 张涛

(航天材料及工艺研究所,北京 100076)

**摘 要** 采用分级加载技术对 30CMnSiA 氢脆敏感性进行了试验研究,对不同强度、电镀参数、镀前处理和镀后处理状态的试样进行了氢脆敏感性试验,并与 200 h 恒载试验结果进行了比较。结果表明,分级加载方法可快速评价材料的氢脆敏感性,提出了采用分级加载方法进行氢脆敏感性定量评价的参数。

**关键词** 氢脆,氢脆敏感性,30CMnSiA,分级加载试验

## Hydrogen Embrittlement Sensitivity by Incremental Step Loading Technique

Li Xiyan Liu Chunli Wang Xiaowei Zhang Tao

(Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076)

**Abstract** This thesis researched on the material's hydrogen embrittlement sensitivity evaluate of 30CMnSiA, with grade to load technique. And have many hydrogen embrittlement sensitivity tests for different specimens intensity level, plating parameter, the state of before plating treatment and after plating treatment. Then, compare with the result of 200 h invariable load test. It is indicate that, the method of grade to load can quickly evaluate the hydrogen embrittlement sensitivity of material. At the end of this thesis, the parameter that quantitative evaluate hydrogen embrittlement sensitivity, with the method of grade to load technique, have been brought forward.

**Key words** Hydrogen embrittlement, Hydrogen embrittlement sensitivity, 30CMnSiA, Incremental step loading technique

### 1 引言

30CMnSiA 钢因为具有较高强度,较好耐磨性和高温性能,大量用于承力结构件和紧固件,且多数采用电镀锌、镉工艺进行表面防护,存在氢脆隐患,因此研究氢脆敏感性的快速定量评价试验方法,对于解决产品氢脆敏感性评价和为氢脆控制和预防研究提供依据,有重要的意义<sup>[1-6]</sup>。

缺口试样 200 h 恒载试验,是判定材料氢脆敏感性的传统方法,我国 HB—5067 (氢脆试验标准方法)对氢脆敏感性进行定性判定——通过或不通过。其主要问题是试验本身耗时太多,完成一次评定试验需要一周或更长时间,效率低。另外,200 h 恒载试验不能给出氢致裂纹形成的时间以及材料避免氢脆发生的应力阈值。

本文以 30CMnSiA 为研究对象,研究不同热处理状态和表面处理状态样品的氢脆敏感性;采用增量加载方法对氢脆敏感性快速试验方法进行的可行性

进行研究;用增量加载方法对氢脆敏感性定量评价进行探索性研究。

### 2 分级加载与 200 h 恒载试验

#### 2.1 200 h 恒载试验结果

分别选取两种硬度状态,16 种不同状态的试样进行 200 h 恒载试验,结果见表 1。

表 1 200 h 恒载试验结果

Tab 1 Result of 200 h invariable load test

HRC51 试样	结果	HRC42 试样	结果
1#	24 h 断	2#	未断
3#	10 h 断	4#	未断
5#	53 h 断	6#	23 h 断
7#	24 h 断	8#	未断
11#	10 h 断	12#	未断
13#	3.5 h 断	14#	未断
15#	10 h 断	16#	开裂
17#	3 h 断	18#	10 h 断

收稿日期:2007-09-30

作者简介:李西颜,1979 年出生,硕士,主要从事金属材料 and 多功能复合材料力学性能测试技术研究工作

对进行 200 h 恒载试验的 16 种状态试样进行分级加载试验,以 200 h 恒载试验的结果为参照标准,对分级加载试验的结果进行验证。

## 2.2 分级加载试验

分级加载试验<sup>[7]</sup>是根据 ASTM F1624 标准制定试验方案。该方法是试样按照一定的步数阶梯加载,到达设定的载荷后进行保持,位移控制。一般情况下,由于蠕变、裂纹萌生等因素,载荷随时间延长而下降,根据载荷—时间的曲线的变化,判断是否出现亚临界裂纹。

### 2.2.1 试验方案

分级加载试验方法:对 HRC 48 的试样,由于材料的氢脆敏感性较高,所以采用 8 级加载法,加载速度为 100 N/s;对 HRC < 48 的试样,由于材料的氢脆敏感性较小,所以需要更长的试验时间才能对其氢脆敏感性做出比较准确的定量评价,所以采用 20 级加载法,加载速度为 50 N/s。试验步骤如下:(1) 8 级加载法:载荷以 12.5%  $p_c$  递增,每一载荷等级位移保持 1 h;(2) 20 级加载法:载荷以 5%  $p_c$  递增,每一载荷等级位移保持 1 h。

### 2.2.2 试样发生氢脆开裂的判断依据

在进行应力松弛试验时,由于材料蠕变、连接状态、裂纹萌生等因素,应力随时间延长将发生松弛。一般情况下,当不存在裂纹萌生行为时,应力松弛速率逐渐减小,经过一段时间位移保持后应力变化趋于稳定;当出现微裂纹时,应力松弛速率将增大。

根据 ASTM F1624 方法中所描述,在分级加载试验和测定氢脆门槛值的试验中,判断试样是否产生裂纹或发生开裂的依据如图 1。A 状态是表示正常的实验状态;载荷衰减出现 B 状态、C 状态则表明此时试样内部有裂纹萌生或发生开裂。

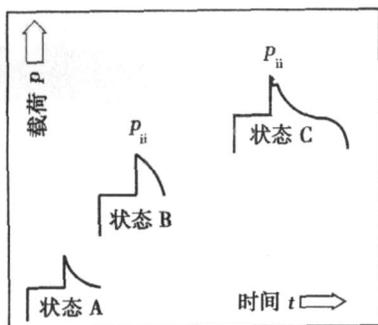
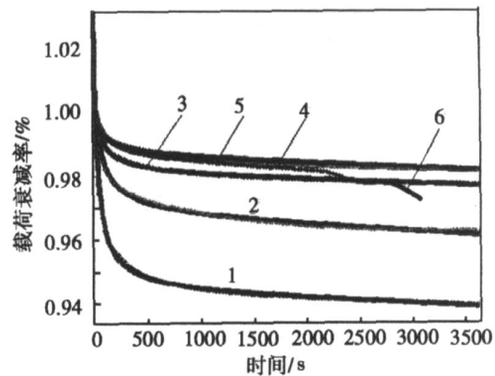


图 1 分级加载试验中载荷衰减类型

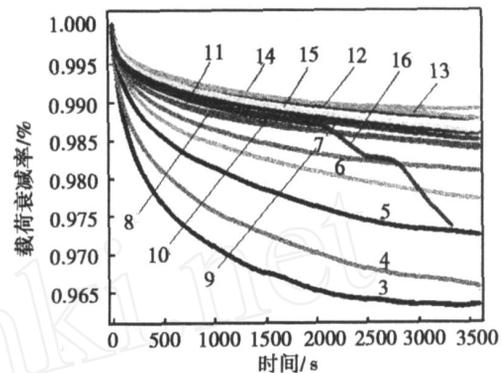
Fig 1 Types of load attenuation in incremental step loading test

### 2.2.3 典型试验曲线

选取典型的 8 级和 20 级加载试验的载荷衰减归一化曲线,如图 2。



(a) 8 级加载



(b) 20 级加载

图 2 8 级、20 级分级加载试验中载荷衰减归一化曲线

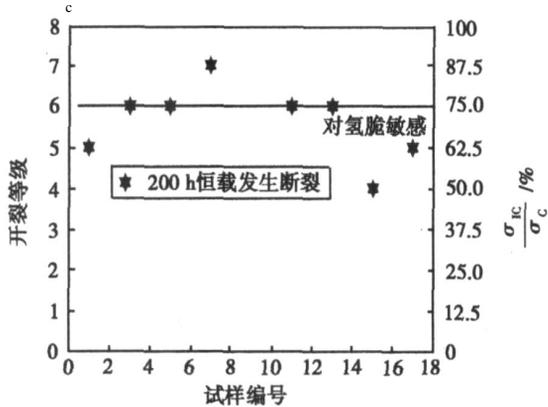
Fig 2 Unitary curves of load attenuation in 8 and 20 steps loading test

如图 2(a) 所示,选取 5<sup>#</sup> 试样进行分析,其载荷衰减归一化曲线包含了 A 和 C 两种载荷衰减状态。试样在第 6 级位移保持时载荷出现 C 类型的衰减,说明试样在第 6 级位移保持过程中至少有两处发生开裂或裂纹扩展。如图 2(b) 所示,选取 2<sup>#</sup> 试样进行分析,其载荷衰减的归一化曲线包含了 A 和 C 两种载荷衰减状态。试样在第 16 级位移保持出现两次 C 状态的衰减。第 16 级位移保持结束后在电镜下观察,发现试样缺口处已经明显开裂。因此可以证明,通过分析试样的载荷衰减的归一化曲线可以判断试样是否有氢脆。

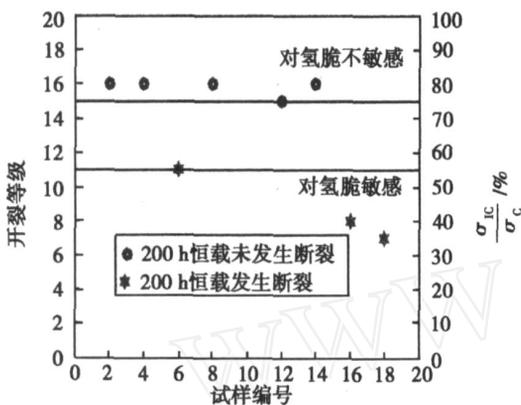
### 2.2.4 结果分析

200 h 恒载试验只能对材料氢脆敏感性进行定性评价,而分级加载试验可以定量的分析材料的氢脆敏感性。在分级加载试验中两个主要的参数,试样开裂等级和试样开裂应力  $\sigma_c$  与缺口强度  $\sigma_0$  的百分比,能够比较准确的对材料的氢脆敏感性进行定量的评价。如图 3 为 8 级和 20 级加载试验结果。从图 3 中可以看出,有一半的 8 级加载试验是在第 6 级位移保持中发生开裂;而试样的  $\frac{\sigma_c}{\sigma_0}$  的百分比大部分集中在 70% ~ 80%。在第 6 级以下发生开裂的试样对氢脆

敏感;  $\frac{\sigma_{IC}}{\sigma_c}$  的百分比在 70% 以下的试样对氢脆敏感。



(a) 8级加载



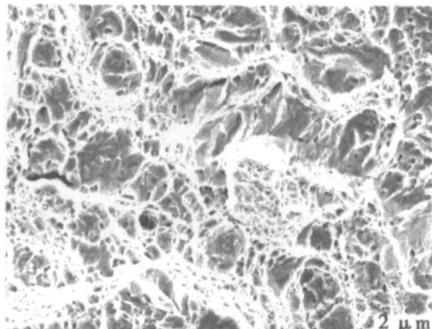
(b) 20级加载

图 3 8级、20级加载试验结果

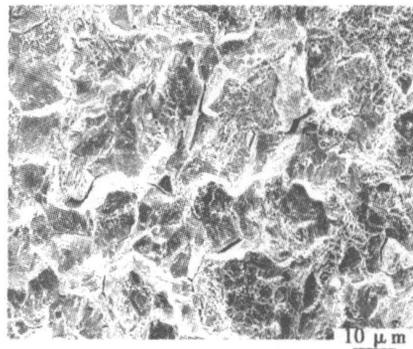
Fig 3 Results of 8 and 20 steps loading test

8级加载试验的试样在 200 h 恒载试验中均发生断裂,但是其氢脆敏感系各不相同,因此也可以根据开裂载荷的等级以及  $\frac{\sigma_{IC}}{\sigma_c}$  的百分比来判断材料氢脆敏感性的大小。

以 7<sup>#</sup>与 17<sup>#</sup>试样的试验结果为例,7<sup>#</sup>的开裂载荷较高,17<sup>#</sup>试样的开裂载荷较低,可以认为 7<sup>#</sup>试样的氢脆敏感性比 17<sup>#</sup>试样的氢脆敏感性低。将两种状态试样的断口形貌相比较,17<sup>#</sup>试样的断口形貌脆(图 4)性特征更为明显,所以,可以认为,根据开裂等级的不同,可以比较两种试样的氢脆敏感性的大小。



(a) 7<sup>#</sup>状态



(b) 17<sup>#</sup>状态

图 4 7<sup>#</sup>与 17<sup>#</sup>试样断口形貌

Fig 4 Fracture surface morphology of 7<sup>#</sup> and 17<sup>#</sup> specimens

20级加载试验中有 50%的试样是在第 16级位移保持中发生开裂;而试样的  $\frac{\sigma_{IC}}{\sigma_c}$  百分比大部分集中在 70% ~ 80%。

分级加载试验中在 15级以上发生氢脆开裂的低强度状态试样对氢脆不敏感,所以  $\frac{\sigma_{IC}}{\sigma_c}$  的百分比大于 75%的低强度状态试样的氢脆敏感性较低;在 11级以下发生开裂的试样对氢脆敏感,所以  $\frac{\sigma_{IC}}{\sigma_c}$  的百分比小于 55%的低强度状态试样的氢脆敏感性较高。

### 2.2.5 结果讨论

减少载荷等级可以提高判断低强度状态试样的精确度。对于 20级加载试验,虽然可以根据试样发生开裂的载荷等级来判断材料的氢脆敏感性,但是不确定的范围较大,这样会对评价材料的氢脆敏感性造成一定的影响。此外,判断材料氢脆敏感性的上、下限的范围也比较宽。但是如果适当的减少试验的载荷等级(比如 16级加载试验),不仅可以缩小不确定范围,提高判断低强度状态试样的精确度,还可以节省试验的时间。

### 3 分级加载与恒载试验结果的对比

(1)分级加载试验的结果与恒载试验的结果一致,分级加载试验可以代替恒载试验判定钢的氢脆敏感性。

(2)分级加载试验可以定量的评价材料的氢脆敏感性,200 h恒载试验只能定性的评价材料的氢脆敏感性,分级加载试验可以通过试样发生氢脆开裂的等级、开裂时间以及开裂应力等参数定量的评价材料的氢脆敏感性。分级加载试验所获得的试验结果的信息更多,对于研究材料氢脆断裂门槛值有重要意义。

(3)用 200 h恒载试验评价材料的氢脆敏感性,宇航材料工艺 2007年 第 6期

时间比较长,分级加载试验可以在 20 h 以内对低强度状态试样的氢脆敏感性进行定量的评价,如果对分级加载试验进行适当的修正,使其可以较好的用来评价高强度状态试样的氢脆敏感性,将会更加节省时间。

#### 4 结论

(1)用分级加载试验可以代替 200 h 恒载试验来定量的评价材料的氢脆敏感性。两种试验方法所得到的材料氢脆敏感性的评价结果一致。如果对分级加载试验进行适当的修正,则可以提高评价材料氢脆敏感性的准确性。

(2)8级加载试验中,可以用 $\frac{F_c}{F_c}$ 的百分比来比较同样对氢脆敏感的不同状态的试样之间的氢脆敏感性的大小,可用于工程优选材料。

(3)20级加载试验中, $\frac{F_c}{F_c}$ 的百分比在 75% 以上的低强度状态试样对氢脆不敏感; $\frac{F_c}{F_c}$ 百分比在 55% 以下的试样对氢脆敏感。而介于 55% ~ 75% 的部分有可能是对氢脆敏感的区域。这一结果与 200 h 恒载试验中 75% 缺口强度的恒定试验载荷相对应。

(4)提出了定性和半定量评价材料氢脆敏感性

的依据,对于快速、定量评价材料的氢脆敏感性有重要的意义,但是本文只是探索性研究,其结果需要大量的试验数据予以证明。

总之,分级加载试验与 200 h 恒载试验相比有一定的优越性,如果能够在工程上应用将会大大提高工作效率和工作质量。

#### 参考文献

- 1 贺书奎,王广生,王峙南. 航空用高强度钢的氢脆问题. 航空科学技术, 1994; (6)
- 2 褚武扬. 氢损伤和滞后断裂. 北京:冶金工业出版社, 1988: 10
- 3 张振. 高强度紧固件镀锌中氢脆的产生环节及控制措施. 材料保护, 2003; (1)
- 4 刘贵明,秦月文. 高强度钢低氢脆光亮镀镉. 材料保护, 1994; (7)
- 5 文斯雄. 电镀锌弹性零件断裂的原因分析. 腐蚀与防护, 2000; (1)
- 6 HB5067 - 85 氢脆实验方法
- 7 ASTM Designation F1624 - 95 (Reapproved 2000), Standard Test Method for Measurement for Hydrogen Embrittlement in Steel by the Incremental Loading Technique

(编辑 吴坚)