

## 13.9 级 ADF1 发动机螺栓的延迟断裂分析

郑琛, 朱金华

(西安交通大学 材料科学与工程学院, 陕西 西安 710049)

**摘要:**以 10.9 级 42CrMo 表面磷化处理螺栓为对比,采用拉伸延迟断裂试验法,在空气和 3.5% NaCl 水溶液中对 13.9 级 ADF1 表面 DAC 处理螺栓进行延迟断裂试验,并用扫描电镜对延迟断裂断口特征进行了微观观察。试验结果表明,13.9 级 ADF1 螺栓具有高的延迟断裂强度,在大气中的断口形貌主要是韧窝,在 3.5% NaCl 水溶液中呈现韧窝和沿晶的混合形貌。

**关键词:**高强度螺栓;延迟断裂;氢

**中图分类号:**TH131.3 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-3516(2003)05-0010-03

延迟断裂是指在静止应力作用下的材料,经过一定时间后突然脆性破坏的一种现象。由于高强度螺栓属于应力集中严重的多缺口零件,承受轴向预紧拉伸应力和工作应力,此应力与螺栓中的氢发生相互作用往往会引起延迟断裂。

延迟断裂是妨碍机械制造用钢高强度化的一个主要因素<sup>[1-2]</sup>。许多研究已证明,钢的强度愈高,对延迟断裂愈敏感。就高强度螺栓而言,其抗拉强度超过 1 200 MPa 时,即使在自然环境中也隐藏着延迟断裂的可能性。目前,我国使用的高强度螺栓的抗拉强度基本在 1 200 MPa 以下,而提高螺栓强度对减轻机械产品重量,增大效能有着重要的作用。本文以目前普遍使用的 10.9 级 42CrMo 表面磷化处理螺栓为对比,对钢铁研究总院开发的 1 300 MPa 级的 ADF1 钢制成的 13.9 级表面 DAC 处理螺栓进行了延迟断裂实验研究,对其延迟断裂性能进行了讨论,并对两种表面处理的优劣进行了比较。

### 1 试验材料和方法

两种汽车发动机前悬挂螺栓的规格为 M10 × 1.25 × 110,其中 10.9 级 42CrMo 螺栓(抗拉强度为 1 124 MPa)表面进行磷化处理,13.9 级 ADF1 螺栓(抗拉强度为 1 425 MPa)表面进行 DAC 处理(锌铝铬涂层)。其热处理制度为:ADF1 钢在真空感应炉中冶炼。930 °C 保温 30 min 后油淬,然后在 600 °C 回火,保温 100 min,水冷。42CrMo 钢在 850 °C 保温 30 min 后油淬,然后在 550 °C 回火,保温 2 h,空冷。两种螺栓用钢的化学成分见表 1。

表 1 两种螺栓用钢的化学成分(质量分数,%)

钢号	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	Nb
42CrMo	0.39	0.29	0.80	0.025	0.019	1.08	0.22	-	-
ADF1	0.43	0.12	0.30	0.005	0.003	1.10	0.50	0.30	0.04

采用拉伸延迟断裂试验法在自制的试验机上进行延迟断裂试验,试验介质分别为大气和 3.5% NaCl 水溶液,并用 S2700 扫描电镜观察延迟断裂试样的断口形貌。

$\sigma_f$  为发生断裂的最小应力,  $\sigma_n$  为规定的截止时间  $t_c$  ( $t_c = 100$  h) 内不发生断裂的最大应力,则定义拉伸延迟断裂强度为<sup>[3]</sup>  $\sigma_c = 1/2(\sigma_f + \sigma_n)$  为使试验值与实际值的误差小于 10%,要求  $\sigma_f - \sigma_n \leq 0.2\sigma_c$ 。

收稿日期:2002-11-21

基金项目:国家“973”计划资助项目(G1998061503)

作者简介:郑琛(1977-),女,陕西西安人,硕士,主要从事机械强度研究;

朱金华(1941-),男,浙江金华人,教授,博士生导师,主要从事材料动态力学研究。

为讨论氢对螺栓延迟断裂的影响,本文对螺栓氢含量作了测定,氢含量分析样品取自螺纹部位,车去螺纹及表面涂层,用 RH-402 测氢仪分析氢含量。

## 2 试验结果和讨论

### 2.1 螺栓的延迟断裂强度及螺栓中的氢含量

10.9 级磷化处理螺栓、13.9 级 DAC 处理螺栓在大气和 3.5% NaCl 水溶液中延迟断裂强度及螺栓中氢含量见表 2。

表 2 螺栓的延迟断裂强度及螺栓中相应的氢含量

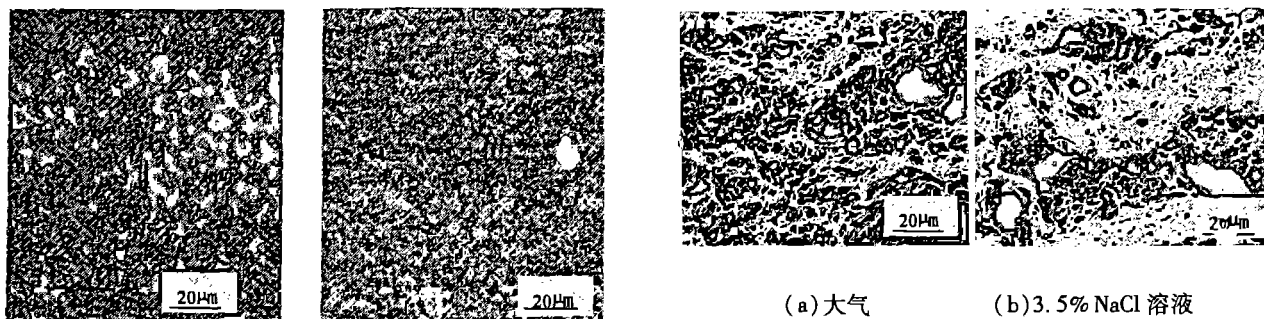
试样	介质	$\sigma_c$ /MPa	氢含量/ppm
10.9 级磷化螺栓	大气	1 095	0.9
10.9 级磷化螺栓	3.5% NaCl 水溶液	1 083	1.1
13.9 级 DAC 螺栓	大气	1 378	1.0
13.9 级 DAC 螺栓	3.5% NaCl 水溶液	1 340	1.4

由表 2 可见两种介质中 13.9 级 ADF1 表面 DAC 处理螺栓的延迟断裂强度均高于 10.9 级 42CrMo 表面磷化处理螺栓,这可能与螺栓的微观组织,加工工艺有关。ADF1 螺栓的微观组织比 42CrMo 螺栓明显细化,见图 1、图 2,这与 ADF1 钢里添加了微合金元素 V 和 Nb 有关。而且 ADF1 螺栓与 42CrMo 螺栓相比 P、S 等杂质含量显著减少,同时降低了促进 P、S 共偏析的 Mn 含量,而一般认为 P 和 S 等杂质元素在晶界的偏聚是导致高强度钢延迟断裂抗力显著下降的原因<sup>[4-5]</sup>, ADF1 螺栓中 P、S 等杂质含量的降低有利于提高螺栓的延迟断裂强度。

两种螺栓在 3.5% NaCl 水溶液中的延迟断裂强度均比大气中低,10.9 级磷化处理螺栓的延迟断裂强度降低了 1.0%,而 13.9 级 DAC 处理的螺栓降低了 2.7%。而在 3.5% NaCl 水溶液中两种螺栓的氢含量均大于其在大气中螺栓的氢含量,在 3.5% NaCl 水溶液中,因产生阴极反应而吸氢: $H^+ + e \rightarrow H$ ,更多的氢侵入到螺栓内部而使螺栓的延迟断裂强度变低。

### 2.2 断口分析

对延迟断裂试样断口作扫描电镜观察(图 3、图 4)发现 10.9 级 42CrMo 表面磷化处理的螺栓与 13.9 级 ADF1 表面 DAC 处理的螺栓在大气介质中延迟断裂断口均为韧性的韧窝断口,在 3.5% NaCl 水溶液中的延迟断裂断口虽出现很多韧窝,但值得注意的是产生韧窝的内颈缩变形是不同的,对比图 3(a),图 3(b)中黑区、白区面积(黑区面积代表孔洞的截面积,白区面积代表内颈缩剪切断面积)发现在 3.5% NaCl 水溶液中白区面积明显增大,表明内颈缩变形受到了限制使断口塑性变形减小,而 13.9 级 ADF1 表面 DAC 处理的螺栓在 3.5% NaCl 水溶液中断口出现了韧窝和沿晶混合的形貌,这可能与氢含量较高有关。



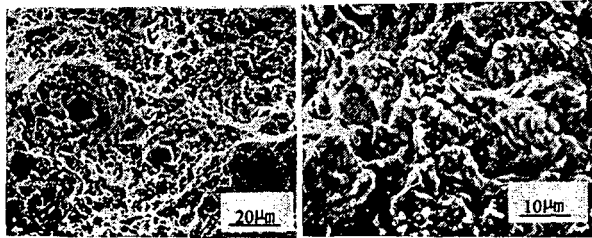
(a) 大气 (b) 3.5% NaCl 溶液

图 3 10.9 级 42CrMo 磷化处理的螺栓延迟断裂断口 SEM 形貌

图 1 10.9 级 42CrMo 螺栓的组织 图 2 13.9 级 ADF1 螺栓的组织

### 2.3 表面处理的影响

用扫描电镜观察两种表面涂层(磷化膜和锌铝铬膜)的形貌,见图 5、图 6,磷化膜结构呈斜方晶体,均匀而致密,而锌铝铬膜上有明显的微裂纹,氢就容易从这些表面微裂纹进入螺栓内部,使得螺栓中氢含量较大,锌铝铬膜抗氢侵入的能力不如磷化膜强。



(a)大气 (b)3.5% NaCl 溶液

图4 13.9级 ADF1 DAC 处理的  
螺栓延迟断裂断面 SEM 形貌

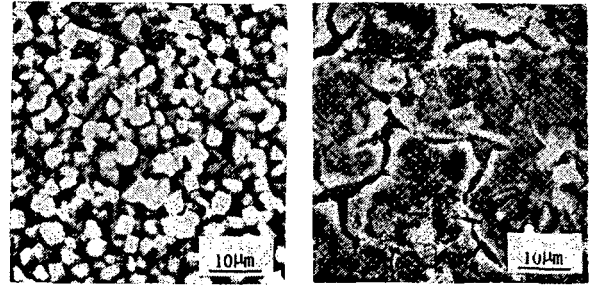


图5 磷化膜表面形貌



图6 锌铝铬膜表面形貌

### 3 结论

13.9 级 ADF1 表面 DAC 处理螺栓的延迟断裂强度高于 10.9 级 42CrMo 表面磷化处理的螺栓,其在大气中断口形貌主要是韧窝,在 3.5% NaCl 水溶液中呈现韧窝和沿晶的混合形貌。

#### 参考文献:

- [1] 松山晋作. 迟滞破坏[M]. 东京:日刊工业新闻社,1989.
- [2] 松本齐. 迟滞破坏はとの强度レベルまで 危険か[J]. 特殊钢,1995,44(12): 24-26.
- [3] 褚武扬. 氢损伤和滞后断裂[M]. 北京:冶金工业出版社,1988.
- [4] Banerji S K, McMahon Jr C J, Feng H C. Intergranular fracture in 4340 - type steels: effects of impurities and hydrogen[J]. Metall Trans A, 1978, 9A(2):237-247.
- [5] Lin T L, Lan Y, Wu J S. Influence of austenitizing temperature on stress corrosion in 4330M steel - The role of impurity segregation in stress corrosion cracking of high strength steel[J]. Metall Trans A, 1988,19A(9):2225-2231.

(编辑:姚树峰)

## Analysis of the Delayed Fracture of Class 13.9 ADF1 Steel Bolts Used for Engine

ZHENG Chen, ZHU Jin-hua

(School of Material Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China)

**Abstract:** The sustained load tensile test is done to evaluate the delayed fracture resistance of both class 13.9 ADF1 steel bolts with DAC treatment and class 10.9 42CrMo steel bolts with phosphate treatment in air and in 3.5% NaCl solution. The fracture surfaces are examined with the help of scanning electron microscopy (SEM). The results show that the delayed fracture strength of class 13.9 bolts is higher than that of class 10.9 bolts and its fractured appearance exhibits a mixed mode failure process and transition from trans-granular feature in air, and both inter-granular fracture and trans-granular fracture in 3.5% NaCl solution.

**Key words:** high strength steel bolt; delayed fracture; hydrogen