

GaAs MMIC 功率放大器加速寿命试验及可靠性评估

苏兴荣, 尹聚文

(空军装备研究院, 北京 100085)

摘要: 目的 评估新研 GaAs 微波单片集成电路(MMIC)功率放大器的可靠性指标。方法 用图估法和范-蒙特福特检验法对失效数据进行分布假设检验,利用贝叶斯定理估算低温度应力下无失效数据的威布尔分布参数。结果 在正常工作情况下,结温为 150 °C 时,该器件特征寿命为 833 370 h, 10 年平均失效率为 $1.2472 \times 10^{-7}/h$, 平均寿命为 738 540 h, 可靠度等于 0.9 时的可靠寿命为 31 年。结论 该型器件在结温小于 250 °C 时服从威布尔分布,结温为 270 °C 时器件的失效机理已发生了变化,器件的各项可靠性指标满足使用要求。

关键词: 加速寿命试验; GaAs MMIC; 功率放大器; 失效率; 可靠性评估

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2014.01.005

中图分类号: TN4 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2014)01-0024-06

Accelerated Life Test and Reliability Evaluation of GaAs MMIC Power Amplifier

SU Xing-rong, YIN Ju-wen

(Equipment Academy of Airforce, Beijing 100085, China)

ABSTRACT: Objective Constant temperature stress accelerated life test was used to evaluate the reliability index of GaAs microwave monolithic integrated circuit (MMIC) power amplifier. **Methods** The failure time distribution of the device was detected by using the probability paper and Van-Montfort methods, and Bayes principle was used to estimate Weibull distribution parameters at the lowest temperature level without failure data. **Results** A series of calculating results were achieved under normal working condition ($\theta_j=150\text{ }^{\circ}\text{C}$): the characteristic life was 833 370 h, the mean failure rate for 10 years was $1.2472 \times 10^{-7} h$, the mean life was 738 540 h and the reliable life was 31 years with a reliability of 0.9. **Conclusion** The reliability index of this device was well enough to meet our needs, and the lifetime of the device obeyed Weibull Distribution below 250 °C, but the failure mechanism changed when the junction temperature was above 270 °C.

KEY WORDS: accelerated life test; GaAs MMIC; power amplifier; failure rate; reliability assessment

收稿日期: 2013-09-03; 修订日期: 2013-10-09

Received: 2013-09-03; Revised: 2013-10-09

作者简介: 苏兴荣(1965-),女,江苏人,硕士,高级工程师,研究方向为装备环境适应性与可靠性。

Biography: SU Xing-rong(1965-), Female, from Jiangsu, Master, Senior Engineer, Research focus: environmental adaptability and reliability of equipments.

1 试验假设

某型 GaAs MMIC 功率放大器是用于某型装备的新研大功率芯片,要求在正常结温 150 °C 的条件下,失效率 > 10⁻⁶/h,可靠寿命 ≥ 15 年。为考核其可靠性指标是否达到要求,采用恒定温度应力加速寿命试验的方法进行验证。根据理论分析,失效机理主要为栅下沉^[1-2],满足最薄弱环节寿命特征模型。因此作以下假定。

1) 器件在正常应力水平 θ_0 和加速应力水平 θ_i 下的寿命都服从威布尔分布,其分布函数为^[3-4]:

$$F_i(t) = 1 - \exp\left\{-\left(\frac{t}{\eta_i}\right)^m\right\}, i = 0, 1, \dots, k$$

式中: m 为形状参数, $m > 0$; η_i 为特征寿命, $\eta_i > 0$ 。此假定表明,改变应力水平不会改变寿命分布类型。

2) 在 θ_0 和 θ_i 下,产品的失效机理不变,由于威布尔分布的形状参数反映失效机理,故此假定意味

着: $m_0 = m_i$ 。

3) 产品的特征寿命 η_i 与所加的温度应力水平 θ_i 间有如下的加速模型,它们之间的关系符合阿伦尼斯方程,即: $\eta_i = e^{a+b/\theta_i}$ 或 $\ln \eta_i = a + b/\theta_i$ 。

2 试验结果及分布假设检验

2.1 试验过程及数据

根据国内外相关资料和该芯片的生产工艺,确定在结温 225, 240, 255, 270 °C 等 4 个加速温度应力下进行 1200 h 的定时截尾试验,每个温度应力下投入 10 个样品,在试验过程中实时监测漏源电流变化量 ($\Delta IDS \leq 20\%$),定时测试输出功率(下降 ≤ 1 dB)。在 225 °C 的温度下无失效,各温度应力下的失效情况见表 1。

表 1 各温度应力下失效情况

Table 1 Failure time at each temperature level

| 温度应力/°C | 失效数 r | 失效时间/h | 试验截尾时间/h |
|---------|---------|--|----------|
| 225 | 0 | | 1200 |
| 240 | 4 | 488, 512, 952, 1155 | 1200 |
| 255 | 7 | 408, 432, 472, 544, 672, 904, 1035 | 1200 |
| 270 | 10 | 400, 408, 452, 456, 464, 480, 520, 544, 568, 576 | 1200 |

2.2 分布假设检验

首先利用表 1 的数据,用 Matlab 绘制威布尔分布图^[5-6](如图 1 所示)。从图 1 中可以看出, θ_2 (240 °C) 和 θ_3 (255 °C) 温度应力下 2 条威布尔分布直线基本平行, θ_4 (270 °C) 时直线斜率出现显著变化。可以初步判断各温度应力下器件的寿命服从威布尔分布,但在高温应力 270 °C 时失效机理发生了变化。

进一步利用范-蒙特福特检验法检验各温度应力下器件的寿命是否服从威布尔分布^[7],这种方法比图估法更为精确。假设 H_0 : 器件的寿命分布为威布尔分布 $W(m, \eta)$, 令:

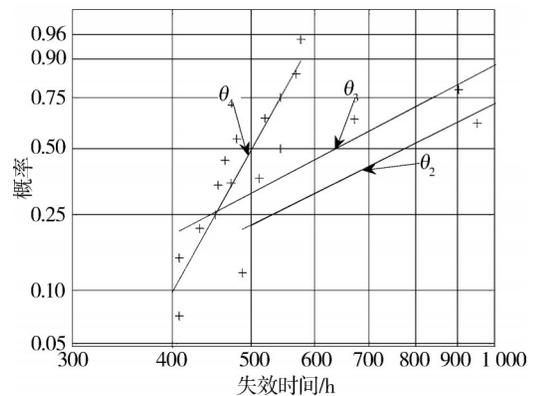


图 1 各温度应力下的威布尔分布曲线

Fig.1 Weibull distribution curve at each temperature level

$$x_i = \ln t_i, Z_i = \frac{x_i - \mu}{\sigma}, i = 1, 2, \dots, r \quad (1)$$

它们分别是极值分布和标准极值分布的次序统计量,其中 $\mu = \ln \eta, \sigma = \frac{1}{m}$, 都为未知数。为检验

H_0 , 用表2计算范-蒙特福特统计量:

$$G_i = \frac{x_{i+1} - x_i}{E(Z_{i+1}) - E(Z_i)}, i = 1, 2, \dots, r \quad (2)$$

在 H_0 成立下, G_i 渐近独立并渐近服从标准指数

表2 温度应力为240 °C下范-蒙特福特检验计算表
Table 2 Calculation table of Van-Montfort test at 240 °C

| 序号j | 失效时间 t_j | $x_j = \ln t_j$ | $a_j = x_j + 1 - x_j$ | $E(Z_j)$ | $b_j = E(Z_{j+1}) - E(Z_j)$ | $G_j = a_j/b_j$ |
|-----|------------|-----------------|-----------------------|----------|-----------------------------|-----------------|
| 1 | 488 | 6.1903 | 0.0480 | -2.8798 | 1.0536 | 0.0456 |
| 2 | 512 | 6.2383 | 0.6202 | -1.8262 | 0.5590 | 1.1096 |
| 3 | 952 | 6.8586 | 0.1933 | -1.2672 | 0.3991 | 0.4843 |
| 4 | 1155 | 7.0519 | | -0.8681 | | |

分布,即为自由度为2的 χ^2 分布。

1) 240 °C时的分布检验。温度应力为240 °C时, G_i 的值见表2。

表2中的 $E(Z_i)$ 可通过查《可靠性试验用表》 $E(Z_{r,n})$ 得到^[8]。把 G_i 均分为2组,则统计量为:

$$F = \frac{\sum_{j=r+1}^{r-1} G_j / (r - r' - 1)}{\sum_{j=1}^{r'} G_j / r'} = \frac{\sum_{j=3}^3 G_j / 1}{\sum_{j=1}^2 G_j / 2} = 0.8386 \quad (3)$$

对于给定的显著水平 $\alpha = 0.1$, 如果上述 F 值满足以下条件,则认为假设成立:

$$F \leq F_{1-\alpha/2}(2(r - r' - 1), 2r') =$$

$$F_{0.95}(2, 4) = \frac{1}{19.25} = 0.0519$$

或 $F \geq F_{\alpha/2}(2(r - r' - 1), 2r') = F_{0.05}(2, 4) = 6.94$ 。

由于 $F = 0.8386$, 介于 $F_{0.95}(2, 4)$ 和 $F_{0.05}(2, 4)$ 之间,所以不能拒绝 H_0 , 即可以认为该温度应力下的寿命分布是威布尔分布。

2) 255, 270 °C时的分布检验。同理,温度应力为255 °C时, $F = 3.8525, F_{0.95}(6, 6) = 0.2336, F_{0.05}(6, 6) = 4.28$; 温度应力为270 °C时, $F = 2.023, F_{0.95}(8, 8) = 0.2907, F_{0.05}(8, 8) = 3.44$ 。因此,在255, 270 °C温度应力下的寿命分布都是威布尔分布。

3 估计各应力水平下的 μ_i 和 σ_i

利用阿伦尼乌斯方程估算寿命曲线,需要3个

温度应力下的参数。在试验中,虽然270 °C下的失效数据服从威布尔分布,但其曲线斜率与前2个温度有明显变化,故认为失效机理发生了变化,不能使用该温度下的失效数据,而225 °C下又无失效。为此,先用经典方法对 θ_2, θ_3 参数进行估计,再使用贝叶斯公式对225 °C时的参数进行估计。

3.1 温度240, 255 °C下 μ 和 σ 的近似无偏估计

在240, 255 °C温度下,用以下公式求得 μ_i 和 σ_i 的近似无偏估计^[1]:

$$\hat{\sigma}_i = \frac{1}{k(r_i, n_i)} [r_i \ln \tau_i - \sum_{j=1}^r \ln t_{ij}] \quad (4)$$

$$\mu_i = \ln t_{ir} - \hat{\sigma}_i E_c(Z_{r_i, n_i}), i = 1, 2, \dots, k \quad (5)$$

式中: $k(r_i, n_i)$ 和 $E_c(Z_{r_i, n_i})$ 的数值由样本总量 n 、失效数 r 查近似无偏估计系数表(极值分布)得到。

温度为240 °C时, $k(4, 10) = 4.4967, E_c(Z_{4, 10}) = -0.966385$; 温度为255 °C时, $k(7, 10) = 9.135356, E_c(Z_{7, 10}) = -0.013997$ 。

计算可得: $\hat{\sigma}_2 = 0.4304, \hat{\mu}_2 = 7.4677; \hat{\sigma}_3 = 0.5293, \hat{\mu}_3 = 6.9496$ 。

3.2 形状参数 m 的估计

根据假设2,即产品在各应力水平下的失效机理不变,应有 $\sigma_2 = \sigma_3 = \sigma = \frac{1}{m}$, 利用 $\hat{\sigma}_2$ 和 $\hat{\sigma}_3$ 及其近

似方差 $\text{Var}(\hat{\sigma}_2) = 0.288\ 070$, $\text{Var}(\hat{\sigma}_3) = 0.129\ 003$, 计算 $\hat{\sigma}$ 的近似无偏估计:

$$\hat{\sigma} = \frac{\sum_2^3 [\text{Var}^{-1}(\hat{\sigma}_i) * \hat{\sigma}_i]}{\sum_2^3 \text{Var}^{-1}(\sigma_i)} = 0.498\ 72 \quad (6)$$

$$\text{形状参数 } \hat{m} = \frac{1}{\hat{\sigma}} = 2.005。$$

3.3 用贝叶斯原理估计 225 °C 下的参数

下面用贝叶斯原理估算 θ_1 (温度应力 225 °C) 水平下参数^[9-15]。

设有 n_1 个产品进行寿命试验, 截尾时间为 τ_1 , 在时刻 t_1 前有 r_1 个产品失效, 其中每个产品的失效概率均设为 p_1 , 其似然函数可用二项分布表示:

$$L(r_1 | p_1) = C_{n_1}^{r_1} p_1^{r_1} (1 - p_1)^{n_1 - r_1}$$

其中 p_1 为产品在 τ_1 前失效的概率, 即:

$$p_1 = P(\theta_1 < \tau_1) = 1 - \exp\left\{-\left(\frac{\tau_1}{\eta_1}\right)^m\right\}$$

试验中, 10 个产品在时刻 1 200 h 前无一失效, 即 $r_1=0$, 则似然函数为:

$$L(0 | p_1) = (1 - p_1)^{10}$$

现确定参数 p_1 的先验分布, p_1 总界于 0 与 1 之间, 由于加速寿命试验产品的失效概率不会很大, 因此, p_1 靠近于 0。另外, 低温度应力下的失效概率不可能超过高温应力下的失效概率, 所以 p_1 的一个上限 λ 可以由 240 °C 下的试验信息确定: $\lambda = P(\theta < t_1) <$

$$P(\theta < t_2) = 1 - \exp\left\{-\left(\frac{\tau_2}{\eta_2}\right)^{\hat{m}}\right\} = 0.3744。$$

若取 $(0, \lambda)$ 上的均匀分布作为 p_1 的先验分布, 再联系到上述似然函数, 由 Bayes 定理可得 p_1 的后验分布为:

$$\pi(p_1 | r_1 = 0) = \frac{(1 - p_1)^{n_1}}{\int_0^\lambda (1 - p_1)^{n_2} dp_1} = \frac{(n_1 + 1)(1 - p_1)^{n_1}}{1 - (1 - \lambda)^{n_1 + 1}} = \frac{11 \times (1 - p_1)^{10}}{1 - (1 - 0.374\ 4)^{11}} = 11.063\ 56 \times (1 - p_1)^{10}$$

其中, $0 < p_2 < 0.3744$, 利用数值积分法得 $\ln \eta_1 =$

$\ln t_1 - \frac{1}{\hat{m}} \ln \ln \frac{1}{1 - p_1}$ 的后验期望为:

$$E(\ln \eta_1 | n_1 = 10, r_1 = 0) = \int_0^{0.374\ 4} \left(\ln 1200 - \frac{1}{2.005} \ln \ln \frac{1}{1 - p_1}\right) \times 11.063\ 56 \times (1 - p_1)^{10} dp_1 = 8.580\ 8$$

$$E((\ln \eta_1)^2 | n_1 = 10, r_1 = 0) = \int_0^{0.374\ 4} \left(\ln 1200 - \frac{1}{2.005} \ln \ln \frac{1}{1 - p_1}\right)^2 \times 11.063\ 56 \times (1 - p_1)^{10} dp_1 = 74.033\ 3$$

因此, 估算出在 225 °C 下: $\hat{\mu}_1 = E(\ln \eta_1 | n_1 = 10, r_1 = 0) = 8.5808$;

$$D_1(r_1, n_1) = \text{Var}(\ln \eta_1 | n_1 = 10, r_1 = 0) = 0.40317$$

4 可靠性指标估计

4.1 加速寿命方程 $\eta = e^{a+b/T}$ 的计算

利用 3 种估计的参数, 在温度 225, 240, 255 °C 等 3 个应力水平下, 加速寿命方程中 a 和 b 的计算按表 3 进行。

表 3 中: D_{1, r, n_i}^{-1} 查近似无偏估计系数表(极值分布), μ_i 由 4.3 条给出。

按下列公式计算 a 和 b :

$$a = \frac{GH - IM}{BG - I^2} = -20.18$$

$$b = \frac{BM - IH}{BG - I^2} = 14\ 303$$

4.2 在 150 °C 时可靠性指标估计

1) 在正常工作情况下, 结温 $T_j = 150$ °C 时的特征寿命:

$$\eta_0 = e^{a+b/T_0} = e^{-20.18 + 14\ 303/423} = 833\ 370\ \text{h}$$

2) 如果按 10 年计算, 在温度 150 °C 的正常工作温度下, 平均失效率为:

$$\overline{\lambda}_{10\text{年}} = t^{\hat{m}-1} / \eta^{\hat{m}} = 1.247\ 2 \times 10^{-7}\ \text{h}$$

3) 在正常工作温度为 150 °C 的条件下, 平均寿命:

表3 计算加速寿命试验方程中的系数a和b
Table 3 Calculation of coefficients a and b in the accelerate life test equation

| 序号 <i>i</i> | <i>n_i</i> | <i>r_i</i> | μ_i | <i>T_i</i> | 1/ <i>T_i</i> | 1/ <i>T_{i2}</i> |
|---------------------|-----------------------------|--------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|-------------------------|--------------------------|
| 1 | 10 | 0 | 8.580 8 | 498 | 0.002 008 03 | 0.000 004 03 |
| 2 | 10 | 4 | 7.467 7 | 513 | 0.001 949 32 | 0.000 003 80 |
| 3 | 10 | 7 | 6.949 6 | 528 | 0.001 893 94 | 0.000 003 59 |
| Σ | | | | | | |
| $D_{1r_i n_i}^{-1}$ | $D_{1r_i n_i * 1/T_i}^{-1}$ | $D_{1r_i n_i * 1/T_{i2}}^{-1}$ | $D_{1r_i n_i * \mu_i}^{-1}$ | $D_{1r_i n_i * \mu_i / T_i}^{-1}$ | | |
| 2.480 343 28 | 0.004 980 609 | 0.000 010 00 | 21.283 329 61 | 0.042 737 61 | | |
| 0.909 429 051 | 0.001 772 766 | 0.000 003 46 | 6.791 343 324 | 0.013 238 486 | | |
| 2.585 903 722 | 0.004 897 545 | 0.000 009 28 | 17.970 996 51 | 0.034 035 978 | | |
| 5.975 676 05 | 0.011 650 92 | 0.000 022 73 | 46.045 669 44 | 0.090 012 074 | | |
| <i>B</i> | <i>I</i> | <i>G</i> | <i>H</i> | <i>M</i> | | |

$t_{0E} = \eta I (1 + 1/\hat{m}) = 738\ 540\ \text{h}$

4) 产品在某温度 150 °C 条件下,可靠度为 0.9 时的可靠寿命为:

$t_{0R} = \eta_0 (-2.30261 \lg R)^{1/\hat{m}} = 271\ 270\ \text{h}$

5 结论

从试验结果及以上分析和计算结果,可以得出以下结论。

1) 该 GaAs MMIC 功率放大器在结温 270 °C 时的失效机理与正常温度应力下相比已经发生改变,不能使用该温度应力下的失效数据对芯片的可靠性指标进行估计。

2) 利用器件在低温度应力下失效概率应小于高温应力下的物理经验,采用均匀分布作为先验布,利用贝叶斯公式,可估算出低温度应力下无失效数据的威布尔分布参数。

3) 在 150 °C 正常温度应力下,该功率放大器使用 10 年的平均失效率小于 10⁻⁶/h,可靠度 0.9 时的可靠寿命达到 30 年以上,满足使用指标要求。

参考文献:

[1] 崔晓英,许燕,黄云. GaAs PHEMT 器件高温加速寿命

试验及物理分析[J]. 电子器件, 2010, 33(1):22-26.

CUI Xiao-ying, XU Yan, HUANG Yun. High Temperature Accelerant Life Test and Physical Analysis of GaAs PHEMT Device [J]. Chinese Journal of Electron Device, 2010, 33(1):22-26.

[2] 王蕴辉,莫郁薇,吴海东,等. 砷化镓微波单片集成电路可靠性预计模型研究[J]. 电子产品环境与可靠性试验, 2007, 25(2):43-48.

WANG Yun-hui, MO Yu-wei, WU Hai-dong, et al. The Research on Reliability Prediction Model for MMIC [J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2007, 25(2):43-48.

[3] 茆诗松,王玲玲. 可靠性统计[M]. 上海: 华东师范大学出版社, 1984.

MAO Shi-song, WANG Ling-ling. The Statistics of Reliability [M]. Shanghai: East China Normal University Publishing House, 1984.

[4] 刘海涛. 氦氖激光器加速寿命试验理论研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2008.

LIU Hai-tao. The Theory Study of He-Ne Lasers Accelerated Life Test [D]. Xi'an: Xi'an Electronic Technology University, 2008.

[5] GB 2689.1-1981, 寿命试验和加速寿命试验方法总则 [S].

GB 2689.1-1981, The General Life Test and Accelerated

- Life Test Method[S].
- [6] GB 2689.2—1981, 寿命试验和加速寿命试验的图估计法(用于威布尔分布)[S].
GB 2689.2—1981, The Probability Paper Estimation for Life Test and Accelerated Life Test (for Weibull Distribution) [S].
- [7] 茆诗松, 王玲玲. 加速寿命试验[M]. 上海: 华东师范大学出版社, 1984.
MAO Shi-song, WANG Ling-ling. The Acceleration Life Test [M]. Shanghai: East China Normal University Publishing House, 1984.
- [8] 中国电子标准化研究所. 可靠性试验用表(增订本)[M]. 北京: 国防工业出版社, 1987.
The Chinese Electronics Standardization Institute. Tables for Reliability Test(Revised and Enlarged Book)[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1987.
- [9] 茆诗松, 李亿民, 陆淑兰, 等. 恒定应力加速寿命试验中无失效数据的处理[J]. 应用概率统计, 1993, 9(2): 216—218.
MAO Shi-song, LI Yi-min, LU Shu-lan, et al. Data Processing for Accelerated Life Test in Constant Stress [J]. Chinese Journal of Applied Probability and Statistics, 1993, 9(2):216—218.
- [10] GB 2689.4—1981, 寿命试验和加速寿命试验的最好线性无偏估计[S].
GB 2689.4—1981, The Best Linear Unbiased Estimation for Life Test and Accelerated Life Test[S].
- [11] 徐健. 定时截尾恒加寿命试验下无失效数据的Bayes处理方法[J]. 上饶师范学院学报, 2007, 27(3):1—7.
XU Jian. Bayesian Statistical Method for Non-failure Data under Accelerated Life Test Based on Type I Censoring[J]. Journal of Shangrao Normal College, 2007, 27(3):1—7.
- [12] 王乃生, 王玲玲. 恒定应力加速寿命试验数据缺失时的统计分析[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2002(1):35—44.
WANG Nai-sheng, WANG Ling-ling. Statistical Analysis of Constant Stress Accelerated Life Testing under Multiply Type-II Censoring[J]. Journal of East China Normal University(Natural Science), 2002(1):35—44.
- [13] 李亿民. 恒加寿命试验中无失效数据的处理[J]. 山东工程学院学报, 1996, 10(4):55—59.
LI Yi-min. A Method for Processing Non-failure Data in Constant Stress Accelerating Life Test[J]. Journal of Shandong Institute of ENG, 1996, 10(4):55—59.
- [14] 严栓航, 师义民. 恒应力加速寿命试验中无失效数据的处理[J]. 纯粹数学与应用数学, 2006, 22(2): 145—148.
YAN Shuan-hang, SHI Yi-min. Zero-failure Data Process of Constant Stress Accelerated Life Testing [J]. Pure and Applied Mathematics, 2006, 22(2): 145—148.
- [15] 唐彦峰, 王森, 刘祥凯, 等. 基于Bayes方法的无失效数据寿命分布研究[J]. 军事交通学院学报, 2011, 13(9): 58—60.
TANG Yan-feng, WANG Sen, LIU Xiang-kai, et al. On Bayesian Method for Life Distribution of Zero-failure Data [J]. Journal of Military Transportation University, 2011, 13(9):58—60.

(上接第12页)

- TAN Wen-zhi, DU Yuan-long, FU Chao. Environmental Embrittlement of ZC-120 Steel in Seawater Induced by Cathodic Protection [J]. Materials Protection, 1998, 21(3): 10—13.
- [11] 肖纪美. 应力作用下的金属腐蚀[M]. 北京: 化学工业出版社, 1990: 373—380.
XIAO Ji-mei. Corrosion of Metal under the Stress [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1990: 373—380.
- [12] WANG G, YAN Y, LI J, et al. Hydrogen Embrittlement Assessment of Ultra-high Strength Steel 30CrMnSiNi2 [J]. Corrosion Science, 2013, 77(1): 273—280.
- [13] TORIBIO J. hydrogen Embrittlement Of Prestressing Steels: the Concept of Effective Stress in Design [J]. Materials & Design, 1997, 18(2): 81—85.
- [14] MICHLER T, MARCHI C S, NAUMANN J, et al. Hydrogen Environment Embrittlement of Stable Austenitic Steels [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2012, 37(21): 16231—16246.
- [15] KOYAMA M, AKIYAMA E, TSUZAKI K. Effect of Hydrogen Content on the Embrittlement in a Fe-Mn-C Twinning-induced Plasticity Steel [J]. Corrosion Science, 2012, 59(6):277—281.