

工业纯钛 TA2 室温蠕变条件下 裂纹尖端的参量表征与估算

代 巧, 周昌玉, 彭 剑, 杨志锋, 贺小华, 於孝春

(南京工业大学, 江苏 南京 211816)

摘 要: 通过试验、理论分析和有限元模拟对工业纯钛 TA2 室温蠕变条件下裂纹尖端应力应变场的参量表征及估算进行了研究。试验研究表明, 在室温条件下, 工业纯钛 TA2 存在明显的第 1 阶段蠕变现象。理论分析和有限元模拟表明, 对 TA2 裂纹体进行保载时, 裂纹尖端的应力应变场为 HRR 场, 提出采用与时间相关的 J 积分来表征, 并给出了估算方法。通过有限元计算, 获得了 TA2 室温蠕变条件下 CT 试样的时间相关 J 积分值, 论证了采用 J 积分来表征室温蠕变条件下 TA2 裂纹尖端应力应变场的合理性。将有限元计算与估算方法获得的 J 积分进行了比较, 验证了估算方法的有效性和准确性。

关键词: 工业纯钛 TA2; 室温蠕变; 裂纹表征参量; J 积分

中图分类号: TG146.2⁺3

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2015)05-1154-05

钛材在室温条件下会产生显著的蠕变现象^[1,2], 其组织和性能^[3-5]及相关力学性能^[6-8]已引起广泛研究。在高应力水平下, 工业纯钛 TA2 室温蠕变表现为第 1 阶段蠕变规律^[9-11]。因而在 TA2 裂纹尖端的高应力区, 将以第 1 阶段蠕变的形式产生与时间相关的变形, 可能导致蠕变裂纹扩展^[12]。因此, 需要寻求合理的参量来表征室温蠕变条件下 TA2 裂纹尖端的应力应变场, 用于预测 TA2 室温蠕变裂纹扩展。

本研究首先通过试验来验证室温条件下工业纯钛 TA2 存在明显的第 1 阶段蠕变现象, 然后对 TA2 裂纹尖端的应力应变场进行分析, 提出采用与时间相关的 J 积分表征形式, 并给出估算方法。与此同时, 对 TA2 室温蠕变条件下的 CT 试样进行有限元分析, 获取与时间相关的 J 积分值, 论证采用 J 积分表征室温蠕变条件下 TA2 裂纹尖端应力应变场的合理性。最后对估算方法结果的准确性进行分析和验证。

1 拉伸和室温蠕变试验

采用 MTS880 试验系统对工业纯钛 TA2 进行拉伸试验和室温蠕变试验, 分别获取其常规力学性能和室温蠕变性能参数。工业纯钛 TA2 的化学成分如表 1 所示。

根据 GB/T 228-2002^[13]《金属材料室温拉伸试验方法》, 对 TA2 板状试样进行拉伸试验。采用 $5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$

表 1 工业纯钛 TA2 的化学成分

Table 1 Composition of commercially pure titanium ($\omega/\%$)

| Ti | Fe | C | N | H | O |
|------|------|------|------|-------|------|
| > 99 | 0.08 | 0.02 | 0.01 | 0.001 | 0.13 |

的恒应变速率, 试验温度控制在 $19 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$, 获得的 TA2 常规力学性能见表 2。

参照 GB/T2039-1997^[14]《金属拉伸蠕变及持久试验方法》对 TA2 板状试样进行室温蠕变试验。在 $19 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ 范围内, 采用不同应力水平对试样进行保载, 获得了蠕变应变随时间的变化, 如图 1 所示。结果表明, 在一定载荷下, 试样的蠕变应变随时间的延长不断增加, 但增加的速率不断减小, 此为典型的第 1 阶段蠕变现象。当所加载荷小于 $0.7\sigma_s$ 时, 由于测量精度及温度的影响, 未能检测出明显的第 1 阶段蠕变现象。本研究试验结果与文献[9-11]有关工业纯钛室温蠕变试验的结果一致。蠕变应变速率 $\dot{\epsilon}$ 可采用时间硬化方程表示为应力、时间的关系式:

$$\dot{\epsilon} = A\sigma^n t^m \quad (1)$$

表 2 TA2 材料的常规力学性能

Table 2 Mechanical properties of commercially pure titanium

| Young's modulus, E/MPa | Yield strength, σ_s/MPa | Tensile strength, σ_b/MPa | Elongation, $\delta/\%$ |
|------------------------------------|--|--|----------------------------|
| 111 556 | 232.60 | 449.00 | 45.14 |

收稿日期: 2014-05-17

基金项目: 国家自然科学基金(51075199); 江苏省研究生科研创新计划(CXZZ11_0341)

作者简介: 代 巧, 女, 1986 年生, 博士生, 南京工业大学机械与动力工程学院, 江苏 南京 211816, 电话: 025-58139951, E-mail: daiqiao@126.com

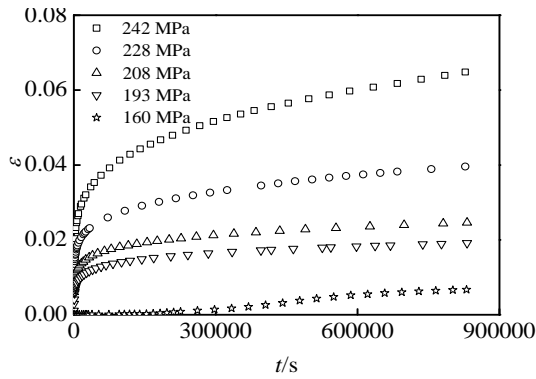


图 1 不同应力水平下 TA2 室温蠕变应变随时间的变化
Fig.1 Variation of room-temperature creep strain with time for TA2 under different stress levels

式中, A 、 n 、 m 为材料常数, 根据试验数据拟合获得的 TA2 室温蠕变应变速率为:

$$\dot{\epsilon} = 3.15 \times 10^{-17} \sigma^{5.6518} t^{-0.8196} \quad (2)$$

2 室温蠕变下 TA2 裂尖的参量表征与估算

试验结果表明, 在室温条件下, 工业纯钛 TA2 存在明显的第 1 阶段蠕变现象。因此, TA2 结构产生裂纹时, 裂纹尖端应力应变场不仅受载荷影响, 同时将与时间相关。本文给出了考虑室温蠕变裂纹尖端应力应变场的参数表征及其估算方法。

2.1 裂尖参量表征

TA2 裂纹体在一定载荷作用下, 裂纹尖端将产生一定范围的塑性区域, 载荷越大, 则塑性区域越大, 此时裂尖的应力状态为 HRR 应力场^[12]。当载荷保持一段时间后, 由于室温蠕变影响, 裂纹尖端将产生一定范围的蠕变区域, 如图 2 所示。随着时间的延长, 蠕变区域不断增大。由于 TA2 室温蠕变为第 1 阶段蠕变, 在较高应力下蠕变现象较为明显, 因而裂尖存在小范围蠕变, 且蠕变应变速率不断降低。但是在裂尖附近的小范围内蠕变应变速率远大于弹性应变速率^[15], 这说明裂尖应力和应变场应是 HRR 型的^[16]。该 HRR 场是随时间变化的, 因此可以采用与时间相关的 J 积分来表征。 J 表示为^[12]:

$$J = \int_S (W n_1 - n_j \sigma_{ij} u_{i,1}) dS \quad (3)$$

$$W = \int_0^{\epsilon_{ij}} \sigma_{ij} d\epsilon_{ij} \quad (4)$$

其中, W 为应变能密度, n_j 为积分路径 S 的外法线方向, u_i 为位移。由于 W 与加载历程有关, 因此在保载过程中 $t > 0$ 时, J 不满足路径无关。但是在 $t = 0$ 及 $t \rightarrow \infty$ 时, 只要裂纹处于稳态, J 是满足路径无关的。在这

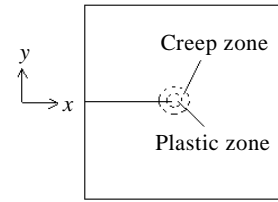


图 2 保载下裂纹尖端的变形行为

Fig.2 Deformation behavior near a crack tip during a load-hold sequence

2 种状态之间, J 可被认为接近路径无关^[12]。

在 $t > 0$ 时刻, 当 J 积分接近路径无关时才能够有效表征室温下第 1 阶段蠕变裂纹尖端的 HRR 应力场。虽然 J 接近于路径无关, 但是它与时间相关, 表示为^[12]:

$$J = J_0 + Ct^{m+1} \quad (5)$$

其中, J_0 为 $t = 0$ 时刻的 J 积分值, C 为未知常量, 与结构载荷相关, m 为式 (1) 中的时间硬化指数。

2.2 与时间相关 J 积分的估算

由于在室温蠕变条件下, TA2 裂纹尖端由 HRR 应力场控制, 因此采用 J 积分来表征裂纹尖端的应力应变场是合理的。根据 TA2 力学性能和室温蠕变性能参数, 进行有限元分析可获得随时间变化的 J 积分值。由于有限元分析复杂耗时, 因此本节给出了修正的 EPRI 方法估算随时间变化的 J 积分值, 以方便工程应用。

室温下 TA2 含裂纹结构在保载过程中, 由于蠕变的影响, 裂纹尖端的应变不断增加。在此过程中, 由于裂尖的应力应变场不是连续剧烈变化的, 因此假设在保载过程中的某 t 时刻, 裂纹尖端的应力应变场与保载时间无关, 而由该时刻的材料特性决定。 t 时刻的材料特性可由等时应力应变曲线给出, TA2 室温蠕变下的等时应力应变曲线如图 3 所示。

等时应力应变曲线可由时间相关的 Ramberg-Osgood

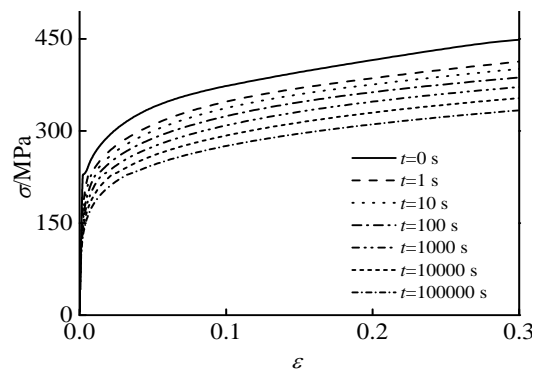


图 3 TA2 室温蠕变下的等时应力应变曲线

Fig.3 Isochronous stress-strain curves for TA2 under room-temperature creep

应力应变关系表示为:

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0(t)} = \frac{\sigma}{\sigma_0(t)} + \alpha(t) \left(\frac{\sigma}{\sigma_0(t)} \right)^{n(t)} \quad (6)$$

其中, $\varepsilon_0(t) = \sigma_0(t)/E$, $\sigma_0(t)$ 为 t 时刻的参考应力, 取为等时应力应变曲线上 0.2% 非弹性应变的应力。 $\alpha(t)$ 和 $n(t)$ 为与 $\sigma_0(t)$ 对应的材料参数。因此, 根据等时应力应变曲线求得 Ramberg-Osgood 关系中的各参量, 通过 EPRI 工程计算方法^[17]就能求得与时间相关的 J 积分值, 表示为:

$$J = J_e + J_p(t) \quad (7)$$

弹性解 J_e 可由应力强度因子转换获得, 应力强度因子可从线弹性断裂力学手册中得到。对于 CT 试样, $J_p(t)$ 为:

$$J_p(t) = \alpha(t) \sigma_0(t) \varepsilon_0(t) c h_1 \left(\frac{P}{P_0(t)} \right)^{n(t)+1} \quad (8)$$

其中, c 为韧带长度, P 为载荷, $P_0(t)$ 为 t 时刻与 $\sigma_0(t)$ 对应的参考载荷, h_1 为与裂纹尺寸和 $n(t)$ 相关的参数。因此, 与时间相关的 J 积分值可由式 (7) 求得, 当 $J = J_{IC}$ 时裂纹开始扩展。当载荷发生变化或裂纹失稳扩展时, $t > 0$ 时 J 与路径无关的假设将不再成立, 此时该估算方法将不再适用。

3 TA2 室温蠕变下 CT 试样有限元分析

有限元分析能够模拟裂纹尖端的应力应变场, 从而获得精确的 J 积分值。本节根据 TA2 的力学性能和室温蠕变性能参数, 采用 ABAQUS^[18]有限元软件对 TA2 的 CT 试样进行分析, 获取与时间相关的 J 积分值, 论证 J 积分表征室温蠕变条件下 TA2 裂纹尖端应力应变场的合理性, 并验证本文提出的估算方法。

3.1 有限元计算模型

采用试验获得的 TA2 材料性能对标准 CT 试样进行有限元分析, 试样尺寸为 60 mm × 62.5 mm × 25 mm, 裂纹长度为 25 mm。由于 CT 试样结构及载荷的对称性, 采用对称模型进行模拟, 如图 4 所示。将试样与销钉的接触面耦合于销钉孔表面圆心处, 通过该点对试样施加垂直方向的载荷。在分析过程中, 设置 2 个分析步: 第 1 步是对试样进行加载过程, 试样产生弹塑性变形; 第 2 步是保载过程, 试样产生蠕变变形。标准 CT 试样符合平面应变条件, 采用 2D 平面应变减缩单元 (CPE8R), 并在裂纹尖端附近细化网格, 如图 5 所示。

在 ABAQUS 中, 二维 J 积分是通过面积分来计算的, 将围绕着裂纹尖端的单元组成环形域来建立不同的积分围线 (域)。第 1 个围线是由裂纹尖端节点相连

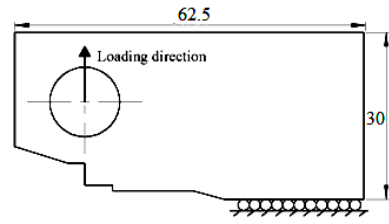


图 4 有限元计算的加载方式和边界条件

Fig.4 Loading and boundary condition imposed in FE simulation

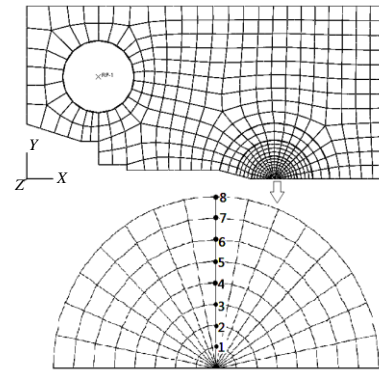


图 5 有限元网格

Fig.5 FE mesh

接单元构成的, 下一个围线是由与前一个相接触的单元环来组成, 以此类推。在分析过程中, 设置了 8 条积分围线, 用以讨论 J 是否接近路径无关。

3.2 有限元结果分析

本节通过分析有限元结果来讨论 J 积分表征的合理性。由于有限元分析采用的是平面应变单元, 因此在裂纹尖端一定范围内, 垂直于裂纹方向的应力大于沿着裂纹方向的应力。20 kN 载荷下, 各积分围线与裂纹垂直线交点 (如图 5) 的应力随时间的变化如图 6 所示。由图可以看出, 在 $t = 0$ 时刻各点应力达到最大值, 且沿着远离裂尖的方向逐渐减小, 点 1 处为 288.03 MPa, 点 8 处为 233.78 MPa, 略大于屈服强度。由于蠕变影响而产生应力松弛, 保载过程中各点上的应力随时间的延长而不断减小, 100 s 时点 1 处为 226.90 MPa, 点 8 处为 176.14 MPa, 均低于屈服强度。因此, 围线的设置能够包围裂尖的塑性区, 满足计算精确 J 积分的要求^[18]。

20 kN 载荷下有限元分析获得各路径 J 积分随时间的变化如图 7 所示。由于第 1 条路径结果不够精确^[18], 因此在分析过程中将其去除。结果表明, 在弹塑性条件下即 $t = 0$ 时刻, 各路径间的最大相对偏差为 0.66%。当室温蠕变开始后各路径间的最大相对偏差开始增大, $t = 1$ 时, 为 0.83%。随着时间的延长最大相对偏

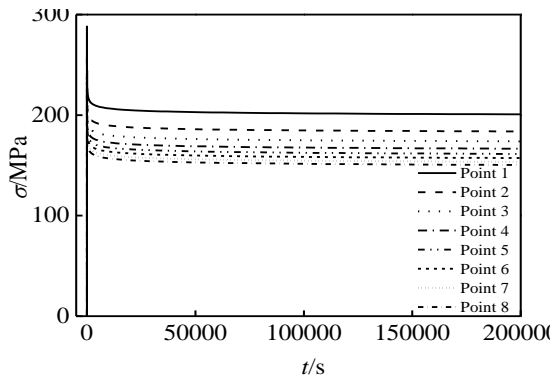


图 6 20 kN 载荷下特征点的应力随时间的变化
Fig.6 Variation of stress value for the feature points with time under 20 kN

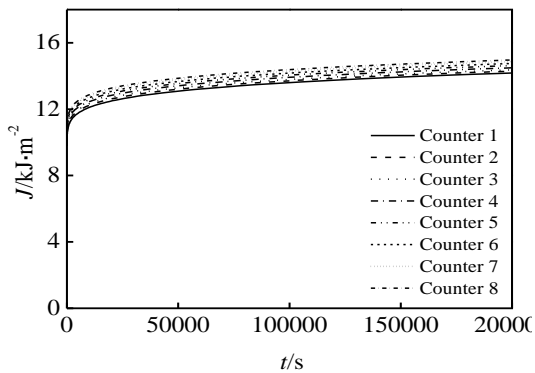


图 7 20 kN 载荷下各路径 J 积分值随时间的变化
Fig.7 Variation of J integral for different counters with time under 20 kN

差不断增大, 当 $t = 7000$ 时, 最大为 4.96%。随后各路径间的最大相对偏差开始减小, 当 $t = 200\ 000$ 时, 为 4.51%。在其它载荷下也能获得类似的结果, 因此可以认为, J 积分是接近路径无关的, J 积分可用于表征室温蠕变条件下 TA2 裂纹尖端的应力应变场。

根据式 (5), J 积分可以表示为随时间连续变化的函数。在 20 kN 载荷下, J 积分随时间的变化可表示为:

$$J = 9.83 + 0.5061t^{0.1804} \quad (9)$$

对于其它载荷, J 积分同样能够拟合为时间的函数。因此在室温蠕变条件下, TA2 裂纹体 J 积分与载荷、蠕变参数和时间有关。

3.3 有限元计算与估算 J 积分比较

分别对 3 个载荷 (15、20、25 kN) 下 CT 试样进行了有限元分析, 获取了随时间变化的 J 积分。同时采用 2.2 节的估算方法对相同载荷下随时间变化的 J 积分值进行了估算, 与时间相关的 Ramberg-Osgood

参数如表 3 所示。图 8 比较了 2 种方法获得的结果, 其中有限元方法结果为除第 1 条积分路径外其余 7 条路径 J 积分值的均值。

由图 8 可以看出: 载荷为 15 和 20 kN 时, 整个时间范围内估算值与有限元计算结果非常吻合; 载荷为 25 kN 时, 估算值偏离了有限元结果。进一步分析表明, 25 kN 载荷, $t = 0$ 时刻 J 积分的估算值 ($16.90\ \text{kJ/m}^2$) 与有限元计算结果 ($15.79\ \text{kJ/m}^2$) 已经存在 6.56% 的偏差, 1 s 后两者结果差异达最大值为 14%, 而后随着时间的延长差异不断减小, 当 $t = 200\ 000$ 时, 两者仅存在 3.07% 的偏差。结果表明, 本文提出的方法能够较好地估算室温蠕变条件下 TA2 材料与时间相关的 J 积分值。

表 3 与时间相关的 Ramberg-Osgood 参数
Table 3 Time-dependent Ramberg-Osgood parameters

| t/s | σ_0/MPa | α | n |
|--------|-----------------------|----------|--------|
| 0 | 232.60 | 2.3090 | 6.3210 |
| 10 | 189.54 | 1.8703 | 0.8006 |
| 100 | 176.29 | 1.7142 | 0.8086 |
| 1000 | 163.87 | 1.6444 | 0.8163 |
| 10000 | 152.34 | 1.6412 | 0.8230 |
| 100000 | 141.52 | 1.6798 | 0.8285 |

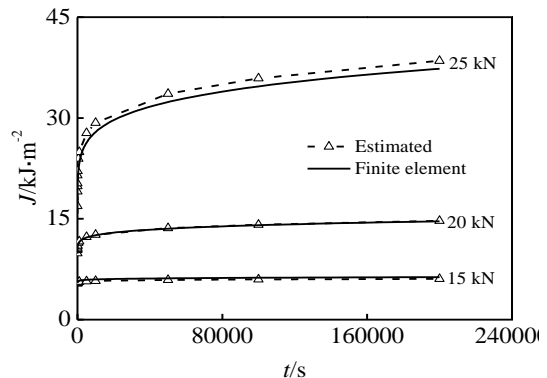


图 8 J 积分有限元解与估算值的比较
Fig.8 Comparison of FE solutions and estimated J integral

4 结 论

- 1) 通过室温蠕变试验, 验证了在一定应力水平下 TA2 存在明显的第 1 阶段蠕变现象。
- 2) 根据 TA2 的室温蠕变规律, 分析表明对 TA2 裂纹体进行保载时裂纹尖端的应力应变场仍由 HRR 场控制。
- 3) 通过有限元计算, 验证了 $t > 0$ 时 J 积分接近路径无关, 表明采用 J 积分来表征室温蠕变条件下 TA2 裂纹尖端的应力应变场是合理的。同时通过拟合得出

了 J 积分随时间的变化关系式, 表明了室温蠕变条件下 TA2 裂纹体的 J 积分与载荷、蠕变参数和时间有关。

4) 将有限元计算与估算方法获得的 J 积分进行了比较, 表明了估算方法的有效性和准确性。

参考文献 References

- [1] Imam M A, Gilmore C M. *Metall Mater Trans A*[J], 1979, 10(4): 419
- [2] Neeraj T, Hou D H, Daehn G S *et al. Acta Mater*[J], 2000, 48: 1225
- [3] Wang Kuaishe(王快社), Ma Honggang(马宏刚), Wang Wen(王文) *et al. Rare Metal Mat Eng*(稀有金属材料与工程)[J], 2011, 40(9): 1530
- [4] Liu Xiaoyan(刘晓燕), Zhao Xicheng(赵西成), Yang Xirong(杨西荣) *et al. Rare Metal Mat Eng*(稀有金属材料与工程)[J], 2012, 41(4): 667
- [5] Paulino G H, Carpenter R D, Liang W W *et al. Eng Fract Mech*[J], 2001, 68: 1417
- [6] Gao Lingqing(高灵清), Zhu Jinhua(朱金华), Li Hui(李慧) *et al. Rare Metal Mat Eng*(稀有金属材料与工程)[J], 2008, 37(6): 1051
- [7] Peng Jian(彭剑), Zhou Changyu(周昌玉), Dai Qiao(代巧) *et al. Rare Metal Mat Eng*(稀有金属材料与工程)[J], 2013, 42(3): 483
- [8] Peng J, Zhou C Y, Dai Q *et al. Mater Design*[J], 2013, 50: 968
- [9] Zhang Li(张莉), Xu Hong(徐宏), Ma Qiulin(马秋林) *et al. Rare Metal Mat Eng*(稀有金属材料与工程)[J], 2008, 37(12): 2114
- [10] Ma Qiulin(马秋林), Zhang Li(张莉), Xu Hong(徐宏) *et al. Rare Metal Mat Eng*(稀有金属材料与工程)[J], 2007, 36(1): 11
- [11] Tanaka H, Yamada T, Sato E *et al. Scripta Mater*[J], 2006, 54(1): 121
- [12] Brust F W, Leis B N. *Int J Fracture*[J], 1992, 54: 45
- [13] GB/T 228-2002. *Metallic Materials-Tensile Testing at Ambient Temperature*(金属材料室温拉伸试验方法)[S]. 2002
- [14] GB/T 2039-1997. *Metallic Materials-Creep and Stress-Rupture Test in Tension*(金属拉伸蠕变及持久试验方法)[S]. 1997
- [15] Ohji K, Kubo S. In: Ohtani R, Ohnami M, Inoue T eds. *High Temperature Creep-Fatigue*[M]. London: Elsevier, 1988: 91
- [16] Tu Shandong(涂善东). *High Temperature Structural Integrity*(高温结构完整性原理)[M]. Beijing: Science Press, 2003: 156
- [17] Kumar V, German M D, Shih C F. *An Engineering Approach for Elastic-Plastic Fracture Analysis*, NP-1931, Research Project 1237-1[R]. Topical Report. Schenectady: General Electric Company, 1981:22
- [18] ABAQUS. *ABAQUS/Standard User's Manual Version 6.9*[Z]. ABAQUS Inc, 2009

Parameter Characterizing and Estimating for Room Temperature Creep Crack Tip of Commercially Pure Titanium TA2

Dai Qiao, Zhou Changyu, Peng Jian, Yang Zhifeng, He Xiaohua, Yu Xiaochun
(Nanjing University of Technology, Nanjing 211816, China)

Abstract: The parameter characterizing and estimating for room temperature creep crack tip stress-strain field of commercially pure titanium TA2 were studied by testing, theoretical analysis and finite element (FE) simulation. Testing results indicate that for commercially pure titanium TA2, the primary creep will occur at room temperature. Theoretical analysis and FE simulation demonstrate that the stress-strain field at the crack tip under loading hold period is HRR field. Thus, the time dependent J -integral was proposed to characterize this HRR field, and an estimation method for the J -integral was provided. Then the FE simulation was used to obtain the time dependent J -integral of TA2 CT specimen under the condition of room temperature creep, which shows that J -integral may appropriately characterize the crack tip stress-strain field. At last, the J -integral obtained by FE simulation and the estimation method were compared, which proves the effectiveness and accuracy of the estimation method.

Key words: commercially pure titanium TA2; room temperature creep; crack characterizing parameter; J -integral

Corresponding author: Zhou Changyu, Professor, School of Mechanical and Power Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 211816, P. R. China, Tel: 0086-25-58139951, E-mail: changyu_zhou@163.com