

工业纯钛中低温蠕变的等时应力应变曲线

彭 剑, 周昌玉, 代 巧, 贺小华

(南京工业大学, 江苏 南京 211800)

摘 要: 根据工业纯钛 TA2 在服役温度范围内 (室温、353 K、423 K) 的拉伸实验和蠕变实验获得了工业纯钛的拉伸应力应变曲线和蠕变曲线。由中低温蠕变实验数据发现工业纯钛在服役温度范围内会产生显著的蠕变现象, 蠕变特征会随温度发生变化。随后, 分别建立了工业纯钛在各温度下的弹塑性拉伸本构方程和蠕变本构方程。综合拉伸和蠕变本构方程建立了工业纯钛在服役温度范围内的等时应力应变曲线。等时应力应变曲线显著低于拉伸曲线, 并且存在寿命相关性, 随着寿命要求的提高等时应力应变曲线不断下降。值得注意的是在不同的温度下等时应力应变曲线随寿命要求的变化规律存在显著差别。根据等时应力应变曲线、结构允许的极限应变和结构设计寿命, 本研究提出了工业纯钛与时间相关的许用应力曲线。

关键词: 工业纯钛; 中低温蠕变; 等时应力应变曲线; 与时间相关的许用应力

中图分类号: TG146.2³

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2016)02-0346-07

许多材料在高温下会产生显著地蠕变行为, 并且蠕变行为会影响高温结构的完整性^[1], 因此国内外研究人员对高温材料的蠕变行为开展了广泛的研究^[2-4]。同时, 研究人员发现, 不少材料在中低温甚至室温下也会存在蠕变现象, 并且会产生显著的蠕变应变^[5-8]。研究人员对比发现, 工业纯钛的中低温蠕变行为最为显著^[5]。目前关于工业纯钛中低温蠕变行为的研究主要集中于蠕变特征与变形机制^[6,9-11]。然而工业纯钛的中低温蠕变行为对钛制结构安全性的影响尚未得到充分的研究。

对于不存在蠕变特征的材料, 可以运用应力应变曲线得到材料许用应力进行结构设计。但是对于存在显著蠕变特征的结构, 蠕变变形是不可忽略的重要失效形式, 因此需要在结构的设计过程中充分考虑蠕变的影响。研究人员们提出了等时应力应变曲线来综合考虑拉伸和蠕变两个应变的增加, 因此它适用于存在显著蠕变变形的工况中^[12]。国内外研究人员陆续对各种高温材料给出了等时应力应变曲线^[13-15], 并且等时应力应变曲线应用到了国外的一些标准中^[16,17]。另外研究人员还利用等时应力应变曲线计算高温结构的承载能力^[18]以及构建与时间相关的失效评定图^[19,20]。虽然工业纯钛被证实会在中低温下产生显著的蠕变变形, 但是目前尚未建立工业纯钛中低温下的等时应力应变曲线, 并且仍未清楚这种蠕变变形对钛制结构的设计及安全评定的影响。

本研究将通过拉伸实验和蠕变实验分别获取工业纯钛在中低温下的拉伸数据以及蠕变数据, 建立工业纯钛中低温蠕变行为的等时应力应变曲线; 系统分析设计寿命和服役温度对等时应力应变曲线的影响; 最后基于等时应力应变曲线提出工业纯钛与时间相关的许用应力曲线。

1 实 验

实验材料为化工设备中常用的工业纯钛 TA2, 其化学成分为(质量分数, %): Fe 0.055, C 0.01, H 0.001 O 0.125, Ti bal。实验温度选择工业纯钛服役温度范围内的 3 种典型温度: 293 (室温), 353, 423 K。

拉伸试样按照 ASTM: E8/E8-11^[21]的尺寸采用线切割从 TA2 板材上切割成型, 并用砂纸手工打磨抛光。试样标距部分尺寸为 40 mm×12.5 mm×5 mm, 并且长度方向为板材轧制方向。拉伸试验在 Instron 试验机上进行, 试验温度选择服役温度范围内的 3 个温度等级: 293, 353, 423 K。所有实验应变速率均控制为 $5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 。在实验过程中利用引伸计自动记录并保存应变的变化。

为了保证蠕变实验与拉伸实验数据的统一性, 蠕变试验材料与拉伸试验材料一致为同一批次的工业纯钛 TA2。蠕变试样按照 GB/T2039-1997《金属拉伸蠕变及持续试验方法》标准^[22], 利用线切割技术加工。

收稿日期: 2015-03-03

基金项目: 国家自然科学基金 (51075199)

作者简介: 彭 剑, 男, 1987 年生, 博士生, 南京工业大学机械与动力工程学院, 江苏 南京 211800, 电话: 025-58139951, E-mail: joepengjian@163.com

在蠕变试验平台上开展工业纯钛中低温下不同应力的蠕变实验。室温通过实验室内中央空调进行温度控制，室温以上温度通过实验设备自带的加热炉进行控制。实验的过程中试验系统利用引伸计自动记录并保存应变的变化。

2 结果与讨论

2.1 工业纯钛的拉伸行为与本构方程

通过在 3 种温度下的拉伸试验得到工业纯钛在服役温度范围内的拉伸应力应变曲线，如图 1 所示。

从图 1 中可以看到，随着温度不断增加，工业纯钛的拉伸力学性能不断降低。为了定量地描述工业纯钛的弹塑性力学性能，采用弹塑性本构方程进行描述。在弹性范围内，应力与应变符合胡克定律：

$$\varepsilon^e(T, \sigma) = \frac{\sigma}{E(T)} \quad (1)$$

随着应力的增加，材料超过屈服强度后应变不再符合弹性条件进入塑性阶段，在塑性阶段往往可以运用下式进行描述^[14]：

$$\varepsilon^p(T, \sigma) = D(T) \left[\frac{\sigma}{\sigma_y(T)} \right]^{m(T)} \quad (2)$$

其中， σ_y 为屈服强度，而材料常数 D 和 m 可由实验数据拟合获得。

工业纯钛弹性模量随温度的变化关系 $E(T)$ 可由文献[23]给出的关系式获得，随后通过对图 1 中实验数据依据 Eq. (1)和 Eq. (2)进行数据拟合可得到工业纯钛在 3 种温度下的拉伸力学本构模型参数，计算得到的本构参数列于表 1 中。工业纯钛在 3 种服役温度范围内的拉伸应力应变曲线可以通过 Eq. (1)、Eq. (2)和表 1 中的本构参量建立。

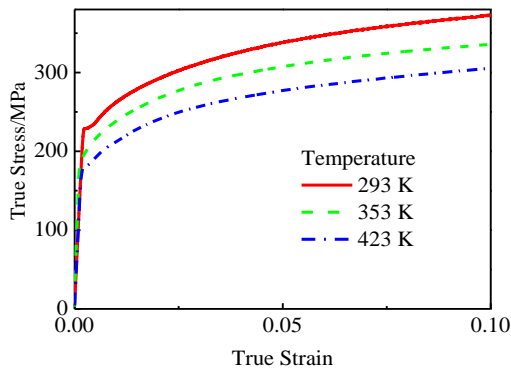


图 1 工业纯钛的拉伸应力应变曲线

Fig.1 Tensile stress-strain curves of CP-Ti

表 1 工业纯钛的拉伸力学性能本构参量

T/K	E/MPa	σ_y /MPa	$D/\times 10^{-3}$	m
293	115604	237.06	3.52	7.30
353	111306	209.16	2.40	7.78
423	106304	185.17	2.65	7.18

2.2 工业纯钛的蠕变行为与本构方程

通过蠕变试验得到了工业纯钛在服役温度范围内不同应力水平下的蠕变曲线，如图 2 所示，其中应力水平用相对应力 $S = \frac{\sigma}{\sigma_y}$ 来表示。

由图 2 的蠕变实验数据可以发现，工业纯钛在 3 个服役温度和各个应力水平下均会产生显著的蠕变行

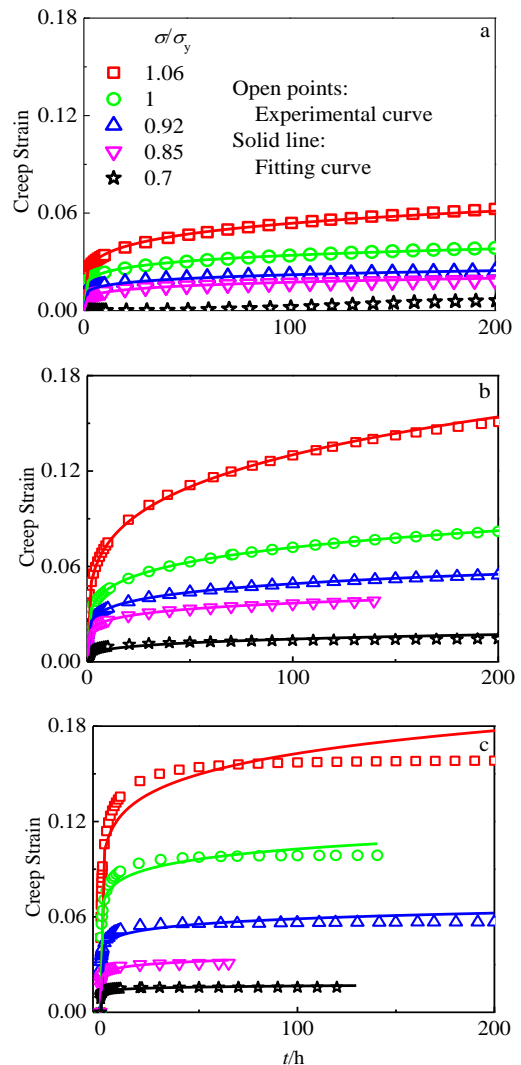


图 2 工业纯钛的中低温蠕变曲线

Fig.2 Low and intermediate temperature creep curves of CP-Ti:

(a) 293 K, (b) 353 K, and (c) 423 K

为，除了在室温最小实验应力水平 ($S=0.7$) 下未表现出常规的蠕变行为。这是由于工业纯钛的室温蠕变存在在门槛应力，当加载应力低于门槛应力时不会产生显著的蠕变行为^[10]。由图 2 的蠕变曲线表明，工业纯钛在中低温主要呈现为蠕变第一阶段行为。值得注意的是，工业纯钛的蠕变特征会随温度发生变化：如图 2a, 2b 在 293 和 353 K 下蠕变应变会随着蠕变时间的延长而持续增加，表现为持续的蠕变行为；如图 2c 当温度达到 423 K 时，出现了饱和蠕变现象，仅在刚开始的数个小时内发生剧烈的蠕变现象，随后达到饱和蠕变应变，应变不再随着蠕变时间的增加而持续升高。因此由图 2 中蠕变曲线随着温度的变化规律可知，工业纯钛的蠕变特征会随温度升高由持续型的蠕变行为转变为存在蠕变饱和现象的蠕变行为。

由于在图 2 中发现工业纯钛仅包含蠕变第 1 阶段行为，因此本节采用第 1 阶段蠕变本构方程来描述工业纯钛的中低温蠕变行为。研究人员主要利用幂率方程和对数方程来描述工业纯钛的蠕变第 1 阶段行为^[5,6, 9-11]，本研究选择幂率本构方程来描述工业纯钛的蠕变行为，其表达式如下：

$$\varepsilon^c(T, \sigma, t) = \beta(T, \sigma)t^n(T, \sigma) \quad (3)$$

其中本构参数 β 和 n 可以通过拟合实验数据获得。图 2 中的实线即为由实验数据通过 Eq.(3)拟合得到的结果，通过对比实验数据与拟合曲线表明幂率本构方程能够合适地描述工业纯钛的蠕变第 1 阶段行为。表 2 和表 3 列出了在不同温度和不同应力下工业纯钛的蠕变第 1 阶段本构参数 β 和 n 。

蠕变本构方程 Eq. (3) 仅关联了蠕变应变和蠕变时间的影响，为了建立工业纯钛的等时应力应变曲线，需要在蠕变本构方程中考虑应力的影响，因此需要讨论蠕变本构参数与应力的关系。图 3 给出了本构参数 $\log \beta$ 和 $\log n$ 随应力的变化规律。从图 3 可以发现 $\log \beta$ 和 $\log n$ 与应力存在线性关系，因此可以运用

如下关系式对各个温度的本构参数与应力的关系进行关联：

$$\log \beta = \begin{cases} -3.71 + 0.00809\sigma & T = 293 \text{ K} \\ -3.59 + 0.01007\sigma & T = 353 \text{ K} \\ -3.70 + 0.01398\sigma & T = 423 \text{ K} \end{cases} \quad (4)$$

$$\log n = \begin{cases} -1.35 + 0.00248\sigma & T = 293 \text{ K} \\ -1.33 + 0.00294\sigma & T = 353 \text{ K} \\ -2.55 + 0.00676\sigma & T = 423 \text{ K} \end{cases} \quad (5)$$

图 3 中的实线是根据本构参数与应力的关系式 Eq. (4)和 Eq. (5)绘制的，通过与数据点的对比可以发现关系式 Eq. (4)和 Eq. (5)能够合适地关联本构参数与应力的关系。工业纯钛在 3 种服役温度范围内的蠕变曲线可以通过 Eq. (3)、Eq. (4)和 Eq. (5)建立。

2.3 构建工业纯钛等时应力应变曲线

对于存在蠕变行为的材料，在设计过程中需要综合考虑拉伸行为和蠕变行为，因为两者均会使材料产生变形，从而造成结构的大变形失效。为了同时考虑拉伸弹塑性变形和蠕变变形，研究人员提出运用等时应力应变曲线表征材料的拉伸和蠕变综合力学性能。等时应力应变曲线综合考虑了拉伸变形和蠕变变形的两种变形行为，因此根据等时应力应变曲线进行设计能够避免结构发生与塑性变形和蠕变变形相关的大变形失效。

当材料存在显著的蠕变变形时，总应变将由弹性应变、塑性应变和蠕变应变 3 部分组成，如下式：

$$\varepsilon^t(T, \sigma, t) = \varepsilon^e(T, \sigma) + \varepsilon^p(T, \sigma) + \varepsilon^c(T, \sigma, t) \quad (6)$$

其中弹性应变 $\varepsilon^e(T, \sigma)$ ，塑性应变 $\varepsilon^p(T, \sigma)$ 和蠕变应变 $\varepsilon^c(T, \sigma, t)$ 可分别由 Eq. (1)，Eq. (2)和 Eq. (3)描述。根据 Eq. (1)~Eq. (6)以及表 1 中的材料常数，即可建立工业纯钛不同温度不同寿命的等时应力应变曲线。图 4 给出了 3 种服役温度（室温、353 K、423 K）下工业纯钛的等时应力应变曲线。

由图 4 可知，考虑蠕变后的等时应力应变曲线与拉伸曲线相比显著下降了，如果不考虑蠕变行为直

表 2 不同温度与应力下的工业纯钛蠕变本构参数 β

Table 2 Creep constitutive parameter β of CP-Ti at different temperatures and stresses

S	Temperature /K		
	293	353	423
1.06	2.1111E-02	4.4933E-02	1.1614E-01
1	1.6152E-02	2.9275E-02	8.0527E-02
0.92	1.1165E-02	2.3285E-02	4.8810E-02
0.85	8.3921E-03	1.8940E-02	2.5998E-02
0.7	-	7.0735E-03	1.4435E-02

表 3 不同温度与应力下的工业纯钛蠕变本构参数 n

Table 3 Creep constitutive parameter n of CP-Ti at different temperatures and stresses

S	Temperature /K		
	293	353	423
1.06	2.0382E-01	2.2996E-01	6.7018E-02
1	1.6245E-01	1.9514E-01	4.5114E-02
0.92	1.4543E-01	1.6127E-01	3.0675E-02
0.85	1.5249E-01	1.4312E-01	4.4840E-02
0.7	-	1.3822E-01	1.9785E-02

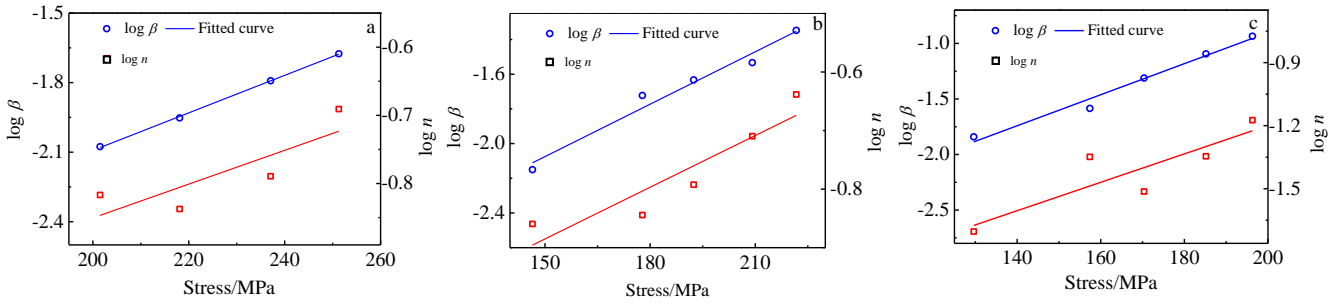


图 3 在不同温度下本构参数随着应力的变化规律

Fig. 3 Variations of constitutive parameters with stress at different temperatures: (a) 293 K, (b) 353 K, and (c) 423 K

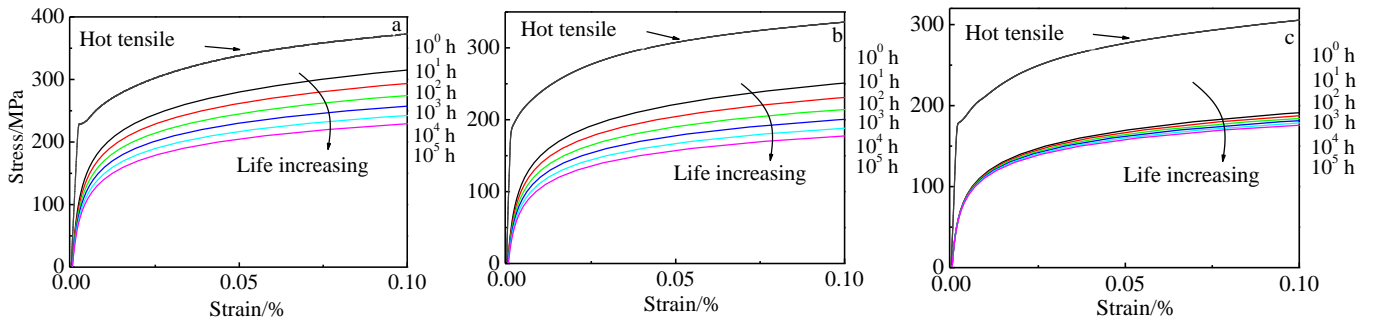


图 4 工业纯钛在服役温度范围内的等时应力应变曲线

Fig.4 Isochronous stress-strain curves of CP-Ti at service temperatures: (a) 293 K, (b) 353 K, and (c) 423 K

接采用拉伸曲线进行设计，钛制结构在服役过程中可能会由于蠕变大变形而造成失效。因此为了保障钛制结构的安全运行，需要对钛制结构进行考虑蠕变变形的的设计。比较图 4 中不同的寿命对应的等时应力应变曲线可以发现，随着寿命要求的不断提高，等时应力应变曲线不断下降。值得注意的是不同温度下的等时应力应变曲线与寿命的关系存在显著的差异。在 293 和 353 K 下，等时应力应变曲线会随着寿命的延长而持续地降低；而当温度提高到 423 K 时，不同寿命对应的等时应力应变曲线间隔不大，等时应力应变曲线的寿命相关性较弱。这种现象与工业纯钛的蠕变行为的温度相关性有关。由图 2 不同温度下的蠕变曲线可以发现：在 293 和 353 K 温度下蠕变属于持续型的蠕变行为；然而在 423 K 下存在蠕变饱和现象。因此在 293 和 353 K 下由于持续的蠕变行为，等时应力应变曲线会随着寿命要求的提高而不断降低，但是在 423 K 下由于饱和蠕变现象的存在，等时应力应变曲线的寿命相关性较低。为了进一步分析温度对等时应力应变曲线的影响，图 5 分别给出了 5 种寿命(10, 100, 1000, 10 000 和 100 000 h)在 3 种不同温度下的等时应力应变曲线。

从图 5a~5c 可以发现较短的寿命（10~1000 h）下，随着温度的不断提高等时应力应变曲线不断下降，但是随着寿命要求的提高，423 K 的等时应力应变曲线与 293 和 353 K 等时应力应变曲线的差距在不断地减小。如图 5e 当寿命达到 100 000 h 时，423 K 的等时应力应变曲线与 353 K 的曲线基本重合，在应变值较小的部分 423 K 的等时应力应变曲线甚至高于 353 K 的曲线。这种现象可以用工业纯钛的蠕变特征的温度相关性进行解释。当温度为 353 K 时，蠕变随着蠕变时间不断增加，因此 353 K 对应的等时应力应变曲线随着寿命的提高不断降低；而当温度为 423 K 时，等时应力应变曲线仅在起初的数小时会随着寿命的提高而降低，当产生蠕变饱和后基本不发生蠕变行为，因此 423 K 对应的等时应力应变曲线不再随着寿命的提高而降低。这样随着寿命要求的提高，353 和 423 K 对应的等时应力应变曲线之间的差异就会不断减小。

2.4 与时间相关的许用应力

当材料在服役条件下不存在蠕变行为时，即可通过拉伸应力应变曲线结合安全系数确定其许用应力。但是本研究的工业纯钛会在服役温度下产生显著的蠕

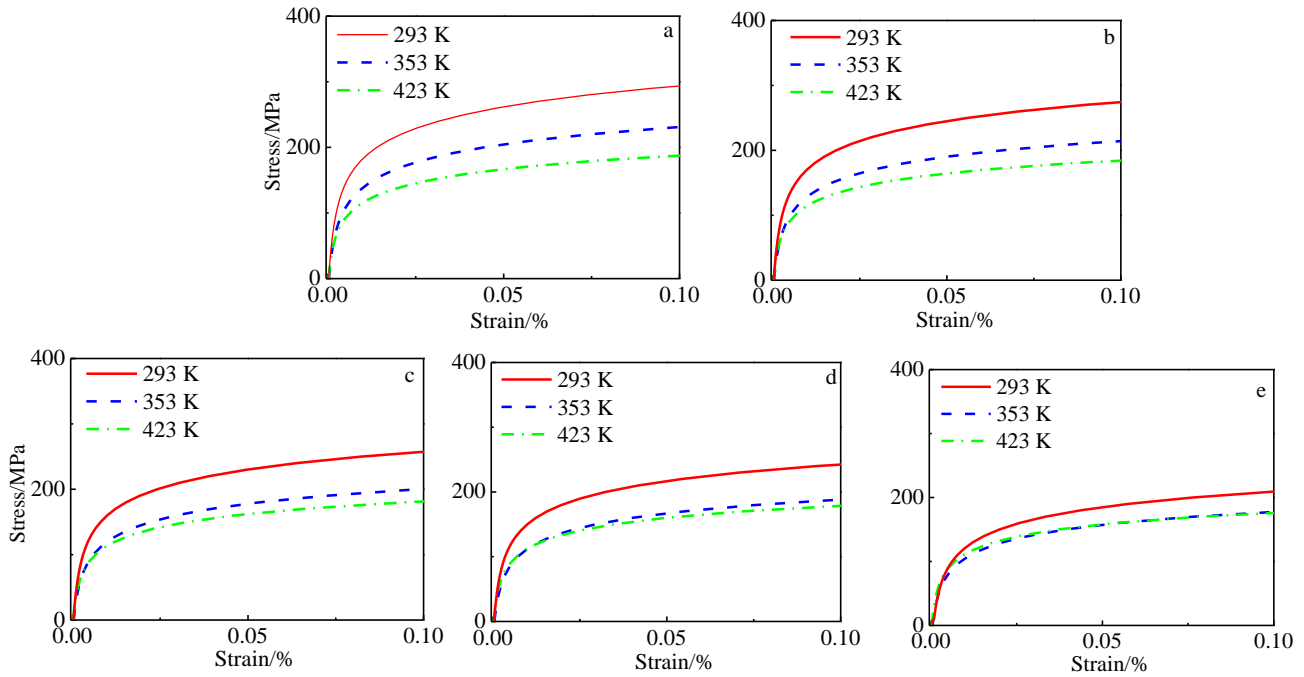


图 5 温度对等时应力应变曲线的影响

Fig.5 Influence of temperature on isochronous stress-strain curves: (a) 10 h, (b) 100 h, (c) 1000 h, (d) 10000 h, and (e) 100000 h

变变形,而蠕变大变形是结构的一种重要的失效模式。因此对于存在蠕变行为的结构需要约束其最大变形来确保结构的完整性。利用传统的许用应力对结构进行设计无法确保不发生蠕变大变形失效。因此本节基于等时应力应变曲线与结构允许的最大变形量来确定材料与时间相关的许用应力。目前 ASME 锅炉与压力容器规范第 3 册第一章中 NH 节给出了 3 种应变极限值: (1) 沿壁厚的平均应变极限值为 1%; (2) 由于应变沿壁厚线性化而产生的表面应变极限值为 2%; (3) 在任何点的局部应变极限值为 5%^[16]。为了更加方便地运用许用应力进行设计与评定,可以根据这 3 种应变值以及图 4 给出的等时应力应变曲线来计算出工业

纯钛与时间相关的许用应力。这种考虑蠕变变形的许用应力是与结构允许的最大应变值和设计寿命相关,可以标记为 s_t^ϵ , 其中上标表示结构允许的最大应变,下标表示结构的设计寿命。图 6 给出了工业纯钛在各温度下与时间相关的许用应力 s_t^ϵ 和寿命的关系曲线。通过图 6 中的曲线,就能够根据设计寿命和结构所允许的最大应变值确定材料与时间相关的许用应力。并且从图 6 可以发现,各个温度与时间相关的许用应力均会随着寿命要求的提高而降低。然而不同的温度存在差别,在 293 和 353 K 下,与时间相关的许用应力随寿命的下降斜率较大,但是在 423 K 下,与时间相关的许用应力随寿命的下降斜率非常小,表明 423 K

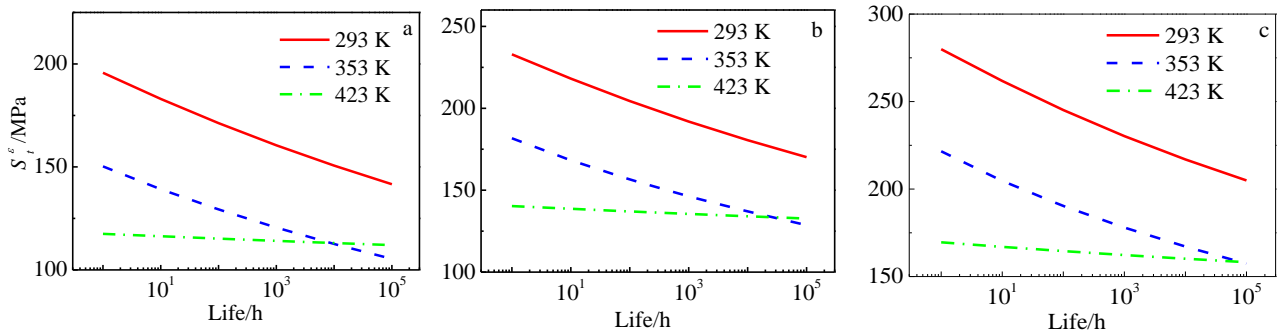


图 6 1%, 2%, 5% 3 种特征应变对应的寿命和应力的关系

Fig. 6 Relationship of allowable time dependent stress and life at three typical strain values of 1% (a), 2% (b), and 5% (c)

与时间相关的许用应力的寿命相关性较小。并且随着寿命要求的不断提高, 423 与 353 K 的与时间相关的许用应力的差距不断降低, 甚至会产生交叉。产生这种现象的原因是在 293 和 353 K 下工业纯钛产生持续性的蠕变行为, 因此在这两个温度下与时间相关的许用应力会随寿命要求的提高不断下降, 并且持续的蠕变行为提供了较大的下降斜率; 但是在 423 K 工业纯钛产生了饱和蠕变现象, 随着时间的增加蠕变行为发生了饱和, 因此在 423 K 下, 与时间相关的许用应力随寿命的下降斜率非常小。因此, 随着寿命要求的不断提高, 423 和 353 K 的与时间相关的许用应力的差距会不断缩小, 甚至会产生交叉。

3 结 论

1) 建立了工业纯钛在服役温度范围内的等时应力应变曲线。

2) 等时应力应变曲线存在显著的温度相关性, 在 293 和 353 K 下等时应力应变曲线随着寿命要求的提高不断降低, 而在 423 K 下等时应力应变曲线随着寿命的变化很小。等时应力应变曲线的温度相关性 with 工业纯钛的蠕变行为的温度相关性存在关联。

3) 通过考虑设计寿命和最大允许应变量的要求, 根据等时应力应变曲线, 提出了工业纯钛与时间相关的许用应力曲线。

参考文献 References

- [1] Tu Shandong(涂善东). *High Temperature Structural Integrity* (高温结构完整性原理)[M]. Beijing: Science Press, 2003
- [2] Wang Minmin(王敏敏), Zhao Yongqing(赵永庆), Zhou Lian(周 廉). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2002, 31(2): 135
- [3] Wang Minmin(王敏敏), Zhao Yongqing(赵永庆), Zhou Lian(周 廉). *Rare Metal Materials and Engineering* (稀有金属材料与工程)[J], 2003, 32(2): 117
- [4] Xin Shenwei(辛社伟), Zhao Yongqing(赵永庆), Wu Huan(吴欢) et al. *Rare Metal Materials and Engineering* (稀有金属材料与工程)[J], 2010, 39(2): 224
- [5] Yamada T, Kawabata K, Sato E et al. *Mater Sci Eng A*[J], 2004, 387: 719
- [6] Matsunaga T, Takahashi K, Kameyama T et al. *Mater Sci Eng A*[J], 2009, 510: 356
- [7] Oberson P G, Ankem S. *Int J Plasticity*[J], 2009, 25: 881
- [8] Sandström R. *Acta Materialia*[J], 2012, 60(1): 314
- [9] Tanaka H, Yamada T, Sato E et al. *Scripta Mater*[J], 2006, 54: 121
- [10] Ma Qiulin(马秋林), Zhang Li(张 莉), Xu Hong(徐 宏) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2007, 36(1): 11
- [11] Zhang Li(张 莉), Xu Hong(徐 宏), Ma Qiulin(马秋林) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2009, 37(12): 2114
- [12] Schaefer A O. *The Generation of Isochronous Stress-strain Curves*[M]. New York: ASME, 1972
- [13] Ganesh Kumar J, Ganesan V, Laha K et al. *Nucl Eng Des*[J], 2013, 265: 949
- [14] Kim W G, Yin S N, Koo G H. *Met Mater Int*[J], 2009, 15(5): 727
- [15] Ma C W. *Acta Metall Sin-Engl*[J], 2009, 17(4): 612
- [16] ASME Section III. *Rules for Construction of Nuclear Power Plant Components*[M]. New York: ASME, 2007
- [17] API 579-1/ASME FFS-1[S]. 2007
- [18] Peng J, Zhou C Y, Xue J L et al. *Mater Sci Forum*[J], 2012, 704: 1291
- [19] Xuan Fuzhen(轩福贞), Tu Shandong(涂善东), Wang Zhengdong(王正东) et al. *Nuclear Power Engineering* (核动力工程)[J], 2004, 25(6): 505
- [20] Xuan Fuzhen(轩福贞), Tu Shandong(涂善东), Wang Zhengdong(王正东). *Nuclear Power Engineering*(核动力工程)[J], 2003, 24(6): 508
- [21] ASTM E8/E8M-11[S]. 2011
- [22] SAC. GB/T2039—1997[S]. 1997
- [23] Frost H J, Ashby M F. *Deformation Mechanism Maps: the Plasticity and Creep of Metals and Ceramics*[M]. Oxford: Pergamon Press, 1982

Isochronous Stress-strain Curves of CP-Ti at Low and Intermediate Temperatures

Peng Jian, Zhou Changyu, Dai Qiao, He Xiaohua
(Nanjing University of Technology, Nanjing 211800, China)

Abstract: The tensile stress-strain curves and creep curves of commercially pure titanium TA2 in the service temperature range (room temperature, 353 K, 423 K) were obtained by tensile testing and creep testing. Based on the creep testing results, a significant creep phenomenon was observed in the service temperature range, and the creep feature was changed with temperature. Then, the tensile constitutive equation and the creep constitutive equation were constructed for TA2. Combining the tensile and the creep constitutive equations, the isochronous stress-strain curves were generated. Results show that the isochronous stress-strain curves of TA2 are much lower than the tensile stress-strain curves, and the isochronous stress-strain curves are decreased with longer design life. Moreover, the variation feature of isochronous stress-strain curves with design life is changed with temperature. Based on the isochronous stress-strain curves, allowable limit strain and design life, the time dependent allowable stress of CP-Ti was proposed.

Key words: commercial pure titanium; low and intermediate temperature creep; isochronous stress-strain curve; time dependent allowable stress

Corresponding author: Zhou Changyu, Ph. D., Professor, School of Mechanical and Power Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 211800, P. R. China, Tel: 0086-25-58139951, E-mail: changyu_zhou@163.com