

钛合金蠕变行为与寿命预测的研究进展

曲胜

天津重型装备工程研究有限公司, 中国·天津 300450

摘要: 钛合金因其优异的性能被广泛应用于航空航天、海洋工程等领域。蠕变行为是评估金属材料在长期高温高压环境服役下造成部件结构失效的重要指标, 钛合金在高温甚至室温环境下均易发生蠕变, 蠕变变形逐渐累积直至断裂, 严重影响结构寿命与安全。近年来, 虽然有大量学者对钛合金蠕变行为与寿命预测进行了研究, 但缺乏系统性的总结。因此, 本文分别从影响钛合金蠕变的因素、钛合金的室温蠕变特性及蠕变寿命预测模型三个方面系统性的梳理了近些年钛合金蠕变行为的研究进展, 并对钛合金蠕变性能评估与寿命预测提供一定的科学依据和指导。

关键词: 钛合金; 蠕变性能; 室温蠕变; 寿命预测

Research Advances in Creep Behavior and Service Life Prediction for Titanium Alloys

Qu Sheng

Tianjin Heavy Equipment Engineering Research Co., Ltd., China Tianjin 300450

Abstract: Titanium alloys are widely used in aerospace, marine engineering and other fields due to their excellent properties. Creep behavior is an important index to evaluate the structural failure of metal materials under long-term high temperature and high pressure service. Titanium alloy is prone to creep at high temperature or even room temperature, and creep deformation gradually accumulates until fracture, which seriously affects the life and safety of the structure. In recent years, although a large number of scholars have studied the creep behavior and life prediction of titanium alloys, there is a lack of systematic summary. Therefore, this paper systematically reviews the research progress of creep behavior of titanium alloys in recent years from three aspects: factors affecting creep of titanium alloys, creep characteristics of titanium alloys at room temperature and creep life prediction models, and provides some scientific basis and guidance for creep performance evaluation and life prediction of titanium alloys.

Keywords: Titanium alloy; Creep property; Room-temperature creep; Life prediction

0 引言

钛合金具有高比强度、耐腐蚀性、良好的疲劳与断裂性能以及优异的生物相容性等性能特点, 被广泛地应用于航空航天、海洋工程与船舶以及生物医用等尖端领域^[1]。钛合金部件长期在高温、复杂应力、高速振动等恶劣环境中服役, 其性能和组织结构都会发生变化, 导致失效, 而造成严重的安全问题^[2]。钛合金部件的蠕变现象不仅会在高温下发生也会在室温环境下发生, 而蠕变的发生会导致其结构件尺寸的精度下降、产生应力松弛等不利影响^[3]。因此, 准确的蠕变寿命预测方法对实际生产中部件结构设计、寿命管理和维修周期等具有重要意义。本文围绕影响钛合金蠕变的因素和蠕变寿命预测模型方面, 对近年来的研究成果进行系统性的总结。

1 影响钛合金蠕变的因素

钛合金蠕变行为机理相对比较复杂, 大致上可划分为扩散蠕变、低温蠕变、位错蠕变以及晶界滑移蠕变等。影响钛合金的蠕变的因素有很多, 如蠕变参数(温度、时

间)、微观组织、合金元素等内外因素, 且不同因素对不同蠕变机制的作用效果存在不尽相同。

1.1 蠕变参数对钛合金蠕变性能的影响

蠕变参数是影响钛合金的蠕变行为的重要因素之一。应力、时间、温度的改变, 都会造成钛合金的行为明显的改变。朱康英等^[4-5]对 Ti811(Ti-8Al-1Mo-1V) 的研究中发现, 该合金在 325℃~450℃和 450℃~500℃范围内的蠕变机制不同, 合金在 425℃时, 会析出大量的 Ti₃Al 相, 抑制位错的运动, 导致合金的抗蠕变能力提高; 而合金在 525℃时, 晶界内析出空穴并长大, 导致晶界内位错聚集, 产生应力集中现象, 从而生成的微裂纹并长大, 这一现象是蠕变断裂的主要原因。同时材料在不同应力条件下, 其蠕变机制也可能不同, 其在较高温度较高应力条件下蠕变, 其蠕变机制受应力的幂次方控制, 而在高温低应力条件下, 稳态蠕变速率同应力大小有比较好的比关系。

1.2 微观组织对钛合金蠕变性能的影响

对钛合金热处理方式、加工工艺的不同, 都会改变钛

合金的微观组织结构,对钛合金的蠕变性能产生影响。片层组织、网篮组织、双态组织与等轴组织是钛合金四类常见微观组织形貌。对于同种钛合金,在其他因素相似的情况下,网篮组织和片层组织一般具有较好的蠕变抗力^[2]。造成这种现象的原因是:每种钛合金的微观组织形态的蠕变机制都不相同。片层组织抗蠕变性能较好主要有两个原因:一方面是片层组织独特的层间结合与变形机制,使合金内部的应力分布相对均匀,降低了其蠕变速率;另一方面是因为其 α/β 界面在蠕变过程中对位错运动起到了抑制作用。网篮组织在蠕变中会析出 α 相与一定量的硅化物,增加了蠕变滑移的难度,有效提升了其抗蠕变的能力。双态组织的结构特征虽能有效阻碍蠕变过程中的位错运动,但由于两相的硬度不同,因此具有双态组织的钛合金在蠕变过程中内部容易产生裂纹,进而发生蠕变断裂。研究表明双态组织中的初生 α 相体积分数越少,蠕变速率越低,而对于等轴组织而言,其蠕变性能较弱与其他组织的主要原因是它的相界相对较大,层与层之间发生滑动的概率更大。

1.3 合金元素对钛合金蠕变性能的影响

合金元素是调节钛合金的抗蠕变性能的关键因素之一。研究发现,加入高熔点的合金元素,可以使得合金有较好的抗蠕变能力;另外加入提升晶界活化能的合金组分也可以改变钛合金的性能,在有效地阻止晶界发生滑移的同时,还能够提高钛合金的裂纹表面能,增强合金的高温力学性能。加入合金元素须遵循数量原则,适量添加合金元素可有效增强抗蠕变能力,含量偏高或偏低均不利于性能提升。

2 蠕变模型

蠕变指标是部件结构在高温环境下服役失效的重要指标之一,对准确评估材料的蠕变性能对结构设计和分析至关重要。由于蠕变实验的周期较长,成本较大,因此,蠕变寿命预测模型为钛合金蠕变寿命预测提供了一种高效可靠的方法,能够利用短时蠕变数据准确外推长期蠕变行为。

2.1 基于传统方法的蠕变寿命预测模型

材料的蠕变问题由来已久,已经有了大量的研究和成果郭育豪等^[6]基于微分自治法与连续损伤力学(CDM)建立了一种新型的钛合金室温受压蠕变损伤本构模型。该模型的拟合结果如图4所示。研究表明,这种模型的精度很高,和试验误差不超过10%,可准确预测深潜器耐压壳等受压结构的室温蠕变损伤分布,为钛合金深海结构安全评估提供理论支撑。

Chao等^[7]为改善传统 θ 投影模型在恒载荷下参数不稳定、预测精度不足等问题,在其基础上提出了一种五参

数改进 θ 投影模型,该模型由式(1)

$$\varepsilon = \theta_1(1 - e^{-\theta_2 t}) + \theta_3(e^{\theta_4 e^{\theta_5 t}} - 1) \quad (1)$$

表示,式中 ε 为蠕变应变, t 为蠕变时间,参数 θ_i ($i=1、2、3、4、5$)通过曲线的回归来确定。结果表明,改进模型的 θ 参数与应变范围关联不大,具有很好的稳定性,为高温构件安全评估提供可靠方法。

Ye等^[8]基于归一化应力(σ/σ_{TS})与Monkman-Grant方程,构建出一种新型全阶段蠕变本构模型,用于解决钛合金高温蠕变行为表征与寿命预测等问题。图1展示了不同应力下各个模型预测曲线与试验数据的比较。由图1可知,和Batsoulas模型、 θ 投影模型和连续损伤力学(CDM)模型相比,该模型可以精准地预测出蠕变的三个阶段的变化,尤其是对蠕变第一阶段和第二阶段更为准确。

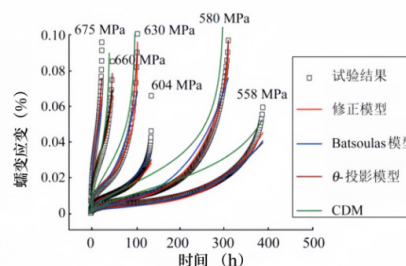


图1 不同应力下各个模型预测曲线与试验数据的比较^[8]

2.2 基于机器学习的蠕变寿命预测模型

随着时代的进步,科技的发展,机器学习逐步走入科研工作者的视野。机器学习方法可以从大量的实验数据中学习材料性质并做出快速预测,从而提高预测精度,降低实验成本,提升效率。如今,基于机器学习的蠕变寿命预测模型已取得一定的成果。

Zong等^[9]用细胞神经网络的特征来改进高温钛合金的蠕变断裂寿命预测。在测试数据集上用不同的算法验证了基于CNN的特征的优越性,其结果如图2所示。该模型两次的决定系数 R^2 均大于0.99,在一定程度上解决了高温钛合金的蠕变试验数据较少、传统模型外推误差较大等问题。

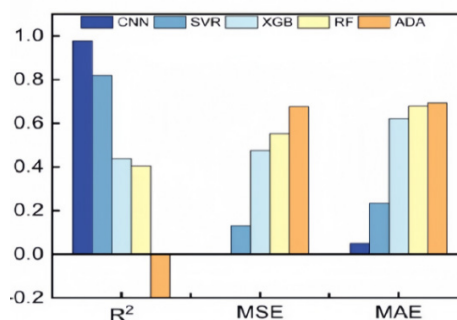


图2 CNN和四种典型算法的模型性能^[9]

Wang等^[10]提出一种基于机器学习的高温钛合金蠕变

持久寿命预测的简化公式。该公式由短时蠕变断裂寿命数据得到的，仅与试验温度、应力以及钼当量相关，同时也对不同测试数据集上模型性能进行比较。结果表明，该模型的预测性能比较优越，对不同长期蠕变断裂寿命的试验数据具有较好的普适性。

3 结语

钛合金蠕变受温度、应力、微观组织及合金元素共同影响，网篮 / 片层组织抗蠕变较优，适量合金元素可提升性能。在钛合金的寿命预测模型中，蠕变本构模型一般基于物理机制，其可解释性和可外推性均比较强，但存在模型较为复杂，实验工作量较大以及对新材料新工艺适应性差等问题。随着科技的进步，机器学习的方法逐渐普及。机器学习方法可以从大量的实验数据中学习材料性质的复杂模式并做出快速预测，从而提高预测精度，降低实验成本，提高效率。

参考文献：

[1] 杨佩, 康聪, 李维. TC4 钛合金工艺进展[J]. 湖南有色金属, 2020, 36(1):45-47+60.

[2] 李聪, 侯江鹏, 陈维等. 钛合金抗蠕变性能研究进展[J]. 机械强度, 2025, 47(12):31-47.

[3] 汪军. 钛合金的蠕变行为研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2008.

[4] 朱康英, 赵永庆, 李佐臣等. Ti811 合金在不同温度和时间下的蠕变性能[J]. 中国有色金属学报, 1998,

(S2):76-79.

[5] 赵永庆, 朱康英, 李佐臣等. Ti811 合金的热稳定性[J]. 稀有金属材料与工程, 1997(03): 35-39.

[6] 郭育豪, 刘刚, 宋育泽. 钛合金室温受压蠕变损伤本构模型[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2024, 45(4): 642-650.

[7] Chao Fu, Yadong Chen, Xiaofei Yuan, Sammy Tin, Stoichko Antonov, Koichi Yagi, Qiang Feng, A modified θ projection model for constant load creep curves-I, Introduction of the model[J]. Journal of Materials Science & Technology, Volume35, Issue1, 2019.

[8] Ye W., Hu X., Song Y. A new creep model and its application in the evaluation of creep properties of a titanium alloy at 500°C[J]. Mech Sci Technol 134, 2317 - 2326 (2020).

[9] Zong B, Li J, Zhou C, et al. Enhancing creep rupture life prediction of high - temperature titanium alloys using convolutional neural networks[J]. Materials Genome Engineering Advances, 2024, 2(4): e68-e68.

[10] Wang P, Zhao S, Zhou C, et al. Simple formula learned via machine learning for creep rupture life prediction of high-temperature titanium alloys[J]. Journal of Materials Informatics, 2024, 4(4):24-24.

作者简介：曲胜（2000.08-），男，汉族，山东平度人，本科，助理工程师，研究方向：大型铸锻件断裂力学。