文章编号:1674-7607(2026)10-0044-08 DOI:10.19805/j.cnki.jcspe.2026.250459

# 超超临界汽轮机阀门材料服役条件下应力松弛行为及蠕变本构模型

史宸伊, 李连翠, 杨昌顺, 田根起, 张 含
(上海发电设备成套设计研究院有限责任公司, 上海 200240)

**摘 要:** 针对超超临界汽轮机阀门用 ST460TS、ST12T 及 Stellite 6 合金,在阀门服役温度 630 ℃和不同初始应力下开展了多组应力松弛试验,研究了不同材料的初始应力对应力松弛的影响。采用四次指数衰减函数对应力松弛曲线进行拟合,得到基于应力松弛的全应力阶段蠕变本构模型。结果表明:ST460TS、ST12T 在不同应力下呈现相同的特点,整个应力松弛过程可以分为快速松弛、过渡松弛和渐进稳态 3 个阶段;四次指数衰减函数可以准确描述 ST460TS、ST12T 的应力松弛过程并预测松弛极限;Stellite 6 由于其低塑性,在高初始应力下呈阶梯式松弛行为,在低初始应力下为连续衰减松弛。

**关键词:** 应力松弛; 指数衰减函数; 蠕变本构模型; 超超临界汽轮机; 阀门
**中图分类号:**TM621 **文献标志码:**A **学科分类号:**470.30

# Stress Relaxation Behavior and Creep Constitutive Model of Ultra-supercritical Steam Turbine Valve Materials Under Service Conditions

*SHI Chenyi*, *LI Liancui*, *YANG Changshun*, *TIAN Genqi*, *ZHAN Han*
(Shanghai Power Equipment Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200240, China)

**Abstract:** Multiple sets of stress relaxation tests were conducted on ST460TS, ST12T and Stellite 6 alloys used in ultra-supercritical steam turbine valves, under different initial stresses and at the valve service temperature of 630 °C. The influence of initial stress on stress relaxation was investigated for various materials. The stress relaxation curves were fitted using a four-order exponential decay function, and a full-stress-range creep constitutive model based on stress relaxation was derived. Results show that ST460TS and ST12T exhibit similar characteristics under different stress levels. The entire stress relaxation process can be divided into three stages: rapid relaxation, transitional relaxation and progressive steady state. The four-order exponential decay function can accurately describe the stress relaxation process of ST460TS and ST12T, and predict the relaxation limit. Stellite 6 exhibits stepwise relaxation behavior under high initial stress due to its low plasticity, while it shows continuous decay relaxation under low initial stress.

**Key words:** stress relaxation; exponential decay function; creep constitutive model; ultra-supercritical steam turbine; valve

**收稿日期:**2025-07-17 **修订日期:**2025-08-24

**作者简介:**史宸伊(1998—),男,满族,吉林四平人,助理工程师,硕士研究生,主要研究方向为电站金属材料疲劳、蠕变和松弛性能,E-mail: shichenyi@speri.com.cn。

在超超临界汽轮机的复杂系统中，阀门是至关重要的核心部件之一[1]，其性能直接影响汽轮机的启动、运行和停机过程的平稳性与安全性。超超临界汽轮机阀门在极端环境服役过程中面临诸多问题与挑战[2]。国家能源局于 2024 年 3 月发文《国家能源局综合司关于加强发电机组检修安全管理的通知》，要求重点关注超超临界发电机组汽轮机高中压主汽阀、调阀间断性卡涩、严密性不合格、关闭时间超标等隐患。电厂反馈，主汽联合阀部件在高温高压的极端工况下长期运行后，由于阀杆衬套与导套材料发生应力松弛，过盈配合导致结构松动，阀杆的往复运动会带动导套部分脱出衬套，无法回到原位，导致阀门关闭不严。阀门材料发生应力松弛导致的密封泄漏或松脱事故，致使机组非计划停运、设备损坏及经济损失。因此，为提高超超临界汽轮机阀门品质，保证其安全服役，急需对阀门用材料的松弛行为进行探究。

ST460TS、ST12T 及 Stellite 6 凭借优越的高温性能、良好的综合力学性能和加工性能，成为超超临界汽轮机阀门制造中的重要材料。近年来，学者对 ST460TS、ST12T 及 Stellite 6 的常规力学性能及热处理工艺等开展了研究[3-5]，但针对 630 ℃高温服役环境中的应力松弛及蠕变本构模型研究较少。因此，针对服役条件下 3 种典型超超临界汽轮机阀门部件材料，结合高温力学性能研究其高温应力松弛的特点和初始应力的影响，对试验数据进行拟合处理，推导基于应力松弛的蠕变本构模型，以了解阀门材料高温环境下的尺寸变化规律。本研究为使用该合金制造的阀门部件服役过程中的工作条件选择及合金松弛规律提供试验依据，为超超临界汽轮机主联合阀的设计与选材提供支持。

## 1　试验材料与方法

试验所用材料为阀杆衬套材料 ST460TS，导套材料 ST12T 及 Stellite 6，均为待加工成阀门部件的交货态棒料。3 种材料化学成分见表 1，室温及 630 ℃的高温力学性能参数分别见表 2 和表 3。

**表 1　ST460TS、ST12T 及 Stellite 6 合金化学成分**

**Tab. 1　Chemical composition of ST460TS, ST12T and Stellite 6 alloys**　单位：%

| 材料 | w(C) | w(Mn) | w(Si) | w(S) | w(P) | w(Ni) | w(Cr) | w(Mo) | w(V) | w(Al) | w(Cu) | w(Fe) | w(W) | w(Co) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ST460TS | 0.198 | 0.62 | 0.21 | 0.006 | 0.005 | 0.20 | 1.42 | 0.70 | 0.31 | 0.01 | | 余量 | | |
| ST12T | 0.203 | 0.55 | 0.29 | 0.004 | 0.023 | 0.37 | 11.30 | 0.96 | 0.29 | | 0.07 | 余量 | | |
| Stellite 6 | 1.150 | 0.06 | 1.08 | 0.005 | 0.005 | 2.14 | 28.73 | 0.50 | | | | 1.71 | 4.72 | 余量 |

**表 2　ST460TS、ST12T 及 Stellite 6 室温力学性能**

**Tab. 2　Room-temperature mechanical properties of ST460TS, ST12T and Stellite 6**

| 材料 | 屈服强度/MPa | 抗拉强度/MPa | 伸长率/% | 断面收缩率/% | 弹性模量/GPa |
|---|---|---|---|---|---|
| ST460TS | 633 | 722 | 23.0 | 78.0 | 215 |
| ST12T | 842 | 968 | 16.0 | 54.0 | 216 |
| Stellite 6 | 541 | 896 | 2.0 | 2.0 | 209 |

**表 3　ST460TS、ST12T 及 Stellite 6 高温力学性能**

**Tab. 3　High-temperature mechanical properties of ST460TS, ST12T and Stellite 6**

| 材料 | 屈服强度/MPa | 抗拉强度/MPa | 伸长率/% | 断面收缩率/% | 弹性模量/GPa |
|---|---|---|---|---|---|
| ST460TS | 357 | 377 | 31.0 | 91.0 | 165 |
| ST12T | 330 | 351 | 35.0 | 93.0 | 119 |
| Stellite 6 | 475 | 554 | 2.0 | 2.0 | 160 |

ST460TS 是一种低合金耐热钢，为电炉＋电渣重熔(ESR)工艺冶炼得到的外径为 100 mm 的棒料，热处理工艺为调质：(925±5) ℃水淬＋720 ℃空冷，去应力工艺为：670～675 ℃出炉空冷。ST12T 是一种马氏体耐热不锈钢，是通过电炉＋电渣重熔工艺冶炼得到的外径为 50 mm 的棒料，热处理工艺为 1 040 ℃淬火＋720 ℃回火。Stellite 6 是一种高性能钴基高温合金。

根据 GB/T 10120—2013《金属材料 拉伸应力松弛试验方法》[6]开展高温应力松弛试验，试验设备为 RPL50 型电子蠕变松弛试验机，试验加载和载荷控制过程均通过电脑程序控制电子伺服系统来完成。松弛试验温度设定为超超临界汽轮机主联合阀服役温度 630 ℃，应力松弛试验初始应力应低于试验温度下的屈服强度[7]，因此 ST460TS、ST12T 试验初始应力设定为 200、250、300 MPa；Stellite 6 试验初始应力设定为为 200、300、400 MPa。施加初始应力后，通过电子伺服系统维持恒定应变。为了便于准确测量和控制松弛变形，松弛试验采用带凸台的标准圆棒状蠕变松弛试样，具体试样尺寸见图 1。

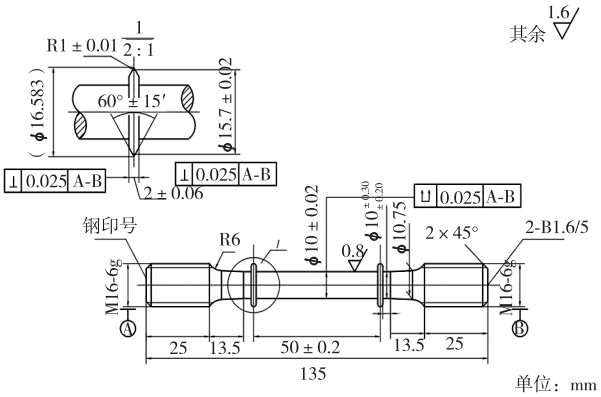



图 1 应力松弛试样尺寸

Fig. 1 Size of stress relaxation specimen

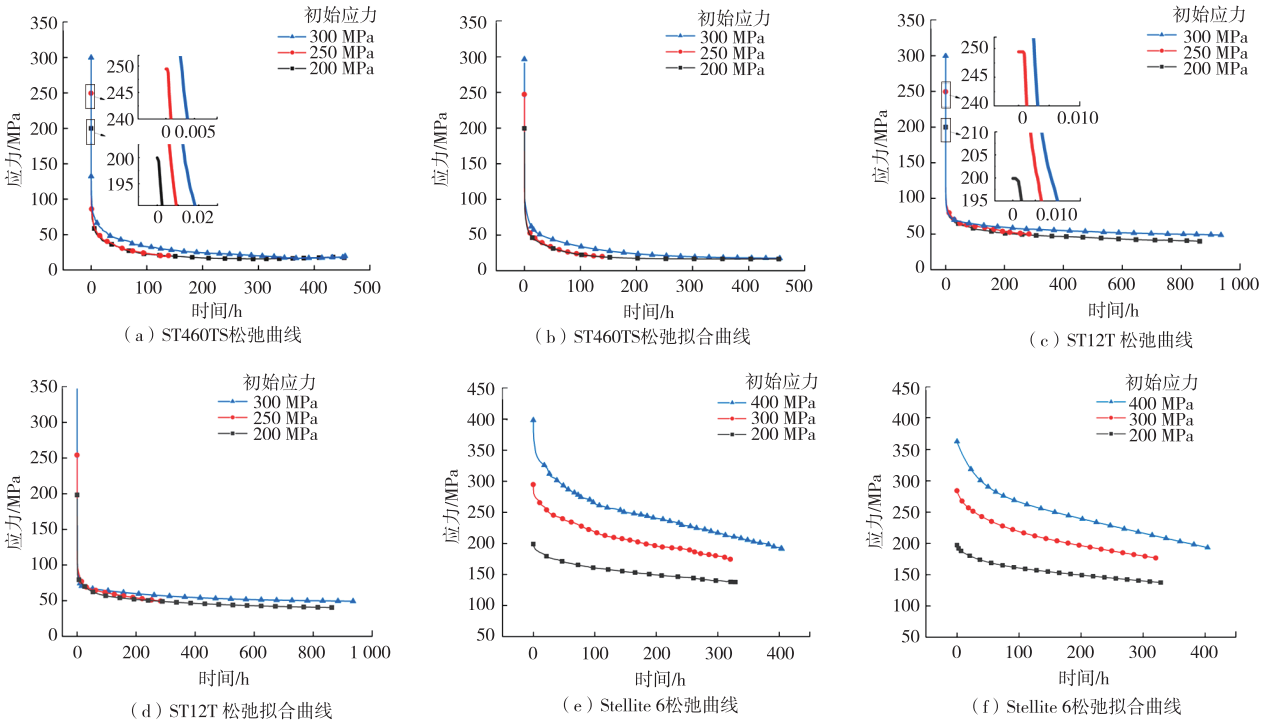
## 2 结果与讨论

### 2.1 应力松弛曲线

应力松弛曲线是在高温服役环境下评估金属材料部件长期尺寸稳定性和承载能力失效风险的关键力学响应[8]。在规定 630 ℃试验温度下，对试样施加不同初始应力载荷，保持初始变形量恒定，记录应力随时间逐渐衰减得到的应力松弛曲线。记录的原始数据中存在影响模型拟合能力的异常值和噪声，因此进行数据预处理时，在保留曲线绝大部分特征和趋势的前提下对数据进行清理和修正，得到的 3 种材料松弛曲线，分别如图 2(a)、图 2(c)、图 2(e)所示。由表2、表3可知，ST460TS、ST12T材料的高温力学性能相似，而 Stellite 6 断面收缩率及伸长率仅为 2%，属于典型高强度脆性材料，其应力松弛曲线与 ST460TS 和 ST12T 有较大区别，因此结合 3 种材料的高温力学性能进行讨论。

由图 2(a)可见，ST460TS 在不同初始应力下的松弛曲线具有相同的规律，即在试验刚开始的极短时间内呈现出快速的应力松弛现象，3 条曲线几乎重合呈垂直下降趋势，接着 ST460TS 应力快速下降至 85 MPa 后，随着时间的延长，应力松弛趋于稳定，剩余应力趋于某一固定极限值，该值即为应力松弛极限 $\sigma_r$。400 h 后剩余应力几乎相同，约为 18 MPa，说明初始应力的变化对 ST460TS 应力松弛极限影响较小，初始应力敏感性较低。

由图 2(c)可见，ST12T 在不同初始应力条件下的松弛曲线与 ST460TS 类似，区别在于 300 MPa 初始应力曲线始终高于 250、200 MPa 曲线，初始应力越大，应力松弛极限越大，$\sigma_r$具有高初始应力敏感性。ST460TS 与 ST12T 曲线趋势具有相似性是由于塑性主导的渐进松弛、高塑性(断后伸长率＞30%、断面收缩率＞90%)赋予两者均匀的变形能力，应力释放以连续位错重组为主，曲线平滑无突变。二者均呈现典型的三阶段松弛规律：快速松弛阶段(＜2 h)，应力急剧下降；过渡松弛阶段(2～100 h)，应力衰减速率显著减缓；渐进稳态阶段(＞100 h)，应力趋近松弛极限平衡值。




(a) ST460TS松弛曲线　(b) ST460TS松弛拟合曲线　(c) ST12T 松弛曲线

(d) ST12T 松弛拟合曲线　(e) Stellite 6松弛曲线　(f) Stellite 6松弛拟合曲线

图 2 ST460TS、ST12T 及 Stellite 6 在不同初始应力下的应力松弛曲线及拟合曲线

Fig. 2 Stress relaxation curves and fitting curves of ST460TS, ST12T and Stellite 6 under different initial stresses

由图 2(e)可见，Stellite 6 由于其低塑性(断面收缩率及伸长率仅为 2%)，松弛曲线趋势与前两者有较大差异，存在临界应力阈值，在初始应力为 300、400 MPa 时出现阶梯式松弛，单次应力降幅约为10～20 MPa，阶梯式松弛反映了一种损伤累积主导的应力释放机制；初始应力 200 MPa 时应力为连续衰减。3 种初始应力水平下不同材料均具有较高的剩余应力，松弛速率均匀减小，松弛时间达到 300～400 h后曲线暂未进入松弛稳定阶段。

根据上述分析，将塑性金属材料(ST460TS 和 ST12T)整个松弛曲线划分为如图 3 所示的 3 个阶段。其中，$\sigma_{rt}$为 $t$ 时刻的剩余应力。该曲线揭示了金属材料在高温恒定应变下应力随时间单调递减的典型规律。

快速松弛阶段Ⅰ：在施加应变后的瞬间，材料承受初始应力 $\sigma_0$。保持恒定应变的同时材料内部应力迅速下降。此阶段对应材料内部微观缺陷(如位错)的快速脱钉、滑移以及初始回复过程[9]。松弛速率在此阶段达到接近垂直下降的最大值。

过渡松弛阶段Ⅱ：随着松弛时间的延长，应力下降到Ⅰ—Ⅱ阶段分界应力 $\sigma_{high}$，松弛速率显著减缓，曲线斜率逐渐变小。此阶段主要受控于热激活过程，例如位错的攀移、晶界滑移以及原子/空位的扩散。这些过程需要更长的时间尺度来协调微观结构的调整，以逐步释放内部应力[10]。

渐进稳态阶段Ⅲ：经过较长时间后，应力下降到Ⅱ—Ⅲ阶段分界应力 $\sigma_{low}$，此阶段松弛速率显著降低并渐趋稳定，占整个松弛过程的主导地位。曲线逐渐逼近一个渐近值，称为松弛极限应力 $\sigma_r$。此时，材料内部由塑性变形产生的内应力与材料在该温度下的流变应力达到动态平衡状态。松弛极限应力 $\sigma_r$代表了在恒定应变和特定温度下，经过充分弛豫后材料能够长期维持的应力水平。该值通常不为零，反映了微观结构(如位错网络、亚晶界、第二相粒子等)对变形的抗力[8,11]。

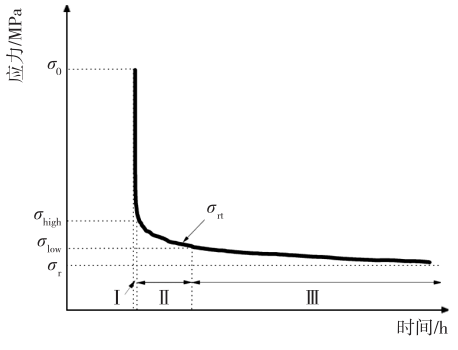



图 3　应力松弛曲线示意图

Fig. 3　Schematic diagram of stress relaxation curve

## 2.2　应力松弛曲线拟合及预测

为了预测材料在应力松弛过程中任意时刻的剩余应力及松弛极限应力，需要对应力松弛曲线进行拟合。学者提出了诸多经验公式(如对数方程、指数方程及延迟函数)[12-13]来处理松弛数据，对比发现，基于应力松弛极限概念及 Maxwell 黏弹性理论模型的指数衰减函数具有拟合精度高、适应性广的优点，并被广泛应用于钛合金及高温合金材料的松弛曲线拟合。广义 Maxwell 模型为

$$\sigma=\sigma_r+\sum_{i=1}^{n}A_i e^{-t/a_i} \tag{1}$$

式中：$\sigma$ 为瞬时剩余应力；$A_i$、$a_i$均为待定常数；$n$ 为无穷项。

对试验曲线进行拟合预处理，发现 $n=2$、3 时二、三次指数衰减函数拟合决定系数 $R^2$ 偏低，拟合效果相对较差。因此取 $n=4$，得到四次指数衰减函数。

$$\sigma=\sigma_r+A_1 e^{-t/a_1}+A_2 e^{-t/a_2}+A_3 e^{-t/a_3}+A_4 e^{-t/a_4} \tag{2}$$

对不同条件下的松弛曲线进行四次指数衰减函数拟合，拟合曲线如图 2(b)、图 2(d)及图 2(f)所示，拟合后的常数见表 4。综合图 2 和表 4，所有试验条件下的拟合曲线与试验数据基本吻合，决定系数 $R^2$ 较高，均大于 0.99。这说明采用四次指数衰减函数能够准确描述及预测 ST460TS、ST12T 及 Stellite 6 在 630 ℃下的应力松弛曲线。

如图 2(b)及表 4 所示，ST460TS 在 300、250、200 MPa 的初始应力下松弛极限分别为 16.896 1、16.969 9及 16.439 8 MPa，说明在屈服强度之下的初始应力并不会影响 ST460TS 的松弛极限。低合金耐热钢 ST460TS 表现出不为零、相对稳定的松弛极限，原因在于其微观组织中富含稳定的碳化物(如 $M_{23}C_6$、MX)沉淀相和位错亚结构。这些强化相能有效地钉扎位错和晶界，阻碍位错的进一步运动和增殖。当应力下降到不足以驱动位错克服这些障碍时，松弛过程就趋于稳定，剩余应力得以保持，即为稳定的松弛极限值。

如图 2(d)及表 4 所示，ST12T 在 200、250、300 MPa 3 种初始应力条件下的松弛极限分别为48.199 5、37.645 7 及 34.589 7 MPa，松弛极限随初始应力升高而增大。ST12T 的松弛极限并不固定，原因在于更高的初始应力使得初始位错密度更高，促进了位错胞结构或亚晶界的形成，这些更稳定的微观结构反过来提供了更强的抗塑性变形能力，从而导致剩余应力更高。

从图 2(f)可以看出，Stellite 6 在不同初始应力下的拟合曲线与试验数据也基本吻合，决定系数 $R^2$ 均大于 0.99，但表 4 中 Stellite 6 的拟合结果出现了负的松弛极限，意味着材料内部的剩余应力为压缩应力[13]，这显然是不可能的。指数衰减函数模型源于广义 Maxwell 黏弹性模型，其核心假设是材料的行为是黏弹性的，描述材料应力随时间平滑、连续地指数衰减，并最终趋近于正的松弛极限，因此该模型不适用于 Stellite 6。Stellite 6 的实际行为是脆性材料的阶梯式松弛，因其微观结构中富含大量的硬质碳化物，这些相极大地阻碍了位错的滑移，使均匀塑性变形非常困难。其松弛机制不是连续的位错滑移和攀移，而是微裂纹的萌生和扩展、碳化物的断裂或界面脱黏，是损伤累积的过程。在高应力(300、400 MPa)下，应力达到了某些脆弱界面或碳化物本身的强度，导致微观损伤突然发生，这表现为应力瞬间阶跃式下降(应力降幅 $\Delta\sigma\approx10\sim20$ MPa)。应力下降后，载荷由尚未损伤的部分承担，直到应力再次累积到足以引发下一次损伤，如此重复，形成“阶梯”。在低应力(200 MPa)下，应力不足以引发明显的突发性损伤，因此表现为看似连续的衰减，但其底层机制仍与塑性良好的 ST460TS、ST12T 不同。

**表 4 ST460TS、ST12T 及 Stellite 6 四次指数衰减函数应力松弛模型常数**

**Tab. 4 Constant values of four-order exponential decay function stress relaxation model for ST460TS, ST12T and Stellite 6**

| 材料 | $\sigma_0$/MPa | $\sigma_r$/MPa | $A_1$ | $a_1$ | $A_2$ | $a_2$ | $A_3$ | $a_3$ | $A_4$ | $a_4$ | $R^2$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ST460TS | 300 | 16.869 1 | 42.723 3 | 109.810 3 | 103.174 0 | 0.005 6 | 43.732 2 | 6.738 40 | 89.983 7 | 0.149 3 | 0.998 8 |
| | 250 | 16.969 9 | 76.791 8 | 0.008 0 | 70.434 0 | 0.126 7 | 40.940 2 | 52.405 00 | 41.967 4 | 3.296 1 | 0.999 5 |
| | 200 | 16.439 8 | 54.445 6 | 0.179 9 | 37.163 8 | 3.686 1 | 53.889 0 | 0.013 98 | 37.603 1 | 54.984 0 | 0.999 1 |
| ST12T | 300 | 48.199 5 | 41.391 3 | 4.789 2 | 22.037 3 | 317.316 9 | 133.979 6 | 0.004 20 | 72.075 1 | 0.116 2 | 0.998 7 |
| | 250 | 37.645 7 | 60.449 9 | 0.184 1 | 31.362 0 | 10.935 8 | 91.509 9 | 0.006 88 | 36.153 2 | 320.308 4 | 0.998 6 |
| | 200 | 34.589 7 | 22.933 5 | 412.551 2 | 23.224 9 | 33.210 4 | 48.539 7 | 0.710 30 | 65.984 5 | 0.0196 9 | 0.998 4 |
| Stellite 6 | 400 | −453.111 6 | 246.968 7 | 2 952.856 1 | 247.211 2 | 2 965.160 4 | 246.962 6 | 2 952.787 90 | 74.883 2 | 31.012 7 | 0.997 6 |
| | 300 | −351.854 9 | 290.913 3 | 3 520.155 7 | 43.817 7 | 60.327 5 | 13.534 6 | 6.730 60 | 287.738 0 | 3 536.464 5 | 0.997 8 |
| | 200 | −27.365 2 | 22.239 8 | 36.985 3 | 5.372 6 | 2.412 7 | 98.642 4 | 2 468.460 90 | 98.402 84 | 1 452.468 33 | 0.999 4 |

### 2.3 基于应力松弛的蠕变本构方程

在应力松弛过程中，随着内应力的减小，蠕变应变增速变慢，弹性应变的减小又导致应力降低，蠕变和应力松弛同时发生，相互影响。大多数学者认为可以把应力松弛理解为载荷(应力)不断减小的“多级”蠕变[11]。为了更深入研究应力松弛规律，需对蠕变应变速率与应力的函数关系(即基于应力松弛的蠕变本构方程)进行分析。

应力松弛过程作为小变形过程，存在弹性应变与塑性(蠕变)应变的同时保持总应变恒定，因此满足：

$$\varepsilon_t=\varepsilon_e+\varepsilon_c \tag{3}$$

式中：$\varepsilon_t$ 为总应变；$\varepsilon_e$ 为弹性应变；$\varepsilon_c$ 为蠕变应变。

应力松弛过程中总应变保持不变，弹性应变随着时间的延长逐渐转化为蠕变应变，从而使得材料内部的应力逐渐降低。

$$\frac{\mathrm{d}\varepsilon_t}{\mathrm{d}t}=\frac{\mathrm{d}\varepsilon_e}{\mathrm{d}t}+\frac{\mathrm{d}\varepsilon_c}{\mathrm{d}t}=0 \tag{4}$$

$$\dot{\varepsilon}_t=\dot{\varepsilon}_e+\dot{\varepsilon}_c=0 \tag{5}$$

式中：$\dot{\varepsilon}_t$ 为总应变速率；$\dot{\varepsilon}_e$ 为弹性应变速率；$\dot{\varepsilon}_c$ 为蠕变应变速率。

弹性应变满足胡克定律。

$$\varepsilon_e=\frac{1}{E}\sigma \tag{6}$$

式中：$E$ 为材料弹性模量。

$$\frac{\mathrm{d}\varepsilon_e}{\mathrm{d}t}=\frac{1}{E}\frac{\mathrm{d}\sigma}{\mathrm{d}t} \tag{7}$$

联立式(2)、式(4)与式(7)得到：

$$\dot{\varepsilon}_c=\frac{\mathrm{d}\varepsilon_c}{\mathrm{d}t}=\frac{1}{E}\left[\frac{A_1}{a_1}\mathrm{e}^{-t/a_1}+\frac{A_2}{a_2}\mathrm{e}^{-t/a_2}+\frac{A_3}{a_3}\mathrm{e}^{-t/a_3}+\frac{A_4}{a_4}\mathrm{e}^{-t/a_4}\right] \tag{8}$$

通过式(8)即可得到蠕变应变速率与应力的关系。由于 Stellite 6 不符合式(2)的四次指数衰减应力松弛行为模型，因此只对 ST460TS、ST12T 的蠕变本构关系进行处理。ST460TS、ST12T 在不同初始应力下的蠕变应变速率-应力曲线如图 4 所示。

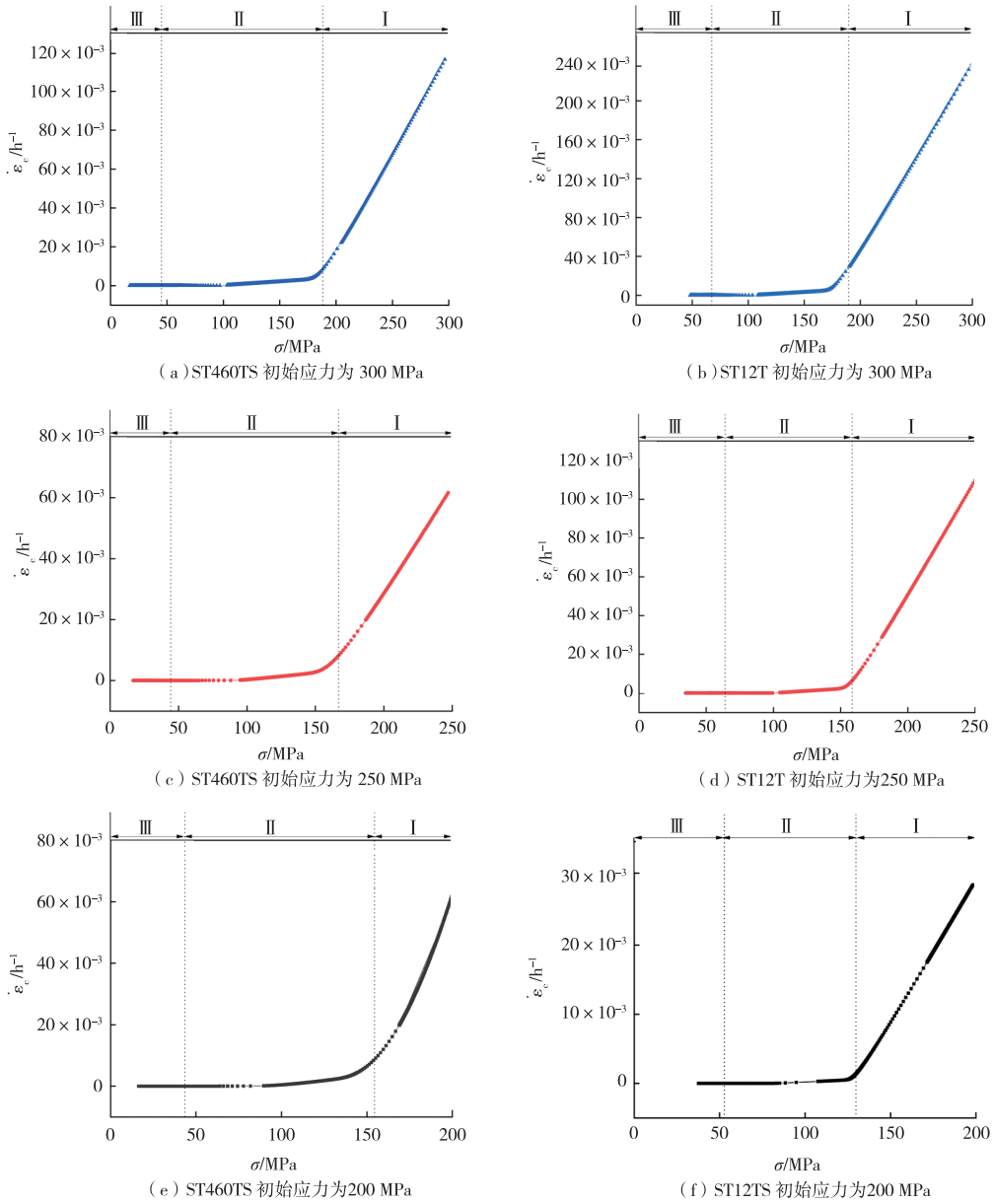
可以看出，不同初始应力条件下，蠕变应变速率与应力的关系曲线具有相似的特点，每条曲线同样可分为 3 个区域，即快速松弛阶段Ⅰ、过渡松弛阶段Ⅱ及渐进稳态阶段Ⅲ，验证了图 3 的分析结果。

ST460TS、ST12T 的蠕变应变速率-应力曲线在Ⅰ、Ⅲ阶段曲线呈明显的线性相关关系。针对Ⅱ阶段，引入能够描述高中低应力状态的双曲正弦型蠕变本构模型[14-15]，根据曲线特点，建立基于应力松弛全应力阶段的蠕变本构模型。

$$\begin{cases}\dot{\varepsilon}_c = A\sigma + B & (\sigma \geqslant \sigma_{high}) \\ \dot{\varepsilon}_c = C(\sin hD\sigma)^m + E\sigma + F & (\sigma_{high} > \sigma > \sigma_{low}) \\ \dot{\varepsilon}_c = F\sigma + G & (\sigma_r \leqslant \sigma \leqslant \sigma_{low})\end{cases} \tag{9}$$

式中：$A \sim H$、$m$ 为蠕变本构方程待定常数。

对不同条件下的蠕变应变速率-应力曲线进行三阶段蠕变本构方程进行拟合。Ⅰ-Ⅱ阶分界应力 $\sigma_{high}$ 及Ⅱ-Ⅲ阶段分界应力 $\sigma_{low}$ 的判定依据为 3 个阶段拟合的决定系数 $R^2$，其值均大于 0.95，拟合后的常数如表 5 所示。这说明采用式(9)能够较准确地描述及预测 ST460TS、ST12T 材料在 630 ℃下的蠕变本构关系。基于应力松弛全应力阶段蠕变本构模型和表 5 的数据可作为 ST460TS、ST12T 的非线性材料常数用于有限元模拟，以了解阀门材料在高温环境下的尺寸变化规律[16-17]。




(a) ST460TS 初始应力为 300 MPa　(b) ST12T 初始应力为 300 MPa

(c) ST460TS 初始应力为 250 MPa　(d) ST12T 初始应力为250 MPa

(e) ST460TS 初始应力为200 MPa　(f) ST12TS 初始应力为200 MPa

图 4　在不同初始应力下 ST460TS、ST12T 的蠕变应变速率-应力曲线

Fig. 4　Creep strain rate-stress relaxation curves of ST460TS and ST12T under different initial stresses

表 5 ST460TS 和 ST12T 基于应力松弛模型的蠕变本构方程常数

Tab. 5 Constant values of creep constitutive equation based on stress relaxation model for ST460TS and ST12T

| 材料 | $\sigma_0$/MPa | $A$ | $B$ | $C$ | $D$ | $E$ | $F$ | $G$ | $H$ | $m$ | $\sigma_{high}$/MPa | $\sigma_{low}$/MPa |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ST460TS | 300 | $1.018\times10^{-3}$ | −0.186 5 | $7.592\times10^{4}$ | $3.987\times10^{-4}$ | $7.338\times10^{-6}$ | $-4.824\times10^{-4}$ | $5.556\times10^{-8}$ | $-9.384\times10^{-7}$ | 6.388 | 189 | 46 |
| | 250 | $6.802\times10^{-4}$ | −0.107 2 | $2.120\times10^{5}$ | $5.032\times10^{-4}$ | $7.588\times10^{-6}$ | $-5.410\times10^{-4}$ | $1.169\times10^{-7}$ | $-1.987\times10^{-6}$ | 7.045 | 166 | 45 |
| | 200 | $1.290\times10^{-3}$ | −0.199 1 | $8.952\times10^{5}$ | $7.612\times10^{-4}$ | $9.640\times10^{-6}$ | $-6.571\times10^{-4}$ | $1.232\times10^{-7}$ | $-2.037\times10^{-6}$ | 8.706 | 156 | 44 |
| ST12T | 300 | $1.900\times10^{-3}$ | −0.333 5 | $6.254\times10^{8}$ | $1.290\times10^{-3}$ | $2.559\times10^{-5}$ | $-2.190\times10^{-3}$ | $2.649\times10^{-8}$ | $-1.277\times10^{-6}$ | 17.07 | 190 | 67 |
| | 250 | $1.150\times10^{-3}$ | −0.177 8 | $1.397\times10^{4}$ | $2.831\times10^{-4}$ | $-4.470\times10^{-6}$ | $2.238\times10^{-4}$ | $2.631\times10^{-8}$ | $-9.117\times10^{-7}$ | 4.842 | 157 | 63 |
| | 200 | $4.022\times10^{-4}$ | −0.051 2 | $2.717\times10^{3}$ | $1.445\times10^{-4}$ | $-6.370\times10^{-6}$ | $3.035\times10^{-4}$ | $2.129\times10^{-8}$ | $-8.012\times10^{-7}$ | 3.666 | 129 | 52 |

## 3 结论

(1) 630 ℃时 ST460TS、ST12T 在不同初始应力下的应力松弛呈现典型三阶段特征，可划分为快速松弛、过渡松弛与渐进稳态阶段。ST460TS 具有稳定的碳化物与位错结构，表现出稳定且几乎不随初始应力变化的松弛极限。而 ST12T 的松弛极限随初始应力的升高而增大，更高的初始应力使得马氏体结构中位错密度增大，促进了稳定亚结构的形成，导致剩余应力更高。Stellite 6 因低塑性，其应力松弛过程由微观损伤的突发性累积主导，在高初始应力下表现为独特的阶梯式松弛；低初始应力不足以引起突发性损伤而表现为不同于塑性变形的连续衰减。

(2) 采用四次指数衰减函数能准确描述 ST460TS 及 ST12T 的应力松弛行为并预测其不同条件下的松弛极限，决定系数均大于 0.99。该模型适用于以连续塑性变形机制为主导的塑性材料，但不适用于以累积损伤机制为主导的脆性材料，如 Stellite 6。

(3) 通过松弛数据推导并建立了适用于 ST460TS 与 ST12T 在全应力范围内的三阶段蠕变本构模型，该模型能准确描述蠕变应变速率与应力的关系，为该类材料在高温服役条件下的寿命预测与有限元模拟提供关键参数。

**参考文献：**


[1] 楚佳薇，刘余，左维辉，等. 超超临界阀门新型材料研究进展与展望[J]. 阀门，2025(4)：460-464.
CHU Jiawei，LIU Yu，ZUO Weihui，et al. Research progress and prospect of new materials for ultra-supercritical valve[J]. Valve，2025(4)：460-464.

[2] 周觉，蔡振威，王炜哲. 基于 R5 规范的超超临界汽轮机阀门损伤评估[J]. 动力工程学报，2019，39(9)：705-710，724.
ZHOU Jue，CAI Zhenwei，WANG Weizhe. Damage assessment of an ultra-supercritical steam turbine valve based on R5 procedures[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering，2019，39(9)：705-710，724.

[3] 印小松，董旭刚，伍宗文，等. 21CrMoV5-7 钢活塞头锻造毛坯热处理[J]. 金属热处理，2016，41(11)：159-163.
YIN Xiaosong，DONG Xugang，WU Zongwen，et al. Heat treatment of 21CrMoV5-7 steel forged piston head[J]. Heat Treatment of Metals，2016，41(11)：159-163.

[4] 王寅超，苗世潮，林鹏，等. 2Cr12MoV 不锈钢螺栓蠕变松弛行为研究[J]. 重型机械，2025(3)：51-56.
WANG Yinchao，MIAO Shichao，LIN Peng，et al. Study oncreep relaxation behavior of 2Cr12MoV stainless steel bolt[J]. Heavy Machinery，2025(3)：51-56.

[5] 张亚玮，胥国华，沈宇，等. Stellite 6B 合金冲击韧性与滑动磨损行为研究[J]. 稀有金属材料与工程，2025，54(4)：1044-1052.
ZHANG Yawei，XU Guohua，SHEN Yu，et al. Impact toughness and sliding wear behavior of Stellite 6B alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering，2025，54(4)：1044-1052.

[6] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局，中国国家标准化管理委员会. 金属材料 拉伸应力松弛试验方法：GB/T 10120—2013[S]. 北京：中国标准出版社，2014.
General Administration of Quality Supervision，Inspection and Quarantine of the People's Republic of China，Standardization Administration of the People's Republic of China. Metallic materials—tensile stress relaxation—method of test：GB/T 10120—2013[S]. Beijing：China Standard Press，2014.

[7] 刘厚吉，谢健，李祎曼，等. GH3536 镍基变形高温合金的应力松弛行为与蠕变本构方程[J]. 塑性工程

学报，2023，30(7)：110-117.
LIU Houji，XIE Jian，LI Yiman，et al. Stress relaxation behavior test and creep constitutive equation of GH3536 nickel-based wrought superalloy[J]. Journal of Plasticity Engineering，2023，30(7)：110-117.

[8] 朱擎，董建新，张麦仓，等. GH4738 高温合金的应力松弛影响因素[J]. 稀有金属材料与工程，2017，46(9)：2546-2552.
ZHU Qing，DONG Jianxin，ZHANG Maicang，et al. Stress relaxation behavior of GH4738 superalloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering，2017，46(9)：2546-2552.

[9] NECHACHE A，BOUZID A H. The effect of cylinder and hub creep on the load relaxation in bolted flanged joints[J]. Journal of Pressure Vessel Technology，2008，130(3)：031211.

[10] GJESTLAND H，NUSSBAUM G，REGAZZONI G，et al. Stress-relaxation and creep behaviour of some rapidly solidified magnesium alloys[J]. Materials Science and Engineering：A，1991，134：1197-1200.

[11] 江河，董建新，张麦仓，等. 服役条件下镍基高温合金应力松弛微观机制[J]. 金属学报，2019，55(9)：1211-1220.
JIANG He，DONG Jianxin，ZHANG Maicang，et al. Stress relaxation mechanism for typical nickel-based superalloys under service condition[J]. Acta Metallurgica Sinica，2019，55(9)：1211-1220.

[12] 帅词俊，段吉安，王炯. 关于黏弹性材料的广义 Maxwell 模型[J]. 力学学报，2006，38(4)：565-569.
SHUAI Cijun，DUAN Ji'an，WANG Jiong. A method of establishing generalized Maxwell model for viscoelastic material[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics，2006，38(4)：565-569.

[13] 郭进全，轩福贞，何磊. 螺栓材料 1Cr10NiMoW2VNbN 的应力松弛行为及预测模型[J]. 核动力工程，2008，29(6)：119-124.
GUO Jinquan，XUAN Fuzhen，HE Lei. Stress relaxation performance and prediction models for bolt material of 1Cr10NiMoW2VNbN[J]. Nuclear Power Engineering，2008，29(6)：119-124.

[14] 常鹏鹏，孔永华，陈国胜，等. GH4169 合金的高温应力松弛行为及蠕变本构方程[J]. 机械工程材料，2015，39(5)：89-92.
CHANG Pengpeng，KONG Yonghua，CHEN Guosheng，et al. Stress relaxation behavior and creep constitutive equation of GH4169 superalloy at high temperature[J]. Materials for Mechanical Engineering，2015，39(5)：89-92.

[15] 朱智，张立文，顾森东. Hastelloy C-276 合金应力松弛试验及蠕变本构方程[J]. 中国有色金属学报，2012，22(4)：1063-1067.
ZHU Zhi，ZHANG Liwen，GU Sendong. Stress relaxation test of Hastelloy C-276 alloy and its creep constitutive equation[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals，2012，22(4)：1063-1067.

[16] 毛剑峰，王炜哲，张军辉，等. 汽轮机螺栓松弛对汽缸蠕变强度的影响[J]. 动力工程学报，2013，33(2)：107-111.
MAO Jianfeng，WANG Weizhe，ZHANG Junhui，et al. Influence of bolt relaxation on creep strength of turbine casings[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering，2013，33(2)：107-111.

[17] 杨志远. GH4169 合金应力松弛行为及有限元模拟研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2020.
YANG Zhiyuan. Research on stress relaxation behavior and finite element simulation of GH4169 alloy[D]. Harbin：Harbin Institute of Technology，2020.

（上接第 17 页）

[18] 黄伟，李常伟，席建忠. 基于 PCA-MEA-WNN 模型的燃烧不稳定性检测方法[J]. 动力工程学报，2021，41(4)：286-293.
HUANG Wei，LI Changwei，XI Jianzhong. Detection method of combustion instability based on PCA-MEA-WNN model[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering，2021，41(4)：286-293.

[19] 卢绪祥，苏一鸣，吴家腾，等. 基于 EMD 及灰色关联度的滑动轴承润滑状态故障诊断研究[J]. 动力工程学报，2016，36(1)：42-47.
LU Xuxiang，SU Yiming，WU Jiateng，et al. Fault diagnosis on lubrication state of journal bearings based on EMD and grey relational degree[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering，2016，36(1)：42-47.