

高温下的“疲劳”与“蠕变”如何联手？——1.25Cr0.5Mo 钢在 580 °C 下的寿命行为探秘

How Fatigue and Creep Team up at High Temperatures? Lifespan Behavior of 1.25Cr0.5Mo Steel at 580 °C

供稿|武兴¹, 陈浩^{1,2}, 刘麟², 李京², 陈杨¹, 季敏² / WU Xing¹, CHEN Hao^{1,2}, LIU Lin², LI Jing², CHEN Yang¹, JI Min²

内容导读

1.25Cr0.5Mo 钢常用于高温关键设备，如加氢反应器，其高温下的疲劳与蠕变联合作用行为即疲劳-蠕变交互是影响其服役寿命的关键。本文通过应力控制试验，模拟了材料在高温服役中承受反复载荷（疲劳）和持续应力（蠕变）的共同作用。研究发现：“弹簧效应”与持续变形：材料在循环载荷下的响应曲线（迟滞回线）呈现开口状并持续向右偏移。这表明材料在每次“拉伸-放松”过程中，不仅产生弹性变形，还积累了不可逆的塑性变形和缓慢的蠕变变形。蠕变恢复的“双刃剑”：在应力峰值（上保载）时，材料会发生显著的蠕变变形；在应力谷值（下保载）时，部分变形会恢复。但“拉长”的量总是大于“回缩”的量，导致每个循环都残留一点永久变形（应变累积）。这种累积的蠕变损伤逐渐成为主导因素。有趣的是，这种恢复效应反而使得疲劳和蠕变两种损伤机制之间的激烈“拉锯战”有所减弱。寿命的关键影响因素：当施加的波动应力范围（应力幅）小于其平均应力水平时，两者都会加速材料的损伤。这好比材料内部同时在进行快速的“晶体内部塑性变形”和缓慢的“晶界滑移蠕变”，加速了材料抵抗变形能力的耗竭，从而显著缩短了材料的使用寿命。特别是当应力幅远低于平均应力时，蠕变损伤几乎完全决定了寿命，疲劳的影响变得微乎其微。本研究揭示了 1.25Cr0.5Mo 钢在高温复杂载荷下的失效机制，为预测其使用寿命、保障相关高温设备的安全运行提供了重要依据。

作者单位：1. 江苏省特种设备安全监督检验研究院，江苏 南京 210036；2. 常州大学机械与轨道交通学院，江苏 常州 213164

1.25Cr0.5Mo 钢被广泛应用于制造加氢反应器、燃气轮机和高温冶炼装置等关键设备,它在工业中被视为一种常见的低合金耐热结构钢。由于这些关键设备在设定工艺温度运行时,受到负荷升降和周期性变化的影响会产生交变热应力,从而使部件承受低周疲劳载荷^[1-2],导致高温环境下设备的复杂疲劳-蠕变损伤不可避免。严重的疲劳与蠕变之间的相互作用可能导致高温关键装备提前失效,甚至引发灾难性后果^[3]。近年来,国内外许多研究者对金属材料在高温下的疲劳-蠕变交互行为给予了广泛关注^[4-8]。针对材料蠕变-疲劳交互作用的试验与理论研究对于确保材料部件的可靠性、安全性和长期运行具有很大的理论和实践意义^[9]。

1.25Cr0.5Mo 钢的组织结构相对稳定,能够适应长期的高温高压环境。此类设备的工艺温度通常为 580℃。为确保设备的长期安全运行,本文以典型压力容器材料 1.25Cr0.5Mo 钢作为研究对象,在 580℃ 高温大气环境条件下开展疲劳-蠕变试验,研究了 1.25Cr0.5Mo 钢在高温高压下的疲劳-蠕变特性,特别是疲劳-蠕变交互作用下载荷变化引起的损伤行为。试验采用恒定最大应力水平的应力循环加载模式,最大应力分别为 300、310 和 320 MPa。通过对

1.25Cr0.5Mo 钢在疲劳-蠕变交互作用下的初始循环特性进行分析研究,探讨了 1.25Cr0.5Mo 钢寿命随应力的变化情况。

试样制备及试验方法

试验材料

选用低合金耐热结构钢 1.25Cr0.5Mo 作为试验材料,为了获得材料的最佳力学性能,对该材料进行以下热处理步骤:第一阶段在 920℃ 正火处理 2 h,加速冷却后,第二阶段在 700℃ 下回火处理 3 h,然后空气冷却至室温。1.25Cr0.5Mo 钢的化学成分和拉伸性能分别列于表 1、表 2 中。根据 GB/T 38822—2020《金属材料 蠕变-疲劳试验方法》,在试验材料上截取如图 1 所示的圆柱形疲劳-蠕变试样。

表 1 1.25Cr0.5Mo 钢的化学成分 (质量分数) %

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Fe
0.163	0.629	0.455	0.014	0.002	1.235	0.490	97.012

表 2 1.25Cr0.5Mo 钢的力学性能

温度/℃	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	断面收缩率/%	延伸率/%
580	352	518	22.72	68.64

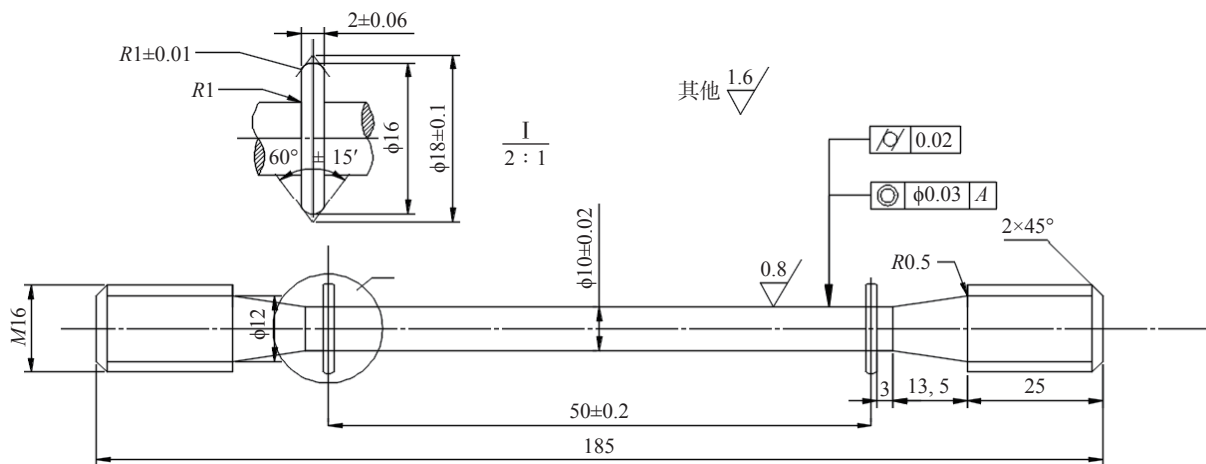


图 1 试样尺寸 (单位: mm)

试验方案

为了研究 1.25Cr0.5Mo 钢在高温条件下的疲劳-蠕变交互作用行为,选择 580℃ 为试验温度,峰值应力和谷值应力分别保持 10 s,具体试验方案见表 3。

根据 GB/T 26077—2021、ASTM E606/E606M—12 和 ISO 12106—2017 标准要求,在长春科新 RD-50 微控电子式蠕变持久试验机上进行高温疲劳-蠕变交互试验。该试验机配有高温电炉和引伸计,并通过

3个误差范围在 $\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 内的K型热电偶测量每根试样的温度场。同时,试验机与计算机连接,并由电液伺服系统控制,以实现试验加、卸载过程速率的自动控制。蠕变试验机的具体参数如表4所示。

表3 疲劳-蠕变试验方案

试样编号	最大应力/MPa	最小应力/MPa	实际加、卸载速率/(N/s)
1 [#]	300	0	4712
2 [#]	300	30	4241
3 [#]	300	60	3769
4 [#]	310	0	4869
5 [#]	310	30	4398
6 [#]	310	60	3927
7 [#]	320	0	5026
8 [#]	320	30	4555
9 [#]	320	60	4084

表4 RD-50 蠕变试验机具体参数

负载能力/ kN	最大加、卸载 速率/(N/s)	拉杆行程/ mm	额定载荷/ kN	工作温度/ $^{\circ}\text{C}$
50	5000	200	50	200~1200

结果与讨论

应力-应变曲线

图2展示了 $580\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时30~300 MPa下1.25Cr0.5Mo钢循环应力-应变曲线变化规律。从图2中可以观察到该材料的应力-应变曲线呈以下特点。首先,具有一定宽度,但并不封闭^[10];其次,随着试验进行,

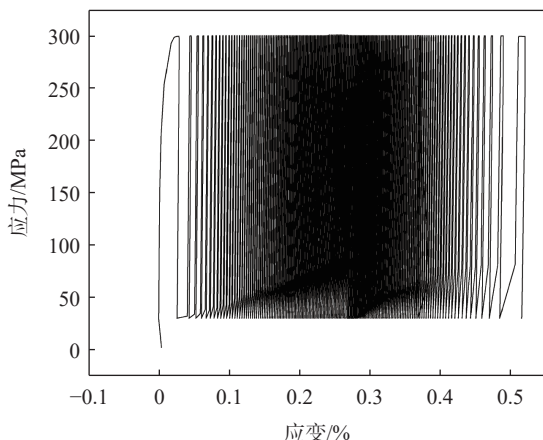


图2 1.25Cr0.5Mo钢在 $580\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下施加应力为30~300 MPa的循环应力-应变曲线

曲线会逐渐向右持续移动^[11],产生的原因可以从以下2个方面解释:第一,材料本身存在持续的拉应力,导致正向塑性变形逐渐增大,从而发生循环蠕变;第二,由于受到拉伸应力作用,在时间上引起缓慢的塑性变形,即静态蠕变。最后,迟滞回线只会在应力控制模式下出现,并且与最大应力、应力幅值或平均应力以及温度等参数密切相关。

应变变化规律

由图2可知,1.25Cr0.5Mo钢在每个试验周期下的总应变逐渐增加,而材料在试验中得到的总应变可分为瞬时产生的塑性应变和滞后产生的蠕变应变2部分,为了进一步探究应力模式下材料的循环特性,对材料试验周期内的蠕变应变和塑性应变的变化规律进行研究。

蠕变应变

图3所示为在 $580\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时30~300 MPa下1.25Cr0.5Mo钢的上保载蠕变应变和下保载蠕变应变的变化规律。由图3可知,上保载(峰值应力)引起了蠕变变形,而下保载(谷值应力)则导致了部分蠕变恢复。然而,由于上保载产生的蠕变应变略大于下保载产生的蠕变应变的绝对值,下保载引起的蠕变恢复只能部分消除前一阶段上保载产生的蠕变变形。因此,试验中每一个循环的总蠕变应变值均为正值,使得迟滞回线不断向右移动,并且具有一定宽度。随着蠕变恢复量增加,材料内部的蠕变损伤占比越明显,从而使试验过程中的疲劳-蠕变损伤交互作用在一定程度上有所下降。

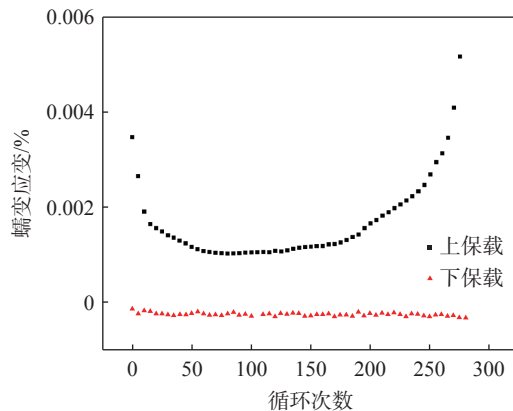


图3 1.25Cr0.5Mo钢在 $580\text{ }^{\circ}\text{C}$ 施加应力为30~300 MPa时上保载和下保载的蠕变应变

塑性应变

图4所示为580℃、30~300 MPa条件下, 1.25Cr0.5Mo钢在加载和卸载阶段塑性应变的变化规律。尽管试验中的最大应力低于材料的屈服极限, 但经过反向塑性变形或蠕变之后, 在低于屈服极限的加载过程中仍会产生一定程度的塑性变形。同样地, 在卸载阶段也会出现一定程度的反向塑性变形。然而, 加载阶段产生的塑性变形略微超过卸载阶段所产生的反向塑性变形的绝对值, 导致迟滞回线不断右移并具有一定宽度。

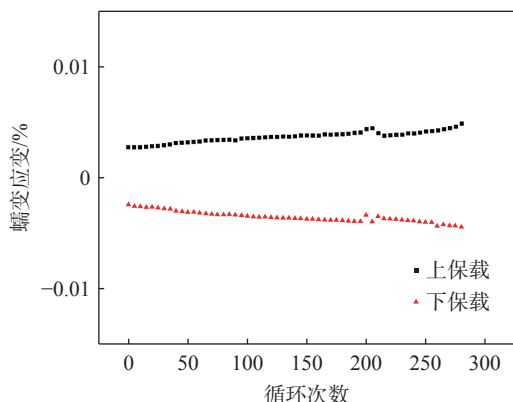


图4 1.25Cr0.5Mo钢在580℃施加应力为30~300 MPa下加载和卸载阶段塑性应变的变化规律

疲劳-蠕变寿命分析

表5所示为1.25Cr0.5Mo钢的高温疲劳-蠕变试验结果。当最大应力为300、310和320 MPa时, 随着最小应力从0 MPa逐步增加到60 MPa (以30 MPa的增量增加), 材料的寿命逐渐缩短。当最小应力为0、30和60 MPa时, 随着最大应力从300 MPa逐步增加到320 MPa (以10 MPa的增量增加), 材料的寿命也逐渐缩短。

分析上述现象的原因为当最大应力确定时, 若应力幅值小于平均应力, 则应力幅值不仅会对材料造成损伤, 而且平均应力也会对材料寿命产生一定的影响。此外, 在材料内部发生疲劳-蠕变交互作用时, 会加速晶体内塑性延性和晶界蠕变延性的消耗, 从而导致材料寿命缩短^[12-13]。然而, 当最小应力确定后, 随着应力幅值增加, 材料的寿命将逐渐缩短。主要原因在于高温环境下发生疲劳-蠕变交互作用需要满足应力幅值小于平均应力的条件。当应力幅远低于平均应力时 (如2#、3#试样, 5#、6#试样和8#、9#试样), 材料内部蠕变损伤所占比例较大, 此时可以忽略疲劳因素对材料寿命的影响。

表5 疲劳-蠕变试验寿命结果

试样编号	最大应力/MPa	最小应力/MPa	应力幅值/MPa	平均应力/MPa	试验寿命 (循环次数)
1#	300	0	150	150	455
2#	300	30	135	165	284
3#	300	60	120	180	270
4#	310	0	155	155	270
5#	310	30	140	170	228
6#	310	60	125	185	181
7#	320	0	160	160	99
8#	320	30	145	175	85
9#	320	60	130	190	80

结束语

(1) 在应力控制的疲劳-蠕变条件下, 1.25Cr0.5Mo钢的迟滞回线具有一定宽度, 但并不封闭, 且随着循环次数的增加, 迟滞回线会朝着平均应变增大的方向持续移动。

(2) 在高温疲劳-蠕变交互作用下, 由于每个

周期的上保载蠕变应变变量略大于下保载蠕变应变变量、加载阶段的塑性应变变量大于卸载阶段的塑性应变变量, 1.25Cr0.5Mo钢总存在蠕变和塑性恢复, 使磁滞回线不断向右移动, 随着蠕变和塑性变形量增大, 疲劳-蠕变损伤交互作用在一定程度上也有所下降。

(3) 在高温疲劳-蠕变交互作用下, 最大应力

确定时,当应力幅小于平均应力,应力幅和平均应力都对材料损伤起作用,加速了晶内塑性延性和晶界蠕变延性的耗竭;最小应力确定时,当应力幅比平均应力低出很多时,材料内部的蠕变损伤占比增加,此时的疲劳因素对材料的影响可以忽略,从而使材料寿命缩短。

参考文献

- [1] 畅旭兵,王勇,林琳,等. X12CrMoWVNbN10-1-1 钢的蠕变-疲劳交互作用及断裂机理. 机械工程材料, 2023, 47(1): 34
- [2] Veerababu J, Goyal S, Nagesha A. Studies on creep-fatigue interaction behavior of Grade 92 steel and its weld joints. *Int J Fatigue*, 2021, 149: Art No. 106307
- [3] 张尚林,轩福贞,邱阳,等. 蠕变-疲劳交互作用下 P92 钢的循环变形行为. 机械工程材料, 2022, 46(5): 36
- [4] Gao F N, Xie L J, Liu T Y, et al. An equivalent strain energy density model for fatigue life prediction under large compressive mean stress. *Int J Fatigue*, 2023, 177: Art No. 107899
- [5] Liu L Z, Gao Y F, Tong N, et al. Study on the creep-fatigue interaction behavior of 1Cr11Ni2W2MoV steel. *J Test Eval*, 2022, 50(2): 16
- [6] Bartošák M, Horváth J, Španiel M. Isothermal low-cycle fatigue and fatigue-creep of a 42CrMo4 steel. *Int J Fatigue*, 2020, 135: Art No. 105538
- [7] 王家璇,李梦阳,郑泽邦. 蠕变-疲劳交互作用下 P91 钢变形行为研究进展. 热加工工艺, 2024, 53(9): 1
- [8] Li K S, Wang J, Fan Z C, et al. A life prediction method and damage assessment for creep-fatigue combined with high-low cyclic loading. *Int J Fatigue*, 2022, 161: Art No. 106923
- [9] Chen S Y, Wei D S, Wang J L, et al. A new fatigue life prediction model considering the creep-fatigue interaction effect based on the Walker total strain equation. *Chin J Aeronaut*, 2020, 33(9): 2382
- [10] 杨铁成. 压力容器用钢 1.25Cr0.5Mo 高温下疲劳蠕变行为及寿命评估技术研究 [学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2006
- [11] 王刚. 生物质锅炉过热器钢管在高温碱金属盐环境下的疲劳-蠕变行为研究 [学位论文]. 长沙: 长沙理工大学, 2018
- [12] Nasibullina O A, Gareev A G, Rizvanov R G. Investigation of the hydrogen stratification of the metal of the active gas pipeline. *Solid State Phenom*, 2018(284): 1302
- [13] 赵加星,潘晴川,刘翔. 锅炉管道三通焊缝裂纹分析及预防研究. 管道技术与设备, 2018(2): 40

基金项目: 江苏省市场监督管理局科技计划资助项目 (KJ2022001)。

作者简介: 武兴 (1977—), 男, 辽宁省沈阳市人, 正高级工程师。主要研究方向: 承压类特种设备的检验检测工作。通信地址: 江苏省南京市鼓楼区草场门大街 107 号龙江大厦; E-mail: jaconxing@sohu.com。