

文章编号:1671-1637(2026)06-0104-11

桥梁用 Q345 钢高温蠕变-疲劳时序耦合性能试验

辛灏辉^{1,2}, 黄旭¹, 赵乾宇¹, 刘高^{*1,2}, 倪雅³, 殷如阳^{1,2}

(1. 东南大学 土木工程学院, 江苏 南京 211189; 2. 长大桥梁安全长寿与健康运维全国重点实验室, 江苏 南京 211112; 3. 江苏智桥科技有限公司, 江苏 南京 210019)

摘要:针对火灾后桥梁钢结构疲劳性能评估的实际需求,以桥梁工程广泛应用的 Q345 低碳合金钢为研究对象,设计了 4 类 7 组共 15 个圆棒标准狗骨状试件,系统探究了持力状态下不同蠕变损伤时间对钢材冷却后残余变形及疲劳性能的影响规律。研究表明:随着高温蠕变时间由 0 增加至 0.7 倍蠕变断裂时间,高温蠕变-疲劳时序耦合试件的平均疲劳寿命减少,从 32.2 万次降低至 11.5 万次,降低了 64.4%;高温蠕变-疲劳耦合作用使断口转为杯锥状并缩小疲劳扩展区,这主要源于氧化脱碳与蠕变损伤导致的材料承载能力下降,从而加速了疲劳破坏;不同高温蠕变时间对试件的疲劳动态弹性模量影响较小,弹性模量软化比接近 1.0,初始动态弹性模量最大仅减少了 8.7%;临界累积塑性应变随着蠕变时间增加而显著降低,最大降幅达 55.6%,而塑性应变累积速率基本不变。随着蠕变时间的增加,高温蠕变损伤降低了时序疲劳的累积塑性变形容限,使材料在更小的塑性应变水平下加速软化与失效。本研究可为火灾受损桥梁钢结构的疲劳性能评估与剩余寿命预测提供试验依据与理论参考。

关键词:桥梁工程;剩余疲劳性能;时序耦合;高温蠕变-疲劳试验;Q345 低碳合金钢

中图分类号:U441.4 **文献标志码:**A **DOI:**10.19818/j.cnki.1671-1637.2026.314

Experimental study on high-temperature creep-fatigue sequential coupling performance of Q345 steel for bridge

XIN Hao-hui^{1,2}, HUANG Xu¹, ZHAO Qian-yu¹, LIU Gao^{*1,2}, NI Ya³, YIN Ru-yang^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, Jiangsu, China; 2. State Key Laboratory of Safety, Durability and Healthy Operation of Long Span Bridges, Nanjing 211112, Jiangsu, China; 3. Jiangsu Zhiqiao Technology Co., Ltd., Nanjing 210019, Jiangsu, China)

Abstract: To meet the practical demand for fatigue performance assessment of bridge steel structures after fire, Q345 low-carbon alloy steel, which is widely used in bridge engineering, was selected as the research object. A total of 15 standard cylindrical dog-bone specimens were designed in 4 categories and 7 groups. The influence law of different creep damage durations under sustained loading on the residual deformation and fatigue performance of the steel after cooling was systematically investigated. The results show that as the high-temperature creep time increases from 0 to 0.7 times the creep rupture time, the average fatigue life of the sequential creep-fatigue coupling specimens decreases from 3.22×10^5 cycles to 1.15×10^5 cycles,

出版历程:2026-01-05 收稿,2026-02-27 修回,2026-05-27 录用

基金项目:国家自然科学基金项目(52578177);国家自然科学基金重大项目(52595691);国家重点研发计划(2024YFB2605700)

作者简介:辛灏辉(1991-),男,甘肃陇南人,教授,博士生导师,工学博士,E-mail:xinhaohui@seu.edu.cn。

*通信作者:刘高(1970-),男,河北唐山人,教授,博士生导师,工学博士,E-mail:liugao77@seu.edu.cn。

引用格式:辛灏辉,黄旭,赵乾宇,等.桥梁用 Q345 钢高温蠕变-疲劳时序耦合性能试验[J].交通运输工程学报,2026,26(6):104-114.

Citation: XIN Hao-hui, HUANG Xu, ZHAO Qian-yu, et al. Experimental study on high-temperature creep-fatigue sequential coupling performance of Q345 steel for bridge[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2026, 26(6): 104-114.

representing a reduction of 64.4%. The sequential creep-fatigue coupling effect transforms the fracture morphology into a cup-and-cone shape and shrinks the fatigue propagation zone. This is mainly due to the reduction in material load-bearing capacity caused by oxidation decarburization and creep damage, which accelerates fatigue failure. Different high-temperature creep times have little effect on the dynamic elastic modulus of the specimens. The softening ratio of the elastic modulus is close to 1.0, and the initial dynamic elastic modulus decreases by only 8.7% at maximum. The critical cumulative plastic strain decreases significantly with increasing creep time, with a maximum reduction of 55.6%, while the plastic strain accumulation rate remains basically unchanged. As the creep time increases, the high-temperature creep damage reduces the cumulative plastic deformation tolerance of the sequential fatigue process, causing the material to accelerate softening and fail at lower plastic strain levels. This study can provide an experimental basis and theoretical reference for the fatigue performance assessment and residual life prediction of fire-damaged bridge steel structures.

Keywords: bridge engineering; residual fatigue performance; sequential coupling; high-temperature creep-fatigue test; Q345 low-carbon alloy steel

Publication history: Received 2026-01-05; Received in revised form 2026-02-27; Accepted 2026-05-27

Funding: National Natural Science Foundation of China (52578177); Major Program of National Natural Science Foundation of China (52595691); National Key R&D Program of China (2024YFB2605700)

* **Corresponding author:** LIU Gao, professor, PhD, E-mail: liugao77@seu.edu.cn.

0 引言

近年来,随着交通量持续增长以及新能源车辆快速普及,超大跨径桥梁火灾事故频发,对桥梁安全运营构成严重威胁^[1-3]。钢结构因其轻质高强、施工便捷等优势,在特大跨径桥梁中应用广泛^[4-5]。火灾高温作用后,桥梁主体钢结构在宏观上通常保持基本完整,工程实践中常面临“快速评估-恢复通行”的决策需求;然而,即使构件未出现明显屈曲或断裂,高温所导致材料性能退化与时间相关损伤仍可能带来潜在的隐性风险^[6-7]。因此,灾后安全评估的关键在于准确识别其承载能力与长期服役性能的退化程度。

火灾高温对钢结构造成的损伤可分为显性与隐性两类。显性损伤主要表现为塑性变形、屈曲或断裂等宏观现象,易于识别;而隐性损伤则源于材料微观组织的劣化,难以通过常规手段检测,却可能引发结构突发性失效,安全隐患更为突出。现有研究多集中于火灾下或火灾后承载能力的显性失效分析^[8],对隐性损伤及其长期累积损伤效应关注不足。疲劳是桥梁钢结构长期服役的关键控制问题^[9-10],再叠加火灾高温作用后将更为复杂。当火灾温度超过材料再结晶临界点时,恒载作用下会发生不可逆高温蠕变,进而在冷却后与运营长期疲劳荷载形成

时序耦合,产生蠕变-疲劳交互损伤机制。然而,目前对该时序耦合机理的认识尚不充分,缺乏系统的损伤演化分析理论。与此同时,国内外现行规范如中国《建筑钢结构防火技术规范》(GB 51249—2017)、欧洲 Eurocode 3: *Design of Steel Structures* (EN 1993-1-2)、美国 *Specification for Structural Steel Buildings* (ANSI/AISC 360-10) 虽给出了钢材高温力学性能或常温疲劳行为的设计方法,但均未系统纳入“火灾高温-冷却历程后”疲劳性能退化的评估准则,导致灾后钢结构剩余疲劳寿命预测缺乏可靠的理论依据。因此,全面掌握桥梁钢材在高温蠕变-疲劳时序耦合作用下的力学行为,是建立科学灾后评估方法与安全控制标准的关键前提。

近年来,温度-力学历程对钢材性能的影响已成为材料与结构交叉领域的重要议题。Sinaie 等^[11]揭示了循环损伤对高温下钢材力学性能的耦合影响;Lou 等^[12]探讨了地震-火灾连续作用对钢材性能的影响;Zhang 等^[13]研究了 Q450 耐候钢高温冷却后的循环特性;Guo 等^[14]则研究了 Q345 钢火灾后的滞回特性与低周疲劳行为;Jiang 等^[15]揭示了 Q355 热轧钢在火灾全过程中力学性能的阈值温度;Chen 等^[16]阐明了 Q345 冷弯钢在升温-降温阶段材料退化的差异规律。然而,从桥梁结构全寿命服役

视角来看,其典型时序路径呈现为“运营期疲劳损伤—火灾高温持荷蠕变—冷却后继续服役疲劳”的三阶段耦合特征。在规范设计与正常运营维护条件下,火灾前的疲劳损伤通常处于可控范围,相关研究积累较为充分^[11-12]。相比之下,火灾高温作用期间,结构在恒载约束下产生的不可逆蠕变损伤,及其对灾后疲劳性能的影响机理,迄今尚未得到系统阐释。针对火灾后仍需继续服役的桥梁钢结构,其在持荷状态下所经历的高温蠕变-疲劳时序耦合损伤机制及演化规律,亟待深入探究。

因此,针对火灾后桥梁钢材性能评估的实际需求,本文聚焦于高温蠕变时间对疲劳寿命的影响,以桥梁工程广泛应用的 Q345 低碳合金钢为研究对象,系统开展了持力状态下高温蠕变-疲劳时序耦合性能试验。设计了 4 类 7 组共 15 个圆棒标准狗骨状试件,重点探究了持力状态下不同蠕变损伤时间对钢材冷却后残余变形及疲劳寿命、刚度退化与应变演化等影响规律。基于试验获取的疲劳响应曲线,进一步揭示了高温蠕变损伤对疲劳刚度退化与

应变幅值演化等关键力学行为的作用机制。本研究旨在为火灾后桥梁钢结构疲劳性能评估与服役寿命预测提供直接的试验数据与理论支撑。

1 Q345 低碳合金钢基本性能试验

1.1 材性试验

首先对 Q345 钢基本力学性能进行了系统测试,旨在为后续的高温蠕变-疲劳时序耦合试验提供可靠的材料性能数据基础。材料性能测试所用试件的几何构造与具体尺寸如图 1 所示。试件总长为 110 mm,平行段长度为 18 mm,直径为 8 mm;过渡段与两端的螺纹段长度分别为 22 mm 和 24 mm。该尺寸设计严格遵循《金属材料力控制轴向等幅疲劳试验标准规程》(ASTM E466-15)规范要求,所有试件均通过精密机加工制备完成。试验所用 Q345 低碳合金钢的主要化学成分和碳当量(CEV)如表 1 所示,其数据由生产厂家(湘钢-湖南华菱湘潭钢铁有限公司)提供。

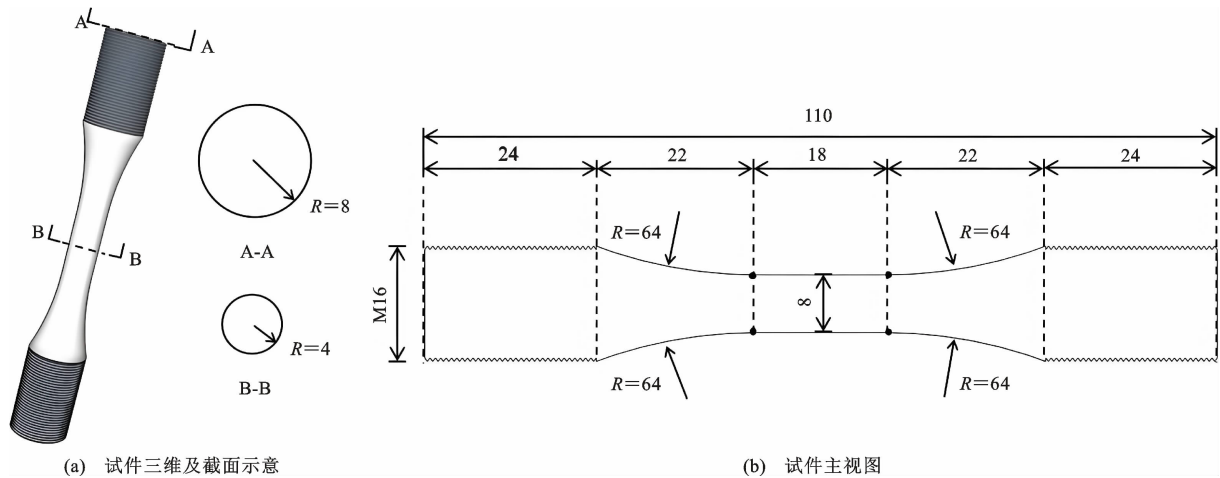


图 1 试件几何构造与尺寸(单位:mm)

Fig. 1 Specimen geometry and dimensions (unit: mm)

表 1 Q345 低碳合金钢主要化学成分质量分数和碳当量

Table 1 Mass fraction of main chemical elements and CEV in Q345 low-carbon alloy steel

化学成分质量分数/%	C	Si	Mn	P	S	Ni	Als	Cr	Cu	CEV
	0.160	0.330	1.480	0.015	0.006	0.010	0.032	0.060	0.020	0.420

材料基本力学性能试验主要包括静载试验、高温蠕变试验和常温疲劳试验。当温度低于 300 ℃时,钢材力学性能受温度影响较小,蠕变行为不显著;而当温度显著超过 600 ℃时,材料性能将急剧退化^[6],试件易发生明显的显性失效。因此,本研究选取 600 ℃作为高温蠕变试验的目标温度,依据规范《建筑钢结构防火技术规范》(GB 51249—2017),选

取 600 ℃下屈服强度设计值的 0.9 倍应力水平($f_{ty600}=161$ MPa)作为持荷应力。常温疲劳试验参数的确定兼顾了工程代表性与试验可操作性,应力上限设为 460 MPa,应力比为 0.1,加载频率为 10 Hz。该参数设置旨在模拟实际服役中因应力集中而形成的高应力循环状态,并在有限循环次数内有效诱导试件发生疲劳破坏^[17]。

1.2 材料性能

材料性能试件的加载、测量仪器与试件破坏形态如图 2 所示。静载与高温蠕变试验在 TSE305D-300 kN 微机控制电子万能试验机(配高温试验系统)上进行,最大试验力为 300 kN,位移控制精度为 $\pm 0.5\%$,高温炉工作温度为 $200\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 1\,200\text{ }^{\circ}\text{C}$,控温精度为 $\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。静载试验加载采用位移控制,加载速率设为 $0.045\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$,直至试件断裂。高温蠕变试验采用应力控制,试件在高温炉中以 $20\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$

的速率升温至 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$,保温 10 min 后以 $10\text{ kN} \cdot \text{min}^{-1}$ 的加载速率平稳施加应力至 144.9 MPa 并保持恒定,直至试件发生蠕变断裂。常温疲劳试验在 HDT504B-50 kN 电液伺服疲劳试验机上完成,加载频率 f 取 10 Hz 。静载与高温蠕变试验采用万测 VE025 视频引伸计(分辨率 $0.1\text{ }\mu\text{m}$)测量应变,为适应蠕变大变形并确保跟踪稳定性,选用 15 mm 的大量程标距;常温疲劳试验则使用 Epsilon 3442 型引伸计,标距为 10 mm ,精度为 $\pm 0.05\text{ mm}$ 。

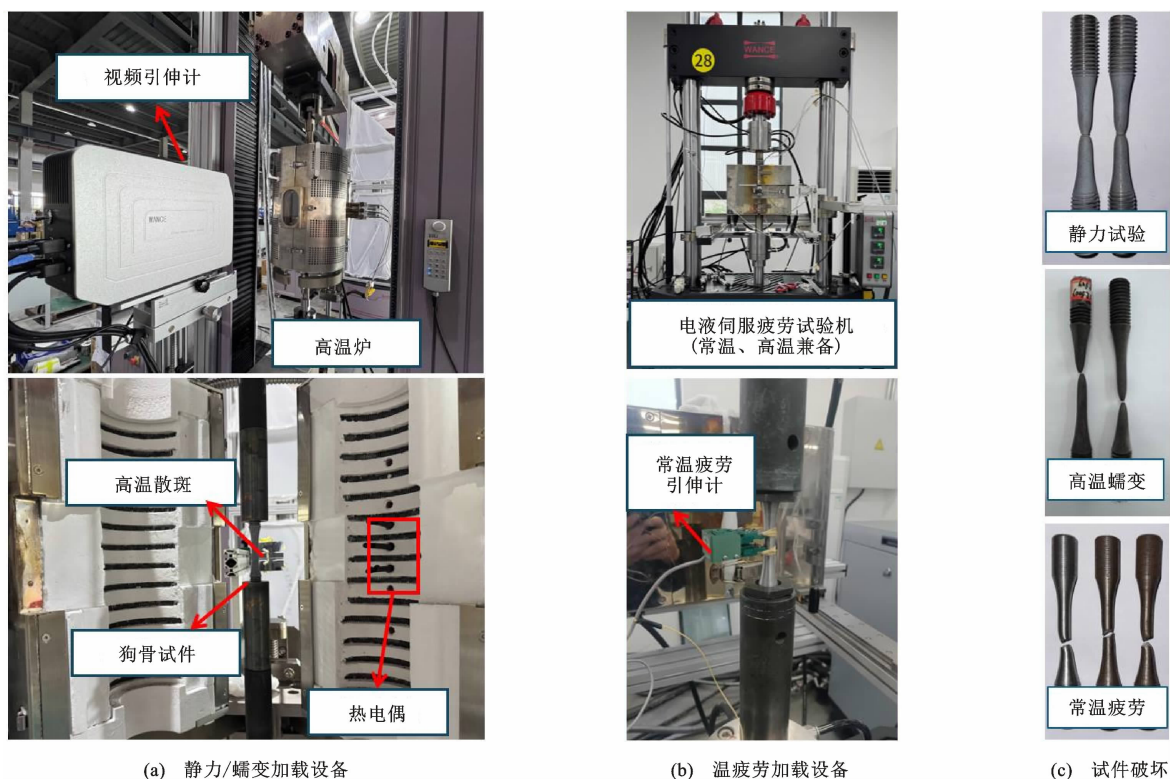


图 2 试验加载、测量仪器与破坏形态

Fig. 2 Test loading, measuring instrument and failure mode

图 3 展示了静载应力-应变、高温蠕变时间-变形、常温疲劳循环次数-应变等典型曲线。试验获取的各项基本力学性能数据汇总于表 2。其中,屈服强度为 345.32 MPa ,极限强度为 511.96 MPa ,弹性模量为 213.74 GPa , $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和持荷应力为 144.9 MPa 条件下的平均蠕变断裂时间为 $1\,656.77\text{ s}$,并标定平均蠕变断裂时间为 $1.0t_R$,疲劳寿命均值为 $168\,299$ 次循环。

2 高温蠕变-疲劳时序耦合试验方案

2.1 试验设计

在桥面火灾中,高温会导致材料发生位错密度下降与晶粒粗化,从而弱化晶界强化效应并诱发蠕变损伤^[18-20]。灾后结构继续承受循环荷载,此类蠕

变损伤将与疲劳过程在时序上相互耦合、共同作用,严重影响结构的剩余性能。为此,本文通过设定不同的高温持荷时间(即蠕变损伤时间)作为控制变量,定量研究蠕变损伤程度与后续疲劳性能之间的关联。依据已标定的蠕变断裂时间 t_R ,如表 3 所示,设置了 $0t_R$ 、 $0.1t_R$ 、 $0.4t_R$ 、 $0.7t_R$ 这 4 个蠕变时间水平。参数 $0t_R$ 的含义是在试件达到规定温度后,仅加载至持荷应力不进行蠕变,直接开始降温。每组试验包含 2 个平行试件,其编号采用“OH-时间-序号”的格式,例如:“OH-0-1”表示蠕变时间为 $0t_R$ 的第 1 个高温蠕变-疲劳时序耦合试件(以下简称“耦合试件”)。

如图 4 所示,高温蠕变-疲劳时序耦合试验按以下 4 个步骤开展:①升温阶段,试件置于高温炉中,

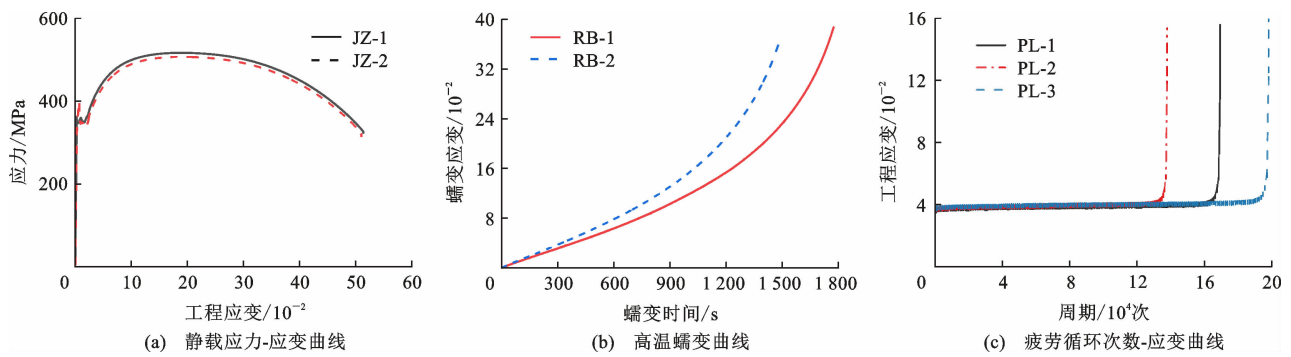


图3 基本力学性能试验曲线

Fig. 3 Basic mechanical properties test curves

表2 基本力学性能试验结果

Table 2 Test results for basic mechanical properties

试件编号	力学性能			试件编号	高温蠕变性能	试件编号	疲劳性能
	屈服强度/MPa	极限强度/MPa	弹性模量/MPa		蠕变断裂时间/s		疲劳寿命/次
JZ-1	346.27	516.83	213 636	RB-1	1 769.52	PL-1	169 872
JZ-2	344.37	507.09	213 840	RB-2	1 544.02	PL-2	138 340
平均值	345.32	511.96	213 738	平均值	1 656.77	PL-3	196 686
						平均值	168 299

表3 时序耦合试验类型与参数设计

Table 3 Sequential coupling test categories and parameter design

试件编号	疲劳上限/MPa	疲劳应力比	疲劳频率/Hz	蠕变持荷应力/MPa	蠕变时间	试件数量/个
OH-0	460	0.1	10	144.9	$0t_R$	2
OH-0.1					$0.1t_R$	2
OH-0.4					$0.4t_R$	2
OH-0.7					$0.7t_R$	2

以 $20\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 的速率升温至 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$, 保温 10 min 使温度均匀稳定; ②蠕变阶段, 以 $10\text{ kN}\cdot\text{min}^{-1}$ 的速率平稳施加荷载至 144.9 MPa , 并保持该应力水平直至达到预设的蠕变时间; ③冷却阶段, 蠕变时间到达后停止加热, 在保持荷载不变的条件下打开炉门, 使试件在自然通风环境中冷却至室温, 该过程模拟火灾后桥梁结构在荷载持续作用下的降温状态; ④疲劳阶段, 试件冷却至室温后, 开展疲劳试验, 直至试件发生疲劳破坏。试件在蠕变与疲劳阶段的转换过程中始终保持受力状态, 以模拟实际桥梁的持续受力情况。

2.2 试验系统与测点布置

如图5所示, 高温蠕变-疲劳时序耦合试验在 HDT504B-50kN 电液伺服疲劳试验机系统上完成, 其最大动静载荷为 $\pm 50\text{ kN}$, 位移精度为 $0.5\%\text{FS}$, 高温炉工作温度为 $200\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 1\text{ }000\text{ }^{\circ}\text{C}$, 通过应力、应变、位移三闭环控制能够满足本研究恒载高温蠕变试验对载荷稳定性、以及应力控制疲劳试验对动态

加载与测量精度的要求。试验全程使用 MTS 632.53F-14 型高温引伸计(标距为 12 mm , 精度为 $\pm 0.5\text{ }\mu\text{m}$)测量高温蠕变阶段、持载冷却阶段及常温疲劳阶段的全过程变形响应。对于高温蠕变时间为 $0.7t_R$ 的试件, 由于其蠕变变形量超出了高温疲劳引伸计的量程, 在高温蠕变与冷却阶段采用万测 VE025 视频引伸计进行测量, 在时序疲劳阶段采用 MTS 高温引伸计测量。温度监测采用 K 型热电偶结合炉内温度传感系统, 实现对试验过程中温度变化的实时控制与记录。

3 高温蠕变-疲劳时序耦合试验结果

3.1 破坏形态

图6展示了高温蠕变-疲劳时序耦合作用下试件的破坏形态。所有高温蠕变-疲劳时序耦合试件在高温阶段表面均形成极薄氧化层。该氧化层在后续疲劳加载中逐渐剥落, 最终表面呈灰白或银亮色, 部分试件可见明显高温氧化着色(蓝紫色), 说明短

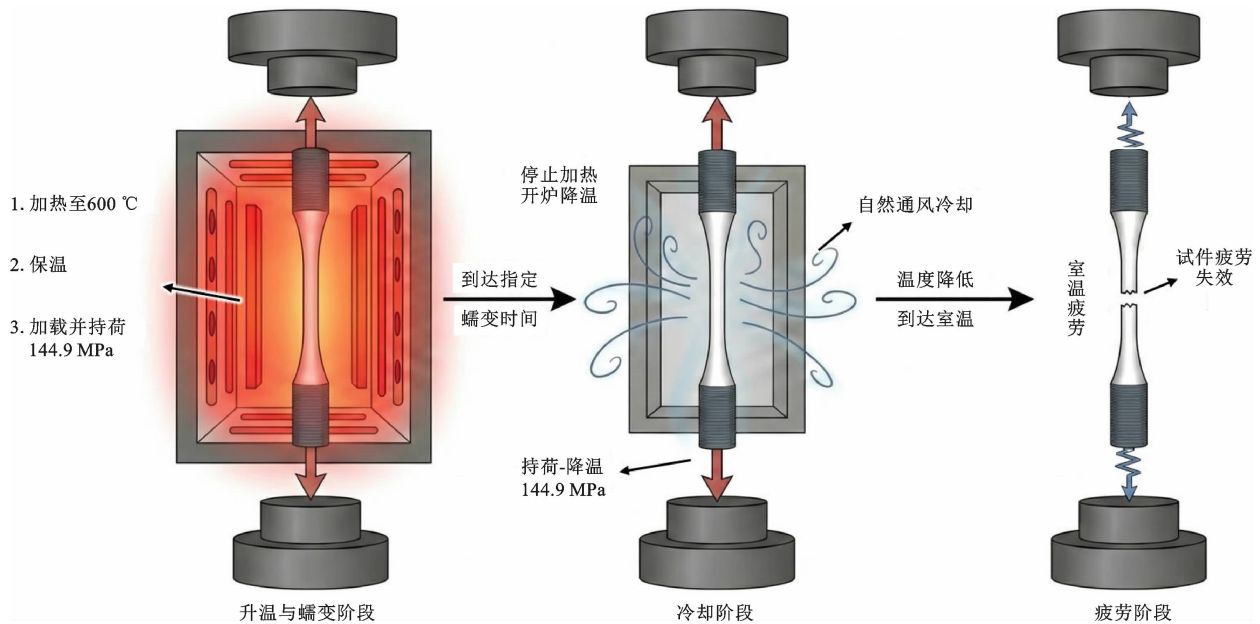


图 4 高温蠕变-疲劳时序耦合试验流程

Fig. 4 High-temperature creep-fatigue sequential coupling test process

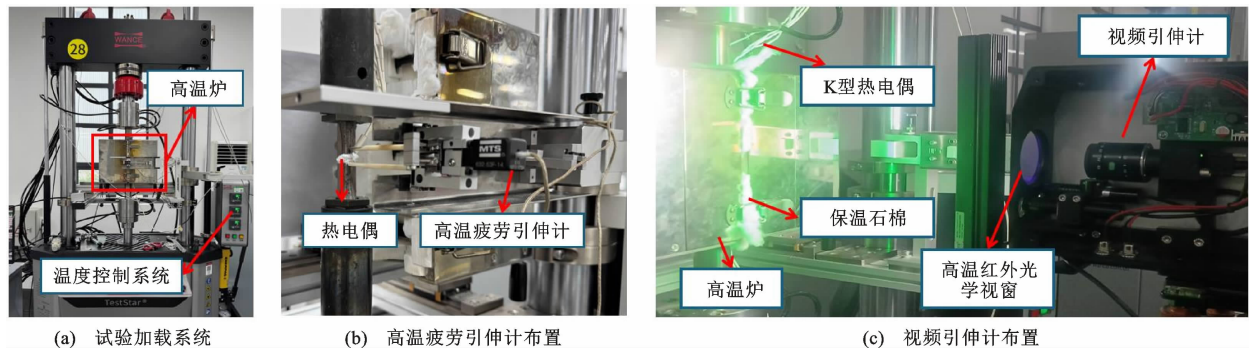


图 5 高温蠕变-疲劳时序耦合试验系统和测点布置

Fig. 5 System and measurement points layout of high-temperature creep-fatigue sequential coupling test

时高温暴露已引发表层脱碳与氧化,导致表层与内部基体力学性能出现差异。对比常温疲劳试件(如 PL-1)与高温蠕变-疲劳时序耦合试件(如 OH-0.4-2)的断口形貌可见:常温疲劳试件断口相对平整,疲劳裂纹扩展区与瞬断区分界清晰;而高温疲劳耦合试件断口呈明显“杯锥状”特征,断面光滑且带有一定倾角。此外,常温疲劳试件的疲劳裂纹扩展区域显著大于高温蠕变-疲劳时序耦合试件。这一差异可归因于高温导致的材料极限强度下降,极限强度越低,裂纹扩展至失稳断裂所需的循环周次越少,疲劳扩展区相应减小。进一步分析蠕变时间对破坏形态的影响发现:随第一阶段蠕变时间延长(蠕变时间从 $0t_R$ 增加至 $0.7t_R$),疲劳损伤区域呈现逐渐缩小趋势。这表明高温蠕变诱发蠕变孔洞与微裂纹,不仅会形成初始损伤源,还会整体降低材料承载能力,加速疲劳破坏进程。

3.2 冷却残余变形曲线

图 7 展示了高温蠕变-疲劳时序耦合试验的前 2 个阶段,即:高温蠕变阶段与持载冷却阶段的变形发展过程。图 7(a)展示了典型试件高温蠕变变形随时间的发展情况。可以看出,随着高温蠕变时间的增加,试件在持温末期的变形逐渐增大;进入持载冷却阶段后,变形随热应力的消除逐渐回缩并趋于稳定,此时的残余变形由弹性变形(约为 0.013 4 mm,占 0.5%~21.3%)以及蠕变变形构成。图 7(b)给出了试件冷后残余变形平均值。值得注意的是,蠕变时间为 $0t_R$ 的耦合试件在达到持荷应力后即开始冷却,但其冷却残余变形并未归零,这表明在蠕变加载阶段已产生瞬时蠕变变形,并在冷却后得以保留。蠕变时间为 $0.1t_R$ 、 $0.4t_R$ 和 $0.7t_R$ 的耦合试件冷却残余变形分别较 $0t_R$ 的耦合试件增加了 247.1%、1 694.7%和 3 866.1%,呈现随高温蠕变时间延长

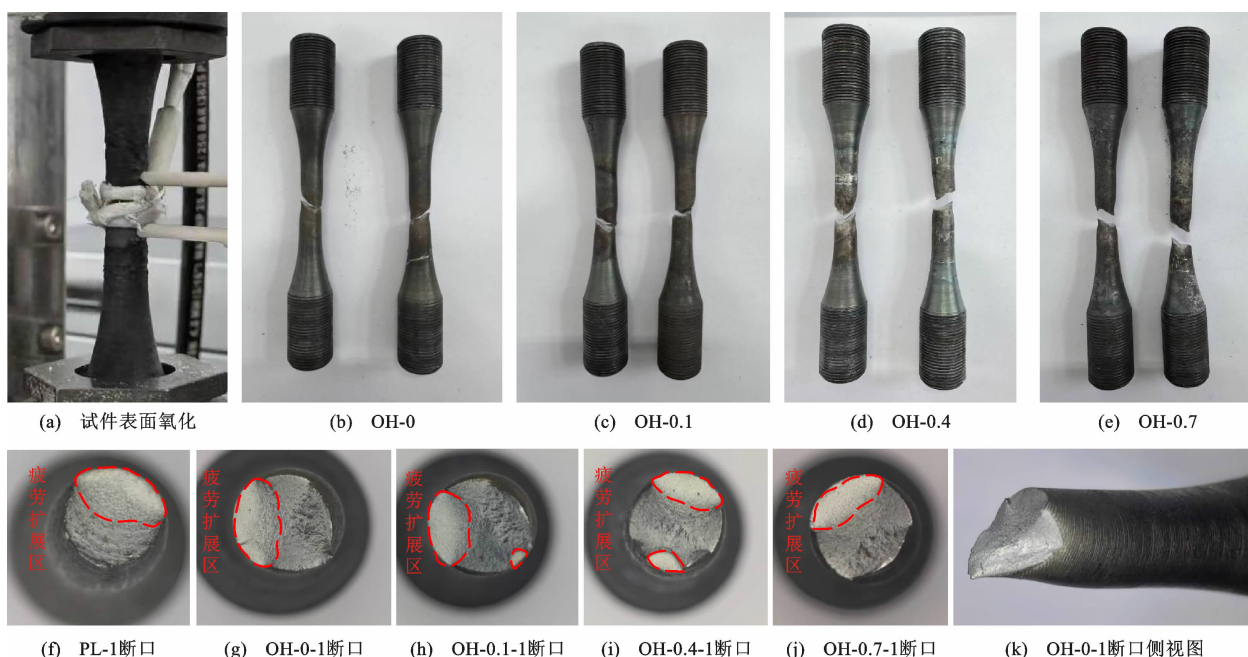


图6 高温蠕变-疲劳时序耦合试件破坏模式

Fig. 6 Failure pattern of high-temperature creep-fatigue sequential coupling specimens

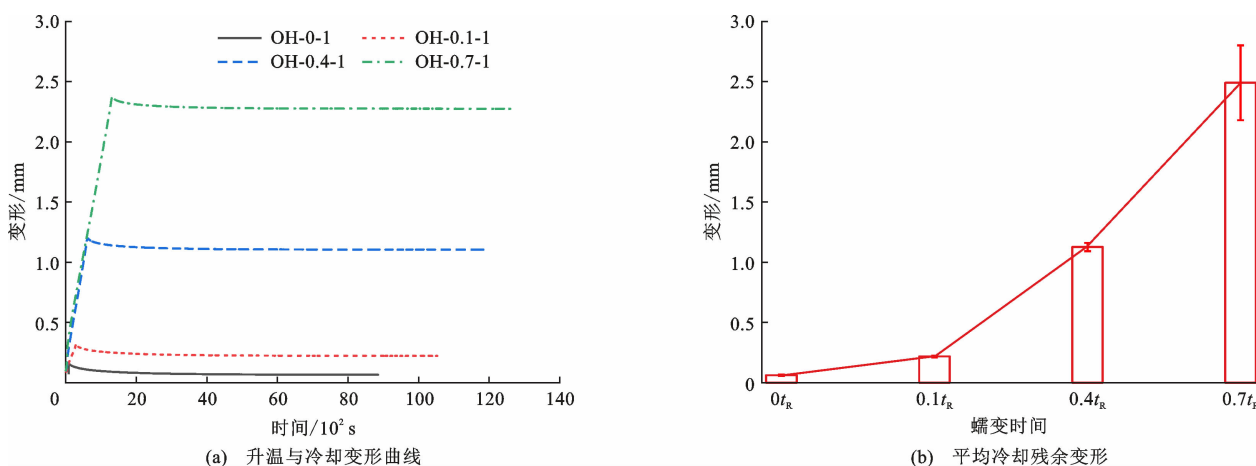


图7 高温蠕变-疲劳时序耦合试件冷却残余变形

Fig. 7 Cooling residual deformation of high-temperature creep-fatigue sequential coupling specimens

而显著增大的趋势。

3.3 主要试验结果汇总

材料动态弹性模量的测定依据 *Standard Test Method for Strain-controlled Fatigue Testing* (ASTM E606/E606M) 标准计算,选取滞回环卸载段线性范围内、应力水平介于峰值应力 40%~90% 区段的数据,按式(1)确定第 N 周期的动态弹性模量(E_N),应变幅(ϵ_a)通常定义为单次循环中峰值应变与谷值应变之差的一半,计算式如下

$$E_N = \frac{0.9\sigma_{\max} - 0.4\sigma_{\max}}{\epsilon_{0.9\sigma} - \epsilon_{0.4\sigma}} \quad (1)$$

$$\epsilon_a = \frac{\epsilon_{\max} - \epsilon_{\min}}{2} \quad (2)$$

式中: $\sigma_{\max}$ 和 $\sigma_{\min}$ 分别为对应周期内的最大和最小应力; $\epsilon_{0.9\sigma}$ 和 $\epsilon_{0.4\sigma}$ 分别为应力为 $0.9\sigma_{\max}$ 和 $0.4\sigma_{\max}$ 时所对应的应变; $\epsilon_{\max}$ 和 $\epsilon_{\min}$ 分别为对应周期内的峰值应变与谷值应变。

考虑到疲劳初期存在的明显瞬态循环硬化现象,为规避前若干周循环数据波动的影响,取 $0.1N_f \sim 0.7N_f$ 作为代表性循环区间进行分析。以该区间内 $0.5N_f$ 与 $0.1N_f$ 对应的数据分别计算弹性模量软化比(R_E)与应变幅增大比(R_ϵ),用于评估寿命中期相对于稳定初期材料的动态弹性模量退化程度与应变幅增长情况,其计算公式如下

$$R_E = \frac{E_{N,0.5N_f}}{E_{N,0.1N_f}} \quad (3)$$

$$R_{\epsilon} = \frac{\epsilon_{a,0.5N_f}}{\epsilon_{a,0.1N_f}} \quad (4)$$

式中: N_f 为疲劳寿命周期; $E_{N,0.5N_f}$ 和 $E_{N,0.1N_f}$ 分别为 $0.5N_f$ 与 $0.1N_f$ 寿命时对应的动弹性模量; $\epsilon_{a,0.5N_f}$ 和 $\epsilon_{a,0.1N_f}$ 分别为 $0.5N_f$ 与 $0.1N_f$ 寿命时对应的应变幅。

宏观裂纹扩展起点采用动态弹性模量下降准则判定^[21]:以稳定阶段($0.1N_f \sim 0.7N_f$)动态弹性模量的中位数为基准动态模量 E_{base} ,当 E_N 下降超过 10% 时,视为进入宏观裂纹快速扩展阶段,该周期记为宏观裂纹快速扩展起点(N_i),表示为

$$\frac{E_N}{E_{base}} \leq 0.9 \quad (5)$$

表 4 汇总了耦合试验的主要结果。其中, δ 为

表 4 试验主要结果

Table 4 Results of the test

试件编号	δ/mm	$\epsilon_a(0.5N_f)/10^{-2}$	$E_N(0.5N_f)/\text{MPa}$	R_{ϵ}	R_E	$N_i/\text{次}$	$N_f/\text{次}$
PL(平均)	-	0.235 0	177 981.09	1.012 9	0.988 9	167 440	168 299
OH-0-1	0.059 1	0.222 4	179 908.33	1.008 0	0.988 0	311 000	318 323
OH-0-2	0.066 6	0.221 6	180 466.93	1.003 4	0.991 2	318 200	325 020
OH-0.1-1	0.223 4	0.244 3	167 939.90	1.005 5	0.983 5	241 700	243 420
OH-0.1-2	0.213 1	0.244 8	167 525.80	1.007 2	0.979 0	267 900	269 674
OH-0.4-1	1.104 6	0.245 2	164 004.21	1.007 2	0.993 9	185 800	191 472
OH-0.4-2	1.153 1	0.245 6	165 925.84	1.009 9	0.985 8	175 154	175 766
OH-0.7-1	2.274 6	0.230 4	165 963.38	1.010 1	0.998 0	129 500	134 066
OH-0.7-2	2.714 8	0.231 3	164 081.33	1.015 6	0.987 2	91 800	95 166

4 高温蠕变-疲劳时序耦合试验分析

4.1 动态模量退化规律

图 8(a)展示了动态弹性模量(简称动态模量)随加载次数的演变曲线。所有曲线均表现为典型的“两阶段”特征:在绝大部分寿命期内,动态模量保持稳定;仅在临近失效的少数循环内发生急剧下降,继而导致失效。这表明在应力控制疲劳模式下,材料在稳定循环阶段具有较好的一致性。结合试件失效断面中疲劳扩展区逐渐减小的趋势可知,失效前的模量快速衰减可能主要源于宏观裂纹的快速扩展及有效承载截面的骤减。图 8(b)展示了耦合试件第 0.1 周期的动态弹性模量 $E_{0.1N_f}$ 和弹性模量软化比 R_E 。与 OH-0 试件相比,OH-0.1、OH-0.4 与 OH-0.7 耦合试件组的 $E_{0.1N_f}$ 分别降低了 6.1%、8.4%、8.7%。各组耦合试件的 R_E 接近 1.0(具体数值见表 4),表明在稳定循环阶段内动态模量并未发生明显退化。高温蠕变时间的延长及伴随的表层脱碳效

冷却降温阶段的残余变形。与常温疲劳相比,OH-0 耦合试件的疲劳寿命有所提高,结合类似现象在结构钢高温后疲劳性能的研究^[14,22],初步推测高温-冷却历程可能通过影响位错组态或残余应力分布等微观机制对疲劳性能产生了一定影响。随着蠕变时间的增加,疲劳寿命呈现单调递减趋势,相较于 OH-0 耦合试件,OH-0.1、OH-0.4 及 OH-0.7 的平均疲劳寿命分别降低了约 20.2%、42.9% 和 64.4%。在裂纹扩展特征方面,参数 N_i 同样随蠕变时间增加而减小,表明高温蠕变损伤会提前削弱材料抵抗裂纹萌生/扩展的能力。经归一化处理(N_i/N_f)表明:常温疲劳试件的该比值约为 0.99,而耦合试件的比值则介于 0.96~0.99,整体略低于前者。

应,会促进材料内部孔洞与微裂纹的萌生与扩展^[23],这为后续疲劳循环中缺陷的快速连通与刚度加速退化提供了微观基础。由此可见,高温蠕变损伤对初始动态模量的直接影响相对有限,其主要作用在于压缩稳定循环阶段的持续时间,从而使试件更早失效。

4.2 应变幅值演化规律

为定量分析蠕变损伤对应变幅值的影响,图 9 给出了应变幅指标的统计分析结果。对于稳定循环阶段($0.1N_f \sim 0.7N_f$)的平均应变幅(ϵ_{as}),当某一周期的应变幅较 ϵ_{as} 增长超过 5% 时,判定材料进入软化阶段^[24],该起点循环数记为 N_s ,其相对寿命位置为 N_s/N_f ,计算式如下所示

$$\epsilon_{as} = \frac{1}{0.7N_f - 0.1N_f + 1} \sum_{i=0.1N_f}^{0.7N_f} \epsilon_{a,i} \quad (6)$$

$$N_s = \min(i | \epsilon_{a,i} \geq (1 + 5\%) \epsilon_{as}) \quad (7)$$

式中: i 为循环周次; $\epsilon_{a,i}$ 为第 i 个周期的应变幅值。

结果表明,4 组耦合试件的稳定平均应变幅 ϵ_{as}

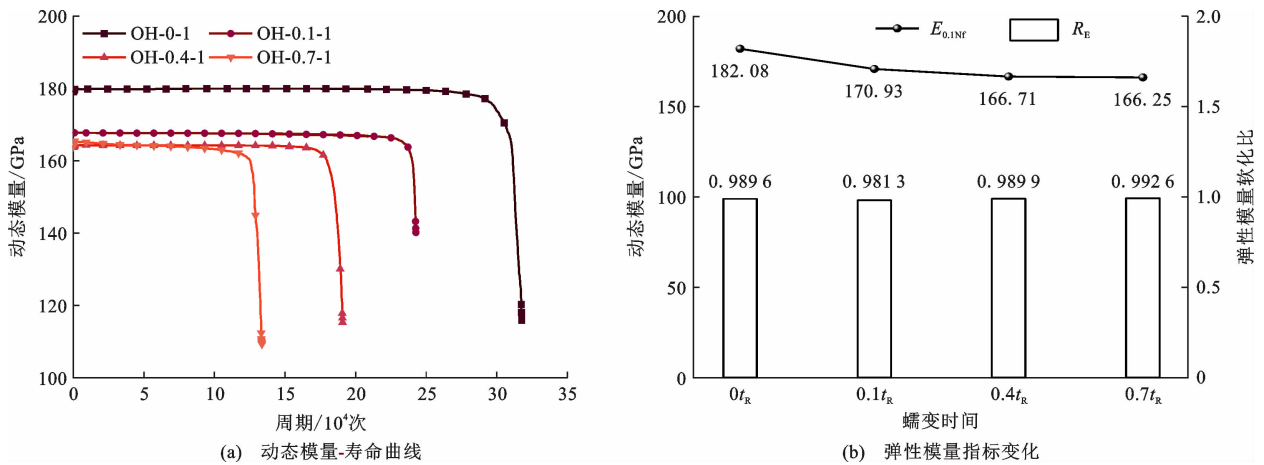


图 8 动态模量退化与指标

Fig. 8 Cyclic stiffness degradation and indicators

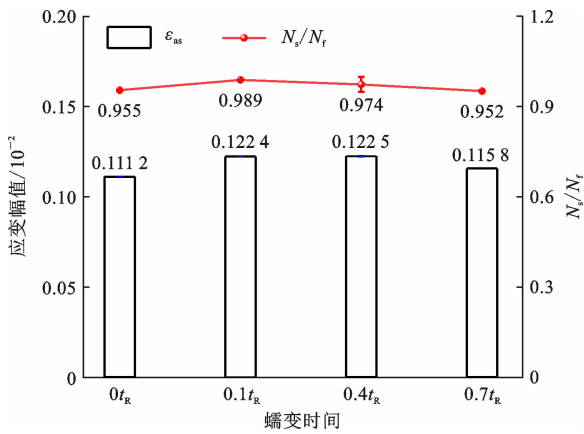


图 9 应变幅值指标变化

Fig. 9 Strain amplitude response and indicator change

总体较为接近,与 OH-0 耦合试件相比,OH-0.1、OH-0.4 与 OH-0.7 的 ϵ_{as} 分别增大了 10.0%、10.2% 和 4.1%,对随蠕变时间变化的影响不显著。这说明稳定阶段的应变幅主要受应力水平控制,对不同程度的蠕变损伤并不敏感。然而,软化起点循环数 N_s 则随蠕变时间延长显著提前:4 组试件的平均 N_s 分别为 30.7 万次、25.4 万次、17.8 万次、10.8 万次,对应的 N_s/N_f 分别为 0.955、0.989、0.974、0.952。这意味着,尽管总疲劳寿命随蠕变损伤加重而下降,但软化起始的相对位置始终集中于失效前的 5% 寿命区间内。结合已有研究^[19], ϵ_a 的演化受到材料循环特性与裂纹扩展的共同影响,稳定循环阶段内滞回响应趋于收敛, ϵ_a 变化较小。综上可知,在本试验循环应力条件下,高温蠕变损伤未显著改变稳定循环阶段的应变幅水平,其主要影响体现在大幅缩短稳定循环区间,促使试件更早进入应变软化阶段,从而主导了后续疲劳性能的退化。

4.3 累积塑性应变响应

图 10 展示了 4 个代表性耦合试件的累积塑性应变-寿命曲线。累积塑性应变通过累加各循环总应变扣除弹性应变后的塑性应变分量得到,用于表征材料在疲劳全过程中内部发生的总塑性滑移量。

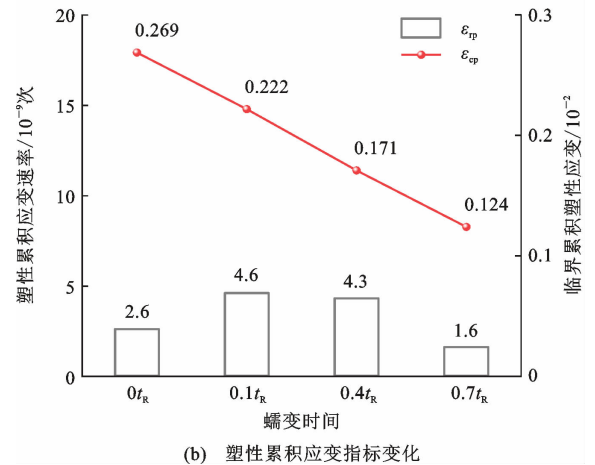
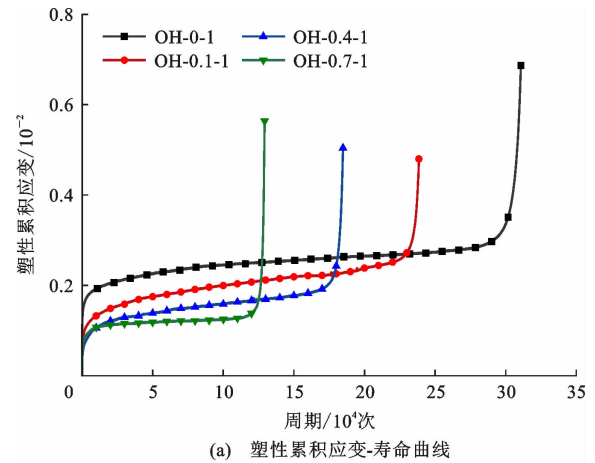


图 10 累积塑性应变响应

Fig. 10 Cumulative plastic strain response

从图 10(a)可以看出,4 条曲线的演化趋势基本

一致:在加载初期,累积塑性应变快速跃升,最大增量接近0.2%;随后在 $0.1N_f \sim 0.7N_f$ 区间内近似线性缓慢增长,表现为稳定循环蠕变阶段;当接近 $0.9N_f$ 时,曲线斜率急剧增大、近乎垂直上升,增长率超过130%,进入大塑性变形阶段。这一演化过程表明,耦合试件在疲劳初期经历了明显的瞬态循环硬化,随后在非对称应力循环下保持稳定的循环蠕变速率,最终在临近失效时表现出显著的塑性失稳特征。该演化形式,与钢材在非对称循环载荷下的棘轮变形特征一致^[25]。

将累积塑性应变演化曲线在稳定阶段($0.1N_f \sim 0.7N_f$)的斜率定义为塑性累积应变稳态速率 ϵ_{cp} ;将该阶段后斜率首次显著增大(超过3倍)时所对应的循环 N_p 处的累积塑性应变,记为临界累积塑性应变 ϵ_{cp} ,如图10(b)所示。分析结果表明,4组耦合试件的 N_p/N_f 相近,均约为0.70,而临界累积塑性应变随蠕变时间的增加,从0.27%下降至0.12%,减小了55.6%。结合已有研究对高温蠕变过程中微观损伤的揭示^[26],这一现象可能源于蠕变阶段形成的晶界孔洞与微裂纹,在后续疲劳循环中促进了损伤的局部化与裂纹的快速连接,从而降低了材料在宏观失稳前所能容纳的总塑性滑移量。上述结果表明,在相同疲劳加载条件下,高温蠕变损伤并未明显改变材料的塑性应变累积速率,而是显著降低了材料累积塑性变形的容限,导致试件在更小的塑性应变水平下便提前进入加速软化与失效阶段。

5 结 语

(1)在高温蠕变-疲劳时序耦合作用下,耦合试件的平均疲劳寿命随蠕变时间增加呈单调下降趋势。当蠕变时间从 $0t_R$ 逐步增至 $0.7t_R$ 时,耦合试件的平均疲劳寿命从32.2万次降至11.5万次。具体而言,与高温蠕变时间为 $0t_R$ 的耦合试件相比,经历 $0.1t_R$ 、 $0.4t_R$ 、 $0.7t_R$ 蠕变时间的耦合试件,其平均疲劳寿命分别降低了约20.2%、42.9%、64.4%。

(2)高温蠕变-疲劳耦合作用使试件断口由平整转为“杯锥状”,且疲劳扩展区随蠕变时间延长而缩小。这表明高温暴露引发的氧化脱碳与蠕变损伤(如晶界弱化、微裂纹)会显著降低材料承载能力,从而加速疲劳破坏进程。

(3)在高温蠕变-疲劳时序耦合作用下,材料动态弹性模量呈现典型的两阶段演化规律:绝大部分疲劳寿命期内模量保持稳定,仅在失效前急剧下降。蠕变作用使初始动态弹性模量略有降低(降幅约

6.1%~8.7%),但其对稳定阶段模量退化影响不明显(软化比接近1.0)。

(4)高温蠕变损伤显著降低了材料对累积塑性变形的容限,但不改变其累积速率。随着蠕变时间从 $0t_R$ 增至 $0.7t_R$,临界累积塑性应变下降约55.6%,耦合试件在更低的塑性应变水平下提前进入加速软化与失效阶段。

参考文献:

References:

- [1] LIU Z, LOU G B, HOU J, et al. Designing a two-level steel cable-stayed bridge against fires[J]. Structural Engineering International, 2023, 33(4): 569-575.
- [2] 张嫣妮,张 帅,刘 学,等.热表面作用下锂电池电解液着火特性研究[J].西安科技大学学报,2025,45(3):461-470.
ZHANG Yan-ni, ZHANG Shuai, LIU Xue, et al. Characterization of lithium battery electrolyte ignition under hot surface action[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2025, 45(3): 461-470.
- [3] 张 岗,赵晓翠,宋超杰,等.桥梁火灾科学与安全保障技术综述[J].交通运输工程学报,2023,23(6):94-113.
ZHANG Gang, ZHAO Xiao-cui, SONG Chao-jie, et al. Review on bridge fire science and safety guarantee technology [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2023, 23(6): 94-113.
- [4] 王春生,张静雯,谭晨欣,等.长寿命耐候钢桥全寿命周期经济性评估模型[J].交通运输工程学报,2024,24(3):69-81.
WANG Chun-sheng, ZHANG Jing-wen, TAN Chen-xin, et al. Life-cycle economic evaluation model of long lasting weathering steel bridges [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2024, 24(3): 69-81.
- [5] 崔 冰,陈 鲲.常规跨径钢箱梁桥工业化设计及经济性分析[J].中外公路,2025,45(1):225-234.
CUI Bing, CHEN Kun. Industrial design and economic analysis of steel box girder bridge with conventional span[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2025, 45(1): 225-234.
- [6] PAGÁN-MARTÍNEZ J J, PAYA-ZAFORTEZA I, HOSPITALER-PÉREZ A. Post-fire assessment of composite steel-concrete box-girder bridges: Lessons from a recent incident [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2024, 214: 108425.
- [7] 张 岗,丁宇航,熊 鑫,等.公轨合用钢桁架桥梁抗火研究进展[J].交通运输工程学报,2026,26(1):31-45.
ZHANG Gang, DING Yu-hang, XIONG Xin, et al. Research review on fire resistance of highway and railway steel truss bridge[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2026, 26(1): 31-45.
- [8] 余玉洁,张 翔,王霄翔.高温后结构钢材单调拉伸和循环荷载试验研究[J].建筑钢结构进展,2024,26(2):13-23.
YU Yu-jie, ZHANG Xiang, WANG Xiao-xiang. Monotonic and cyclic loading tests on the structural steel after an

- exposure to high temperature[J]. *Progress in Steel Building Structures*, 2024, 26(2): 13-23.
- [9] 邓林宇. 基于监测数据与多尺度模拟的大跨度悬索桥钢桥面板疲劳性能研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2023.
- DENG Lin-yu. Fatigue performance of large span suspension bridges based on monitoring data and Multi-scale simulation study of fatigue performance of steel bridge panels[D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2023.
- [10] 王春生, 翟慕赛, 王雨竹. 钢桥疲劳研究进展[J]. *交通运输工程学报*, 2024, 24(1): 9-42.
- WANG Chun-sheng, ZHAI Mu-sai, WANG Yu-zhu. Research progresses on fatigue in steel bridges[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2024, 24(1): 9-42.
- [11] SINAIE S, HEIDARPOUR A, ZHAO X L. Mechanical properties of cyclically-damaged structural mild steel at elevated temperatures [J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 52: 465-472.
- [12] LOU T, WANG W. Mechanical properties of mild steel under combined effects of pre-damage and elevated temperatures in post-earthquake fire scenarios[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2022, 189: 107102.
- [13] ZHANG C T, CUI L W, WANG Z S. Effects of cyclic loading and high-temperature cooling on mechanical properties of Q450 weathering steel[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2025, 224: 109084.
- [14] GUO Y, FANG C, ZHENG Y. Post-fire hysteretic and low-cycle fatigue behaviors of Q345 carbon steel[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2021, 187: 106991.
- [15] JIANG B H, QU Y Q, WANG M J, et al. Mechanical properties of Q355 hot-rolled steel during the entire fire process[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2024, 215: 108565.
- [16] CHEN W, YE J H, JIN L, et al. High-temperature material degradation of Q345 cold-formed steel during full-range compartment fires [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2020, 175: 106366.
- [17] HU Z H, DING K Q, ZHOU J F, et al. Early fatigue damage evolution and crack recognition in low-cycle metal fatigue testing based on acoustic emission monitoring[J]. *International Journal of Fatigue*, 2025, 201: 109182.
- [18] ZHU F, ZHANG Y, ZHANG C T. Experimental study on mechanical properties of Q345 steel after high temperature cooling[J]. *World Journal of Engineering and Technology*, 2020, 8(3): 257-265.
- [19] WU F, LIU Y, ZHANG H Y, et al. Macro- and micro-mechanical perspectives on creep-fatigue interaction in Type 316L stainless steel[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2026, 206: 106353.
- [20] SAADOON A M, AL GHARAWI M, AL-MOSAWE A. Effect of elevated temperature on microstructure and mechanical properties of hot-rolled steel[J]. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 2024, 14(6): 18756-18766.
- [21] IM Y C, KIM D Y, LIM S W, et al. Fatigue life prediction for carbon-SMC and carbon-FRP by considering elastic modulus degradation [J]. *Journal of Composites Science*, 2021, 5(2): 54.
- [22] WITHERS P J. Residual stress and its role in failure[J]. *Reports on Progress in Physics*, 2007, 70(12): 2211-2264.
- [23] CHEONG K S, STEVENS K J, SUZUKI Y, et al. The effects of microstructure on creep behaviour: A study through synchrotron X-ray tomography[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2009, 513/514: 222-227.
- [24] LI Y J, YUAN Y T, WANG D X, et al. Low cycle fatigue behavior of wire arc additive manufactured and solution annealed 308 L stainless steel[J]. *Additive Manufacturing*, 2022, 52: 102688.
- [25] DUTTA K, RAY K K. Ratcheting strain in interstitial free steel[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2013, 575: 127-135.
- [26] ZHANG T Y, WANG X W, JI Y N, et al. P92 steel creep-fatigue interaction responses under hybrid stress-strain controlled loading and a life prediction model[J]. *International Journal of Fatigue*, 2020, 140: 105837.