

基于高温气压鼓胀试验的 12Cr1MoV 钢 蠕变损伤评价与剩余寿命预测方法

王步美^{1,2*}, 谢 毅^{1,2}, 葛志强^{1,2}, 张 涛^{1,2}, 马 歆¹

(1. 江苏省特种设备安全监督检验研究院, 江苏 南京 211800; 2. 江苏省市场监管重点实验室 (过程装备风险防控技术), 江苏 南京 211800)

摘 要: 针对现役电站主蒸汽管道 12Cr1MoV 钢在长期服役过程中的蠕变损伤评估难题, 提出了一种基于微试样高温气压鼓胀试验的蠕变损伤评价与剩余寿命预测方法。通过开展不同应力水平下的蠕变中断试验获取不同损伤状态的试样, 利用微试样高温气压鼓胀技术测试材料的剩余力学性能。基于获得的力学性能构建了蠕变损伤评价参量, 并将其作为内变量耦合至 Larson-Miller 参数模型中, 进一步建立了剩余蠕变寿命预测模型。试验结果表明, 该方法能够有效表征材料的蠕变损伤程度, 模型预测的剩余寿命与试验结果吻合良好, 预测结果均在 1.5 倍分散带以内。

关键词: 微试样; 12Cr1MoV 钢; 高温气压鼓胀试验; 蠕变损伤; 剩余寿命预测

中图分类号: X933.4

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2026)04-0109-08

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2026.04.013

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



听
语
音
与
作
者
互
动
聊
科
研

Creep damage evaluation and remaining life prediction method for 12Cr1MoV steel based on high-temperature pneumatic bulging test

WANG Bumei^{1,2*}, XIE Yi^{1,2}, GE Zhiqiang^{1,2}, ZHANG Tao^{1,2}, MA Xin¹

(1. Special Equipment Safety Supervision Inspection Institute of Jiangsu Province, Nanjing 211800, Jiangsu, China;
2. Key Laboratory of Risk Control Technology of Process Equipment for Jiangsu Province Market Regulation, Nanjing 211800, Jiangsu, China)

Abstract: Aiming at the problem of creep damage assessment for 12Cr1MoV steel used in the main steam pipeline of in-service power plants during long-term operation, a creep damage evaluation and remaining life prediction method based on micro-specimen high-temperature pneumatic bulging test is proposed. Creep interruption tests under different stress levels were carried out to obtain specimens with different damage states, and the residual mechanical properties of the material were tested by high-temperature pneumatic bulging technology via micro-specimens. Based on the obtained mechanical properties, creep damage evaluation parameters were constructed and coupled as internal variables to the Larson-Miller parameter model, and a prediction model for residual creep life was further established. The test results show that this method can effectively characterize the creep damage degree of the material, and the predicted residual life by the model is in good agreement with the tested results, with all predicted results within 1.5 times scatter band.

Key words: micro-specimen; 12Cr1MoV steel; high-temperature pneumatic bulging test; creep damage; residual life prediction

收稿日期: 2026-02-06; 修回日期: 2026-03-11; 接受日期: 2026-03-24

基金项目: 江苏省市场监督管理局科研计划项目 (KJ2024030)。

作者简介: 王步美, 1981 年出生, 女, 江苏盐城人, 硕士, 高级工程师, 主要从事长周期服役高温部件寿命预测研究和微试样测试技术研究, E-mail: wbm209@163.com。

0 引言

12Cr1MoV 耐热钢因其优异的高温力学性能和抗氧化性能,被广泛应用于火力发电厂主蒸汽管道等高温高压部件^[1-2]。随着机组服役时间的延长,材料内部不可避免地会发生蠕变损伤累积,导致性能劣化甚至引发爆管事故^[3-4]。因此,准确评估在役部件的蠕变损伤状态及剩余寿命对于保障电站安全运行具有重要意义。

目前,工程上常用的寿命评估方法主要包括基于硬度或金相分析的无损检测法,以及基于标准单轴蠕变试验的破坏性检测法。前者虽然操作简便,但往往精度差,难以量化早期损伤^[5]。后者结果准确,但需要从管道上切取大尺寸试样,会对设备完整性造成破坏,且试验周期长、成本高。近年来,微试样测试技术因其取样微小、对设备几乎没有损伤等优势受到广泛关注。微试样测试技术目前主要包括小冲杆^[6-7]、液压鼓胀^[8-9]、气压鼓胀试验^[10-11]等。小冲杆试验应力状态复杂,经验公式转换精度受摩擦力影响大。液压鼓胀试验通常只能在常温下进行,无法反映材料在高温下的真实力学响应。而高温气压鼓胀试验作为一种新型微试样技术,通过气体压力使薄片试样产生变形,能够较好地获取材料的高温力学性能^[12]。曹学刚等^[13]提出了一种获取材料真应力-真应变的方法,通过鼓胀试验与有限元反求相结合的方法获得材料的真实模型及参数。张连旺等^[14]通过微试样液压鼓胀试验测试了常温环境下 Q420 钢的力学性能,表明微试样液压鼓胀法可以较准确地求解 Q420 钢的力学性能。然而,目前利用该技术直接建立物理损伤参量并用于寿命预测的研究相对较少。

笔者以 12Cr1MoV 钢为研究对象,通过蠕变中断试验制备不同损伤试样,利用高温气压鼓胀试验获取材料屈服强度的演化规律,并进一步定义基于屈服强度的损伤评价参量,通过将其耦合修正传统的 Larson-Miller 参数模型,建立了一种基于微试样测试的剩余寿命精准预测模型。

1 试验材料与方法

试验材料为外径为 219 mm,壁厚 20 mm 的未服役 12Cr1MoV 钢管,其热处理状态为正火(980~1 030 ℃)和回火(730~760 ℃)。原始试样室温下的屈服强度为 400 MPa,抗拉强度为 503 MPa,延伸率为 29%。原始材料组织主要为铁素体+珠光体,晶内及晶界弥散分布着细小的碳化物,起到强烈的固溶与析出强化作用,如图 1 所示。

试验方法主要包含以下几步:

1) 获得材料的基准蠕变断裂寿命 t_r 。对原始材料进行 550 ℃、不同应力水平(190~270 MPa)下的高温蠕变试验,获得其在 550 ℃ 某一应力水平下的基准蠕变断裂寿命(t_r)。蠕变试验试样尺寸如图 2 所示。

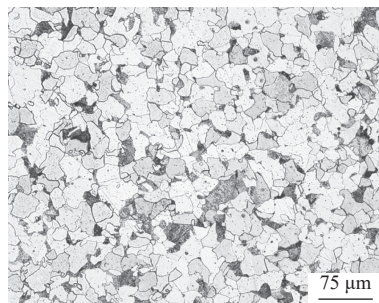


图 1 12Cr1MoV 钢原始材料金相组织

Fig. 1 The optical microstructure of the as-received 12Cr1MoV steel

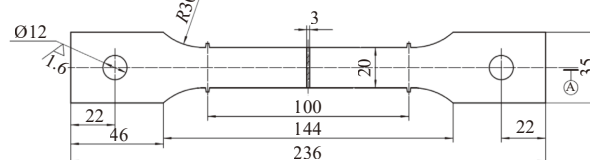
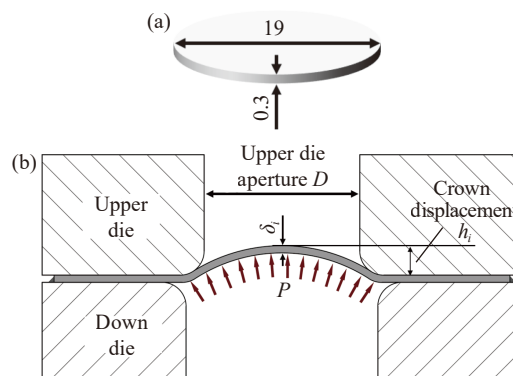


图 2 蠕变试验试样尺寸 (单位:mm)

Fig. 2 Specimen dimensions for the creep test (units: mm)

2) 获取不同损伤状态的试样。在 550 ℃ 下分别进行应力为 190 MPa 和 210 MPa 的蠕变中断试验,试样尺寸如图 2 所示。当蠕变时间 t 达到设定的时间节点(5% t_r 、10% t_r 、20% t_r 、40% t_r 、60% t_r 、80% t_r 、100% t_r)时,终止试验并降温卸载,从而获得一系列具有不同程度蠕变损伤的试样。

3) 利用线切割技术从不同程度蠕变损伤的试样上切取微型圆片。经机械研磨和抛光处理,制备成直径 19 mm、厚度 0.3 mm 的光滑圆形薄片试样(图 3(a))。同时,采用 TEM 对切取下的试样进行观察,探究不同蠕变时间下的微观损伤机理。



(a) 试样尺寸; (b) 加载示意

注: δ_t 为气压鼓胀过程中试样的实时厚度; h_t 为气压鼓胀过程中拱顶实时位移。

图 3 气压鼓胀试验试样尺寸及加载示意 (单位:mm)

Fig. 3 Schematic diagram of specimen dimensions and loading for the pneumatic bulging test (units: mm)

4)采用高温气压鼓胀试验机对圆形薄片试样进行高温气压鼓胀试验,试验温度为550℃,加载速率为2 MPa/min。圆形薄片试样采用激光焊接方式将薄片试样固定在夹具上以确保气密性,使用高纯氦气作为加压介质,如图3(b)所示。试验过程中,通过高精度线性可变位移传感器(LVDT)实时采集试样中心的拱顶位移 h_t ,获取高温气压鼓胀压力-位移曲线。

2 结果与讨论

2.1 高温气压鼓胀试验结果

图4给出了12Cr1MoV钢在550℃下,190 MPa和210 MPa下不同程度蠕变损伤后的高温气压鼓胀试验压力和拱顶位移曲线。从图4(a)(b)可以看出,随着蠕变损伤程度增加,12Cr1MoV钢的鼓胀曲线均呈现出整体下移的趋势。这表明在相同的拱顶

位移下,试样所能承受的内部压力显著降低。原始材料具有最高的峰值压力,随着蠕变时间的增加,曲线的斜率和峰值压力逐渐减小。当蠕变损伤达到80% t_t 时,其承载能力较原始状态出现了显著降低,表明蠕变过程中产生的微观损伤(如碳化物粗化、溶质元素贫化以及蠕变孔洞的形核与长大^[15-16])严重削弱了材料的强度。进一步对比图4(a)(b)可以看出,在两种不同的蠕变应力水平下,气压鼓胀曲线随损伤程度的变化规律几乎相同,说明高温气压鼓胀试验能够有效地反映不同工况下材料内部的累积蠕变损伤程度。仔细对比图4(a)(b)可以发现,在相同的归一化蠕变时间(t/t_t)下,210 MPa较高应力状态下气压鼓胀峰值压力的下降幅度略大于190 MPa。这是因为高应力水平加速了位错的增殖、攀移及亚晶界的形成,导致析出相粗化动力学加快。

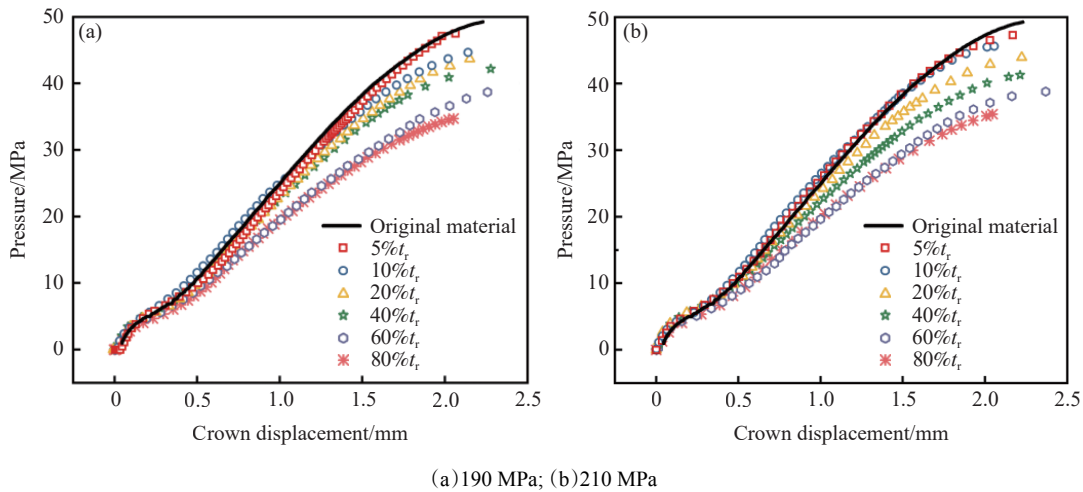


图4 不同蠕变损伤程度下12Cr1MoV钢的高温气压鼓胀压力-拱顶位移曲线

Fig. 4 Pressure - crown displacement curves of 12Cr1MoV steel by high-temperature pneumatic bulging test under different creep damages

为了定量表征材料的力学性能退化,采用公式(1)(2)确定材料的屈服强度($R_{p0.2}$)和抗拉强度(R_m)^[14]。

$$R_{p0.2} = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{D_s}{\delta} \right)^2 P_{lim} \quad (1)$$

$$R_m = \frac{P_c r_c}{2\delta_c} \left(1 + \ln \frac{\delta}{\delta_c} \right) \quad (2)$$

式中: δ 为试样的厚度, D_s 为上模孔直径, α 为极限载荷系数,通常取11.26~12.54, P_{lim} 为由试验确定的极限载荷,其值由图5所示的双切线方法确定, P_c 为试样失稳时的临界压力, r_c 为临界半径, δ_c 为试样临界厚度。

图6给出了基于上述公式计算得到的12Cr1MoV

钢在不同蠕变损伤状态下的屈服强度和抗拉强度演化曲线。原始状态下材料的屈服强度和抗拉强度分别为303 MPa和447 MPa,随着蠕变时间的增加,屈服强度和抗拉强度均呈现出单调下降的趋势,表明蠕变损伤导致了材料强度的显著下降。进一步观察图6可以发现,在蠕变初期,强度大幅下降,稳态蠕变阶段,强度下降相对平缓,在蠕变后期,强度快速下降。该趋势与蠕变过程中的损伤演化规律相同,表明基于高温气压鼓胀试验获得的屈服强度和抗拉强度可以有效表征材料的宏观力学性能退化。对比190 MPa和210 MPa可以发现,虽然强度退化趋势一致,但在20%~40% t_t 的蠕变初中期,210 MPa

条件下强度的相对下降速率更快。高应力导致了更高的初始位错增殖率和更早的位错缠结及亚晶化演变。因此,在同一寿命百分比节点,较高应力造成的基体软化和形变强化能力丧失更为严重。

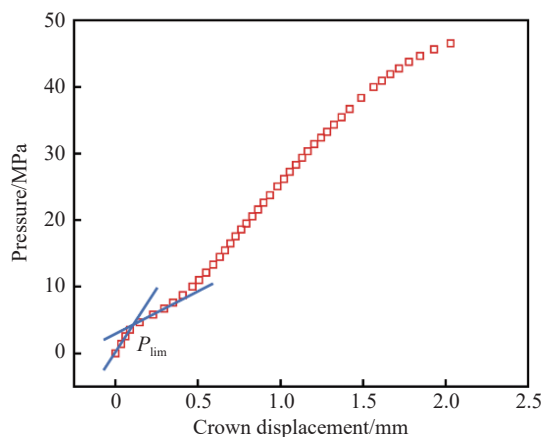


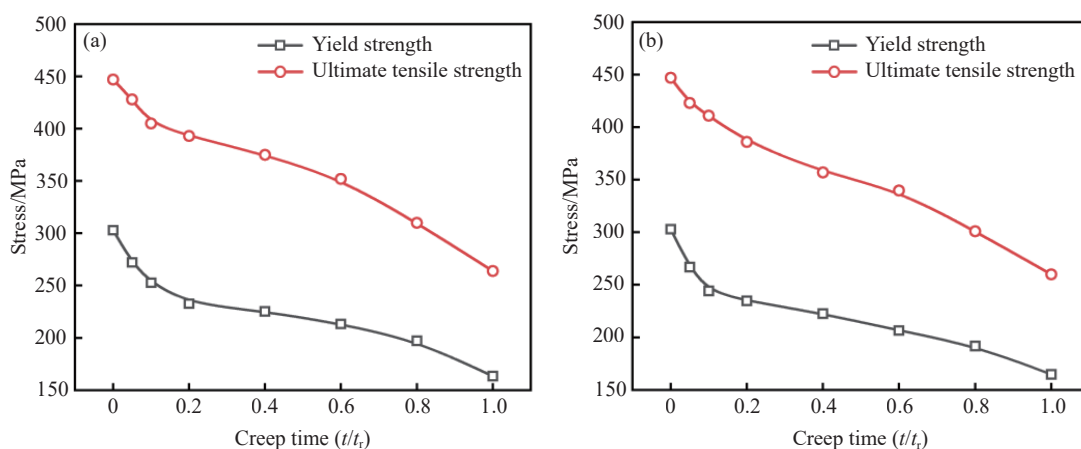
图5 双切线方法确定极限载荷示意

Fig. 5 Schematic diagram of determining the ultimate loading by the double tangent method

2.2 蠕变微观损伤特征

为了阐明不同蠕变时间下的性能退化机理,对不同中断时间下的蠕变试样进行 TEM 观察。190 MPa 和 210 MPa 不同蠕变时间下的 12Cr1MoV 钢 TEM 微观特征如图 7 和图 8 所示,可以看出,原始材料中 MX 析出相比较为细小,并弥散分布于铁素体上(图 7(a))。在较低蠕变应力(190 MPa)下,蠕变过程中的微观组织变化相对缓慢,主要表现为位错形态的演变和析出相的相互作用。在蠕变初期(5%~10% t_r ,图 7(b)(c)),基体中存在大量的位错。位错主要以缠结的形式存在,并开始与碳化物发生

相互作用。碳化物起到了钉扎位错的作用,阻碍位错运动。在蠕变稳态阶段(图 7(d)),位错密度较高。位错缠结开始演变为位错胞或亚晶界。在蠕变时间达到 80% t_r (图 7(e))时,出现了更加明显的亚晶界特征,位错开始向晶界处集中,晶内位错密度相对降低,位错通过攀移和交滑移重新排列以降低系统能量。在断裂后(图 7(f)),可以看到多边形化的亚晶组织,且析出相颗粒较大,位错网络变得稀疏但亚晶界明显。而在较高蠕变应力(210 MPa)下,微观组织的演变速度明显加快,位错更加明显。在蠕变初期(5%~10% t_r ,图 8(b)(c)),相比 190 MPa,此时的位错密度更高,且位错缠结更加紧密。可以看到大量的位错被析出相阻挡,形成复杂的位错网络,高应力导致了更高的初始位错增殖率。在蠕变中期,高应力加速位错缠结向亚晶组织的转变,位错胞状结构形成较早。在 20% t_r 寿命时就已经能观察到明显的位错胞壁和亚晶界的形成迹象。在蠕变稳态阶段(图 8(d)),基体中出现了明显的板条状结构分裂。在蠕变后期(80% t_r ,图 8(e)),试样显示出严重的组织退化。对比原始材料(图 8(a)),可以直观地观察到细小弥散的析出相明显减少,碳化物颗粒发生显著的粗化与聚集,失去了原有的弥散强化效果。同时,原本密集的位错胞壁逐渐清晰化,演变为宽化且尺寸显著增大的多边形亚晶结构。大量的位错在长大的亚晶界以及粗化的碳化物/基体相界面处发生严重的塞积(如图 8(e)红色箭头所示)。这种剧烈的位错堆积会导致局部产生极高的应力集中,从而为宏观损伤阶段蠕变微孔洞的形核与扩展提供了有利条件。



(a) 190 MPa; (b) 210 MPa

图6 不同蠕变损伤程度下 12Cr1MoV 钢的屈服强度和抗拉强度

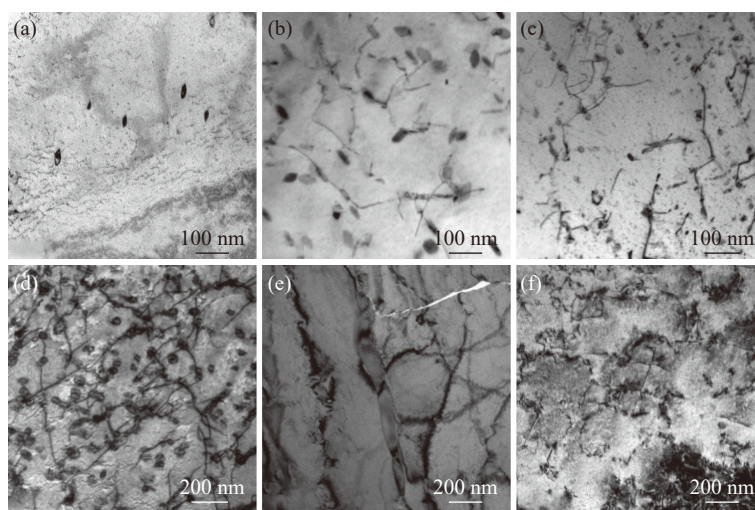
Fig. 6 The yield strength and tensile strength of 12Cr1MoV steel under different creep damages

2.3 高温气压鼓胀试验强度退化机理

结合高温气压鼓胀试验获得的宏观力学性能演化(图6)与TEM微观组织表征(图7、图8),进一步讨论高温气压鼓胀试验强度退化机理。

从图6可以看出,材料的强度随着蠕变时间的增加而单调降低。这种弱化效应首先与第二相粒子的演变密切相关。原始态12Cr1MoV钢中,细小的MX相弥散分布于铁素体基体上(图7(a)),通过Orowan机制有效地钉扎位错,阻碍位错运动,从而

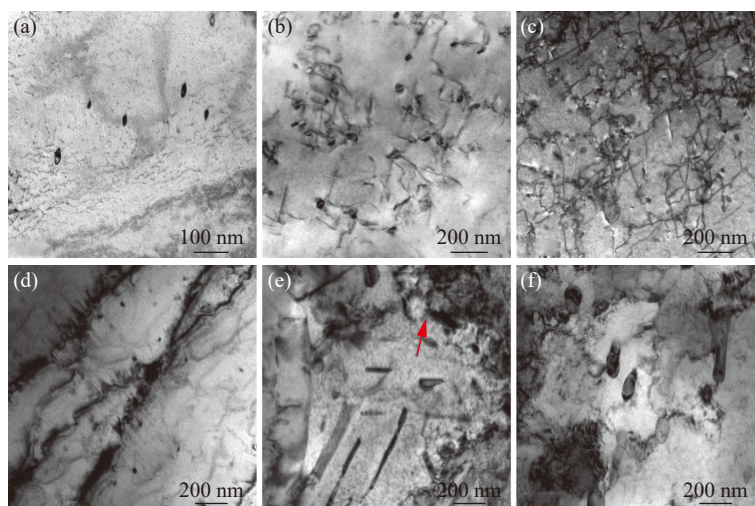
赋予材料较高的初始屈服强度和抗拉强度。然而,随着蠕变过程的进行,TEM结果显示碳化物发生了显著变化。在蠕变后期(80% t_r 及断裂后),碳化物颗粒明显粗化(图7(e)~(f)、图8(e)~(f)),且部分溶质元素从基体中析出,导致固溶强化效果减弱。析出相的粗化导致粒子间距增大,位错绕过粒子所需的临界剪切应力降低,从而削弱了位错钉扎作用。这直接导致了宏观上气压鼓胀试验中极限载荷 P_{lim} 的降低,表现为屈服强度和抗拉强度的下降。



(a)新材料; (b)5% t_r ; (c)10% t_r ; (d)40% t_r ; (e)80% t_r ; (f)100% t_r

图7 550 °C 190 MPa 不同蠕变时间下的12Cr1MoV钢TEM微观特征

Fig. 7 TEM microstructure characteristics of 12Cr1MoV steel at 550 °C and 190 MPa under different creep times



(a)新材料; (b)5% t_r ; (c)10% t_r ; (d)40% t_r ; (e)80% t_r ; (f)100% t_r

图8 550 °C 210 MPa 不同蠕变时间下的12Cr1MoV钢TEM微观特征

Fig. 8 TEM microstructure characteristics of 12Cr1MoV steel at 550 °C and 210 MPa under different creep times

位错亚结构的演变是导致材料强度退化的另一个关键因素,且这种演变在不同蠕变应力下表现出

相似的规律,但不同的速率。蠕变初期(强度快速下降阶段),如图7(b)~(c)和图8(b)~(c)所示,蠕变初

期基体中存在高密度的位错缠结。虽然位错密度较高,但高温环境提供了足够的热激活能,使得位错开始通过攀移和交滑移进行重排。这种微观组织的不稳定性导致了初始阶段强度的快速释放与下降。蠕变稳态(强度平缓下降)阶段,位错增殖与位错回复达到动态平衡。TEM观察表明,位错缠结逐渐演变为位错胞和亚晶界(图7(d)),这种组织结构的有序化降低了系统的畸变能。虽然210 MPa高应力下亚晶形成更早(图8),但整体上,这种缓慢的亚晶化过程对应了图6中强度下降较为平缓的中间阶段。蠕变后期(强度加速下降阶段),当蠕变达到80% t_r 乃至断裂时,微观组织发生了显著的回复与多边形化。如图7(e)和图8(d)所示,清晰的多边形亚晶界形成,晶内位错密度显著降低,位错主要集中在晶界处。这种高度回复的组织结构对塑性变形的阻力大幅降低,导致材料抵抗气压鼓胀变形的能力急剧下降。除组织老化外,物理损伤的累积也是强度在蠕变后期快速恶化的重要原因。如2.1节所述,气压鼓胀曲线的斜率和峰值压力在80% t_r 后显著降低。结合TEM分析,在蠕变后期及断裂试样中,位错在亚晶界和碳化物界面处的堆积导致应力集中,促进了微孔洞的形核与长大。孔洞的存在减少了材料的有效承载面积,并在鼓胀试验的双向拉伸应力状态下加速扩展,导致宏观力学性能的急剧恶化。

进一步对比190 MPa和210 MPa两种工况,虽然强度退化的趋势一致,但高应力水平(210 MPa)显著加速了上述微观演变过程。TEM结果显示,210 MPa下位错胞壁和亚晶界的形成时间更早(20% t_r 即可观察到),且板条结构的破碎更为剧烈。这解释了为何在图6中,尽管归一化寿命(t/t_r)相同,但不同应力水平下的绝对强度值和下降速率

仍存在细微差异,反映了应力对微观损伤演变的加速作用。

2.4 蠕变损伤评价参量

为了定量表征12Cr1MoV钢在蠕变过程中的损伤演化状态,进一步定义了一个基于强度演化的损伤参量 D ,其表达式如式(3)所示。

$$D = \left| \frac{R_0 - R_i}{R_0 - R_c} \right| \quad (3)$$

式中, R_i 为当前时间下通过气压鼓胀试验测得的拉伸强度, R_0 为原始材料的拉伸强度, R_c 为断裂后通过气压鼓胀试验测得的拉伸强度。

图9给出了190 MPa和210 MPa下基于屈服强度和抗拉强度的损伤参量 D 随蠕变时间 t/t_r 的对比。图9(a)表明基于屈服强度定义的损伤参量在蠕变初期快速上升,达到0.2~0.3。屈服强度的大小直接取决于基体的位错密度及细小碳化物对位错的Orowan钉扎阻力。在蠕变初期,热激活导致的位错大量回复和极细小碳化物的迅速球化,会使得屈服强度发生快速的断崖式下降。而抗拉强度表征的是材料整体抵抗失稳变形的能力,它不仅依赖初始组织,还受到加工硬化行为的影响。在未产生宏观微裂纹等物理损伤截面减少前,抗拉强度下降相对平缓。因此,屈服强度的过度降低主要是组织老化软化的体现,而非材料结构承载力的丧失。经典的连续损伤力学指出,材料真正的损伤往往在蠕变中后期才加速积累。由图9可见,基于抗拉强度的损伤演化曲线更贴近理论线性基准,并在后期表现出典型的非线性加速特征;而基于屈服强度的参量在极早期(20% t_r)即达到0.3以上,这与实际物理损伤演化规律不符。说明基于抗拉强度的损伤参量可以较好地评估蠕变损伤。

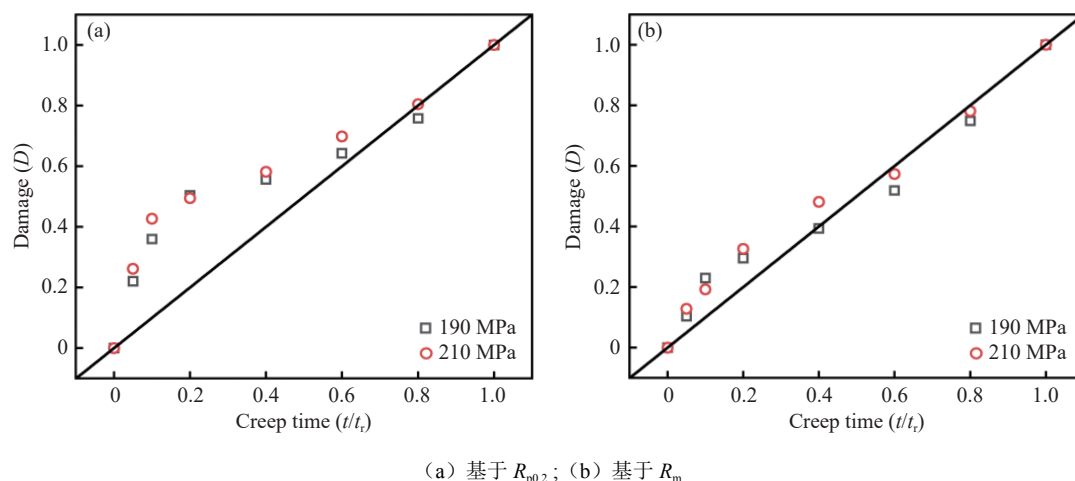


图9 基于拉伸强度的损伤指标 D 与蠕变时间对比

Fig. 9 Comparison of damage value D based on tensile strength with creep time

2.5 剩余蠕变寿命预测模型

传统的 Larson-Miller(L-M) 参数法通常基于无损伤的初始材料状态假设,直接建立应力、温度与断裂时间的关系。直接使用 L-M 寿命预测模型,其无法实现对剩余寿命的预测。然而,对于处于服役过程中的设备,其内部已积累了不同程度的蠕变损伤,直接沿用原始 L-M 参数方程进行剩余寿命预测往往存在较大偏差。而上述研究发现,基于抗拉强度的损伤参量能够有效表征材料的蠕变损伤演化。因此为了准确预测材料的剩余寿命,可以将提出的基于抗拉强度的损伤参量 D 耦合至 L-M 参数方程中,原始 L-M 参数方程表达式如式(4)所示。

$$\ln(t_r) = \frac{a \times \ln(\sigma) + b}{T} + c \quad (4)$$

式中, t_r 为蠕变断裂时间, σ 为蠕变应力, T 为蠕变温度(K), a 、 b 和 c 为与材料相关的参数。通过对 12Cr1MoV 材料在同一温度、不同应力水平下的蠕变数据进行拟合,计算得到 $a=-9\,322$, $b=110\,016$, $c=-66.56$ 。

基于 Kachanov-Rabotnov 连续损伤力学理论,引入有效应力,进一步将定义的基于抗拉强度的损伤参量 D 耦合至基于材料无损伤状态假设的 L-M 参数法中,构建的包含损伤因子的修正 L-M 寿命预测模型见式(5)。

$$\ln(t_r) = \frac{a \times \ln\left(\frac{\sigma}{(1-D)^k}\right) + b}{T} + c \quad (5)$$

其中,该模型通过引入 $(1-D)^k$ 项,量化了损伤积累对剩余寿命的削弱效应。为了确定模型中的关键参数 k ,通过选取 210 MPa 不同中断时间下的剩余蠕变寿命进行拟合,可得 $k=0.1$ 。

图 10 给出了修正 L-M 寿命预测模型预测结果与试验结果的对比。图中圆形为 210 MPa 下的寿命预测结果,可以看出,210 MPa 下的预测结果全部落在 1.5 倍误差带以内,表明通过引入基于抗拉强度的损伤参量 D 进行修正后,修正模型能够很好地表征前期损伤对蠕变寿命的削弱作用。图中方形代表 190 MPa 下的预测结果,作为模型的外推验证,该组数据并未参与参数 k 的拟合,但可以看出,修正模型的预测结果依然表现出较好的预测精度。所有

数据点均位于 1.5 倍误差带内,且大部分位于 1.3 倍误差带之间。表明通过引入基于抗拉强度的损伤参量 D 进行修正 L-M 参数方程能够很好地实现对 12Cr1MoV 钢剩余蠕变寿命的准确预测。

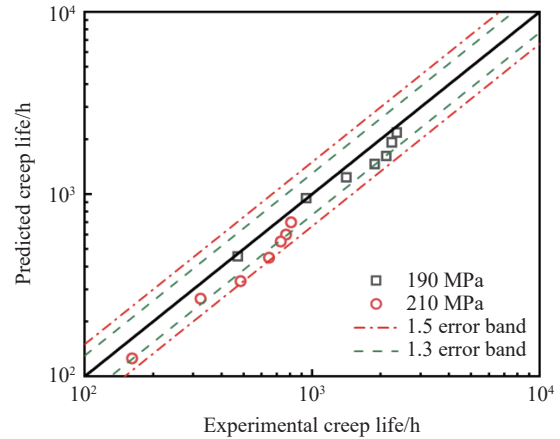


图 10 修正 L-M 寿命预测模型预测结果与试验结果对比
Fig. 10 Comparison between the prediction results of the modified L-M life prediction model and the tested results

3 结论

1) 高温气压鼓胀试验能够有效表征 12Cr1MoV 钢在 550 °C 蠕变过程中的力学性能退化规律。随着蠕变损伤程度的增加,压力-拱顶位移曲线相加,峰值压力与曲线斜率逐渐降低。基于鼓胀试验数据计算得到的屈服强度与抗拉强度均随蠕变时间的增加呈现单调下降趋势。

2) 12Cr1MoV 钢在蠕变过程中的屈服强度和抗拉强度的退化机理主要归因于析出相的粗化、基体组织的回复以及蠕变孔洞的损伤累积。

3) 基于气压鼓胀试验计算得到的屈服强度和抗拉强度,构建了材料蠕变损伤评价参量 D 。对比分析发现,基于屈服强度的损伤参量高估了蠕变损伤,而基于抗拉强度的损伤参量则能准确地反映材料损伤的非线性累积过程。

4) 通过将损伤参量 D 耦合至传统 Larson-Miller 参数方程中,建立了剩余蠕变寿命预测模型。结果表明,该模型对 12Cr1MoV 钢不同应力下的剩余寿命预测精度较高,预测值均落在试验值的 1.5 倍分散带以内,且大部分位于 1.3 倍误差带之间。

参考文献

- [1] 巨佳, 吴鑫鑫, 李德宣, 等. 火电承压关键金属部件的蠕变及寿命预测研究[J]. 中国金属通报, 2024(7): 127-129.
Ju Jia, Wu Xinxin, Li Dexuan, et al. Study on creep and life prediction of critical pressure-bearing metallic components in thermal power units[J]. China Metal Bulletin, 2024(7): 127-129.
- [2] 马瑞东, 瞿丽莉, 叶智, 等. 长时运行高温再热器 12Cr1MoV 钢寿命评估[J]. 特种设备安全技术, 2024(6): 1-3, 20.
Ma Ruidong, Qu Lili, Ye Zhi, et al. Life evaluation of 12Cr1MoV steel for high-temperature reheater after long-term service[J]. Safety Technology of Special Equipment, 2024(6): 1-3, 20.
- [3] Song M, Xu T, Yuan K Y, et al. Creep failure of a steam pipe girth weld and NDT strategy on creep damage[J]. Engineering Failure Analysis, 2019, 104: 673-681.
- [4] 李文波, 刘兰兰, 王军, 等. 12Cr1MoV 长时超温爆管分析[J]. 矿冶工程, 2016, 36(5): 119-122.
Li Wenbo, Liu Lanlan, Wang Jun, et al. Analysis of long-time over-temperature explosion of 12Cr1MoV tube[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2016, 36(5): 119-122.
- [5] 秦佳怡, 关凯书. 高温炉管服役过程中的显微组织和硬度变化及其损伤评价[J]. 机械工程材料, 2020, 44(8): 17-22.
Qin Jiayi, Guan Kaishu. Microstructure and hardness changes of high temperature furnace tubes during service and damage evaluation[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2020, 44(8): 17-22.
- [6] 陈帅甫, 杨滨, 郭志伟, 等. 基于小冲杆试验的 CrMo 钢主蒸汽管道焊接接头拉伸性能退化表征[J]. 化工设备与管道, 2025, 62(2): 99-104.
Chen Shuaifu, Yang Bin, Guo Zhiwei, et al. Characterization of tensile property degradation in welded joints of CrMo steel main pipeline using small punch testing[J]. Process Equipment & Piping, 2025, 62(2): 99-104.
- [7] Zeng Sixiong, Du Peinan, Lai Huansheng, et al. Study on the axial tensile properties of cladding tubes using a modified small punch test[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2025, 215: 105469.
- [8] 王春辉, 安英辉. 主管道材料微试样液压鼓胀拘束度影响研究[J]. 机械强度, 2024, 46(5): 1090-1094.
Wang Chunhui, An Yinghui. Study on the influence of hydraulic bulging restraint intensity on microsample of main pipeline material[J]. Journal of Mechanical Strength, 2024, 46(5): 1090-1094.
- [9] Ding Haoran, Peng Jian, Lu Dongya, et al. Comparison study of small punch test, hydraulic bulge test and uniaxial tensile test for typical pressure vessel CrMo steel[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2025, 217: 105563.
- [10] 王超然, 刘飞, 张睿, 等. 气压鼓胀法用微小试样材料的制备与力学性能研究[J]. 今日制造与升级, 2025(4): 204-206.
Wang Chaoran, Liu Fei, Zhang Rui, et al. Preparation and mechanical properties research of micro-specimens for pneumatic bulging test[J]. Manufacture & Upgrading Today, 2025(4): 204-206.
- [11] Shi Jin, Guo Zijian, Wang Jiaxing, et al. A novel small specimen testing method based on a pneumatic bulging test: Measurement of tensile properties at high temperatures[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2024, 209: 105210.
- [12] Guo Zijian, Shi Jin, Chang Jinghuan, et al. Impact of different welding processes on the pneumatic bulge test at a high temperature: Gas tungsten arc welding and laser beam welding[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2026, 219: 105703.
- [13] 曹学刚, 高光藩, 孙亮, 等. 鼓胀试验的有限元反求应用研究[J]. 机械设计与制造, 2013(12): 262-263, 266.
Cao Xuegang, Gao Guangfan, Sun Liang, et al. The application research of finite element reverse method in the bulge test[J]. Machinery Design & Manufacture, 2013(12): 262-263, 266.
- [14] 张连旺, 宋明, 王汉奎, 等. 微试样液压鼓胀法及单轴拉伸法测试 Q420 钢的力学性能[J]. 中国特种设备安全, 2025, 41(10): 26-33.
Zhang Lianwang, Song Ming, Wang Hankui, et al. Research on mechanical properties of Q420 steel tested by hydraulic bulging test and uniaxial tensile test[J]. China Special Equipment Safety, 2025, 41(10): 26-33.
- [15] 宋玉, 郭岩, 李鹏刚, 等. 长时运行高温过热器 12Cr1MoV 钢寿命评估[J]. 金属热处理, 2021, 46(7): 223-229.
Song Yu, Guo Yan, Li Penggang, et al. Life assessment of 12Cr1MoV steel for high temperature superheater after long-term service[J]. Heat Treatment of Metals, 2021, 46(7): 223-229.
- [16] Xiong Weizhou, He Jianjun, Chen Jian, et al. Microstructure characteristics of 12Cr1MoV heat pipes with the combined effects of compression creep and molten alkali salts corrosion[J]. Procedia Engineering, 2015, 130: 701-710.