

DOI: 10.11973/jxgccl201906004

含不同循环变形历史 P92 钢的高温拉伸性能

张威^{1,2}, 王小威^{1,2,3}, 巩建鸣^{1,2}, 李想^{1,2}, 张天宇^{1,2}

(南京工业大学 1.机械与动力工程学院, 2.江苏省极端承压装备设计与制造重点实验室, 南京 211816;
3.根特大学工程与建筑学院, 兹维纳尔德 B-9052)

摘要: 在 650 °C 下对 P92 钢进行不同周次循环加载试验, 再在 650 °C 下进行拉伸试验, 研究了循环变形对其显微组织和高温拉伸性能的影响。结果表明: 未循环变形 P92 钢的显微组织由细小板条马氏体组成, 马氏体内存在亚晶粒和位错, 晶界析出 $M_{23}C_6$ 碳化物, 循环变形后钢中板条马氏体发生明显回复, 亚晶粒长大、位错向胞状结构转变; 与未循环变形相比, 循环变形后 P92 钢的高温拉伸性能明显降低, 且抗拉强度和屈服强度随循环周次的增加而降低; 循环变形对 P92 钢的拉伸断裂机制没有产生明显影响, 拉伸断口均存在明显韧窝, 拉伸断裂机制均为韧性断裂。

关键词: P92 钢; 循环变形; 拉伸性能; 组织演变

中图分类号: TG142.24

文献标志码: A

文章编号: 1000-3738(2019)06-0018-05

High Temperature Tensile Properties of P92 Steel with Different Cyclic Deformation Histories

ZHANG Wei^{1,2}, WANG Xiaowei^{1,2,3}, GONG Jianming^{1,2}, LI Xiang^{1,2}, ZHANG Tianyu^{1,2}

(1.School of Mechanical and Power Engineering, 2. Jiangsu Key Lab of Design and Manufacture of Extreme Pressure Equipment, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China;
3.Department of Materials Science and Engineering, Ghent University, Zwijnaarde B-9052, Belgium)

Abstract: Cyclic loading tests at 650 °C for different number of cycles were conducted on P92 steel, and then tensile tests at 650 °C were carried out on the steel. The effects of cyclic deformation on microstructure and high temperature tensile property were studied. The results show that the microstructure of P92 steel without cyclic deformation consisted of fine lath martensite; subgrains and dislocations existed inside the martensite and $M_{23}C_6$ carbide precipitated on the boundaries. After cyclic deformation, the recovery of the lath martensite in the steel occurred obviously, the subgrains grew and the dislocations changed to the cellular-like structure. Compared with those without cyclic deformation, the high temperature tensile properties of the P92 steel after cyclic deformation decreased significantly, and the tensile strength and yield strength decreased with the increase of the number of cycles. The cyclic deformation did not greatly influence the tensile fracture mechanism of the P92 steel; dimples appeared on the tensile fracture surface, indicating that the tensile fracture mechanism was ductile fracture.

Key words: P92 steel; cyclic deformation; tensile property; microstructural evolution

0 引言

为降低能源消耗、提高燃煤发电效率、减少

CO₂ 气体排放, 提高工作压力和温度是目前发电机组的主要发展趋势; 超超临界(USC)机组因具有较高的热效率而得到了快速发展^[1]。目前, USC 机组工作时的压力达到 25~30 MPa、温度达到 625 °C。截至 2013 年底, 我国百万千瓦级 USC 机组已有 60 余台, 其发展已取得瞩目的成绩; 但是 USC 机组用高温高强耐热钢的应用基础研究仍然很薄弱, 这成为制约我国 USC 机组稳定发展的瓶颈之一。

目前, USC 发电技术主要通过提高蒸汽参数来

收稿日期: 2018-05-02; 修订日期: 2019-05-05

基金项目: 江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(KYCX17_0935); 中国博士后科学基金资助项目(2016M600405)

作者简介: 张威(1992—), 男, 江苏徐州人, 博士研究生

导师(通信作者): 巩建鸣教授

提高发电效率,进而实现煤的清洁利用。然而,超高的蒸汽温度和压力对设备用材料的高温性能,尤其是抗蠕变性能提出了苛刻要求,因此抗蠕变性能优异的高铬马氏体耐热钢——P92 钢在 USC 机组过热器、主蒸汽管道以及再热器等关键高温装置中得到了广泛应用^[2]。但是,在频繁开停车、新能源发电并网所致的调峰等复杂工况^[3]条件下,USC 机组的关键高温装置还承受着蠕变、疲劳以及蠕变-疲劳交互等损伤作用。这些复杂的循环变形历史会对关键高温装置在稳定工况下的性能产生影响。HAMDOON 等^[4]研究发现,随着循环周次的增加,AISI 1022 钢表现出明显的硬化现象,即循环加载提高了该钢的屈服强度和抗拉强度。MOČKO 等^[5]在对 Ti6Al4V 合金的研究中也得到了类似的结论。然而,SÁNCHEZ-SANTANA 等^[6-8]研究发现,循环加载降低了 6061-T6 铝合金和 4140T 钢的屈服强度和抗

拉强度。MARIAPPAN 等^[9]研究发现,随着循环周次的增加,316L 不锈钢和 P91 钢先表现出硬化现象随后又表现出明显的软化现象,拉伸性能则不断下降。目前,有关循环变形历史对 P92 钢高温拉伸性能的影响研究还鲜见报道。为此,作者在 650 °C 下对 P92 钢试样先进行了不同周次循环加载试验,然后进行了高温(650 °C)拉伸试验,研究了含不同周次循环变形历史的 P92 钢的高温拉伸性能,并结合拉伸断口形貌及循环过程中显微组织的演变规律分析了不同循环载荷下试验钢的损伤机制。

1 试样制备与试验方法

试验材料为外径 105 mm、壁厚 24 mm 的厚壁 P92 钢管,化学成分见表 1,热处理工艺为正火(1 040 °C×20 min)和回火(780 °C×2 h),显微组织为回火马氏体。

表 1 P92 钢的化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of P92 steel (mass)

C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	V	N	Ni	Al	Nb	W	B
0.106	0.36	0.235	0.017	0.008	9.2	0.368	0.182	0.061	0.108	0.005 9	0.078	1.85	0.002 2

在 P92 钢管上截取出尺寸如图 1 所示的试样,标距为 25 mm,标距段直径 8 mm,采用 RPL100 型电子蠕变疲劳试验机进行疲劳试验,试验温度(650±2) °C,在疲劳试验开始前保温 30 min 以确保标距范围内温度均匀,控制方式为应变控制,应变幅为 0.25%,应变速率为 10^{-3} s^{-1} ,测得循环软化曲线,见图 2。由图 2 确定试样的疲劳寿命

N_f 为 5 480 周次^[10]。

使用 RPL100 型电子蠕变疲劳试验机对试样进行不同周次循环加载试验,循环周次分别为 0, 10% N_f , 20% N_f , 50% N_f , 70% N_f , 其他参数同前。使用 JEOL JEM-2010 型透射电子显微镜(TEM)观察循环加载后试样的显微组织。使用 EHFEV100K1 型拉伸试验机对经历循环加载的试样进行高温拉伸试验,拉伸速度为 $1.5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$,温度为 650 °C。采用 Zeiss Axio Imager A1m 型光学显微镜观察拉伸断口附近表面形貌,使用 JSM-6360 型扫描电子显微镜(SEM)观察拉伸断口形貌。

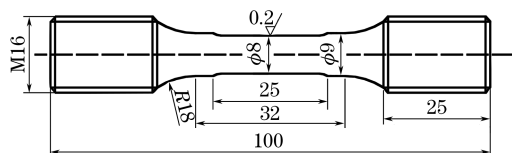


图 1 试样尺寸

Fig.1 Size of specimen

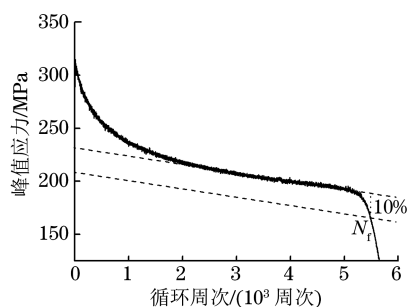


图 2 在 650 °C、应变幅 0.25% 下试样的循环软化曲线

Fig.2 Cyclic softening curve of specimen at 650 °C and 0.25% strain amplitude

2 试验结果与讨论

2.1 显微组织

由图 3 可以看出:未循环变形(循环周次为 0)试样的显微组织主要由细小板条马氏体组成,板条马氏体内分布着亚晶粒和位错,晶界则分布着一些碳化物,这些碳化物应主要为 $M_{23}C_6$ ^[11-12];经过 20% N_f 和 50% N_f 周次循环变形后,板条马氏体发生明显回复,马氏体内的亚晶粒长大,位错向能量更低的胞状结构转变^[13],马氏体晶界处的碳化物未发生明显粗化。碳化物的粗化程度与时间相关^[12]:时间越长,碳化物粗化越明显。因为试验循环变形时

间较短,最长为 3 h,所以碳化物未发生明显粗化。

2.2 拉伸性能

由图 4 可见:不同周次循环变形后试样的高温拉伸曲线形状与未循环变形试样的相似,但是拉伸性能下降较为显著;随着循环周次的增加,屈服强度和抗拉强度先快速下降后缓慢下降,后减缓的趋势

主要与循环变形过程中显微组织的演变有关^[9];循环变形降低了试样的韧性,其伸长率随着循环周次的增加整体上呈现出下降的趋势。在 10% N_f 循环周次下,伸长率的反常变化应是试验误差导致的。

2.3 表面及断口形貌

由图 5 可以看出:随着循环周次的增加,试样拉

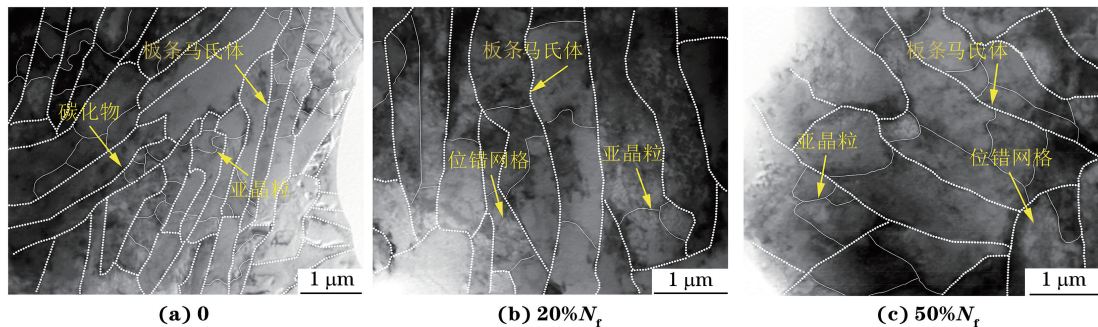


图 3 不同周次循环变形后试样的 TEM 形貌

Fig.3 TEM micrographs of specimens after cyclic deformation for different number of cycles

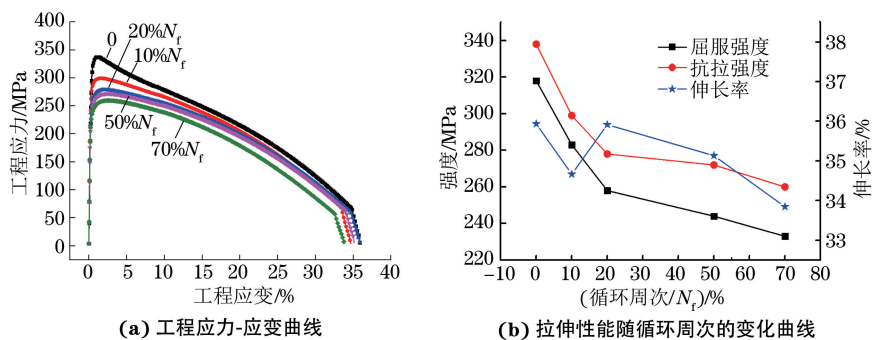


图 4 不同周次循环变形试样的高温拉伸性能

Fig.4 Tensile properties at high temperature of specimens after cyclic deformation for different number of cycles:

(a) engineering stress-strain curve and (b) curves of tensile property with number of cycle

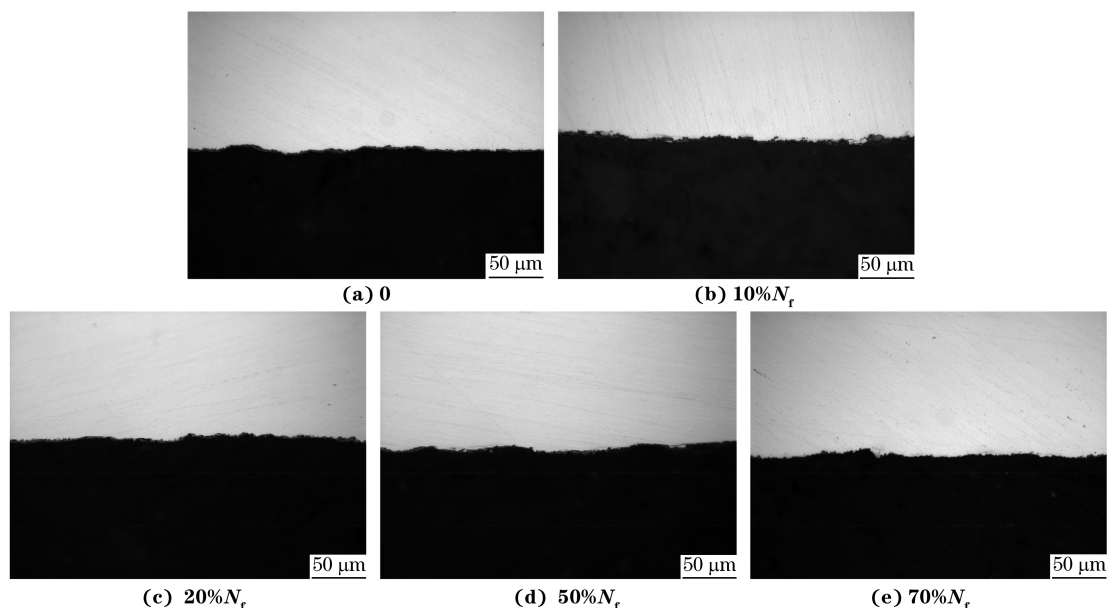


图 5 不同周次循环变形试样拉伸断口附近的表面形貌

Fig.5 Surface morphology near tensile fracture of specimens after cyclic deformation for different number of cycles

伸断口附近表面的粗糙程度呈增大趋势,这主要与循环变形过程中显微组织的演变有关^[14];断口附近表面未观察到明显的裂纹,说明循环变形对试样拉伸性能的影响与表面裂纹无关。

由图6可以看出:未循环变形试样的拉伸断口存在大量尺寸较大的韧窝,其拉伸断裂机制为典型

的韧性断裂,裂纹在试样内部起裂、穿晶扩展,最终导致试样失效;不同周次循环变形试样的拉伸断口上仍存在大量韧窝,说明循环变形并未影响试样的拉伸断裂机制;随着循环周次的增加,大尺寸韧窝数量减少、小尺寸韧窝数量增加,表明试样的韧性在下降,这与伸长率的变化趋势基本吻合。

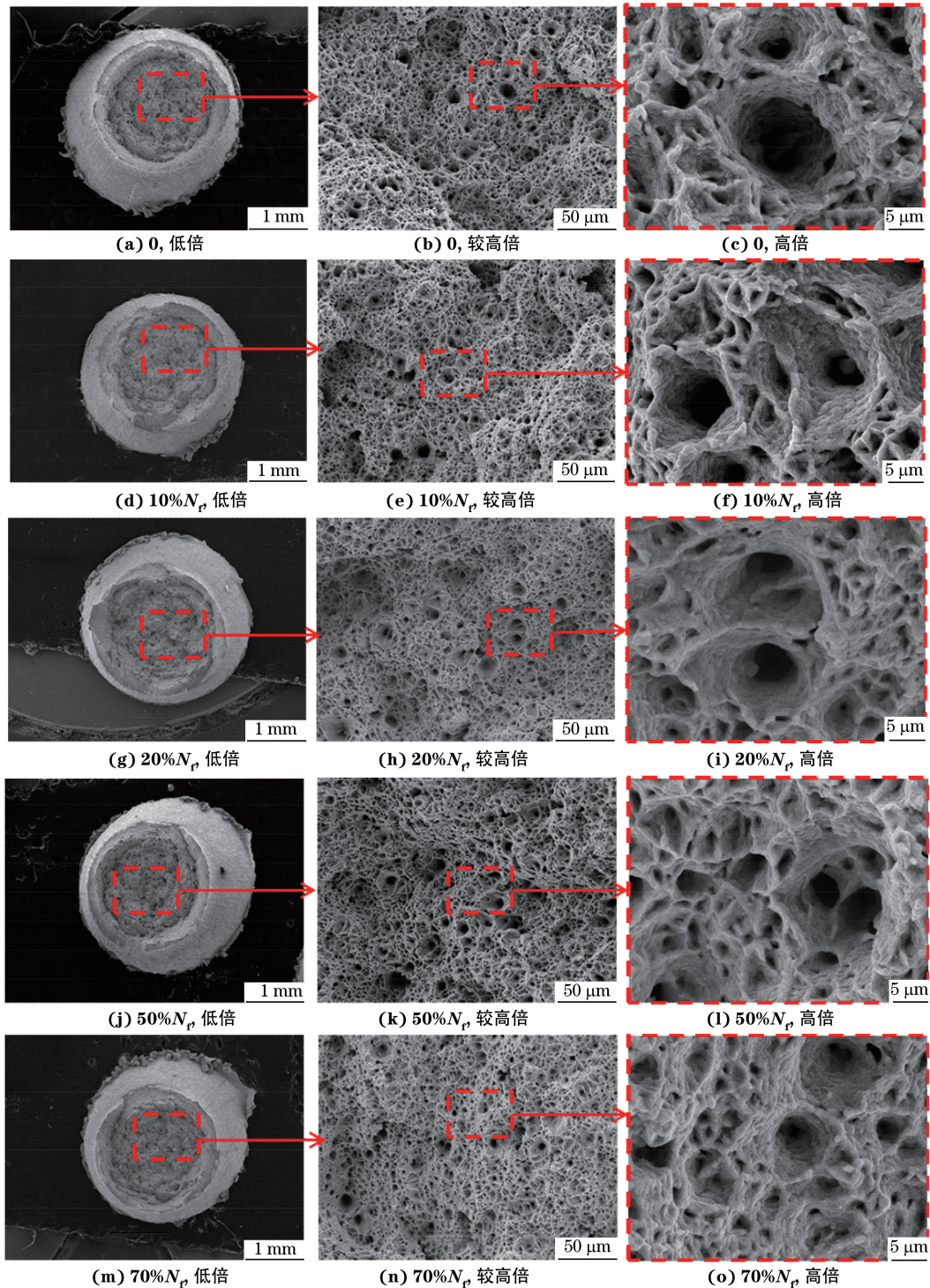


图6 不同周次循环变形试样拉伸断口的SEM形貌

Fig.6 SEM micrographs showing tensile fracture of specimens after cyclic deformation for different number of cycles:

(a, d, g, j, m) at low magnification; (b, e, h, k, n) at relatively high magnification and (c, f, i, l, o) at high magnification

综上所述,循环变形对拉伸性能的影响并不是由裂纹萌生造成的。P92 钢较高的高温抗拉和屈服强度主要归因于其回火马氏体组织^[15]、分布均匀的位错密度以及能阻碍位错运动的亚晶粒。然而,在循环变形过程中,亚晶粒长大、位错密度减小,削弱了在拉伸过程中组织内部抵抗位错运动的作用力^[16],导致 P92 钢在拉伸过程中更快地进入屈服阶段,从而降低了屈服和抗拉强度。同时,板条马氏体的回复也会将一些缺陷,如位错、孔洞等从板条马氏体内部带到边界^[17]。这些缺陷会造成拉伸过程中的应力集中,为裂纹萌生提供更加有利的条件,从而导致 P92 钢伸长率的降低。综上所述,循环变形过程中板条马氏体的回复是 P92 钢拉伸性能下降的主要原因。

3 结 论

(1) P92 钢的原始显微组织主要由细小板条马氏体组成,板条马氏体内存在亚晶粒和位错,晶界析出了 $M_{23}C_6$ 碳化物;在 650 °C 下经不同周次循环变形后,板条马氏体发生明显回复,马氏体内亚晶粒长大,位错向胞状结构转变,马氏体晶界处的碳化物未发生明显粗化。

(2) 循环变形后 P92 钢高温拉伸曲线的形状与未循环变形的没有明显差异,但是拉伸性能明显降低;随循环周次增加,抗拉强度和屈服强度下降,伸长率总体上呈下降趋势;循环变形对 P92 钢的高温拉伸断裂机制没有产生明显影响,拉伸断口均存在明显韧窝,拉伸断裂机制均为韧性断裂。

(3) 循环变形对 P92 钢高温拉伸性能的影响与表面裂纹无关,循环变形过程中板条马氏体的回复是其高温拉伸性能下降的主要原因。

参考文献:

- [1] 全国人民代表大会.中华人民共和国国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要[EB/OL]. (2016-03-17)[2018-05-02]. http://www.xinhuanet.com/politics/2016lh/2016-03/17/c_1118366322.htm.
- [2] 王小威, 巩建鸣, 郭晓峰, 等. 超超临界发电厂中 P92 钢蠕变特性及断裂机制[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2014, 36(3): 32-38.
- [3] WANG X W, GONG J M, ZHAO Y P, et al. Characterization of low cycle fatigue performance of new ferritic P92 steel at high temperature: Effect of strain amplitude [J]. Steel Research International, 2015, 86(9): 1046-1055.
- [4] HAMDOON M, DAS S, ZAMANI N, et al. Experimental study on the effect of strain cycles on mechanical properties of AISI 1022 steel[J]. Strain, 2011, 47(S2): 386-392.
- [5] MOČKO W, KOWALEWSKI Z L. Evolution of tensile properties of the TiAl6V4 alloy due to the prior cyclic loading history[J]. Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2014, 52(3): 847-851.
- [6] SÁNCHEZ-SANTANA U, RUBIO-GONZÁLEZ C, MESMACQUE G, et al. Dynamic tensile behavior of materials with previous fatigue damage [J]. Materials Science and Engineering: A, 2008, 497(1/2): 51-60.
- [7] SÁNCHEZ-SANTANA U, RUBIO-GONZÁLEZ C, MESMACQUE G, et al. Effect of fatigue damage induced by cyclic plasticity on the dynamic tensile behavior of materials [J]. International Journal of Fatigue, 2008, 30(10): 1708-1719.
- [8] SÁNCHEZ-SANTANA U, RUBIO-GONZÁLEZ C, MESMACQUE G, et al. Effect of fatigue damage on the dynamic tensile behavior of 6061-T6 aluminum alloy and AISI 4140T steel[J]. International Journal of Fatigue, 2009, 31(11): 1928-1937.
- [9] MARIAPPAN K, SHANKAR V, SANDHYA R, et al. Influence of prior fatigue damage on tensile properties of 316L(N) stainless steel and modified 9Cr-1Mo steel [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2015, 46(2): 989-1003.
- [10] WANG X, JIANG Y, GONG J, et al. Characterization of low cycle fatigue of ferritic-martensitic P92 steel: Effect of temperature[J]. Steel Research International, 2016, 87(6): 761-771.
- [11] KIMURA M, YAMAGUCHI K, HAYAKAWA M, et al. Microstructures of creep-fatigued 9-12% Cr ferritic heat-resisting steels[J]. International Journal of Fatigue, 2006, 28(3): 300-308.
- [12] FOURNIER B, SAUZAY M, PINEAU A. Micromechanical model of the high temperature cyclic behavior of 9-12%Cr martensitic steels [J]. International Journal of Plasticity, 2011, 27(11): 1803-1816.
- [13] GOLANŠKI G, MROZIŃSKI S. Low cycle fatigue and cyclic softening behaviour of martensitic cast steel[J]. Engineering Failure Analysis, 2013, 35: 692-702.
- [14] MARIAPPAN K, SHANKAR V, SANDHYA R, et al. Comparative assessment of remnant tensile properties of modified 9Cr-1Mo steel under prior low cycle fatigue and creep-fatigue interaction loading[J]. International Journal of Fatigue, 2017, 103: 342-352.
- [15] 黄鑫, 王小威, 张威, 等. 疲劳载荷对 P92 钢高温拉伸性能的影响[J]. 机械工程材料, 2017, 41(12): 49-53.
- [16] GIROUX P F, DALLE F, SAUZAY M, et al. Mechanical and microstructural stability of P92 steel under uniaxial tension at high temperature [J]. Materials at High Temperatures, 2010, 27(1): 29-34.
- [17] ZHANG Z, HU Z F, SCHMAUDER S, et al. Low-cycle fatigue properties of P92 ferritic-martensitic steel at elevated temperature [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2016, 25(4): 1650-1662.