

30Cr1Mo1V 转子钢应变控制下的蠕变—疲劳交互作用研究*

毛雪平 刘宗德 杨 昆 安江英 蒲泽林

(华北电力大学动力系 北京 102206)

摘要:在 540 和 565 下进行了 30Cr1Mo1V 带有保持时间的总应变控制轴向高温低周疲劳试验,保持时间 10~60 s,应变幅为 0.6%~1.2%,采用拉应对称梯形波。对该材料蠕变—疲劳交互作用下的应力松弛现象及应变—寿命规律进行了研究。选取了几个常用的蠕变—疲劳寿命预测模型对试验数据进行分析,对各种预测模型的准确性进行了寿命预测因子和标准偏差分析。试验结果表明,随着控制应变幅的增加,第一、三阶段比例均呈增加趋势,第二阶段的比例呈现减小趋势;以应力下降比率作为参考变量,在整个寿命周期内,拉应力松弛与压应力松弛基本一致,应力下降比率基本相同。采用线性累计损伤法和应变范围划分法的准确度较高,而频率修正法和应变能划分法的准确度较差;给出了各种方法的寿命预测公式。

关键词:30Cr1Mo1V 蠕变 疲劳 应变控制 低周疲劳

中图分类号:TH140.1

0 前言

在热效率方面,超临界机组具有明显的优势。据参考文献[1],当蒸汽温度由 540 升至 566 ,汽轮机的热耗值可降低 50 kJ/(kw·h)。为了追求更高的效率,发展超临界机组是火电机组发展的方向。发展超临界汽轮机组的关键在于确保各部件的材料性能。根据超临界汽轮机运行的特点^[2],高中压转子中疲劳—蠕变交互作用损伤程度很大。为了确保设计和运行的安全,蠕变和疲劳的交互作用必须考虑。关于蠕变和疲劳交互作用的寿命预测模型有很多,但由于蠕变—疲劳交互作用的复杂性,交互作用的机理还没有统一的认识,因而对于这些经验模型的预测有效性的认识也未统一。

自 20 世纪 80 年代末以来,我国在汽轮机转子选材方面发生了一些变化^[3,4]。传统的转子钢 30Cr2MoV 存在冶炼方面的原因,质量难以保证,而 30Cr1Mo1V 具有力学性能和工艺性能方面的优势。从 20 世纪 90 年代以后,30Cr1Mo1V 成为 30Cr2MoV 钢的换代产品,而且被认为可以用于制造 23.5~25 MPa,538~540 /538~566 超临界机组高中压转子材料。据查阅的文献,哈尔滨汽轮机有限公司对该材料的低周疲劳试验进行了初步研究,其试验温度在 538 ,对于超临界温度的低周疲劳试验尚未见报道。为此,对 30Cr1Mo1V 在超

临界温度下进行了蠕变—疲劳交互作用试验研究,探讨该材料用于超临界机组转子钢的可行性,并基于试验结果,对几种常用的蠕变—疲劳交互作用的预测模型的有效性进行分析比较。

1 试验描述

试验用 30Cr1Mo1V 转子钢材料取自北京重型电机厂一根高压转子轴头。其热处理工艺为:预备热处理 980~1030 ,空冷,回火后缓冷;调质热处理 940~970 ,风冷,大于 660 回火,炉冷;除应力热处理,大于 620 ,炉冷,金相组织为回火贝氏体。

转子材料的质量分数和力学性能如表 1 和表 2 所示。

表 1 30Cr1Mo1V 的质量分数 w/%

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	Ni
0.28	0.22	0.73	0.023	<0.005	1.10	1.13	0.24	0.40

表 2 30Cr1Mo1V 的力学性能

温度	屈服点	抗拉强度	伸长率	断面收缩率
$q/$	s_s/MPa	s_b/MPa	$d/$	$j/$
20	629	779	22.0	60.0
540	465	520	29.6	88.5
565	447	484	40.0	85.9

高温疲劳试验设备主机为长春试验机研究所生产的 CSS-280 100KN 电液伺服试验系统,控制器为美国 MTS 公司生产的 458.20 MicroConsole。引伸计的标距为 25 mm,量程为 1 mm。试验采用

* 华北电力大学博士学位教师科研基金资助项目 (2004-4),20040318 收到初稿,20040819 收到修改稿

美国材料与试验协会颁布的 Standard Practice for Strain-Controlled Fatigue Testing (ASTM E606-1992) 以及国家标准《轴向等幅低周疲劳试验方法》(GB/T 15248-1994)。试样为等截面圆柱形试样，直径 6~10 mm。采用轴向总应变控制、拉压对称梯形波，保持时间在 10~60 s。数据采集由计算机完成。应变范围 $\pm 0.2\% \sim \pm 1.2\%$ ，加载应变速率为 $0.2\% s^{-1}$ ，试验温度为 540、565，在试验之前进行 40 min 的保温。

2 试验数据处理方法及试验结果

2.1 应力变化特征

2.1.1 应力随循环周次变化特征

在 540、565 两种温度下，带有应变保持的 30Cr1Mo1V 转子钢的应力随周次变化曲线如图 1 所示。在整个寿命过程中，无论从最大拉应力、最小保持拉应力、最大压应力以及最小保持压应力均呈现从急剧变化—缓慢变化—急剧变化三个阶段，各应力变化是同步的，整个过程呈现疲劳软化特征。

试验数据结果显示，在相同温度不同应变下，三阶段的比例并不相同，这一点与参考文献[6]中关于 30Cr2MoV 的试验结果不同。随着温度的升高，第一阶段的比例有升高趋势，而对第二、第三阶段的规律不明显。施加的应变幅大小对各阶段比例变化呈现一定的规律性，即无论保持时间长短，随着控制应变幅的增加，第一、三阶段比例均呈增加趋势，第二阶段的的比例呈现减小趋势。应变保持时间的长短对各阶段的比例分配规律不明显，如表 3、4 所示。

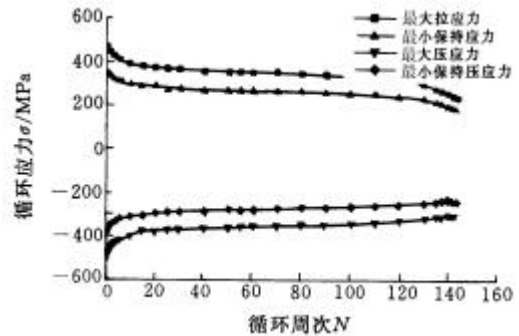


图 1 循环应力随循环周次变化曲线

表 3 540 不同应变、不同保持时间各阶段比例

应变 e_t /%	保持时间 10 s				保持时间 20 s				保持时间 60 s			
	0.6	0.8	1.0	1.2	0.6	0.8	1.0	1.2	0.6	0.7	0.8	1.0
第一阶段	0.126	0.130	0.138	0.144	0.110	0.122	0.124	0.127	0.088	0.099	0.109	0.125
第二阶段	0.674	0.650	0.599	0.441	0.713	0.699	0.672	0.431	0.700	0.661	0.516	0.528
第三阶段	0.200	0.220	0.263	0.414	0.177	0.178	0.404	0.442	0.212	0.240	0.375	0.347

表 4 565 不同应变、不同保持时间各阶段比例

应变 e_t /%	保持时间 10 s				保持时间 20 s				保持时间 60 s			
	0.6	0.8	1.0	1.2	0.6	0.8	1.0	1.2	0.6	0.7	0.8	1.0
第一阶段	0.128	0.155	0.180	0.196	0.120	0.127	0.205	0.221	0.090	0.108	0.126	0.170
第二阶段	0.712	0.675	0.644	0.601	0.709	0.683	0.557	0.529	0.766	0.671	0.630	0.558
第三阶段	0.161	0.170	0.175	0.203	0.171	0.189	0.238	0.250	0.144	0.221	0.244	0.273

2.1.2 松弛应力的变化规律

为探讨在应变保持期内的应力下降规律，以相对应变保持开始点时刻的应力作为基准点应力，以应力下降比率作为参考变量，发现在整个寿命周

期内，应力下降比率基本相同。在各温度下，在不同应变和应变保持时间条件下的结果如表 5、6 所示。

表 5 540 时不同应变、不同保持时间应力下降比率

应变 e_t /%	保持时间 10 s				保持时间 20 s				保持时间 60 s			
	0.6	0.8	1.0	1.2	0.6	0.8	1.0	1.2	0.6	0.7	0.8	1.0
拉应力松弛	0.192	0.198	0.199	0.202	0.214	0.230	0.234	0.247	0.275	0.282	0.275	0.292
压应力松弛	0.182	0.185	0.199	0.203	0.211	0.221	0.234	0.230	0.274	0.274	0.269	0.296

表 6 565 时不同应变、不同保持时间应力下降比率

应变 e_t / % 应力下降 Δs / %	保持时间 10 s				保持时间 20 s				保持时间 60 s			
	0.6	0.8	1.0	1.2	0.6	0.8	1.0	1.2	0.6	0.7	0.8	1.0
拉应力松弛	0.216	0.228	0.232	0.236	0.256	0.270	0.261	0.275	0.288	0.327	0.319	0.323
压应力松弛	0.206	0.214	0.220	0.227	0.246	0.259	0.247	0.274	0.286	0.338	0.310	0.312

从表中可以看出,拉应力松弛与压应力松弛基本一致,相对误差在7%之内。保持时间的延长,应力松弛比例会增加,而应变水平提高引起的应力松弛比率有升有降。这表明,应力松弛程度与控制的应变量和时间有关。此外,随着温度的升高,应力松弛程度增加。根据试验观察到的应力随循环周次变化的特点,可以将应变和时间的影响分离。以 f 表示松弛度, t 表示保持时间(单位: min), 温度不变时可以写成如下的形式

$$f = f(e_t, t) = f_1(e_t) f_2(t) \quad (1)$$

根据参考文献[5], 应变控制保持时间循环的应力松弛可以采用 Felltham 公式表示, 即

$$\Delta s(t) = s(0) - s(t) = a \ln(bt + 1) \quad (2)$$

式中 $s(0), s(t)$ ——保持开始和 t 时间后的应力, a, b 为常数

根据试验结果, 应改写为.

$$\frac{s_0 - s}{s} = (ae_t + b) \ln(bt + 1) \quad (3)$$

式中 a, b ——由材料特性确定的常数
各温度的拟合公式如下。

540 时

$$f = (0.04271 + 0.7578e_t) \ln(300.92t + 1) \quad (4)$$

565 时

$$f = (0.04628 + 0.7136e_t) \ln(404.43t + 1) \quad (5)$$

式中, t 的单位为 min。

2.1.3 循环应力—应变关系

仿照纯疲劳试验定义稳定循环^[6], 以循环中的最大拉应力作为循环应力的计算应力的标准, 可以得到如下的循环应力—应变关系。

540 时

$$e_t = \frac{s}{172800} + \left(\frac{s}{801.83} \right)^{\frac{1}{0.1491}} \quad (6)$$

565 时

$$e_t = \frac{s}{171200} + \left(\frac{s}{459.7} \right)^{\frac{1}{0.0401}} \quad (7)$$

式中 e_t, s ——控制总应变和循环稳定时的应力

2.2 蠕变—疲劳寿命关系

2.2.1 蠕变—疲劳寿命关系

关于蠕变—疲劳交互作用寿命估算的常用方

法^[8]有线性累计损伤法、应变范围划分法、频率修正法以及等效应变法等^[5]。

参考文献[6]中关于失效的定义为, 以第二阶段终了寿命的一半为循环稳定滞回环, 选取最大拉应力下降到稳定循环峰值拉应力的75%的循环周次作为失效周次, 记为 N_{ie} 。

按照应变范围划分法得到的疲劳寿命公式如下。

540 时

$$N_{pp} = 0.3207e_{pp}^{-1.358} \quad (8)$$

$$N_{cc} = 0.04477e_{cc}^{-1.3674} \quad (9)$$

565 时

$$N_{pp} = 1.291e_{pp}^{-1.044} \quad (10)$$

$$N_{cc} = 0.1577e_{cc}^{-1.1469} \quad (11)$$

式中 N_{pp}, N_{cc} ——分解纯蠕变应变和塑性应变 e_{pp}, e_{cc} 下的循环失效周次

按照应变能区分法得到的寿命公式如下。

540 时

$$N_{pp} = 1449(s_{max} \Delta e_{pp})^{-0.996} \quad (12)$$

$$N_{cc} = 0.035703(s_{max} \Delta e_{cc})^{-5.4805} \quad (13)$$

565 时

$$N_{pp} = 1476.7(s_{max} \Delta e_{pp})^{-1.1403} \quad (14)$$

$$N_{cc} = 30.924(s_{max} \Delta e_{cc})^{-1.8827} \quad (15)$$

式中 s_{max} ——滞回环中的最大应力

按等效应变法, 等效应变如下。

540 时

$$e_{eq} = 0.002007(2N_f)^{-0.06821} + 0.7262 \times (2N_f)^{-0.7192} \quad (16)$$

565 时

$$e_{eq} = 0.004511(2N_f)^{-0.05042} + 2.45(2N_f)^{-1.003} \quad (17)$$

按照频率修正法得到的疲劳寿命公式如下。

540 时

$$e_t = 0.007115N_f^{-0.1156} n^{0.1288} + 1.733 \times N_f^{-0.8664} n^{-0.0842} \quad (18)$$

565 时

$$e_t = 0.005749N_f^{-0.09165} n^{0.1451} + 0.6646 \times N_f^{-0.7087} n^{-0.06891} \quad (19)$$

式中, n 的单位为 r/min。

对于拉压应变保持时间内的蠕变应力 s 随时间松弛变化，线性累计损伤法采用的有效应力按所谓的黄金分割法求得^[8]，即

$$s = s_{\max} - 0.618(s_{\max} - s_1) \quad (20)$$

式中 s_{\max}, s_1 —— 应变保持开始和终止时的应力值

蠕变试验的结果如下。

540 时

$$t_r = 5.998 \times 10^{31} s^{-11.737} \quad (21)$$

565 时

$$t_r = 3.1696 \times 10^{30} s^{-11.557} \quad (22)$$

式中 t_r —— 蠕变断裂时间(h)

纯疲劳试验的结果如下。

540 时

$$N_f = 0.3207e_p^{-1.358} \quad (23)$$

565 时

$$N_f = 1.291e_p^{-1.044} \quad (24)$$

式中 e_p —— 塑性应变幅

为验证公式的准确性，将按照频率修正公式得到的试验数据拟合公式与参考文献[7]中 Cr-Mo-V 的钢频率修正曲线进行比较，基本处于同一水平。图 2 中拉压保持时间各为 30 min。从图可以看出，在相同保持时间的条件下，540 和 565 两种温度下的寿命曲线没有明显的差别。这表明，将国产 30Cr1Mo1V 转子钢的使用温度提高到超临界条件的 565 下是可行的。

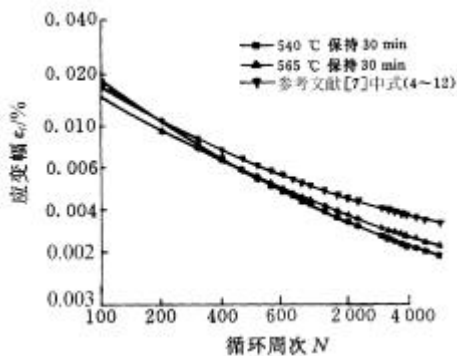


图 2 数据拟合曲线与参考文献[7]中公式的比较

2.2.2 预测模型有效性的量化评估

预测模型有效性的量化评估通过采用预测寿命和实际寿命之间的分散带因子 F 和标准偏差 S 评估。

分散带因子 F 定义为

$$F = \begin{cases} N_p / N_0 & \text{当 } N_p > N_0 \\ N_0 / N_p & \text{当 } N_0 > N_p \end{cases} \quad (25)$$

标准偏差 S 定义为

$$S = \frac{\sum_{i=1}^n (\lg N_p - \lg N_0)^2}{n-1} \quad (26)$$

式中 n —— 数据点个数

N_0, N_p —— 实际寿命和预测寿命

显然，分散带因子和标准偏差的值越小，预测精度就越高。表 7、8 分别表示了按照分散带因子和标准偏差的比较值。从分散带因子来说，应变范围划分法的预测精度较高，而频率修正法的精度最差。从标准偏差来看，以频率修正法最差。综合考虑，以线性累计法和应变范围划分法的效果较好，等效应变法也能给出很好的预测效果。

表 7 各种预测方法的分散带因子 F

温度 $q/$	预测方法				
	线性累计损伤法	应变范围划分法	应变能划分法	频率修正法	等效应变法
540	1.9	1.67	2.12	3.13	1.21
565	1.3	1.70	1.73	2.17	1.40

表 8 各种预测方法的标准偏差 S

温度 $q/$	预测方法				
	线性累计损伤法	应变范围划分法	应变能划分法	频率修正法	等效应变法
540	0.106	0.104	0.1200	0.248	0.00770
565	0.063	0.090	0.0911	0.099	0.00316

3 结论

(1) 随着控制应变幅的增加，第一、三阶段比例均呈增加趋势，第二阶段比例呈现减小趋势。以应力下降比率作为参考变量，在整个寿命周期内，拉应力松弛与压应力松弛基本一致，应力下降比率基本相同，并给出了应力下降比率与应变时间的关系。

(2) 对几种常用的疲劳—蠕变交互作用的寿命预测方法进行的量化分析结果表明：用黄金分割法的有效蠕变应力后，在试验加载条件下的高温蠕变—低周疲劳范围内，线性累计损伤的寿命预测方法具有较高的精度，分散因子在 2 以内。应变范围划分法和等效应变法也能给出较好的预测精度，而应变能划分法和频率修正法的预测准确度较差。

(3) 从试验结果来看，将国产 30Cr1Mo1V 转子钢使用温度提高到超临界条件的 565 是可行的。

参 考 文 献

- 1 翁思成, 姚祖安, 郑云之. 超临界汽轮机组的现状和开发前景. 上海汽轮机, 1998, 38(3): 1~11
- 2 Viswanathan R. Creep fatigue problems in the power generation industry. Creep and Fracture of Engineering Materials and Structure, 2001: 545~563
- 3 林富生. 我国火电超临界机组的材料. 动力工程, 1991, 11(1): 52~64
- 4 孙惠连. 我国发电设备材料的技术进展. 动力工程, 1989, 9(2): 14~24
- 5 Skelton R P. Crack initiation and growth during thermal transients. In: Ginsztler J, Skelton R P, Wien S, eds. Component Reliability under Creep-Fatigue Conditions, New York, 1998
- 6 毛雪平, 刘宗德, 杨昆, 等. 30Cr2MoV 转子钢高温下的低周疲劳特性实验研究. 中国电机工程学报, 2002, 22(6): 119~122
- 7 Viswanathan R. Damage mechanisms and life assessment of high-temperature component. ASM International, 1995
- 8 Chen L J, Wang Z G, Yao G, et al. An assessment of three creep-fatigue life prediction methods for nickel-based superalloy GH4049. Fatigue Fract. Mater. Struct., 1999, 23(4): 509~519

STUDY ON CREEP-FATIGUE INTERACTION BEHAVIOR OF 30Cr1Mo1V UNDER STRAIN-CONTROLLED STATE

Mao Xueping Liu Zongde Yang Kun
An Jiangying Pu Zelin

(Department of Power Engineering, North China
Electrical Power University, Beijing 102206)

Abstract: High temperature low-cycle fatigue test with hold time ranging from 10 s to 60 s are performed on 30Cr1Mo1V under a fully reversed axial total strain control mode at 540 and 565 . The strain amplitudes are 0.6% ~1.2%, the waveforms are symmetrical trapezium. The relaxation phenomena and the strain-life laws are investigated. Several commonly used fatigue-creep life prediction methods are chosen to analyze the experimental data. The scatter band factor and standard deviation are used to test validity of these life prediction methods. The results show that the ratios of the first and the third stage are increasing whereas the ratio of the second stage is decreasing with the increasing strain. The relaxation ratios are almost the same during tensile hold time and compress hold time with stress for reference. The linear damage summation method and the strain range partitioning method have higher precision, whereas the strain energy partitioning method and the modified frequency Manson-Coffin method are weaker in life-prediction. In addition, life prediction formula of this material are presented of these life-prediction modes.

Key words: 30Cr1Mo1V steel Creep Fatigue
Strain-controlled Low-cycle fatigue

作者简介: 毛雪平, 男, 1967 年出生, 博士。主要从事汽轮机疲劳寿命方面的研究。

E-mail: maoxp@sohu.com