

文章编号: 1000-8055(2000)03-0291-04

一种新的蠕变持久可靠性方程

张少波 傅惠民

(北京航空航天大学固体力学研究所, 北京 100083)

摘要: 高可靠度的蠕变持久方程是高温机械设备设计和寿命评估的重要依据, 但是, 根据现行方法得出的蠕变持久可靠性方程无法满足预定的置信度和可靠度的要求, 导致其预测的蠕变持久强度和使用寿命过大, 使高温机械在实际使用中偏于危险。本文发现并纠正了现行方法中的错误, 建立了一种新的蠕变持久可靠性方程, 根据该方程可以准确地预测高置信度和高可靠度的蠕变持久强度和使用寿命。

关键词: 蠕变; 持久; 可靠性

中图分类号: V 250 **文献标识码:** A

1 前言

材料蠕变断裂是高温环境中工作的机械设备发生失效的主要形式之一, 因此有关设计规范都规定高温机械设备必须依据材料的长期持久强度来进行设计^[1], 对关键零部件则要求以高置信度、高可靠度的持久强度作为设计依据。如航空发动机的热端部件就是根据持久强度的 -3σ 基值(即置信度为 95%, 可靠度为 99.87% 的持久强度)进行设计。

由于试验上的困难, 工程上只能根据短期蠕变试验结果来预测长期持久强度, 而其预测结果的准确程度主要取决于对短期蠕变试验数据的拟合精度。目前, 美国涡轮涡扇发动机设计通用规范(MIL-5007D)、我国国军标 GJB/Z18-91 和发动机设计规范都推荐采用拉森—米勒(L-M)方程、葛—唐吾(G-D)方程、曼森—索柯普(M-S)方程和曼森—哈弗特(M-H)方程这 4 种持久方程^[2], 并选择其中将短期蠕变试验数据拟合最好(即标准差最小、相关系数最大)的方程作为最终的持久方程。但是, 在此基础上建立的高置信度、高可靠度的持久方程对短期蠕变试验数据拟合的误差较大, 无法满足预定的置信度和可靠度要求, 造成了高温机械设备在“高可靠度”下频繁失事。本文对此进行了深入研究, 发现造成这一现象的

根本原因在于现行方法存在一严重错误, 即在确定高置信度、高可靠度的持久方程时误用了一维单侧容限系数, 导致根据其预测的蠕变持久强度和使用寿命过大, 使机械在实际使用中偏于危险。为此, 本文采用二维单侧容限系数方法建立了一种新的高置信度、高可靠度的持久方程, 大量的对比计算表明, 该方程可以很好地拟合短期蠕变试验数据, 克服了现行方法因采用一维单侧容限系数而导致持久强度值偏大、工程应用偏于危险的错误。

2 基本原理与方法

为了便于叙述, 将持久方程表示为热强参数综合方程的形式:

$$\lg \sigma = a + b_1 p + b_2 p^2 + b_3 p^3 \quad (1)$$

式中 σ 为持久强度; a 和 $b_i (i = 1, 2, 3)$ 为待定系数; p 为热强参数, 上述四种持久方程相对应的热强参数分别为:

$$\text{L-M 方程: } p = T(\lg t + c) \quad (2)$$

$$\text{G-D 方程: } p = \lg t - c/T \quad (3)$$

$$\text{M-S 方程: } p = \lg t + cT \quad (4)$$

$$\text{M-H 方程: } p = (\lg t - \lg t_\alpha) / (T - T_\alpha) \quad (5)$$

式中: t 为蠕变断裂时间; T 为绝对温度; c , t_α 和 T_α 均为材料常数。

$$\text{令: } y = \lg \sigma, p_1 = p, p_2 = p^2, p_3 = p^3$$

收稿日期: 1999-01-10; 修订日期: 1999-04-20

作者简介: 张少波(1970-), 男, 博士生, 北京航空航天大学 2-32 信箱, 100083

$P = (p_1, p_2, p_3)^T$, 则式(1)可写为:

$$y = a + B^T P \tag{6}$$

式中: a 和 $B = (b_1, b_2, b_3)^T$ 为待定参数。

设 $(T_i, \sigma_i, t_i), i = 1, 2, \cdots, n$, 为经过 n 次独立试验得到的试验数据, 由此可确定样本 (P_i, y_i) , 其中 $P_i = (p_{1i}, p_{2i}, p_{3i})^T$ 。那么 a 和 B 的估计量 $\hat{a}$ 和 $\hat{B} = (\hat{b}_1, \hat{b}_2, \hat{b}_3)^T$ 可以由线性回归分析确定:

$$\hat{a} = \bar{y} - \hat{B}^T \bar{P}, \quad \hat{B} = L_{pp}^{-1} L_{py}$$

其回归方程为:

$$\hat{y} = \hat{a} + \hat{B}^T P \sim N(a + B^T P, \left[\frac{1}{n} + (P - \bar{P})^T L_{pp}^{-1} (P - \bar{P}) \right] \sigma^2) \tag{7}$$

方差 σ^2 的估计量 $\hat{\sigma}^2$ 由下式给出:

$$\hat{\sigma}^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \hat{a} - \hat{B}^T P_i)^2}{n - 4} \tag{8}$$

其自由度 $\nu = n - 4$ 。以上各式中:

$$\bar{P} = (\bar{p}_1, \bar{p}_2, \bar{p}_3)^T$$

$$\bar{p}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_{ji} \quad (j = 1, 2, 3)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i, \quad L_{pp} = (L_{jk})_{3 \times 3}$$

$$L_{py} = (L_{1y}, L_{2y}, L_{3y})^T$$

$$l_{jk} = \sum_{i=1}^n (p_{ji} - \bar{p}_j)(p_{ki} - \bar{p}_k) \quad j, k = 1 \sim 3$$

$$l_{jy} = \sum_{i=1}^n (p_{ji} - \bar{p}_j)(y_i - \bar{y}) \quad j = 1 \sim 3$$

根据现行方法^[1], 置信度为 γ , 可靠度为 R 的持久强度 $\sigma_{Y,R}$ 可由下式算出:

$$\lg \sigma_{Y,R} = \hat{a} + \hat{B}^T P - K_{Y,R} \cdot \beta \cdot \hat{\sigma} \tag{9}$$

式中 β 为标准差修正系数, 当 $n \geq 20$ 时, $\beta = 1 + 1/4(n - 1)$; $\hat{\sigma}$ 为标准差; $K_{Y,R}$ 为一维单侧容限系数, 可由下式确定:

$$K_{Y,R} = \frac{u_\gamma - u_R \sqrt{\frac{1}{n} \left[1 - \frac{u_\gamma^2}{2(n-1)} \right] + \frac{u_R^2}{2(n-1)}}}{u_\gamma / [2(n-1)] - 1} \tag{10}$$

其中: u_γ 和 u_R 为对应于置信度 γ 和可靠度 R 的标准正态偏量。

由于式(7)和式(8)可以看到, 子样方差 $\hat{\sigma}^2$ 的自由度为 $n - 4$, 而非 $n - 1$; 子样均值的自由度为 $n / [1 + n(P - \bar{P})^T L_{pp}^{-1} (P - \bar{P})]$, 也不是 n , 所以(9)式采用一维单侧容限系数是错误的, 它将导致持久强度预测值偏大, 并使置信度得不到保证。正确的做法是采用二维单侧容限系数, 即置信度至少为 γ 可靠度为 R 的持久强度由下式给出:

$$\lg \sigma_{Y,R} = \hat{a} + \hat{B}^T P - K'_{Y,R} \cdot \hat{\sigma} \tag{11}$$

式中二维单侧容限系数 $K'_{Y,R}$ 由下式计算^[3]:

$$K'_{Y,R} = \frac{-u_R + u_\gamma \sqrt{\frac{1}{n_e(P)} \left[1 - \frac{u_\gamma^2}{w} \right] + \frac{u_R^2}{w}}}{\left[1 - \frac{u_\gamma^2}{w} \right] \sqrt{\frac{2\nu - 2}{2\nu - 1}}} \tag{12}$$

$$w = 2 \left[\nu + u_\gamma - 0.64 - \frac{1}{\sqrt{\nu + u_\gamma - 0.64}} \right] \tag{13}$$

$$n_e(P) = \frac{n}{1 + n(P - \bar{P})^T L_{pp}^{-1} (P - \bar{P})} \tag{14}$$

其中: $n_e(P)$ 被定义为回归函数 $\hat{y}$ 的自由度, $\nu = n - 4$ 为 $\hat{\sigma}^2$ 的自由度。二维单侧容限系数公式(12)可以通过非中心 t 分布得到证明(略)。

3 实例分析

文献[5]对 12Gr1MoV 钢(热处理: 1000℃正

表 1 12Gr1MoV 钢持久强度试验数据

温度/℃	应力/MPa	断裂时间/h
660	127	11
	108	93
	78	119
	68	430
	49	1097
	25	4397
620	157	47.5
	127	168
	98	1151
	69	5064
600	186	36 58
	168	45 56 161 65
	157	99 104 435
	147	285 514 746
	137	244 1143 710
	118	1166
540	245	42
	235	781
	226	176
	216	1384
	206	1943
	196	6869
	177	8748
500	343	366 122
	309	709
	294	701
	275	1668
	265	6061
	255	4516
	245	1443 2040

表 2 12Cr1MoV 钢 580℃持久强度成组试验数据

应力/MPa	216	196	186	172	162	152	142	132	123
断裂时间 (h)	53.5	92.5	67.2	326	322	298	917	3414	2125
	239.2	99.8	76.8	372	380	955	952	3441	4058
	12.5	15.0	150.5	651	482	1134	1607	4257	5646
	43.5	187.6	110.5	639	1136	712	811	909	8136
	35.34	12.0	283.1	328	703	2487	746	4121	7677
	68.3		83.0	308	481	480	802	7420	
	17.3	164.8	220.8	372	307	1033	1300	3422	
		87.2	105.4	230	428	589	835	2289	
		60.5	151.3	490	341	1522	932	618	
		28.8		634	337		1024	4472	
				251	688			2982	

火 1 h, 720℃回火 3 h) 进行了的 5 种温度下的持久强度试验和 580℃下的成组试验, 试验数据分别列于表 1 和表 2。

采用现行方法和本文方法分别对表 1 中持久强度试验数据进行处理, 得到置信度为 95%、可靠度为 99.87%的持久方程(即- 3σ基值持久曲线方程)。

现行方法

$$\lg \sigma_{-3\sigma} = 31.8138 - 371.574p + 1598.48p^2 - 2360.03p^3 \tag{15}$$

本文方法

$$\lg \sigma_{-3\sigma} = 31.7384 - 371.563p + 1598.43p^2 - 2359.96p^3 \tag{16}$$

其曲线如图 1 所示, 上面那条是中值持久曲线, 中间那条是现行方法得到的- 3σ基值持久曲线, 下面那条是本文方法得到的- 3σ基值持久曲线。

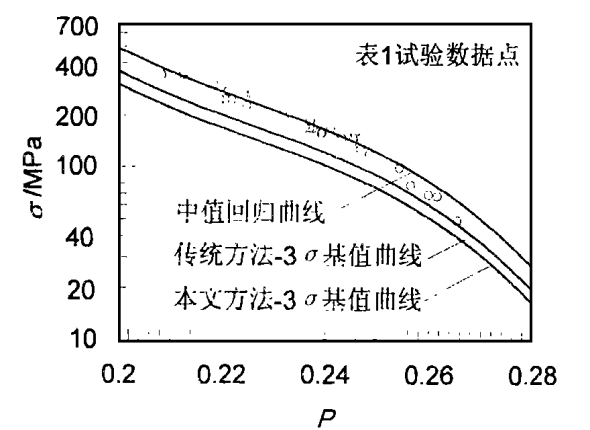


图 1 12Cr1MoV 钢热强参数综合曲线(L - M)

为了进行验证, 在 580℃下对同一材料又进行了 82 个试件的成组试验, 试验结果列于表 2

中, 并在图 1 的基础上标出了这些成组试验数据点, 如图 2 所示。从图 2 可以看到已经有 3 个数据点落到了现行方法得到的- 3σ基值持久曲线的下面。

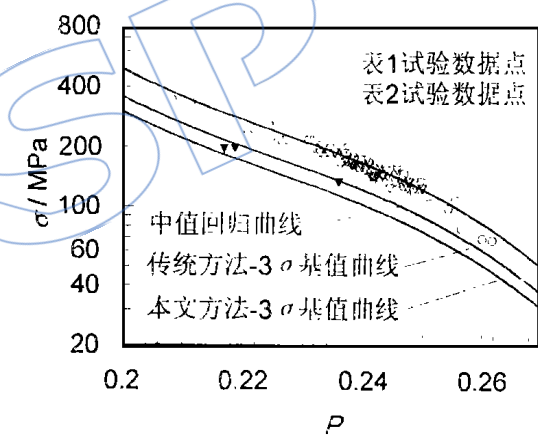


图 2 12Cr1MoV 钢热强参数综合曲线(L - M)

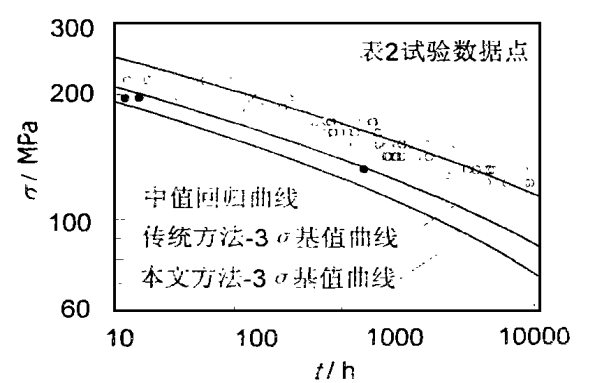


图 3 12Cr1MoV 钢的持久应力—寿命曲线(580℃)

为了更直观地说明这一点, 根据式 (15) 和 (16) 绘出了 12Cr1MoV 钢在 580℃下的持久应力—寿命曲线, 如图 3 所示。在该温度下共有 82 个试验数据点, 其中就有 3 个试验数据点落在了现

行方法得到的 -3σ 基值曲线的下面,即可靠度还不到 96.5%。而按照 -3σ 基值曲线的定义,可靠度应达到 99.87%,也就是说 1000 个试验数据点里面最多只允许有一个数据点落在这条曲线的下面。所以现行方法得到的 -3σ 基值曲线远远不能满足预定可靠度的要求。也就是说,采用现行方法确定出的 -3σ 基值曲线偏高,工程应用偏于危险。

同时,从图 1~图 3 中还可以看到,按本文方法确定出的 -3σ 基值曲线能包含所有的试验数据点,满足了置信度和可靠度的要求。大量的 Monte Carlo 模拟也证明了这一点。

4 结 论

(1) 本文发现了根据现行方法得到的 -3σ 基值蠕变持久方程达不到预定的 99.87%的可靠度要求,导致设计许用值偏高,工程应用偏于危险,从而造成高温机械设备的失效。文中给出了一个实例,从中可以看到,现行方法确定的 -3σ 基值持久曲线达不到预定 99.87%的可靠度要求。

(2) 通过理论上的严格推导,建立了能够满足

高置信度、高可靠度要求的新的蠕变持久可靠性方程。

(3) 通过大量的 Monte Carlo 模拟和试验验证,证明了新的蠕变持久可靠性方程的正确性。根据它确定的 -3σ 基值蠕变持久曲线可以很好地达到 99.87%的可靠度要求。

参 考 文 献

- 1 GJB/218-19 金属材料力学性能数据表达准则(中华人民共和国国家军用标准)[S]. 北京:国防科工委军标发行部出版社, 1991
- 2 北京航空材料研究所 航空发动机设计用材料数据手册(第二册)[S]. 北京:国防工业出版社, 1993
- 3 傅惠民 二维单侧容限系数方法[J]. 航空学报, 1993; 14(3): A 166- 172
- 4 傅惠民 百分回归分析[J]. 航空学报, 1994; 15(2): 141- 144
- 5 机械工程材料性能数据手册编委会 机械工程材料性能数据手册[S]. 北京:机械工业出版社, 1994
- 6 Jaske C E. Life Prediction in High Temperature Structural Materials[J]. Fatigue and Fracture of Aerospace Structural Materials, 1993, 36(2): 133- 141

(责任编辑 王震华)

A New Stress-Rupture Equation with High Reliability and Confidence

Zhang Shaobo, Fu Huimin

(5th Dept Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: The stress-rupture equation with high reliability is an important basis in the design of the mechanism working in high temperature environment. But the stress-rupture equations with high reliability and confidence obtained by using the traditional method can not satisfy the specified reliability and confidence. So the creep rupture strength and creep life predicted is overestimated. Therefore, a new stress-rupture equation with high reliability and confidence is derived, which overcomes the shortcomings in the current method. This equation can accurately predicted the creep rupture strength and creep life with high reliability and confidence.

Key words: creep; stress-rupture; reliability