

文章编号: 1000 8055(2008)11-2007-09

多轴高周疲劳失效准则的对比分析

时新红, 鲍蕊, 张建宇, 费斌军
(北京航空航天大学 固体力学研究所, 北京 100191)

摘 要: 采用多种材料、多种加载方式的数据对多轴高周疲劳中比较常用的 6 个失效准则进行了对比分析。选取的准则涵盖目前研究的各个方面, 包括等效应力准则、应力不变量准则和临界面应力准则; 选用的数据包括合金钢、低碳钢、铝合金和铸铁等 10 种金属材料; 加载方式包括比例加载和非比例加载; 对比方式包括对同种材料不同准则之间的横向比较和同一准则对不同材料的纵向比较。对比分析的结果表明, 6 种准则对于低碳钢及合金钢材料的预测结果优于其它材料; 比例加载的预测结果优于非比例加载; 预测结果较满意的是 Papadopoulos 准则、Susmel 准则和 Liu 准则。此外, 6 种准则对于铸铁的预测结果均不理想。

关 键 词: 压气机叶片; 多轴疲劳; 高周疲劳; 等效应力准则; 应力不变量准则; 临界面应力准则

中图分类号: O346.2

文献标识码: A

Comparative study of multiaxial high cycle fatigue prediction criteria

SHI Xin hong, BAO Rui, ZHANG Jianyu, FEI Bin jun

(Institute of Solid Mechanics,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Six common fatigue prediction criteria for multiaxial high cycle fatigue analysis were analyzed with several materials and loading data. The selected criteria cover: equivalent stress criteria, stress invariant criteria and critical plane stress criteria in current investigations. The experimental data covered 10 kinds of metal materials, including alloy steel, low-carbon steel and aluminum alloy and cast iron, under proportional and nonproportional loading conditions respectively. The analytical results show that, the predicted results for low-carbon steel and alloy steel are better than that for other materials, and the predicted result for proportional loading is better than that for nonproportional loading. Papadopoulos criterion, Susmel criterion and Liu criterion show better prediction capability than the other three criteria. However, the prediction results of all six criteria for cast iron materials are dissatisfactory.

Key words: compressor blade; multiaxial fatigue; high cycle fatigue; equivalent stress criteria; stress invariant criteria; critical plane stress criteria

航空航天、核电站、化工及车辆运输等领域的许多零部件承受着多轴循环载荷。例如航空发动机的叶片及涡轮盘结构, 由于其部件结构形状及

工作环境的影响, 均是在复杂多轴应力状态下工作, 其失效多为多轴疲劳失效。尤其对于航空发动机的压气机叶片, 由于形状复杂(扭曲和变厚度)

收稿日期: 2007-10-24; 修订日期: 2008-01-07

作者简介: 时新红(1981-), 女, 山东德州人, 博士, 研究方向为结构疲劳可靠性。

且在工作时受到很大的离心力、气动力等作用,叶片的振动又多为弯扭复合振动,因此叶片中的应力-应变状态处于三维弹性状态,其振动疲劳寿命属于多轴高周疲劳研究范畴^[1].

多轴高周疲劳自研究以来,出现许多关于疲劳强度预测的方法即多轴高周疲劳失效准则,经过后人的论证,这些准则或被否定,或被完善.迄今为止,尚没有一种对各种材料、各种载荷普遍适用的多轴高周疲劳失效准则^[2].基于此,本文筛选出6个近年来比较常用的准则进行分析对比.通常来说,多轴高周疲劳失效准则分为等效应力准则、应力不变量准则、临界面应力准则三类.等效应力准则在静强度理论的基础上根据试验数据得出,缺乏合理的物理背景;但由于其形式简单,工程应用较广,本文选取 Gough 准则^[3]的 Lee 修正式^[4].应力不变量准则虽然计算方便,然而从失效机理出发,其对于多轴疲劳失效的有效性是有待验证的^[5],本文选取 Crossland 准则^[6].从疲劳裂纹形成的机理看,临界面应力准则更有效性,但是临界面的确定比较复杂,本文选取 Mediarimid 准则^[7].

近几年多轴高周疲劳失效准则的研究趋向于将等效应力准则与临界面应力准则结合,或者将应力不变量准则与临界面准则结合,避短取长,如 Carpinteri 准则^[8]、Papadopoulos 准则^[9]等.

1 6个多轴高周疲劳失效准则

1) Gough 准则的 Lee 修正式^[4]

$$(\sigma_a/b)^{\alpha} + (\tau_a/t)^{\alpha} \leq 1 \quad (1)$$

其中 $\alpha = 2/(1 + \beta \sin \varphi)$, σ_a , τ_a 分别为弯曲正应力幅和扭转应力幅, b 是指定寿命 N 下的弯曲疲劳极限, t 是指定寿命 N 下的剪切疲劳极限, φ 为非比例加载时弯曲和扭转的相位差, β 为材料常数.

该准则在比例加载与非比例加载下均适用,比例加载条件下, Lee 修正式即 Gough 准则.

2) Crossland 准则^[6]

$$\sqrt{J_{2,a}} + K(\sigma_{H,m} + \sigma_{H,a}) \leq \lambda \quad (2)$$

其中 $K = 3(t_1/f_{-1} - 1/\sqrt{3})$, $\lambda = t_1$, $J_{2,a}$ 为应力偏量第二不变量的幅值, $\sigma_{H,a}$, $\sigma_{H,m}$ 分别为第一应力不变量的幅值和均值, t_1 , f_{-1} 分别为材料在对称扭转和弯曲时的疲劳强度.

该准则适于 $f_{-1}/t_1 \leq \sqrt{3}$ 的金属材料.

3) Mediarimid 准则^[7]

$$\tau_a/t_{A(B)} + \sigma_{n,max}/(2\alpha) \leq 1 \quad (3)$$

式中 τ_a , $\sigma_{n,max}$ 为临界面上的剪切应力幅和最大正应力, $t_{A(B)}$ 分别为出现拉伸(剪切)破坏时的剪切疲劳强度, σ_f 为材料在拉伸时的疲劳强度.

通过对 EN24T 钢的管状试件进行弯扭实验表明,该准则在比例和非比例两种情况下都适用,但有效范围为 $0.5t \leq \tau_a \leq t$, $0 \leq \sigma_{n,max} \leq \alpha$.

4) Papadopoulos 准则^[9]

$$(T_a)_{max} + \alpha(\sigma_{H,m} + \sigma_{H,a}) \leq \gamma \quad (4)$$

其中 $(T_a)_{max} = \sqrt{\frac{\sigma_a^2}{3} + \tau_a^2}$, $\alpha = 3\left[\frac{t_1}{f_{-1}} - \frac{1}{\sqrt{3}}\right]$, $\gamma = t_1$,

σ_a , τ_a 分别为弯曲正应力幅和扭转应力幅, $\sigma_{H,a}$, $\sigma_{H,m}$ 分别为第一应力不变量的幅值和均值, t_1 , f_{-1} 分别为材料在对称扭转和弯曲的疲劳强度.

该准则适于 $f_{-1}/t_1 \leq \sqrt{3}$ 的金属材料.

5) Susmel 准则^[10]

$$\tau_a^* + \left[\tau_1 - \frac{\alpha_1}{2} \right] \frac{\sigma_{n,max}^*}{\tau_a^*} \leq \tau_1 \quad (5)$$

式中 τ_a^* 为最大剪应力平面上的剪切应力幅, $\sigma_{n,max}^*$ 为临界面上的最大正应力, τ_1 为扭转疲劳极限, α_1 为拉伸疲劳极限.

该准则在比例加载与非比例加载下均适用.

6) Liu 准则^[11]

$$\left[\frac{\sigma_{a,c}}{f_{-1}} \right]^2 + \left[\frac{\tau_{a,c}}{t_1} \right]^2 + k \left[\frac{I}{f_{-1}} \right]^2 \leq 1 \quad (6)$$

其中 $k = 9/4[3 - (t_1/f_{-1})^2]$, $\sigma_{a,c}$, $\tau_{a,c}$, I 分别为临界面上的正应力幅、剪应力幅、静水应力幅, t_1 , f_{-1} 分别为材料在对称扭转和弯曲的疲劳强度.

该准则适于 $f_{-1}/t_1 \leq \sqrt{3}$ 的金属材料.

2 6个失效准则的对比分析

为了使各准则具有可比性,将各准则的表达式变形,同时引入一个损伤变量 T ,于是各准则的表达式(1)~(6)分别变为

$$(\sigma_a/b)^{\alpha} + (\tau_a/t)^{\alpha} = T \quad (7)$$

$$\sqrt{J_{2,a}}/\lambda + K(\sigma_{H,m} + \sigma_{H,a})/\lambda = T \quad (8)$$

$$\tau_a/t_{A(B)} + \sigma_{n,max}/(2\sigma_f) = T \quad (9)$$

$$(T_a)_{max}/\gamma + \alpha(\sigma_{H,m} + \sigma_{H,a})/\gamma = T \quad (10)$$

$$\frac{\tau_a^*}{\tau_1} + \left[\tau_1 - \frac{\alpha_1}{2} \right] \frac{\sigma_{n,max}^*}{\tau_a^* \tau_1} = T \quad (11)$$

$$\left[\frac{\sigma_{a,c}}{f_{-1}} \right]^2 + \left[\frac{\tau_{a,c}}{t_1} \right]^2 + k \left[\frac{I}{f_{-1}} \right]^2 = T \quad (12)$$

各准则的计算误差 I 定义为

$$I = \frac{T-1}{1} \times 100\% \quad (13)$$

I 是各失效准则准确度的一个度量. I 越接近零则表示该准则越准确; I 大于零, 则表示与试验结果相比, 该准则的预测结果偏于保守; I 小于零, 则表示该准则的预测结果偏于危险^[12].

取 10 种材料的试验数据对以上 6 种失效准则进行对比, 其中 10 种材料的基本力学性能参数及试验数据来源见表 1.

对于 10 种材料, 6 种准则的预测结果见表 2~表 11.

表 2~ 表 5 为比例加载下各种材料的试验数据对比分析结果. 分析表明, 对于低碳钢材料 0.1% C 钢, 由于其延性较大, Crossland 准则、Papadopoulos 准则和 Liu 准则不适用; 其余准则的预测偏差均在 9% 以内. 对于合金钢材料 3.5% NiCr

表 1 材料的力学性能
Table 1 Mechanical property of materials

材料		力学性能参数/ MPa			数据来源
		f_{-1}	t_{-1}	σ_f	
1	0.1% C 钢	239.9	135.1	379.2	Gough and Pollard ^[3]
2	3.5% NiCr	482.6	314.4	799.8	
3	Silal 铸铁	215.1	195.8	205.5	
4	76S T61	170.3	109.6	499.9	Findley ^[13]
5	0.51% C 钢	313.9	196.2	680	Nishihara and Kawamoto ^[14]
6	0.15% C 钢	235.4	137.3	518.8	
7	3.87% 铸铁	96.1	91.2	230	Papadopoulos et al. ^[9]
8	42CrMo4	398	260	1025	
9	34Cr4	410	256	795	Froustey and Lasserre ^[15]
10	30NCD16	660	410	1880	

表 2 比例加载下 0.1% C 钢的试验数据及计算误差
Table 2 Comparison of criteria for 0.1% C steel under proportional loading

试验数据						计算误差 $I/\%$					
n	σ_a/MPa	σ_m/MPa	τ_a/MPa	τ_m/MPa	$\phi/^\circ$	Lee	Crossland	Mediarimid	Papadopoulos	Susmel	Liu
1	239.9	0	0	0	0	0.00	(0.00)	4.60	(0.00)	0.00	(0.00)
2	234.4	0	31.7	0	0	0.97	(0.42)	5.32	(0.42)	0.69	(0.49)
3	216.5	0	62.1	0	0	2.57	(1.04)	6.65	(1.04)	2.10	(1.28)
4	183.4	0	92.4	0	0	5.22	(2.09)	8.45	(2.09)	4.26	(2.58)
5	131	0	113.1	0	0	- 0.10	(- 0.67)	5.38	(- 0.67)	2.36	(- 0.05)
6	70.3	0	131	0	0	2.61	(0.77)	5.03	(0.77)	3.30	(1.30)
7	0	0	135.1	0	0	0.00	(0.00)	0.00	(0.00)	0.00	(0.00)

注 () 表示超出该准则的适用范围

表 3 比例加载下 3.5% NiCr 钢的试验数据及计算误差
Table 3 Comparison of criteria for 3.5% NiCr steel under proportional loading

试验数据						计算误差 $I/\%$					
n	σ_a/MPa	σ_m/MPa	τ_a/MPa	τ_m/MPa	$\phi/^\circ$	Lee	Crossland	Mediarimid	Papadopoulos	Susmel	Liu
8	482.6	0	0	0	0	0.00	0.00	- 8.17	0.00	0.00	0.00
9	481.3	0	63.4	0	0	3.53	2.00	- 5.80	2.00	1.64	1.75
10	438.5	0	126.9	0	0	- 1.15	0.41	- 5.72	0.41	0.70	- 0.58
11	366.8	0	183.4	0	0	- 8.20	- 2.25	- 6.04	- 2.25	- 1.06	- 4.19
12	293.7	0	253.7	0	0	2.15	3.98	2.42	3.98	4.88	1.07
13	160	0	297.9	0	0	0.77	2.97	3.11	2.97	4.14	0.38
14	0	0	314.4	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

表 4 比例加载下 Silal 铸铁的试验数据及计算误差
Table 4 Comparison of criteria for Silal cast iron under proportional loading

试验数据						计算误差 $I / \%$					
n	σ_a / MPa	σ_m / MPa	τ_a / MPa	τ_m / MPa	$\phi / (^\circ)$	Lee	Crossland	Mediarmid	Papadopoulos	Susmel	Liu
15	215.1	0	0	0	0	0.00	0.00	- 18.90	0.00	0.00	0.00
16	209.6	0	27.6	0	0	- 3.06	- 0.97	- 19.15	- 0.97	- 1.07	- 1.54
17	187.5	0	53.8	0	0	- 16.47	- 6.38	- 21.99	- 6.38	- 5.70	- 8.60
18	173.7	0	86.9	0	0	- 15.09	- 2.69	- 16.12	- 2.69	- 5.39	- 7.85
19	136.5	0	118.6	0	0	- 23.04	- 4.07	- 13.51	- 4.07	- 7.63	- 12.27
20	80	0	148.9	0	0	- 28.34	- 6.78	- 11.52	- 6.78	- 9.56	- 15.35
21	0	0	195.8	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

钢,各种准则的预测偏差也在 9% 以内. 对于 Silal 铸铁,各种准则的预测结果均小于零,且预测偏差较大,最大偏差高达 29%,明显大于前两种材料,这说明对于该铸铁材料,6 种准则的预测结果均过于危险,即 6 种准则不适用于这种材料的多轴

疲劳强度预测. 由 0. 1% C 钢与 3. 5% NiCr 钢属于塑性材料,而 Silal 铸铁属于脆性材料,可见比例加载中,6 种准则对于脆性材料不适用. 对于铝合金材料 76S- T61,由于存在平均应力的影响,6 种准则的预测偏差较无平均应力时偏大.

表 5 比例加载下 76S T61 的试验数据及计算误差
Table 5 Comparison of criteria for 76S T61 aluminium under proportional loading

试验数据						计算误差 $I / \%$					
n	σ_a / MPa	σ_m / MPa	τ_a / MPa	τ_m / MPa	$\phi / (^\circ)$	Lee	Crossland	Mediarmid	Papadopoulos	Susmel	Liu
22	170.3	0	0	0	0	0.00	0.00	- 13.79	0.00	0.00	0.00
23	157.9	82.7	0	0	0	- 14.03	- 2.28	- 15.93	- 2.28	6.03	6.95
24	143.4	206.8	0	0	0	- 29.10	- 3.30	- 17.07	- 3.30	19.90	26.05
25	161.3	0	33.4	0	0	- 1.00	0.01	- 12.29	0.01	0.26	- 0.50
26	124.8	0	62.4	0	0	- 13.88	- 5.49	- 13.24	- 5.49	- 3.71	- 7.20
27	102.7	0	75.2	0	0	- 16.56	- 6.42	- 11.78	- 6.42	- 4.34	- 8.65
28	79.4	0	95.8	0	0	- 1.86	1.70	- 1.41	1.70	3.16	- 0.93
29	124.1	82.7	62.1	41.4	0	- 14.79	- 0.99	- 9.56	- 0.99	6.37	4.31
30	115.1	206.8	57.6	103.4	0	- 26.70	- 0.31	- 9.61	- 0.31	18.39	22.96
31	0	0	109.6	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

表 6~ 表 11 为非比例加载下各种材料的试验数据的对比分析结果. 分析表明,对于中碳钢材料 0. 51% C 钢和低碳钢材料 0. 15% C 钢,各种准则的预测偏差均在 15% 以内. 对于 3. 87% C 铸铁,各种准则的预测偏差较大,最高可达 37%,明显大于前两种材料. 也就是说,非比例加载中,6

种准则也不适用于该材料疲劳强度的预测. 由 0. 51% C 钢与 0. 15% C 钢属于塑性材料,而 3. 87% C 铸铁属于脆性材料,可见非比例加载中,6 种准则对于脆性材料也不适用. 此外,综合各种材料的预测结果可以发现,与比例加载相比,非比例加载的预测偏差较大,其原因主要是相位差的

存在使主应力轴的方向不断改变, 从而影响材料的疲劳强度. 对于合金钢材料 42CrMo4 钢、34Cr4

钢和 30NCD16 钢, 由于存在平均应力的影响, 6 种准则的预测偏差较无平均应力的结果偏大.

表 6 非比例加载下 0.51%C 钢的试验数据及计算误差

Table 6 Comparison of criteria for 0.51%C steel under non proportional loading

试验数据						计算误差 $I / \%$					
n	σ_a / MPa	σ_m / MPa	τ_a / MPa	τ_m / MPa	$\phi / (^\circ)$	Lee	Crossland	Mediarimid	Papadopoulos	Susmel	Liu
32	0	0	196.2	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
33	138.1	0	166.8	0	0	- 8.37	- 2.41	- 3.08	- 2.41	- 0.34	- 4.28
34	245.3	0	122.6	0	0	0.11	1.44	- 2.90	1.44	2.54	0.06
35	299.1	0	61.9	0	0	0.75	0.77	- 6.89	0.77	0.98	0.37
36	313.9	0	0	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
37	140.4	0	169.5	0	30	- 9.25	- 2.73	- 1.51	- 0.83	1.16	- 2.72
38	249.7	0	124.9	0	30	- 0.99	0.05	- 1.12	3.29	4.15	1.88
39	145.7	0	176.7	0	60	- 3.42	- 3.41	2.59	3.29	5.04	1.32
40	252.4	0	126.3	0	60	- 1.95	- 8.32	- 0.04	4.42	5.14	3.00
41	150.2	0	181.3	0	90	1.74	- 3.94	5.35	6.08	7.68	4.06
42	258.0	0	129.0	0	90	1.81	- 17.81	2.14	6.70	7.13	5.25
43	304.5	0	63.1	0	90	0.61	- 2.99	- 5.19	2.60	2.48	2.20

表 7 非比例加载下 0.15%C 钢的试验数据及计算误差

Table 7 Comparison of criteria for 0.15%C steel under non proportional loading

试验数据						计算误差 $I / \%$					
n	σ_a / MPa	σ_m / MPa	τ_a / MPa	τ_m / MPa	$\phi / (^\circ)$	Lee	Crossland	Mediarimid	Papadopoulos	Susmel	Liu
44	0	0	137.3	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
45	99.9	0	120.6	0	0	- 4.84	- 2.20	- 0.11	- 2.20	0.54	- 2.45
46	180.3	0	90.2	0	0	1.82	1.10	1.57	1.10	2.97	0.91
47	223	0	46.2	0	0	1.06	0.59	- 1.35	0.59	1.09	0.53
48	235.4	0	0	0	0	0.00	0.00	- 2.93	0.00	0.00	0.00
49	103.6	0	125.1	0	60	- 8.26	- 5.39	3.61	1.44	4.08	1.19
50	191.4	0	95.8	0	60	- 0.25	- 6.47	7.85	7.34	8.71	7.14
51	108.9	0	131.5	0	90	2.86	- 3.76	8.91	6.63	9.12	6.36
52	201.1	0	100.6	0	90	10.95	- 14.57	13.28	12.76	13.69	12.55
53	230.2	0	47.7	0	90	0.76	- 2.21	1.84	3.84	3.93	3.78

表 8 非比例加载下 3.87%C 铸铁的试验数据及计算误差

Table 8 Comparison of criteria for 3.87% C cast iron under non proportional loading

试验数据						计算误差 $I/\%$					
n	σ_a/MPa	σ_m/MPa	τ_a/MPa	τ_m/MPa	$\phi/^\circ$	Lee	Crossland	Mediarmid	Papadopoulos	Susmel	Liu
54	0	0	91.2	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
55	52.6	0	63.5	0	0	-1.41	-1.38	-18.92	-1.38	-6.53	-11.43
56	79.8	0	39.8	0	0	4.50	-0.72	-29.53	-0.72	-4.71	-6.19
57	90.6	0	18.7	0	0	0.82	-2.17	-36.42	-2.17	-2.53	-3.52
58	96.1	0	0	0	0	0.00	0.00	-36.87	0.00	0.00	0.00
59	63.8	0	77	0	60	0.41	13.26	-1.68	19.59	9.50	7.41
60	90.3	0	45.1	0	60	2.11	2.59	-20.21	12.39	3.45	6.18
61	67.6	0	81.6	0	90	12.74	17.02	4.19	26.73	14.95	13.81
62	93.7	0	46.8	0	90	9.91	-2.50	-17.20	16.62	6.08	10.18
63	95.2	0	19.7	0	90	-0.91	-0.94	-33.17	2.82	0.20	1.39

表 9 非比例加载下 42CrMo4 的试验数据及计算误差

Table 9 Comparison of criteria for 42CrMo4 steel under non- proportional loading

试验数据						计算误差 $I/\%$					
n	σ_a/MPa	σ_m/MPa	τ_a/MPa	τ_m/MPa	$\phi/^\circ$	Lee	Crossland	Mediarmid	Papadopoulos	Susmel	Liu
64	328	0	157	0	0	4.38	4.19	-4.68	4.19	4.27	2.17
65	286	0	137	0	90	-5.47	-28.14	-16.86	-9.13	-6.89	-10.89
66	233	0	224	0	0	8.50	7.30	2.79	7.30	7.93	4.16
67	213	0	205	0	90	4.89	-14.93	-5.95	-1.84	-0.33	-4.71
68	266	0	128	128	0	-31.10	-15.34	-22.52	-15.34	-12.10	-16.99
69	283	0	136	136	90	-6.88	-28.89	-17.61	-9.97	-7.60	-11.73
70	333	0	160	160	180	-2.35	5.93	-3.06	5.93	5.73	3.86
71	280	280	134	0	0	-23.94	-2.89	-11.81	-2.89	8.43	6.38
72	271	271	130	0	90	-13.23	-24.00	-14.56	-5.94	6.08	3.02

表 10 非比例加载下 34Cr4 的试验数据及计算误差

Table 10 Comparison of criteria for 34Cr4 steel under non proportional loading

试验数据						计算误差 $I/\%$					
n	σ_a/MPa	σ_m/MPa	τ_a/MPa	τ_m/MPa	$\phi/^\circ$	Lee	Crossland	Mediarmid	Papadopoulos	Susmel	Liu
73	314	0	157	0	0	-3.74	-0.55	-3.39	-0.55	0.82	-1.89
74	315	0	158	0	60	-2.88	-12.32	-2.95	-0.11	1.21	-1.45
75	316	0	158	0	90	-2.51	-22.93	-2.78	0.08	1.37	-1.26
76	315	0	158	0	120	-2.88	-12.32	-2.95	-0.11	1.21	-1.45
77	224	0	224	0	90	6.41	-8.38	4.87	5.15	6.74	3.16
78	380	0	95	0	90	-0.33	-7.32	-5.07	0.37	0.80	-0.16
79	316	0	158	158	0	-2.51	0.08	-2.78	0.08	1.37	-1.26
80	314	0	157	157	60	-3.74	-12.69	-3.39	-0.55	0.82	-1.89
81	315	0	158	158	90	-2.88	-23.17	-2.95	-0.11	1.21	-1.45
82	279	279	140	0	0	-23.79	-6.38	-5.25	-6.38	5.33	5.33
83	284	284	142	0	90	-21.25	-25.51	-3.69	-4.83	6.62	7.11
84	355	0	89	178	0	-12.94	-6.19	-11.27	-6.19	-4.63	-6.70
85	212	212	212	0	90	-4.68	-9.40	5.92	3.41	10.41	7.41
86	129	0	258	0	90	11.47	3.15	7.94	7.27	8.71	5.58

表 11 非比例加载下 30NCD16 的试验数据及计算误差

Table 11 Comparison of criteria for 30NCD steel under non proportional loading

试验数据						计算误差 $I/\%$					
n	σ_a/MPa	σ_m/MPa	τ_a/MPa	τ_m/MPa	$\phi/(^{\circ})$	Lee	Crossland	Mcdiarmid	Papadopoulos	Susmel	Liu
87	485	0	280	0	0	0.64	1.77	- 3.21	1.77	3.12	0.32
88	480	0	277	0	90	- 1.46	- 27.27	- 4.22	0.70	2.17	- 0.73
89	0	300	395	0	0	- 7.18	- 0.45	0.33	- 0.45	3.75	- 1.01
90	480	300	277	0	0	- 1.46	3.91	- 0.24	3.91	10.16	9.65
91	480	300	277	0	45	- 1.46	- 3.36	- 0.24	3.91	10.16	9.65
92	470	300	271	0	60	- 5.60	- 10.76	- 2.27	1.77	8.43	7.59
93	473	300	273	0	90	- 4.30	- 25.12	- 1.62	2.45	8.98	8.24

6 种准则纵向对比分析如图 1~ 图 6 所示.

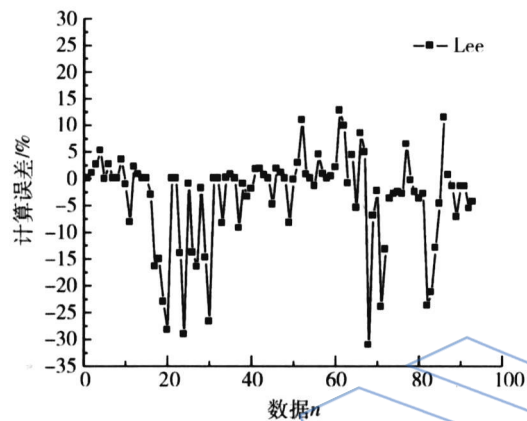


图 1 Lee 准则预测结果的图形表示

Fig. 1 Prediction results of Lee criteria

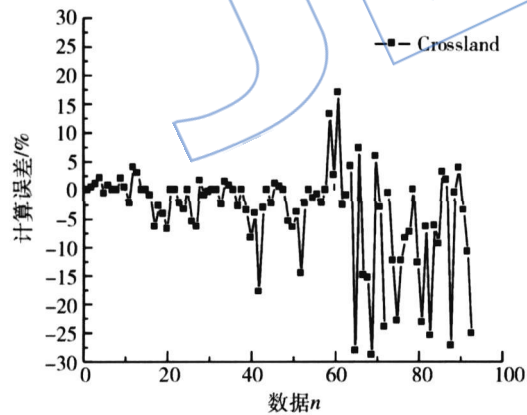


图 2 Crossland 准则预测结果的图形表示

Fig. 2 Prediction results of Crossland criteria

对于 Lee 准则, 无论是比例加载还是非比例加载, 其不存在平均应力的预测结果均在 11% 以内, 而对于存在平均应力的预测偏差较大, 最高可达 32%. 这说明 Lee 准则并不适用于存在平均应力的加载方式, 原因在于该准则对于多轴疲劳强度的预测缺乏合理的物理解释. 此外, Lee 准则中

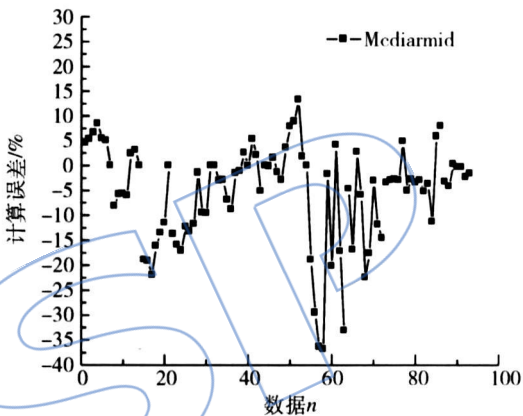


图 3 Mcdiarmid 准则预测结果的图形表示

Fig. 3 Prediction results of Mcdiarmid criteria

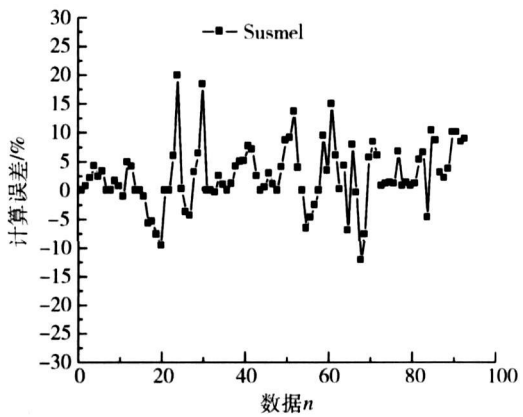


图 4 Susmel 准则预测结果的图形表示

Fig. 4 Prediction results of Susmel criteria

存在经验常数 β , 其值的确定影响着强度预测的结果.

对于 Crossland 准则, 无论有无平均应力的影响, 其在比例加载下的预测结果均在 7% 以内, 而在非比例加载下的预测偏差较大, 最高可达 29%. 这说明 Crossland 准则并不适用于非比例加载. 此外, Crossland 准则中所用应力不变量对

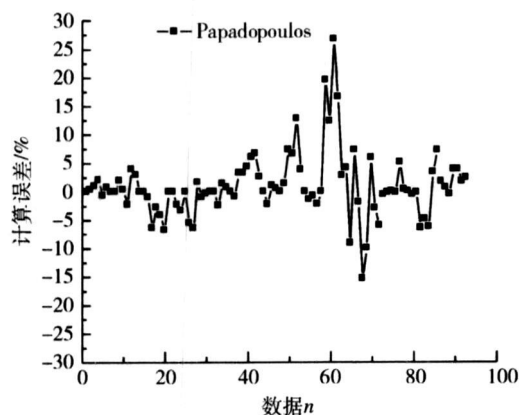


图5 Papadopoulos 准则预测结果的图形表示

Fig. 5 Prediction results of Papadopoulos criteria

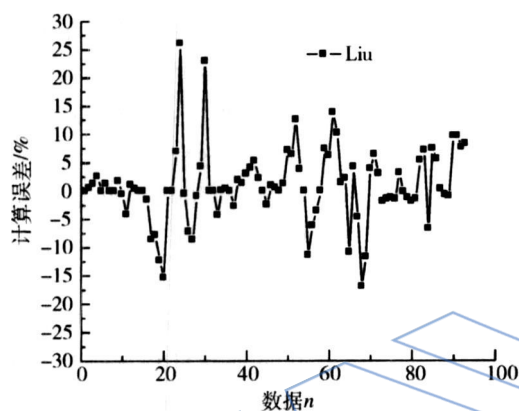


图6 Liu 准则预测结果的图形表示

Fig. 6 Prediction results of Liu criteria

于疲劳失效的意义是有待验证的。

对于 Mcdiarmid 准则, 其预测偏差或过于危险, 或过于保守。无论对哪种材料, 其余准则的预测结果均优于此准则, 因此在强度预测时该准则是不优先推荐的。究其原因, 可能是对于临界面准则中两种失效形式的破坏由同一个公式进行预测引起的。

对于 Susmel 准则, 综合各种材料、各种加载方式来看, 该准则的预测偏差大都在 15% 以内, 是多轴疲劳强度预测时比较推荐使用的准则。但总体说来, 其预测结果略偏于保守。此外, Susmel 准则未考虑相位差的量化影响。

对于 Papadopoulos 准则, 在比例加载下其预测结果与 Crossland 准则完全相同, 但在非比例加载下, 其预测结果却优于 Crossland 准则很多, 其预测结果大部分集中在 10% 左右。但对于某些低碳钢材料该准则并不适用。

对于 Liu 准则, 同 Susmel 准则一样, 对于各种材料、各种加载方式其预测结果大部分集中在

15% 左右。但其对于某些低碳钢材料, 该准则也不适用。

3 结 论

综合以上分析, 可以得出如下结论: ①从不同材料的预测结果来看, 6 种准则对于低碳钢及中碳钢材料和合金钢材料的预测结果较好, 但不适用于铸铁材料的强度预测; ②从不同的加载方式来看, 6 种准则对于比例加载的预测结果优于非比例加载; 对于无平均应力的预测结果优于存在平均应力的情况; ③从不同准则的预测结果来看, Papadopoulos 准则、Liu 准则和 Susmel 准则较好。Lee 准则不适用于存在平均应力的情况, Crossland 准则不适用于非比例加载。

同时, 从以上分析中可以看出, 对于多轴疲劳的失效准则研究存在的问题是: ①相位差及平均应力对多轴高周疲劳强度的定量化影响还有待于进一步研究; ②由于多轴疲劳的失效准则研究以试验数据为基础, 其试验数据尚需进一步的积累; ③在非对称加载的情况下, 公式参数仍然使用单轴对称加载下的参数, 其合理性还有待证明; ④建立对各种加载方式普遍适用且具有工程应用价值的多轴疲劳失效准则仍是今后重要的研究方向。

参考文献:

- [1] 张忠平, 孙强. 航空发动机压气机叶片振动疲劳寿命与 α_f 值的关系[J]. 应力力学学报, 2006, 23(3): 459-461.
ZHANG Zhongping, SUN Qiang. Relationship between fatigue life and value for aerost engine compressor blades [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2006, 23(3): 459-461. (in Chinese)
- [2] 陈旭, 安柯, 齐荣. 非比例载荷下 304 不锈钢低周疲劳寿命预测[J]. 机械强度, 2001, 23(3): 316-318.
CHEN Xu, AN Ke, QI Rong. Low cycle fatigue life prediction for 304 stainless steel under nonproportional loadings[J]. Journal of Mechanical Strength, 2001, 23(3): 316-318. (in Chinese)
- [3] Gough H G, Pollard H V. The strength of metals under combined alternating stress[R]. London: Proc Inst Mech Engrs., 1935, 131: F 103.
- [4] Lee S B. A criterion for fully reversed out-of-phase torsion and bending[R]. In Multiaxial Fatigue, ASTM STP 853, 1985: 553-568.
- [5] Socie D F, Marquis G B. Multiaxial fatigue[J]. Society of Automotive Engineers, 2000: 146-150.
- [6] Crossland B. Effect of large hydrostatic pressures on the torsional fatigue strength of an alloy steel[C] // Proceedings of the International Conference on Fatigue of Metals. London: Institution of Mechanical Engineers, 1956:

138-156.

[7]

McDiarmid D L. A general criterion for high cycle multiaxial fatigue failure[J]. Fatigue Fract Engng Mater Struct, 1991, 14(4): 429-453.

[8]

Carpinteri A, Spagnoli A. Multiaxial high cycle fatigue criterion for hard metals[J]. Int. J. Fatigue, 2001, 23: 135-145.

[9]

Papadopoulos I V, Davoli P, Gorla C, et al. A comparative study of multiaxial high cycle fatigue criteria for metals[J]. Int. J. Fatigue, 1997, 19(3): 219-235.

[10]

Lazzarin P, Susmel L. A stress-based method to predict lifetime under multiaxial fatigue loadings[J]. Fatigue Fract Engng Mater Struct, 2003, 26: 1171-1187.

[11]

Liu Y M, Mahadevan S. Multiaxial high cycle fatigue criterion and life prediction for metals[J]. Int. J. Fatigue, 2005, 27: 790-800.

[12]

Ninic D, Stark H L. A multiaxial fatigue damage function[J]. Int. J. Fatigue, 2007, 29: 533-548.

[13]

Findley W N. Combined stress fatigue strength of 76S-T61 aluminum alloy with superimposed mean stress and corrections for yielding[R]. NACA Technical Note 2924, 1953.

[14]

Nishihara T, Kawamoto M. The strength of metals under combined alternating bending and torsion with phase difference[J]. Mem College Engng, Kyoto Imperial Uni. , 1945, 11: 85-112.

[15]

Froustey C, Lasserre S. Multiaxial fatigue endurance of 30NCD steel[J]. Int. J. Fatigue, 1989, 11(3): 169-175.

