

一种新的多轴非比例低周疲劳寿命预测 临界面模型¹⁾

赵而年²⁾ 瞿伟廉

(武汉理工大学道路桥梁与结构工程湖北省重点实验室, 武汉 430070)

摘要 工程结构在服役过程中往往承受着复杂的多轴非比例循环荷载, 在长期动力载荷作用下结构构件的失效主要为多轴非比例疲劳破坏. 文中基于圆管薄壁试件在拉-扭复合加载情况下的多轴疲劳试验结果, 对比了广泛讨论的 Kandil-Brown-Miller (KBM) 模型和 Fatemi-Socie (FS) 模型对多轴非比例疲劳寿命的预测能力, 分析了非比例加载条件引起多轴疲劳附加损伤的原因; 针对 FS 模型对不存在非比例附加强化的材料多轴疲劳寿命预测的不足, 提出了一个能考虑非比例加载路径变化和材料附加强化效应双重作用的非比例影响因子, 参照 FS 准则提出了一种新的多轴非比例低周疲劳寿命预测临界面模型. 利用 5 种材料的多轴非比例疲劳试验数据对该模型进行了试验验证, 结果表明: 采用文中提出的临界面模型预测的多轴非比例疲劳寿命与试验结果符合较好, 预测精度优于 FS 模型; 同时, 该模型对不存在非比例附加强化的材料的多轴疲劳寿命预测表现出更好的适用性, 且能有效的提高不同类型材料的多轴非比例疲劳寿命预测精度.

关键词 多轴疲劳, 非比例路径, 附加强化效应, 临界面法, 寿命预测

中图分类号: TG111.8, O346.2 文献标识码: A doi: 10.6052/0459-1879-15-377

A NEW PROPOSAL FOR MULTIAXIAL LOW-CYCLE FATIGUE LIFE PREDICTION UNDER NON-PROPORTIONAL LOADING¹⁾

Zhao Ernian²⁾ Qu Weilian

(Hubei Key Laboratory of Roadway Bridge & Structure Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract Engineering components are always in multiaxial and non-proportional stress states under complex service loading, and multiaxial fatigue is the primary failure mode during the long term vibration. In the present paper, the accuracy of multiaxial fatigue life estimation by the widely discussed Kandil-Brown-Miller (KBM) and FS model is investigated while the shortcoming of Fatemi-Socie (FS) parameter on fatigue life prediction of materials without additional cycle hardening is pointed out. Considering the dual influence of the additional cycle hardening and the rotation of principal stress/strain axes caused by non-proportional loading on multiaxial fatigue, which results in more fatigue damage, a new non-proportional influence factor is proposed, which is adopted for a modification to FS critical plane approach. Experimental results of five materials from tubular specimens under axial-torsional straining using sinusoidal wave forms in the literature are selected for the model verification. Comparing with FS parameter, the proposed critical plane damage parameter can significantly improve the accuracy of multiaxial fatigue lifetime prediction, especially for the materials

2015-10-14 收稿, 2016-04-20 录用, 2016-04-26 网络版发表.

1) 国家自然科学基金资助项目 (51438002, 51378409).

2) 赵而年, 博士研究生, 主要研究方向: 钢结构的疲劳. E-mail: zhaoern@126.com

引用格式: 赵而年, 瞿伟廉. 一种新的多轴非比例低周疲劳寿命预测临界面模型. 力学学报, 2016, 48(4): 944-952

Zhao Ernian, Qu Weilian. A new proposal for multiaxial low-cycle fatigue life prediction under non-proportional loading. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2016, 48(4): 944-952

without additional cycle hardening due to the non-proportionality of cycle loading.

Key words multiaxial fatigue, non-proportional loading, additional cycle hardening, critical plane approach, life prediction

引言

工程结构在服役过程中往往承受着复杂的多轴非比例循环载荷. 试验结果表明: 相比于单轴或比例加载条件, 多轴非比例加载条件下的结构构件有更快的损伤累积和更短的疲劳寿命^[1-11]. 对多轴非比例疲劳而言, 由于研究初期受试验条件等的限制, 研究者们难以解释多轴非比例疲劳损伤破坏的机理; 在确定多轴非比例疲劳损伤控制参量时, 通常采用一个等效应变变量, 然后将单轴加载条件下的 Manson-Coffin 疲劳寿命预测公式推广应用于多轴非比例疲劳寿命的预测. 尽管等效应变法对多轴比例疲劳寿命的预测结果相对满意, 但基于等效应变法进行多轴非比例疲劳寿命预测时, 寿命预测结果与试验结果相比误差较大^[1-2,11]. 因此, 需要发展新的疲劳损伤控制参量进行多轴非比例疲劳寿命的预测和评估. 目前, 疲劳损伤临界面法因具有较为明确的物理意义而被广泛讨论和研究.

临界破坏平面概念基于疲劳裂纹萌生及扩展断裂机理, 该机理认为疲劳失效发生在某一特定材料平面上, 疲劳损伤的累积、疲劳寿命的估算都在该平面上进行. Brown 和 Miller^[3] 较早研究了基于应变参量的多轴疲劳损伤临界面法. 他们认为: 疲劳寿命可表示为疲劳损伤临界面上应变状态的函数, 通过将最大剪应变幅平面定义为疲劳临界面, 提出了适用于多轴低周疲劳寿命预测的临界面模型. 之后, 疲劳研究者们针对基于应变参量的多轴非比例低周疲劳临界面法进行了大量的研究, 提出了诸多临界面损伤控制准则, 如 Kandil-Brown-Miller (KBM) 准则^[1]、Socie 准则^[4]、Lohr-Ellison 准则^[5]、Fatemi-Socie (FS) 准则^[6]、Wang-Yao 准则^[7]、Shang-Wang 准则^[8]、MKBM 准则^[9]等. Karolczuk 等^[10]和 You 等^[11]综述了不同学者提出的多轴非比例低周疲劳临界面法, 指出: 不同学者在构建多轴非比例低周疲劳临界面准则时, 一般将最大剪切应变幅平面定义为疲劳损伤临界面, 通过将疲劳临界面上的最大剪切应变幅和该平面上的法向正应变或法向正应力进行 (非) 线性组合来建立临界面疲劳损伤控制参量, 并结合 Manson-Coffin 公式进行多轴非比例低周疲劳

寿命的预测. 虽然多轴疲劳寿命临界面法具有明确的物理意义, 但是不同学者提出的各类疲劳寿命预测临界面模型并不能适用于所有的材料类型, 建立统一适用的多轴非比例疲劳临界面损伤控制参量仍需要大量的研究^[8,11].

本文基于 5 种材料的圆管薄壁试件在拉-扭复合加载情况下的多轴疲劳试验结果, 对比分析了多轴非比例低周疲劳临界面法中广泛讨论的 KBM 模型和 FS 模型, 指出了 FS 模型的不足; 通过分析非比例加载条件引起多轴疲劳寿命降低的原因, 提出了一个能考虑非比例加载路径变化和材料附加强化效应双重作用的非比例影响因子, 参照 FS 准则提出了一种新的多轴非比例低周疲劳寿命预测临界面模型; 利用 5 种材料的多轴疲劳试验数据, 将本文提出的临界面模型对多轴非比例疲劳寿命的预测精度与 FS 模型的预测精度进行了对比分析.

1 临界面法

1.1 临界面模型

Brown 和 Miller^[3] 根据疲劳裂纹的物理解释提出基于应变参量的多轴疲劳寿命预测临界面法后, 疲劳研究学者们主要是基于不同材料的圆管薄壁试件在拉-扭复合加载条件下的多轴疲劳试验结果, 提出了不同形式的多轴低周疲劳临界面准则^[12-13], 其中最广泛讨论的两种临界面准则是 KBM 准则和 FS 准则. Kandil, Brown 和 Miller^[1]的研究认为, 材料的疲劳损伤起始于最大剪切应变幅平面; 他们通过分析临界面上剪切应变和法向正应变对裂纹发展过程的共同贡献, 将临界面疲劳损伤控制参量表示为最大剪切应变幅 $\Delta\gamma_{\max}/2$ 和最大剪切应变幅平面上的法向正应变变量 $\Delta\epsilon_n$ 的线性组合, 提出了一个仅依赖于应变参量的临界面疲劳损伤模型. 结合 Manson-Coffin 公式, KBM 模型可表示为

$$\frac{\Delta\gamma_{\max}}{2} + S^* \Delta\epsilon_n = [1 + \nu_e + (1 - \nu_e) S^*] \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b + [1 + \nu_p + (1 - \nu_p) S^*] \epsilon'_f (2N_f)^c \quad (1)$$

式中, $\Delta\gamma_{\max}/2$, $\Delta\epsilon_n$ 分别为临界面上的最大剪切应变

幅和法向正应变变程; S^* 为正应变影响经验系数; σ'_f 为疲劳强度系数; ε'_f 为疲劳延性系数; b 为疲劳强度指数; c 为疲劳延性指数; ν_e, ν_p 分别为弹性和塑性泊松比; E 为弹性模量; N_f 为疲劳寿命。

Fatemi 和 Socie^[6] 研究指出, 在建立临界面疲劳损伤控制参量时, 仅采用应变参量 (如 KBM 模型中的 $\Delta\gamma_{\max}$ 和 $\Delta\varepsilon$) 不能有效地反映材料在非比例加载条件下的附加强化效应, 而非比例附加强化可以通过临界面上的法向正应力参量来表征. 因此, 他们在建立临界面疲劳损伤控制参量时, 考虑了疲劳损伤临界面上最大剪切应变幅和法向正应力对裂纹形成和扩展的影响, 通过引入最大剪应变幅平面上的最大法向正应力 $\sigma_{n,\max}$ 来反映材料非比例附加强化对多轴疲劳损伤的影响. FS 模型可表示为

$$\frac{\Delta\gamma_{\max}}{2} \left(1 + k \frac{\sigma_{n,\max}}{\sigma_y} \right) = \left[(1 + \nu_e) \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b + (1 + \nu_p) \varepsilon'_f (2N_f)^c \right] \left[1 + k \frac{\sigma'_f}{2\sigma_y} (2N_f)^b \right] \quad (2)$$

式中, $\sigma_{n,\max}$ 为临界面上的最大法向正应力; σ_y 为材料的屈服强度; k 为材料经验系数, 当经验系数 k 较难确定时可近似取为 1.0^[14]; 式中其他参数含义同 KBM 模型。

1.2 模型验证

为了验证 KBM 模型和 FS 模型对多轴疲劳寿命的预测能力, 本文采用 5 种材料 (4 种钢材和 1 种铝合金材料) 在 45° 拉扭比例、45° 椭圆非比例和 90° 圆形非比例 3 种加载路径下的多轴疲劳试验结果进行模型验证. 多轴疲劳试验数据分别取自文献 [14-18]. 多轴疲劳试验均采用圆管薄壁试件, 多轴加载方式采用正弦波拉-扭复合加载. 材料的基本力学参数及疲劳性能参数见表 1。

图 1 和图 2 分别给出了双对数坐标下 KBM 模型和 FS 模型在比例和非比例加载条件下的多轴疲劳寿命预测结果. 图中由内向外分别给出了 3 倍和 5 倍的误差因子范围。

从图 1 和图 2 中可以看出: 在比例加载条件下, KBM 模型和 FS 模型的疲劳寿命预测结果与试验结果均符合较好, 大部分预测结果能维持在 3 倍的误差因子范围之内; 但在非比例加载条件下, KBM 模型的预测能力远不如 FS 模型, 且大部分的预测结果偏于危险估计. 为了评价不同多轴疲劳寿命预测模

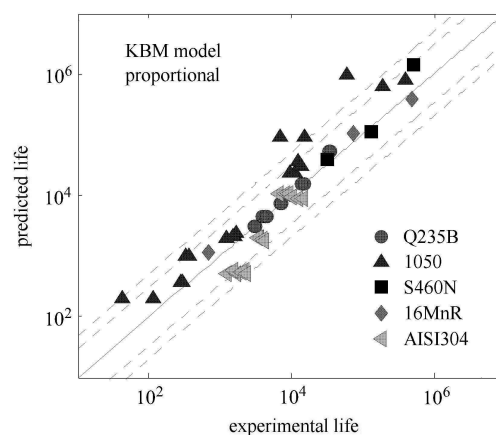
表 1 材料基本力学参数和疲劳性能参数

Table 1 The mechanical parameters and fatigue properties of investigated materials

Materials	E/GPa	σ_y/MPa	σ'_f/MPa	ε'_f	b	c
S460N	208.5	500	834	0.157	-0.079	-0.493
1050 ^N	200	435.8	1 109	0.292	-0.100	-0.456
1050 ^{QT}	200	1 049	1 346	2.010	-0.062	-0.725
1050 ^{IH}	200	2 156	4 974	0.529	-0.152	-0.910
16MnR	212.5	324.4	966.4	0.842	-0.101	-0.618
AISI304	200	495	798	0.096	-0.055	-0.446
Q235B	206	412	630.7	1.188	-0.080	-0.661

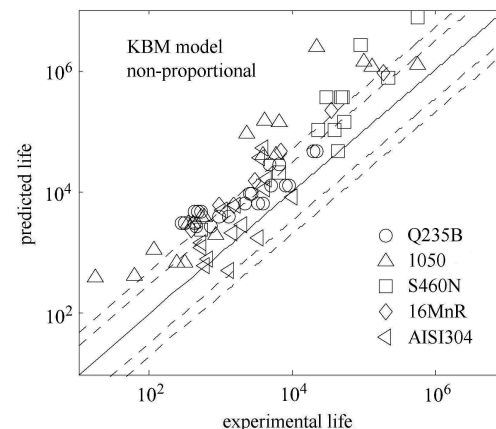
注: N—正火状态, QT—调制状态, IH—淬火条件.

Note: N — Normalized condition, QT — Quenched and tempered condition, IH — Induction-hardened condition.



(a) 比例加载条件

(a) Proportional loading

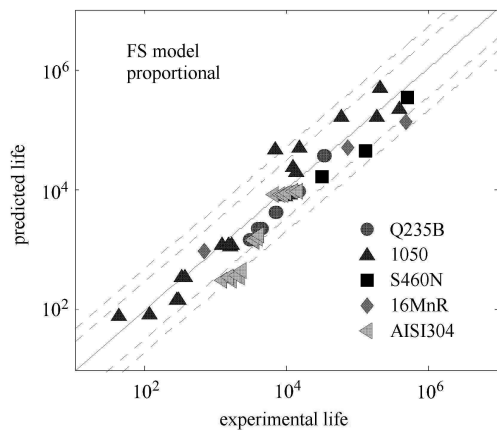


(b) 非比例加载条件

(b) Non-proportional loading

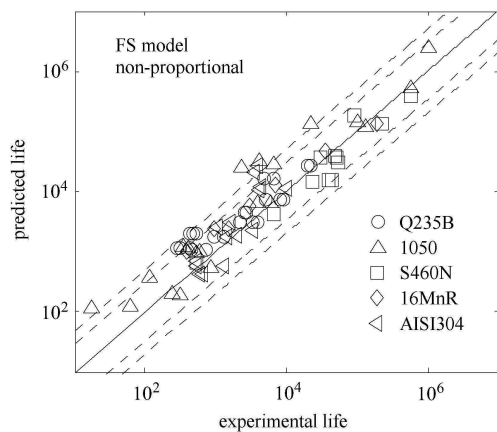
图 1 KBM 模型疲劳寿命预测结果

Fig. 1 Fatigue life prediction based on KBM parameter



(a) 比例加载条件

(a) Proportional loading



(b) 非比例加载条件

(b) Non-proportional loading

图 2 FS 模型疲劳寿命预测结果

Fig. 2 Fatigue life prediction based on FS parameter

型的预测效果, 定义如下误差评价指标 [19-20]

$$EC(S) = \frac{\text{误差因子 } S \text{ 内的试验数据量}, N\left(\frac{1}{S} \leq \frac{N_p}{N_t} \leq S\right)}{\text{总的试验数据量}, N_{\text{total}}} \quad (3)$$

式中, S 表示误差因子, N_t, N_p 分别表示多轴疲劳试验寿命和模型预测寿命. 根据式 (3) 的定义, 误差评价指标 $EC(S)$ 反映了 S 倍的误差因子内疲劳寿命预测模型的预测精度. 对文中 5 种材料圆管薄壁试件在拉-扭复合加载下的多轴疲劳寿命预测结果, KBM 和 FS 模型的误差评价指标如表 2 所示.

从表 2 可以看出: 对文中 5 种材料的多轴疲劳寿命预测而言, FS 模型的多轴疲劳寿命预测精度总体上要高于 KBM 模型. 在 3 倍和 5 倍的误差因子范

表 2 不同多轴疲劳寿命预测模型的评价指标

Table 2 The error criterion of life prediction models

	Proportional		Non-proportional	
	KBM	FS	KBM	FS
$EC(2)$	0.592 6	0.648 1	0.142 9	0.610 4
$EC(3)$	0.796 3	0.814 8	0.324 7	0.805 2
$EC(5)$	0.925 9	0.907 4	0.532 5	0.922 1

围内, 比例加载条件下 KBM 模型和 FS 模型的预测效果相对均较为理想; 但非比例加载条件下, KBM 模型总体上的预测精度仅为 32.5% 和 53.3%, 预测结果不理想; FS 模型预测精度则分别达到了 80.5% 和 92.2%, 预测结果与试验符合较好.

2 考虑非比例路径和材料附加强化效应的改进 FS 模型

2.1 问题描述

从总体的模型验证结果看, FS 模型在非比例加载条件下的多轴疲劳预测效果相对较好. 这主要是由于 FS 模型引入了一个规格化的应力项以考虑材料非比例附加强化对多轴疲劳损伤的影响, 从而提高了其寿命预测能力. 但值得注意的是, 在非比例条件下并非所有的金属材料都存在明显的循环附加强化特征.

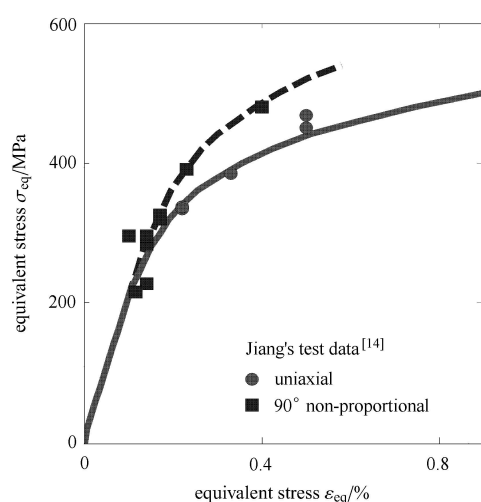
对于存在明显非比例附加强化效应的材料, Wang 等 [21] 研究指出, 可以通过修正比例加载条件下的循环应力-应变关系得到非比例循环应力-应变关系, 他们通过修正 Ramberg-Osgood 方程中材料的循环强度系数 K' 来反映材料的非比例附加强化效应, 可表示为

$$\frac{\varepsilon_{eq}}{2} = \frac{\sigma_{eq}}{2E} + \left[\frac{\sigma_{eq}}{2K'(1+L \cdot \Phi)} \right]^{\frac{1}{n'}} \quad (4)$$

式中, Φ 为非比例路径因子, 反映非比例加载路径变化的影响; L 为材料非比例附加强化参数, 具有材料依赖性特征; σ_{eq} 和 ε_{eq} 分别为等效应力和等效应变; K' 和 n' 分别为循环强化系数和循环强化指数. 由式 (4) 可知, 材料的附加强化特征与材料本身属性及非比例加载路径密切相关 [22]. 但是, 对不存在非比例附加强化效应的材料, 非比例附加强化参数 $L = 0$, 经式 (4) 非比例修正后的 Ramberg-Osgood 方程并无异于比例加载条件下的 Ramberg-Osgood 方程. 以 S460N 钢和 1050 钢为例, 两种材料在单轴 (或

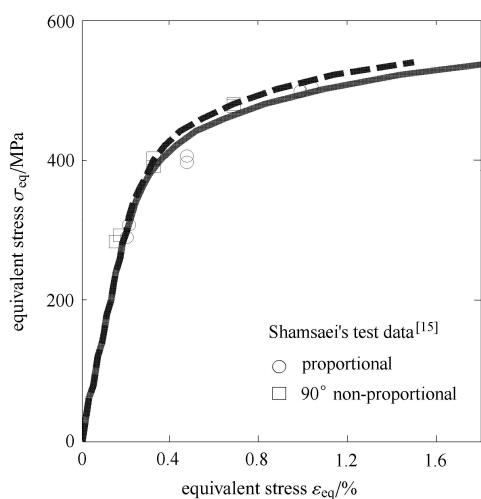
比例) 和非比例加载条件下的循环应力-应变关系拟合曲线如图 3 所示。

从图 3 可以看出, 非比例加载条件下 S460N 钢的循环应力-应变曲线明显高于单轴加载条件下的应力-应变曲线, 表现出明显的非比例附加强化特征; 相比而言, 1050 钢的非比例附加强化效应不明显. 为了验证 FS 模型对这两类材料的预测能力, 表 3 给出了 FS 模型对文中五种材料的圆管薄壁试件在拉扭复合加载下的多轴非比例疲劳寿命预测能力的评价指标。



(a) S460 N 钢

(a) S460 N steel



(b)1050 钢

(b) 1050 steel

图 3 S460N 钢和 1050 钢的循环应力-应变拟合曲线

Fig. 3 Fitted cyclic stress-strain curves of S460N and 1050 steel

表 3 FS 模型对 5 种材料的寿命预测评价指标

Table 3 The error criterion of FS model for five materials

	Non-proportional, FS model				
	S460N	Q235B	AISI304	16MnR	1050
EC(2)	0.583 3	0.608 7	0.555 6	0.714 3	0.300 0
EC(3)	0.833 3	0.739 1	0.888 9	1.000 0	0.600 0
EC(5)	0.916 7	1.000 0	0.888 9	1.000 0	0.740 0

从表 3 可以看出, FS 模型对存在非比例附加强化的材料 (S460N、Q235B、16MnR 钢和 AISI304 铝合金) 的预测能力, 整体上高于不存在非比例附加强化的材料 (1050 钢); 从图 2(b) 可知, FS 模型对 1050 钢的多轴非比例疲劳寿命预测值主要偏高于试验结果. 这主要是因为: 在等应变前提下, 对存在非比例附加强化的材料, FS 模型中的应力项在非比例加载条件下要大于比例加载条件, 由此可计算得到较大的 FS 损伤控制参量值, 从而给出相对于比例加载条件较低的疲劳寿命预测, 符合多轴非比例疲劳寿命低于比例加载条件下疲劳寿命的预期; 但对不存在附加强化的材料, FS 模型中的应力项在非比例和比例加载条件下几乎没有差别, 因此, 在两种不同加载条件下 FS 模型会给出相同的疲劳寿命预测结果, 从而得到较差的多轴非比例疲劳寿命预测。

FS 模型的研究思路是 [6,23-24]: 非比例加载条件引起材料附加强化, 进而导致多轴非比例疲劳寿命的降低; 但是这一思路不能解释“对不存在非比例附加强化的材料, 在非比例加载条件下同样存在较低的疲劳寿命”这一试验结论. 因此, 本文从这个角度出发研究 FS 模型改进方法, 以解决 FS 模型对不存在非比例附加强化的材料适用性不足的问题。

2.2 非比例路径因子

已有的多轴非比例疲劳研究表明 [25-28]: 非比例加载条件除了引起材料的附加强化效应之外, 不同的非比例路径会导致材料一点处应力应变主轴发生不同程度的旋转. 这样, 非比例加载条件导致材料抗疲劳性能降低的原因就可归纳为以下两个方面: (1) 材料相关性, 即非比例加载条件引起的材料附加强化效应; (2) 路径相关性, 即非比例加载条件引起应力应变主轴的旋转变化特征。

对不存在非比例附加强化效应的材料, 材料相关性因素不影响其非比例多轴疲劳性能; 但非比例加载路径的变化仍会引起材料一点处应力应变主轴在循环加载过程中发生不同程度的旋转, 导致材料内部开动更多滑移系, 使得金属材料晶体层次难以形成

稳定的位错结构,从而降低了多轴非比例加载条件下材料的抗疲劳性能^[28].这种影响仅依赖于非比例加载路径的变化,而与材料的循环强化特征无关.

以简谐波拉-扭复合加载条件下的圆管薄壁试件为例,考察不同加载路径下圆管薄壁试件表面危险点处主应变轴的旋转变化特征.对于承受拉-扭复合简谐波加载的圆管薄壁试件,材料表面一点处任一平面角度 θ 上的最大剪切应变 $\gamma_{\theta,\max}$ 可以根据坐标变化关系得到^[1,12].图 4 给出了极坐标系下不同应变加载路径下 $\gamma_{\theta,\max} - \theta$ 的关系^[29].

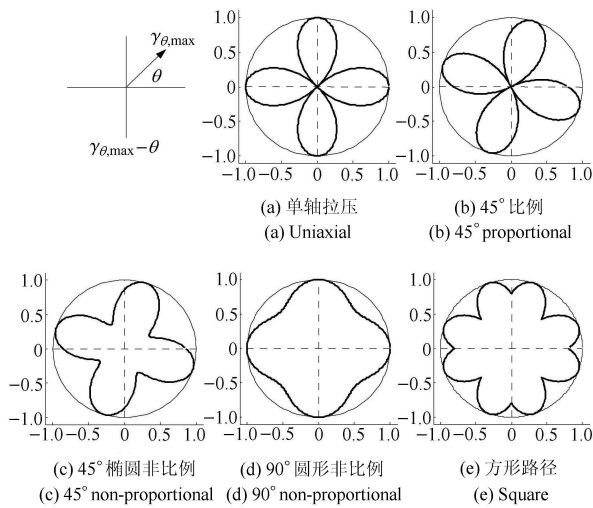


图 4 不同应变路径下的 $\gamma_{\max} - \theta$ 图形

Fig. 4 $\gamma_{\max} - \theta$ relationships for five strain paths

从图 4 可以看出:在不同的应变加载路径下 $\gamma_{\theta,\max} - \theta$ 图形不仅发生了旋转,而且 $\gamma_{\theta,\max} - \theta$ 图形的形状也会随着应变加载路径的变化而发生变化.据此,Chen 等^[29]在研究非比例加载路径的变化特征时,定义了一个能反映非比例加载路径变化对多轴疲劳性能影响的非比例路径因子 Φ

$$\Phi = 2 \frac{A_{\theta,\max}}{A_{\max}} - 1 \quad (5)$$

式中: $A_{\max}$ 表示极坐标下一个应变循环内以材料平面上的最大剪切应变 $(\gamma_{\theta,\max})_{\max}$ 为半径的圆的面积, $A_{\theta,\max}$ 表示极坐标下一个应变循环内 $\gamma_{\theta,\max} - \theta$ 的包络面积.图 5 给出了非比例路径因子 Φ 随非比例加载路径参数 (λ, ϕ) 的变化曲线^[9].

从图 5 可以看出:在比例加载条件下 ($\phi = 0^\circ$),非比例路径因子 Φ 与应变比 λ 无关,恒为 0;在拉-扭复合非比例加载条件下,正、剪应变相位差 ϕ 一定时,随着应变比 λ 的增大,非比例路径因子 Φ 首先逐渐增大到最大值,然后衰减至 0;在 90° 圆形

非比例且 $\lambda = 1.3$ 时,非比例路径因子 Φ 达到最大值 1.由此可知,在不同的非比例加载路径下,非比例路径因子 Φ 随着加载路径参数 (λ, ϕ) 的变化而变化,但这一变化仅取决于非比例加载路径,而不依赖于材料本身的循环强化属性.

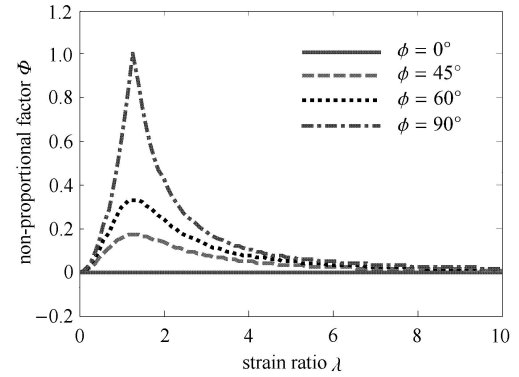


图 5 非比例路径因子

Fig. 5 Non-proportional path factor

2.3 建议一个非比例影响因子

FS 模型的核心思想是引入了最大剪切应变幅平面上规格化的最大法向正应力来反映材料的非比例附加强化,这样 FS 临界面损伤控制参量保持了最大剪切应变幅的量纲,可以认为是通过引入一个最大剪切应变幅的修正系数 $\left(1 + k \frac{\sigma_{n,\max}}{\sigma_y}\right)$ 来考虑非比例加载条件对多轴疲劳损伤的影响, $\sigma_{n,\max}$ 可以通过式 (4) 计算得到^[9].对存在非比例附加强化效应的材料,利用非比例修正 Ramberg-Osgood 方程计算的 $\sigma_{n,\max}$ 能同时反映非比例加载路径 Φ 及材料非比例强化参数 L 的影响;但是只要材料的非比例附加强化参数 $L = 0$,式 (4) 中的 $L \cdot \Phi$ 恒为 0,这说明对不存在非比例附加强化效应的材料,非比例加载路径对 $\sigma_{n,\max}$ 没有影响,因此在这种情况下 FS 模型不能反映非比例加载路径对多轴疲劳寿命的影响.

为了能反映非比例加载条件下路径变化和不同类型材料非比例循环附加强化特征对多轴疲劳性能的双重影响,本文建议一个非比例影响因子

$$\kappa^* = 1 + \sqrt{\Phi^2 + (L \cdot \Phi)^2} = 1 + \Phi \sqrt{1 + L^2} \quad (6)$$

式中, Φ 为非比例路径因子,可由式 (5) 给出; L 为式 (4) 中的材料非比例附加强化参数,按下式定义^[1,30-32]

$$L = \frac{\bar{\sigma}_{OP}}{\bar{\sigma}_{IP}} - 1 \quad (7)$$

式中, $\bar{\sigma}_{OP}$, $\bar{\sigma}_{IP}$ 分别表示高塑性应变区等应变条件下 90° 圆形非比例和比例加载条件下的等效应力。

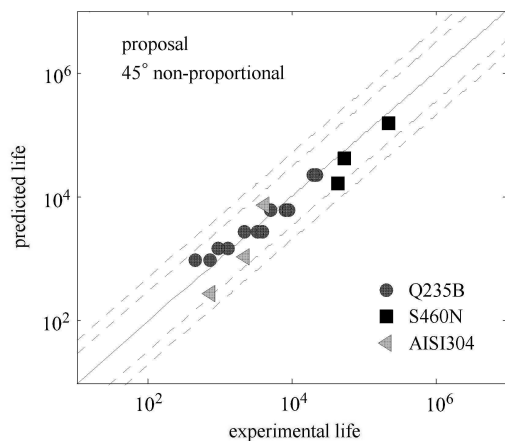
可以看出: 式 (6) 提出的非比例影响因子 κ^* 包含了反映非比例路径变化及材料非比例附加强化特征的两个参数 Φ 和 L , 且以非比例附加强化影响和非比例路径变化影响的组合形式考虑两者对多轴疲劳损伤的双重作用. 这样, 即使对不存在非比例附加强化效应的材料 ($L = 0$), 式 (6) 仍可以通过路径参数 Φ 反映非比例加载路径变化引起的材料一点处应变主轴旋转对多轴疲劳性能的影响. 据此, 本文参照 FS 临界面模型, 提出了一种新的多轴疲劳损伤临界面准则

$$\frac{\Delta\gamma_{\max}}{2} \left(1 + \kappa^* \frac{\bar{\sigma}_{n,\max}}{\sigma_y} \right) = f(N_f) \quad (8)$$

在该临界面疲劳损伤准则中, 采用 $\kappa^* \bar{\sigma}_{n,\max}$ 修正了 FS 模型中的应力项 $\sigma_{n,\max}$, 其中 $\bar{\sigma}_{n,\max}$ 为按比例加载条件 Ramberg-Osgood 方程计算的临界面上的最大法向正应力. 非比例加载条件的路径变化和材料附加强化对多轴疲劳损伤的影响在 κ^* 中反映. 可以看出, 该模型在 FS 准则仅考虑材料非比例附加强化影响的基础上, 增加了对非比例路径影响的考量, 克服了 FS 模型的不足, 能更好地适用于不同类型材料的多轴非比例疲劳寿命预测.

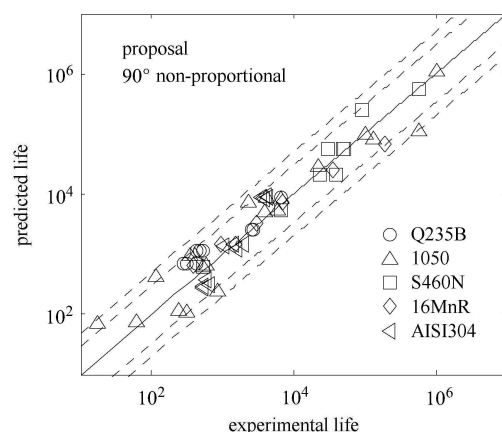
2.4 修正 FS 模型的试验验证

采用本文提出的修正 FS 临界面准则, 对 3 种材料在 45° 椭圆非比例路径下的多轴疲劳寿命 (其他两种材料疲劳数据文献中未给出) 和 5 种材料在 90° 圆形非比例路径下的多轴疲劳寿命进行预测, 预测结果与试验结果的对比分析如图 6 所示. 图中由内向外分别给出了 3 倍和 5 倍的误差因子范围.



(a) 45° 椭圆非比例加载路径

(a) 45° non-proportional loading path



(b) 90° 圆形非比例加载路径

(b) 90° non-proportional loading path

图 6 修正 FS 模型疲劳寿命预测结果

Fig. 6 Fatigue life prediction based on modified FS model

根据式 (3) 定义的评价指标, 计算本文修正 FS 模型对文中 5 种材料的圆管薄壁试件在拉-扭复合非比例加载条件下的误差评价指标, 如表 4 所示.

表 4 修正 FS 模型误差评价指标

Table 4 The error criterion of modified FS model

	Non-proportional, modified FS model				
	S460N	Q235B	AISI304	16MnR	1050
EC (2)	0.833 3	0.742 9	0.555 6	0.857 1	0.500 0
EC (3)	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	0.750 0
EC (5)	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0

对比表 3 和表 4 可以看出, 相比较于 FS 模型, 在相同的误差因子范围内, 本文提出的修正临界面模型对 5 种材料的多轴非比例疲劳寿命预测精度均有不同程度的提高. 对不存在附加强化效应的材料 1050 钢而言, 在 2 倍、3 倍和 5 倍的误差因子内, FS 模型的预测精度仅为 30%, 60%, 74%, 而本文修正模型的预测精度为 50%, 75%, 100%, 预测精度明显提高; 同样, 对 4 种存在非比例附加强化效应的材料 S460N, Q235B, AISI304 和 16MnR, 多轴非比例疲劳寿命预测结果能全部保持在 3 倍的误差因子范围之内, 预测精度均有明显提高.

需要指出的是, 目前的多轴疲劳寿命预测模型均是基于对疲劳试验结果的统计分析而提出的经验模型, 建立一种统一适用的临界面疲劳寿命预测模型尚较为困难 [33-34]. 本文通过分析非比例加载对多轴疲劳损伤的双重影响, 改进了 FS 模型, 改进模型

的预测精度有明显提高,但仍属于经验分析模型范畴.总体而言,多轴疲劳理论发展的不成熟以及疲劳试验结果的分散性仍然是导致多轴疲劳预测寿命与试验寿命存在一定误差的主要原因.

3 结 论

(1) 采用 5 种材料的圆管薄壁试件在拉-扭复合加载条件下的多轴疲劳试验结果验证了 KBM 模型和 FS 模型对多轴疲劳寿命的预测能力.结果表明:KBM 模型对多轴非比例低周疲劳的预测结果不理想,而 FS 模型对存在非比例附加强化效应的材料的疲劳寿命预测结果与试验符合较好.

(2) 分析了非比例加载条件对多轴疲劳损伤的影响,提出了一个能考虑非比例路径变化和材料附加强化效应双重作用的非比例影响因子,参照 FS 准则提出一种新的多轴非比例低周疲劳寿命预测临界面模型.模型验证结果表明:文中修正 FS 临界面模型对多轴非比例疲劳寿命预测结果与试验结果符合较好,预测精度优于 FS 模型,且该模型能较好地适用于具有不同附加强化特征材料的多轴疲劳寿命预测.

参 考 文 献

- Socie DF, Marquis GB. Multiaxial fatigue. Warrendale, PA: SAE, 2000
- Gladyski M, Shukaev S. A new model for low cycle fatigue of metal alloys under non-proportional loading. *International Journal of Fatigue*, 2010, 32(10):1568-1572
- Brown MW, Miller KJ. A theory for fatigue failure under multiaxial stress-strain conditions. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 1973, 187(1): 745-755
- Socie DF, Shield TW. Mean stress effects in biaxial fatigue of inconel 718. *Journal of Engineering Materials & Technology*, 1984, 106(3): 227-232
- Lohr RD, Ellison EG. A simple theory for low cycle multiaxial fatigue. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 1980, 3(1): 1-17
- Fatemi A, Socie DF. A critical plane approach to multiaxial fatigue damage including out-of-phase loading. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 1988, 11(3): 149-165
- Wang YY, Yao WX. A multiaxial fatigue criterion for various metallic materials under proportional and nonproportional loading. *International Journal of Fatigue*, 2006, 28(4): 401-408
- Shang DG, Sun GQ, Deng J, et al. Multiaxial fatigue damage parameter and life prediction for medium-carbon steel based on the critical plane approach. *International Journal of Fatigue*, 2007, 29(12):2200-2207
- Li J, Zhang Z, Sun Q, et al. Multiaxial fatigue life prediction for various metallic materials based on the critical plane approach. *International Journal of Fatigue*, 2011, 33(2): 90-101
- Karolczuk A, Macha E. A review of critical plane orientations in multiaxial fatigue failure criteria of metallic materials. *International Journal of Fracture*, 2005, 134(3-4): 267-304
- You BR, Lee SB. A critical review on multiaxial fatigue assessments of metals. *International Journal of Fatigue*, 1996, 18(4): 235-244
- 尚德广, 王德俊. 多轴疲劳强度. 北京: 科学出版社, 2007 (Shang Deguang, Wang Dejun. Multiaxial Fatigue Strength. Beijing: Science Press, 2007 (in Chinese))
- Shang DG, Sun GQ, Deng J, et al. Multiaxial fatigue damage parameter and life prediction for medium-carbon steel based on the critical plane approach. *International Journal of Fatigue*, 2007, 29(12): 2200-2207
- Jiang Y, Hertel O, Vormwald M. An experimental evaluation of three critical plane multiaxial fatigue criteria. *International Journal of Fatigue*, 2007, 29(8): 1490-1502
- Shamsaei N, Fatemi A. Effect of hardness on multiaxial fatigue behaviour and some simple approximations for steels. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2009, 32(8): 631-646
- 张小元. Q235 钢多轴低周疲劳寿命及评估方法研究. [硕士论文]. 南宁: 广西大学, 2013 (Zhang Xiaoyuan. Research on multiaxial low-cycle fatigue and life evaluation for Q235 steel. [Master Thesis]. Nanning: Guangxi University, 2013 (in Chinese))
- Nitta A, Ogata T, Kuwabara K. Fracture mechanisms and life assessment under high-strain biaxial cyclic loading of type 304 stainless steel. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 1989, 12(2): 77-92
- Gao Z, Zhao T, Wang X. Multiaxial fatigue of 16MnR steel. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 2009, 131(2): 73-80
- Li J, Zhang Z, Sun Q, et al. Low-cycle fatigue life prediction of various metallic materials under multiaxial loading. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2011, 34(4): 280-290
- Lee KS, Song JH. Estimation methods for strain-life fatigue properties from hardness. *International Journal of Fatigue*, 2006, 28(4): 386-400
- Wang CH, Brown MW. A path-independent parameter for fatigue under proportional and non - proportional loading. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 1993, 16(12): 1285-1297
- 赵社戌, 匡震邦. 考虑路径相关性的非比例循环塑性本构模型. 力学学报, 1999, 4 (4): 484-492 (Zhao Shexu, Kuang Zhenbang. A constitutive model for non-proportional cyclic plasticity with loading path dependence. *Acta Mechanica Sinica*, 1999, 4 (4): 484-492 (in Chinese))
- Reis L, Li B, Freitas MD. Crack initiation and growth path under multiaxial fatigue loading in structural steels. *International Journal of Fatigue*, 2009, 31(s11-12): 1660-1668
- Itoh T, Sakane M, Ohsuga K. Multiaxial low cycle fatigue life under non-proportional loading. *International Journal of Pressure Vessels & Piping*, 2013, 110: 50-56
- 张成成, 姚卫星. 一种新的多轴高周疲劳寿命预测模型. 力学学报, 2010, 42(6): 1225-1230 (Zhang Chengcheng, Yao Weixing. A

- new model for life prediction of multiaxial high-cycle fatigue. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2010, 42(6): 1225-1230 (in Chinese))
- 26 Shamsaei N, Fatemi A. Effect of microstructure and hardness on non-proportional cyclic hardening coefficient and predictions. *Materials Science & Engineering A*, 2010, 527(12): 3015-3024
- 27 Mcclafin D, Fatemi A. Torsional deformation and fatigue of hardened steel including mean stress and stress gradient effects. *International Journal of Fatigue*, 2004, 26(7): 773-784
- 28 李静, 孙强, 李春旺等. 一种新的多轴疲劳寿命预测方法. *机械工程学报*, 2009, 45(9): 285-290 (Li Jing, Sun Qiang, Li Chunwang, et al. New prediction method for multiaxial fatigue life. *Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 45(9): 285-290 (in Chinese))
- 29 Chen X, Gao Q, Sun XF. Low-cycle fatigue under non-proportional loading. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 1996, 19(7): 839-854
- 30 Shamsaei N, Fatemi A, Socie DF. Multiaxial fatigue evaluation using discriminating strain paths. *International Journal of Fatigue*, 2011, 33(4): 597-609
- 31 Shamsaei N, Mckelvey SA. Multiaxial life predictions in absence of any fatigue properties. *International Journal of Fatigue*, 2014, 67(10): 62-72
- 32 Borodii MV, Shukaev SM. Additional cyclic strain hardening and its relation to material structure, mechanical characteristics, and lifetime. *International Journal of Fatigue*, 2007, 29(6): 1184-1191
- 33 刘嘉, 李静, 张忠平. 基于临界面法的剪切式多轴疲劳寿命预测模型. *固体力学学报*, 2012, 33(1): 58-62 (Liu Jia, Li Jing, Zhang Zhongping. A multiaxial fatigue life prediction model with shear form based on the critical plane approach. *Chinese Journal of Solid Mechanics*, 2012, 33(1): 58-62 (in Chinese))
- 34 Gómez C, Canales M, Calvo S, et al. High and low cycle fatigue life estimation of welding steel under constant amplitude loading: Analysis of different multiaxial damage models and in-phase and out-of-phase loading effects. *International Journal of Fatigue*, 2011, 33(4): 578-587