



缺口和平均应力对 TC18 棒材疲劳强度的影响

张 乐, 刘莹莹, 孙宇幸, 薛希豪

(西安建筑科技大学 冶金工程学院, 西安 710055)

摘 要: 在不同的应力集中系数 K_t 和应力比 R 下, 分析缺口(应力集中)和平均应力对 TC18 棒材疲劳强度的影响。结果表明: TC18 棒材的应力幅 σ_a 随应力集中系数和应力比的增大而减小, 但其最大应力 $\sigma_{\max}$ 随应力比的增大而增大。应力集中和平均应力对 TC18 棒材疲劳强度的影响可分别用应力集中敏感因子 A 和平均应力敏感因子 A_m 来衡量。为了进一步评估应力集中和平均应力对 TC18 棒材疲劳强度的综合影响, 建立一种新的模型, 并且通过新模型得到的数据和实验结果匹配较好。

关键词: TC18 合金; 疲劳强度; 应力集中; 平均应力

文章编号: 1004-0609(2018)-12-2450-07

中图分类号: TG146.2

文献标志码: A

TC18 合金因其具有强韧性高、塑性好以及焊接性能优良等特点而被广泛使用在航空工业中^[1-4]。疲劳破坏是 TC18 合金的主要破坏形式之一, 因此, 研究 TC18 合金的疲劳强度对其在航空工业中的应用有着重要的意义。

试样表面存在缺口就会产生应力集中现象, 而应力集中的存在会显著地降低材料的疲劳强度^[5-9]。关于缺口(应力集中)对材料疲劳性能的影响, 国内外学者已做了较多研究。例如, HTOO 等^[5]研究了 Ti-6Al-4V 合金的缺口疲劳行为; PLUVINAGE^[6]研究了缺口对疲劳和断裂的影响; MCEVILY 等^[7]研究了疲劳缺口敏感度及缺口尺寸对疲劳的影响; MORTAZAVIAN 等^[8]研究了应力集中对复合材料疲劳行为的影响; 田伟等^[9]研究了缺口对 TC17 合金低周疲劳性能的影响; 袁永壮等^[10]研究了缺口的几何尺寸对钢材疲劳强度的影响; 闫桂玲等^[11]研究了缺口对 5083-H111 铝合金疲劳性能的影响。

应力比是影响疲劳强度的重要因素之一, 而应力比对疲劳强度的影响可归因于平均应力对疲劳强度的影响。对于疲劳强度, 正的平均应力(平均拉应力)是有害的, 而负的平均应力(平均压应力)却是有利的^[12-17]。国内外学者已做了很多关于平均应力对材料疲劳行为影响的研究。例如, YUAN 等^[13]研究了平均应力对 316LN 不锈钢低周疲劳行为的影响; KOVACS 等^[14]研究了平均应力对涡轮机叶片钢超高周疲劳寿

命的影响; OBERWINKLER^[15]研究了 Ti-6Al-4V 合金的平均应力敏感度; ADACHI 等^[16]研究了平均应力对 Ti-6Al-4V 合金疲劳强度的影响; SARKAR 等^[17]研究了平均应力对不锈钢失效模式和疲劳寿命的影响; 蔡晓静等^[18]提出了一种适用于各种平均应力的疲劳极限的函数关系式。

本文作者主要研究了缺口(应力集中)和平均应力对 TC18 合金疲劳强度的影响, 并且建立了一个新模型来评估应力集中和平均应力对疲劳强度的综合影响。研究结果可为 TC18 合金在航空工业中的应用提供必要的疲劳强度设计数据。

1 实验

本试验中所用的材料为 TC18 棒材, 其力学性能见表 1, 其显微组织见图 1, 且其化学成分见表 2。由图 1 可以看出, 棒材的显微组织为双态组织, 主要由初生 α 相和 β 转变组织组成, 其中初生 α 相尺寸不均匀, 主要为等轴状和条状。

疲劳试验方法及要求按国标 GB/T 3075—2008 执行, 试样为 $K_t=1$ 的光滑试样及 K_t 为 3 和 5 的缺口试样, 其尺寸均按 HB 5287—96 确定。图 2 所示为疲劳试样的尺寸图, 其中图 2(a)为光滑试样尺寸, 图 2(b)为缺口试样尺寸。在应力集中系数 K_t 分别为 1、3、5

表 1 TC18 棒材的力学性能

Tensile strength/ MPa	Yield strength/ MPa	Elongation/ %	Reduction of area/%	Elastic modulus/ GPa
1035	992	17	55	100

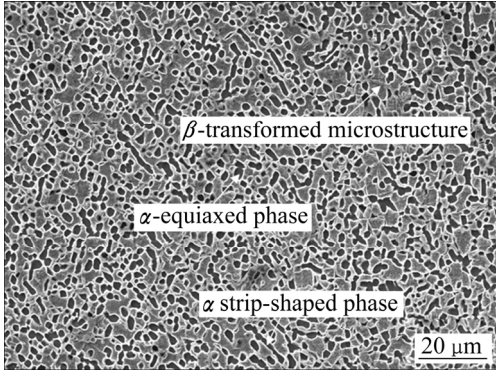


图 1 TC18 棒材的显微组织
Fig. 1 Microstructure of TC18 bars

表 2 TC18 棒材的化学成分

Table 2 Chemical composition of TC18 bars (mass fraction, %)					
Al	Mo	V	Cr	Fe	C
5.48	5.28	5.05	1.02	0.88	0.013
Si	Zr	O	N	H	Ti
0.017	0.01	0.12	0.017	0.001	Bal.

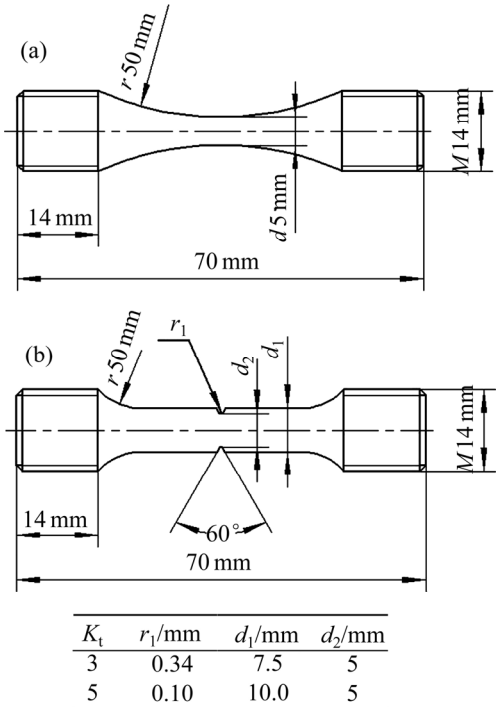


图 2 疲劳试样尺寸图
Fig. 2 Dimensions of fatigue specimens: (a) Smooth specimen; (b) Notched specimen

和应力比 R 为 0.5、-1, 加载频率 $f \approx 150 \text{ Hz}$ 条件下, 分别取 5 个应力水平, 每个应力水平确保 3 根有效试样, 最低应力水平下的疲劳循环周次达到 2×10^6 。

疲劳试验温度为室温, 采用 JXG-100 高频疲劳试验机进行。采用 VEGA II 扫描电镜对试样的显微组织进行观察, 其中采用腐蚀剂的体积配比为 $V(\text{HF}):V(\text{HNO}_3):V(\text{H}_2\text{O})=2.5:5:92.5$ 。

2 结果与分析

2.1 S—N 曲线

图 3 所示为 TC18 合金棒材在不同应力集中系数和应力比下的 $S-N$ 曲线, 其中图 3(a) 的纵坐标为应力幅 σ_a , 图 3(b) 的纵坐标为最大应力 $\sigma_{\max}$ 。由图 3(a) 可以看出, 恒定寿命下的应力幅随着应力比的增大而减小。由图 3(b) 可以看出, 恒定寿命下的最大应力随着应力比的增大而增大。图 3(a) 和 (b) 得到完全相反的结

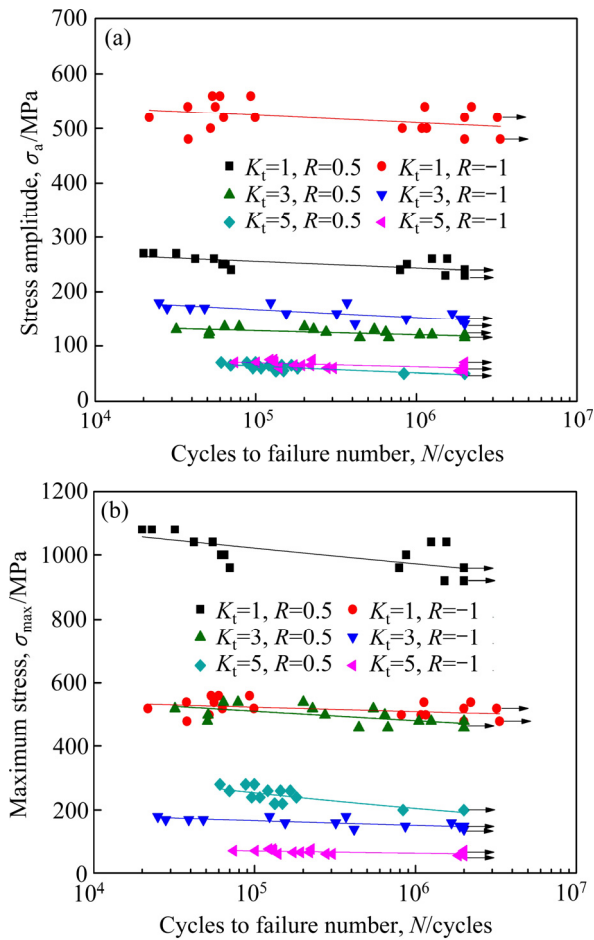


图 3 TC18 棒材 $S-N$ 曲线
Fig. 3 $S-N$ curves of TC18 bars: (a) Relationship between σ_a and N ; (b) Relationship between $\sigma_{\max}$ and N

果,可见, $S-N$ 曲线中纵坐标选取的不同对疲劳强度的研究有着截然不同的结果,MIKADO 等^[19]和 LIU 等^[20]在研究应力比对疲劳性能的影响时也得到了类似的结论。综上所述可知,应结合实际的研究需要来确定是采用应力幅还是最大应力作为 $S-N$ 曲线的纵坐标,但无论选择哪个作为纵坐标都应说明疲劳强度对应的是应力幅值还是最大应力值。本研究中的疲劳强度指的是 2×10^6 周次下的应力幅值 σ_a 。

2.2 应力集中对疲劳强度的影响

表 3 所列为 TC18 棒材在 2×10^6 周次下的疲劳强度值。图 4 所示为 TC18 棒材疲劳强度与应力集中系数 K_t 的关系曲线。由表 3 和图 4 均可看出,TC18 棒材的疲劳强度随着应力集中系数的增加而减小。

表 3 TC18 棒材的疲劳强度

Table 3 Fatigue strength of TC18 bars at 2×10^6 cycles		
K_t	R	Fatigue strength/MPa
1	-1	480
	0.5	230
3	-1	140
	0.5	115
5	-1	55
	0.5	50

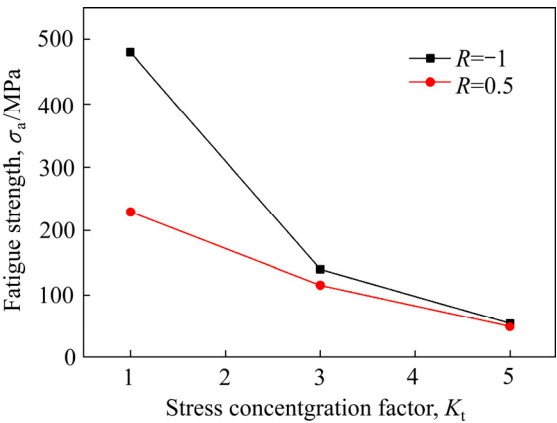


图 4 TC18 棒材在不同应力集中系数下的疲劳强度

Fig.4 Fatigue strength of TC18 bars under different stress concentration factors

缺口对材料疲劳性能的影响一般用疲劳缺口敏感度 q_f 评定,但本文试图找到一种能直接参与公式运算且其值能反映缺口对疲劳强度影响程度的系数。

GAO^[21]在研究 40CrNi2Si2MoVA 钢的疲劳性能时定义了应力集中敏感因子 A ,认为 A 与 K_t 满足二次

函数的关系,并且得到了 A 与应力集中系数 K_t 之间的关系: $A=9.567\times 10^{-5}K_t^2-3.723\times 10^{-4}K_t+5.219$ 。本文中, $A=-8.05\times 10^{-5}K_t^2+6.41\times 10^{-4}K_t-1.61\times 10^{-3}$ 。图 5 为应力集中敏感因子 A 与应力集中系数 K_t 的二次函数关系曲线,其对称轴为 $K_t=3.98$ 。由图 5 可以看出,当 $K_t<3.98$ 时,应力集中系数 K_t 的值越大,应力集中敏感因子 A 的值就越大,即应力集中对疲劳强度的影响也就越大;当 $K_t>3.98$ 时,随着应力集中系数 K_t 值的增大,应力集中敏感因子 A 的值有所减小,即应力集中对疲劳强度的影响有所减弱。

本研究中,当应力集中系数 K_t 分别为 1、3 和 5 时,与之对应的应力集中敏感因子 A 的值分别为 -0.00105 、 -0.00041 和 -0.00042 , $A_{K_{t1}}<A_{K_{t5}}<A_{K_{t3}}$ 。可见,当应力集中系数 $K_t=3$ 时,应力集中对 TC18 棒材的疲劳强度影响最大。这可以用前面的二次函数来解释, $K_t=3$ 和对称轴 $K_t=3.98$ 之间的距离为 $|3-3.98|=0.98$,而 $K_t=5$ 和对称轴 $K_t=3.98$ 之间的距离为 $|5-3.98|=1.02$, $0.98<1.02$,即 $K_t=3$ 更接近对称轴 $K_t=3.98$,因而按照开口朝下的二次函数的性质 $K_t=3$ 时的函数值 $A_{K_{t3}}$ 要大于 $K_t=5$ 时的函数值 $A_{K_{t5}}$ 。另外,虽然 $A_{K_{t1}}<A_{K_{t5}}$,但 $A_{K_{t3}}$ 与 $A_{K_{t5}}$ 的值较为接近,即 $K_t=3$ 时应力集中对疲劳强度的影响程度与 $K_t=5$ 时应力集中对疲劳强度的影响程度相差较小,这与实验数据是吻合的。例如,在应力比 $R=0.5$ 时,当应力集中系数 K_t 由 1 变为 3 时,TC18 棒材的疲劳强度由 230 MPa 变为 115 MPa,降低了 50%;而当应力集中系数 K_t 由 3 变为 5 时,TC18 棒材的疲劳强度则由 115 MPa 变为 50 MPa,降低了 56.5%,两者相差并不十分显著。

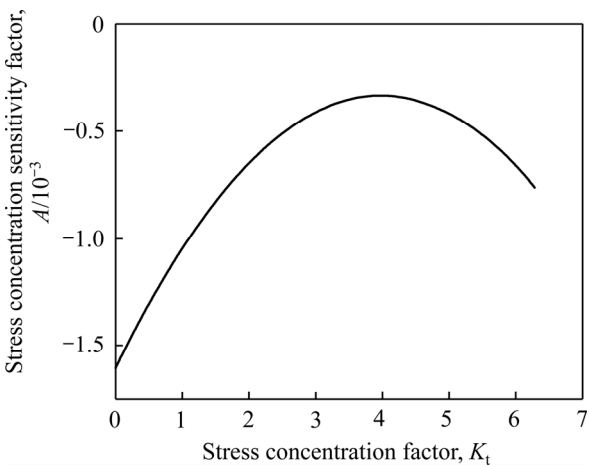


图 5 应力集中敏感因子与应力集中系数的关系

Fig. 5 Relationship between stress concentration sensitivity factor and stress concentration factor

2.3 平均应力对疲劳强度的影响

平均应力对疲劳强度的影响一般用 3 个常用的模型来分析, 分别是 Goodman(式(1))、Soderberg relation(式(2))和 Gerber parabola(式(3))。

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_{a,-1}} = 1 - \frac{\sigma_m}{R_m} \quad (1)$$

式中: σ_a 为应力幅; σ_m 为平均应力; $\sigma_{a,-1}$ 为应力比 $R = -1$ 时的应力幅; R_m 为抗拉强度。

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_{a,-1}} = 1 - \frac{\sigma_m}{R_{p0.2}} \quad (2)$$

式中: $R_{p0.2}$ 为屈服强度。

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_{a,-1}} = 1 - \left(\frac{\sigma_m}{R_m} \right)^2 \quad (3)$$

通过式(1)、(2)和(3)得到的 TC18 棒材在应力比 $R=0.5$ 时的疲劳强度见表 4。比较表 3 和 4 可以看出, 通过式(1)建立起的应力幅与平均应力之间的关系仅在 K_t 为 3 和 5 时与实验数据基本吻合, 而在 $K_t=1$ 时则与实验数据相差较大。通过式(2)建立起的应力幅与平均应力之间的关系仅在 K_t 为 3 和 5 时与实验数据基本吻合, 而在 $K_t=1$ 时则与实验数据相差较大。通过式(3)建立起的应力幅与平均应力之间的关系在 K_t 为 1、3 和 5 时与实验数据均能基本吻合, 但误差较大。

显然, 上述 3 种模型中的任一模型都不能与本文中的实验数据准确的匹配。因此, 本文作者需要建立一种新的模型来准确地反应平均应力对疲劳强度的影响。

表 4 通过式(1)、(2)和(3)得到的在应力比 $R=0.5$ 时 TC18 棒材的疲劳强度

Table 4 Fatigue strength of TC18 bar at $R=0.5$ obtained by Eqs. (1), (2) and (3)

K_t	Fatigue strength/MPa		
	Eq. (1)	Eq. (2)	Eq. (3)
1	160	146.1	266.7
3	93.3	91.3	124.4
5	47	46.7	53.8

SCHÜTZ^[22]分析了多种材料的平均应力敏感度, 并得到了平均应力敏感因子 A_m (见式(4))。

$$A_m = \frac{\sigma_{a,-1} - \sigma_{a,0}}{\sigma_{m,0}} \quad (4)$$

本研究中, 平均应力敏感因子 A_m 被定义如下(式(5)):

$$A_m = \frac{\sigma_{a,-1} - \sigma_{a,0.5}}{\sigma_{m,0.5}} \quad (5)$$

式中: $\sigma_{a,0.5}$ 为应力比 $R=0.5$ 时的应力幅; $\sigma_{m,0.5}$ 为应力比 $R=0.5$ 时的平均应力。

根据式(5)可得出应力集中系数 K_t 分别为 1、3、5 时的平均应力敏感因子 A_{m1} 、 A_{m3} 、 A_{m5} , 且其值分别为 0.36、0.07、0.03。

2.4 新模型的建立

为了评估应力集中和平均应力对 TC18 棒材疲劳强度的综合影响, 本研究在 Goodman、Soderberg relation 和 Gerber parabola 模型的基础上参照文献[21]中的公式建立了一个新的模型, 见式(6)。

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_{a,-1}} = 1 + \frac{A\sigma_m^2 + A_m\sigma_m}{\sigma_{a,-1}} \quad (6)$$

式中: A 为应力集中敏感因子, 反映了应力集中系数 K_t 对应力幅 σ_a 的影响程度; A_m 为平均应力敏感因子, 反映了平均应力 σ_m 对应力幅 σ_a 的影响程度。

通过式(6)得到的 TC18 棒材在应力比 $R=0.5$ 时的疲劳强度见表 7。比较表 3 和表 5 可以看出, 通过式(6)建立起的应力幅与平均应力之间的关系与实验数据符合较好。

图 6 所示为式(1)、式(2)、式(3)和式(6)在不同应力集中系数下 TC18 棒材的疲劳强度曲线, 其中图 6(a)为 $K_t=1$ 时的曲线, 图 6(b)为 $K_t=3$ 时的曲线, 图 6(c)为 $K_t=5$ 时的曲线。由图 6 可以看出, 在 $K_t=1$ 时, 式(6)和式(3)的函数曲线较为接近; 在 $K_t=3$ 时, 式(6)的函数曲线在 $\sigma_m \in [0, 500]$ 区间上是介于式(1)、式(2)和式(3)的函数曲线之间的; 在 $K_t=5$ 时, 式(6)的函数曲线在 $\sigma_m \in [0, 200]$ 区间上是介于式(1)、式(2)和式(3)的函数曲线之间的。这些结论与实验数据是吻合的, 例如, 在 $K_t=1$ 时, 通过式(6)和式(3)得到的 TC18 棒材在应力比 $R=0.5$ 时的疲劳强度相差不大; 在 $K_t=3$ 时, TC18 棒材在应力比 $R=0.5$ 时的平均应力 $\sigma_m=345$ MPa $\in [0, 500]$, 因而, 此时通过式(6)得到的疲劳强度与实验数据更为接近; 在 $K_t=5$ 时, TC18 棒材在应力比 $R=0.5$ 时的平均应力 $\sigma_m=150$ MPa $\in [0, 200]$, 因而, 此时通过式(6)得到的疲劳强度更接近实验数据。

综上所述可知, 本文建立的新模型与实验数据是吻合的。

表 5 通过式(6)得到的在应力比 $R=0.5$ 时 TC18 棒材的疲劳强度

K_t	Fatigue strength/MPa
1	228.5
3	115.1
5	50.1

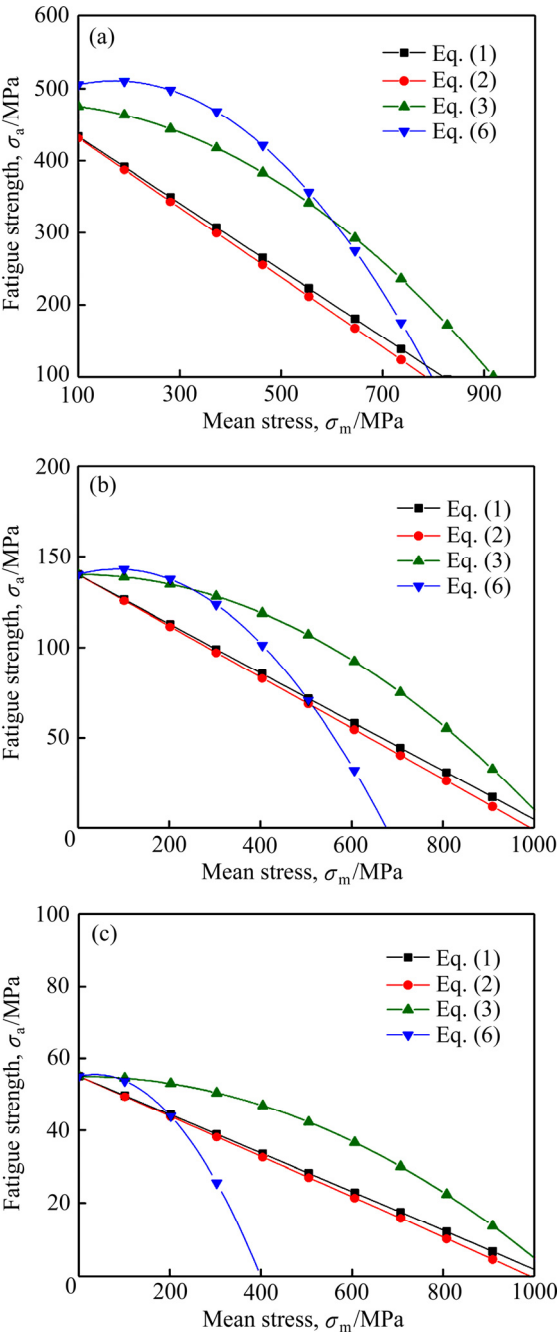


图 6 式(1)、式(2)、式(3)和式(6)在不同应力集中系数下 TC18 棒材的疲劳强度曲线

Fig. 6 Fatigue strength curves of Eqs. (1), (2), (3) and (6) under different stress concentration factors: (a) $K_t=1$; (b) $K_t=3$; (c) $K_t=5$

3 结论

- 1) TC18 棒材的应力幅 σ_a 随应力集中系数和应力比的增大而减小, 但其最大应力 σ_{max} 随应力比的增大而增大。
- 2) 缺口(应力集中)和平均应力对疲劳强度的影响可分别用应力集中敏感因子 A 和平均应力敏感因子 A_m 来衡量, 且 A 和 A_m 的数值大小体现了它们对疲劳强度的影响程度。
- 3) 建立了一种能反映应力集中和平均应力对 TC18 棒材疲劳强度综合影响的模型, 并且通过新模型得到的数据与实验结果吻合较好。

REFERENCES

[1] 韩 栋, 张鹏省, 毛小南, 卢亚锋, 奚正平, 杨建朝. BT22 钛合金及其大型锻件的研究进展[J]. 材料导报, 2010, 24(3): 46-50.

HAN Dong, ZHANG Peng-sheng, MAO Xiao-nan, LU Ya-feng, XI Zheng-ping, YANG Jian-zhao. Research progress of BT22 titanium alloy and its large forgings[J]. Materials Review, 2010, 24(3): 46-50.

[2] 黄张洪, 曲恒磊, 邓 超, 杨建朝. 航空用钛及钛合金的发展及应用[J]. 材料导报, 2011, 25(1): 102-107.

HUANG Zhang-hong, QU Heng-lei, DENG Chao, YANG Jian-zhao. Development and application of aerial titanium and its alloys[J]. Materials Review, 2011, 25(1): 102-107.

[3] 曹春晓. 钛合金在大型运输机上的应用[J]. 稀有金属快报, 2006, 25(1): 17-21.

CAO Chun-xiao. Applications of titanium alloys on large transporter[J]. Rare Metals Letters, 2006, 25(1): 17-21.

[4] BOYER R R, BRIGGS R D. The use of β titanium alloys in the aerospace industry[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2005, 14(6): 681-685.

[5] HTOO A T, MIYASHITA Y, OTSUKA Y, MUTOH Y, SAKURAI S. Notch fatigue behavior of Ti-6Al-4V alloy in transition region between low and high cycle fatigue[J]. International Journal of Fatigue, 2017, 95: 194-203.

[6] PLUVINAGE G. Notch effects in fatigue and fracture[J]. Nano Science, 2011, 138(4587): 1-22.

[7] MCEVILY A J, ENDO M, YAMASHITA K, ISHIHARA S, MATSUNAGA H. Fatigue notch sensitivity and the notch size effect[J]. International Journal of Fatigue 2008, 30: 2087-2093.

[8] MORTAZAVIAN S, FATEMI A. Effects of mean stress and stress concentration on fatigue behavior of short fiber reinforced

- polymer composites[J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2016, 39(2): 149–166.
- [9] 田 伟, 伏 宇, 钟 燕, 李祚军, 曾卫东, 张赛飞, 赵 伟. 缺口对 TC17 钛合金拉伸性能和低周疲劳性能的影响[J]. *材料热处理学报*, 2016, 37(11): 68–72.
- TIAN Wei, FU Yu, ZHONG Yan, LI Zuo-jun, ZENG Wei-dong, ZHANG Sai-fei, ZHAO Wei. Effects of notches on tensile properties and low cycle fatigue properties of TC17 titanium alloy[J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2016, 37(11): 68–72.
- [10] 袁永壮, 谷 曼. 缺口几何尺寸对钢材疲劳强度的影响[J]. *材料热处理学报*, 2015, 36(2): 237–240.
- YUAN Yong-zhuang, GU Man. Influence of notch geometric size on fatigue strength of steel[J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2015, 36(2): 237–240.
- [11] 闫桂玲, 王 弘, 康国政, 董轩成. 缺口应力集中对 5083-H111 铝合金超高周疲劳性能的影响[J]. *西南交通大学学报*, 2016, 51(5): 944–950.
- YAN Gui-ling, WANG Hong, KANG Guo-zheng, DONG Xuan-cheng. Influence of notch stress concentration on fatigue properties of 5083-H111 aluminum alloy in very high cycle regime[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2016, 51(5): 944–950.
- [12] RAJPUROHIT R S, SUDHAKAR RAO G, CHATTOPADHYAY K, SANTHI SRINIVAS N C, SINGH V. Ratcheting fatigue behavior of zircaloy-2 at room temperature[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2016, 477: 67–76.
- [13] YUAN X Y, YU W W, FU S C, YU D J, CHEN X. Effect of mean stress and ratcheting strain on the low cycle fatigue behavior of a wrought 316LN stainless steel[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2016, 677: 193–202.
- [14] KOVACS S, BECK T, SINGHEISER L. Influence of mean stresses on fatigue life and damage of a turbine blade steel in the VHCF-regime[J]. *International Journal of Fatigue*, 2013, 49: 90–99.
- [15] OBERWINKLER B. On the anomalous mean stress sensitivity of Ti-6Al-4V and its consideration in high cycle fatigue lifetime analysis[J]. *International Journal of Fatigue*, 2016, 92: 368–381.
- [16] ADACHI S, WAGNER L, LÜTJERING G. Influence of mean stress on fatigue strength of Ti-6Al-4V[J]. *Strength of Metals & Alloys*, 1986, 3: 2117–2122.
- [17] SARKAR S, KUMAR C S, NATH A K. Effect of mean stresses on mode of failures and fatigue life of selective laser melted stainless steel[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2017, 700: 92–106.
- [18] 蔡晓静, 许金泉. 各种平均应力下高周疲劳极限间的定量关系[J]. *工程力学*, 2015, 32(10): 25–30.
- CAI Xiao-jing, XU Jin-quan. A quantitative relationship of high cycle fatigue limit with mean stresses[J]. *Engineering Mechanics*, 2015, 32(10): 25–30.
- [19] MIKADO H, ISHIHARA S, OGUMA N, MASUDA K, KITAGAWA S, KAWAMURA S. Effect of stress ratio on fatigue lifetime and crack growth behavior of WC-Co cemented carbide[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2014, 24(S1): s14–s19.
- [20] LIU X L, SUN C Q, HONG Y S. Effects of stress ratio on high-cycle and very-high-cycle fatigue behavior of a Ti-6Al-4V alloy[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2015, 622: 228–235.
- [21] GAO Y K. Fatigue stress concentration sensitivity and stress ratio effect of a 40CrNi2Si2MoVA steel[J]. *Materials Letters*, 2017, 186: 235–238.
- [22] SCHÜTZ W. The relationship between the lifetime of constant and variable strain amplitudes and their applicability to aircraft component design[J]. *Journal of Flight Science*, 1967, 15(11): 407–419.

Effect of notch and mean stress on fatigue strength of TC18 alloy bars

ZHANG Le, LIU Ying-ying, SUN Yu-xing, XUE Xi-hao

(School of Metallurgical Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: Under different stress concentration factors K_t and stress ratios R , the effects of notch (stress concentration) and mean stress on fatigue strength of TC18 bars were analyzed. The results show that the stress amplitude σ_a of TC18 bars decreases with the increase of stress concentration factor and stress ratio, but the maximum stress $\sigma_{\max}$ increases with the increase of stress ratio. TC18 bars have great sensitivity of stress concentration effect and mean stress effect on fatigue properties. And, its effects on fatigue strength can be characterized by stress concentration sensitivity factor A and mean stress sensitivity factor A_m , respectively. In order to evaluate the comprehensive effect of stress concentration and mean stress on fatigue strength of TC18 bars, a new model is established, and the data obtained by the new model agree well with the experimental results.

Key words: TC18 alloy; fatigue strength; stress concentration; mean stress

Foundation item: Project(2016KW-054) supported by Shaanxi International Cooperation and Exchange Project, China

Received date: 2017-08-24; **Accepted date:** 2018-03-29

Corresponding author: LIU Ying-ying; Tel: +86-29-82205097; E-mail: wflly7779@163.com

(编辑 李艳红)