

可靠性设计中材料屈服极限的最佳选择

北京航空航天大学
株洲航空动力机械研究所
中国南山开发股份有限公司

古 远** 洪其麟
张跃春
李树良

【摘要】 根据航空发动机结构完整性大纲, 对于断裂关键件必须进行损伤容限设计分析。由于材料缺陷, 加工缺陷或疲劳引起裂纹的扩展, 都会导致构件断裂, 为此要求在有缺陷(裂纹)的情况下, 构件应能保持足够的损伤容限, 这主要靠正确选用材料, 控制应力水平, 采用抗断裂结构, 控制加工精度及采用可靠的检查方法来实现。

主题词: 可靠性设计 损伤 屈服极限

分类号: V215.7 V215.6

1 计算模型

大量试验证明, 不同材料的平面应变断裂韧性 K_{IC} 随其屈服强度 σ_y 的增高而线性降低, 如图 1^[1]所示, 可表示为:

$$K_{IC} = A - B\bar{\sigma} \quad (1)$$

式中 A 、 B 均为材料常数。如果 K_{IC} 的单位用 $\text{MPa}/\sqrt{\text{m}}$, σ 的单位用 MPa , 根据图 1 的试验数据可以得出图示 3 类材料的 A 、 B 值。对于钢材, $A = 178$; $B = 0.0798$, 对于钛合金, $A = 115.6$, $B = 0.0798$; 对于铝合金, $A = 70.46$, $B = 0.0798$ 。由(1)式可见, 在同类材料中, 提高屈服强度, 必然会降低其断裂强度。面对这种矛盾关系, 提出了如何选择最佳材料的问题。本文应用强度—应力干涉理论, 对含裂纹构件, 研究了使可靠度为最大值的选材问题。

根据损伤容限可靠性设计方法, 断裂强度均值 $\bar{\sigma}$ 可由下式给出:

$$\bar{\sigma} = K_{IC} / \sqrt{\pi a} \quad (2)$$

式中 $\bar{a}$ 为构件最大应力处的 I 型裂纹尺寸均值。将(1)式代入(2)得:

$$\bar{\sigma} = (A - B\bar{\sigma}) / \sqrt{\pi a} \quad (3)$$

如设构件强度 σ_s 、 σ_f 和应力 σ_w 均按正态分布, 则强度和应力均可用其均值和标准差表示:

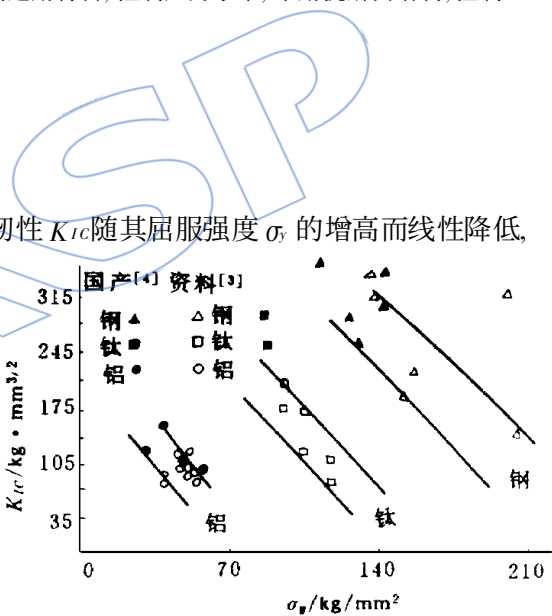


图 1 材料 K_{IC} 随 σ_y 的变化

$$\sigma_y = N(\bar{\sigma}_y, S_y) \quad , \quad \sigma_f = N(\bar{\sigma}_f, S_f) \quad , \quad \sigma_w = N(\bar{\sigma}_w, S_w) \quad (4)$$

为了计算方便,各标准差用相应的变异系数 V 表示:

$$S_y = V_y \bar{\sigma}_y \quad , \quad S_f = V_f \bar{\sigma}_f \quad , \quad S_w = V_w \bar{\sigma}_w \quad (5)$$

由于材料屈服为一稳定过程,而断裂常为一不稳定过程,更容易受局部因素影响,故在一般情况下, $V_f > V_y$ [2]。为便于讨论,本文设 $V_y = 0.1$, $V_f = 0.25$, $V_w = 0.2$ 。

为简化计算,本文假设构件只有屈服和断裂两种故障模式,而且该两种模式是同样重要的独立事件[3]。如用 R_y 和 R_f 分别表示构件抗屈服和抗断裂的可靠度,则构件的总可靠度 R 为

$$R = R_y R_f \quad (6)$$

式中 $R_y = P(\sigma_y > \sigma_w)$, $R_f = P(\sigma_f > \sigma_w)$ 。

2 计算结果

在指定工作应力均值 $\bar{\sigma}_w$ 和裂纹尺寸均值 $\bar{a}$ 条件下,设一系列屈服强度均值 $\bar{\sigma}_{yi}$, 可通过 (3)、(6) 式算出相应的 R_i 值,最后可画出 $R \sim \bar{\sigma}_y$ 曲线。如定义 $R = R_{\max}$ 时的 $\bar{\sigma}_y$ 等于最佳屈服强度均值 $(\bar{\sigma}_y)_{\text{opt}}$, 则可画出指定的 $\bar{\sigma}_w$ 值条件下的 $(\bar{\sigma}_y)_{\text{opt}} \sim \bar{a}$ 曲线以及在指定 $\bar{a}$ 值条件下,最佳屈服强度 $(\bar{\sigma}_y)_{\text{opt}}$ 随 $\bar{\sigma}_w$ 值的变化曲线。为便于计算,在讨论某一变异系数对可靠度的影响时,假设另两个变异系数不变均等于 0.2。

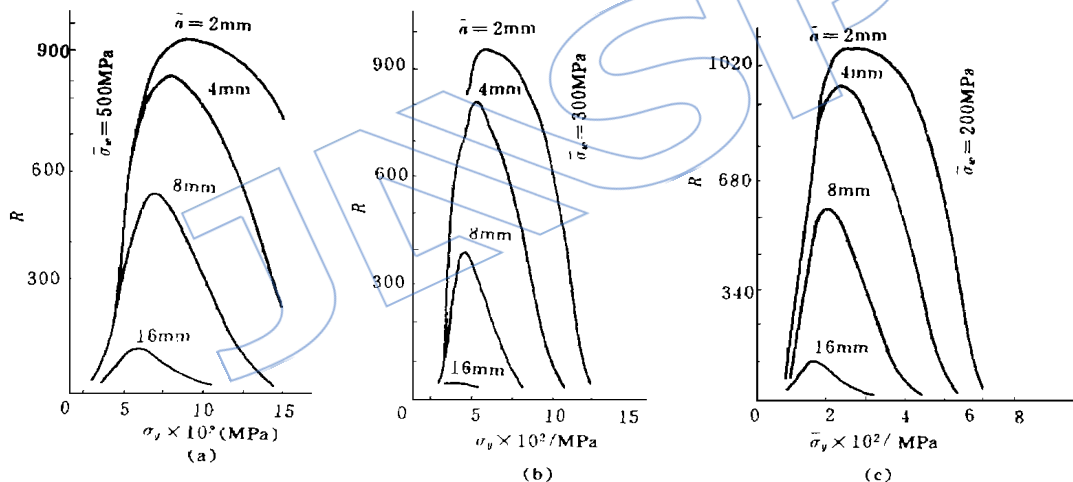


图 2 构件的 $R \sim \bar{\sigma}_y$ 曲线 ($V_w = 0.2$, $V_y = 0.1$, $V_f = 0.25$) (a) 钢材 (b) 钛合金 (c) 铝合金

从图 2 (a~c) 可见,在裂纹尺寸 $\bar{a}$ 和工作应力 $\bar{\sigma}_w$ 一定时,随着 $\bar{\sigma}_y$ 增加 R_y 增加,但 R_f 减小,致使 R 值随 $\bar{\sigma}_y$ 增加出现峰值 $R_{\max}$ 。当 $R < R_{\max}$ 时,随 $\bar{\sigma}_y$ 的增加, R_y 增长占优势,使 R 值向峰值增加。当 $\bar{\sigma}_y$ 增加到使 $R = R_{\max}$ 后,继续增加 $\bar{\sigma}_y$ 值,反而使 R 下降。因此,对于任一 $\bar{a}$ 和 $\bar{\sigma}_w$, 就能找到使 R 值最大的 $(\bar{\sigma}_y)_{\text{opt}}$ 值。根据该值,可以选用相适应的材料牌号或确定合适的热处理规范。当 $\bar{\sigma}_w$ 一定时,随 $\bar{a}$ 值增加, $R_{\max}$ 值逐渐减小,其相应的 $(\bar{\sigma}_y)_{\text{opt}}$ 值也逐渐减小。但对小裂纹尺寸从绝对值上看, $R_{\max}$ 减小得很慢 (图 3 (a~c))。这一特征表明,对研究增加裂纹检测灵敏度是否一定能大幅度提高可靠度提出了疑问,更何况提高无损检测灵敏度在实践中尚有一定困难。在 $\bar{a}$ 一定条件下,随 $\bar{\sigma}_w$ 的增加, $R_{\max}$ 减小,对应的 $(\bar{\sigma}_y)_{\text{opt}}$ 值却逐渐增加,但增加的趋势越来越平缓,如图 4 (a~c) 所示。其原因可能是,随 $\bar{\sigma}_y$ 值增加,尽管 R_y 值增加,但 R_f 值却减小。为保持 R 值最大,故 $(\bar{\sigma}_y)_{\text{opt}}$ 值不能随 $\bar{\sigma}_w$ 增加而增加过快。从图 5

(a~c) 可见, 在 3 个变异系数 V_f 、 V_y 、 V_w 中, 因 V_f 包含于材料断裂韧性和断裂裂纹尺寸

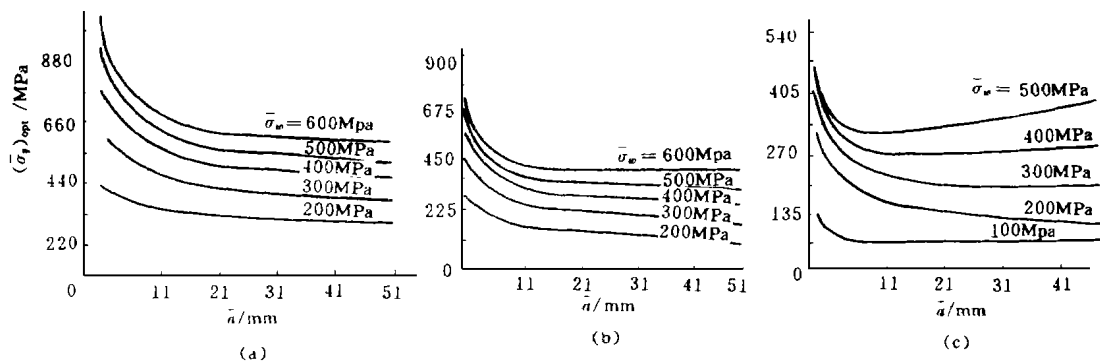


图 3 构件的 $(\sigma_y)_{opt} \sim \bar{a}$ 曲线 (a) 钢材 (b) 钛合金 (c) 铝合金

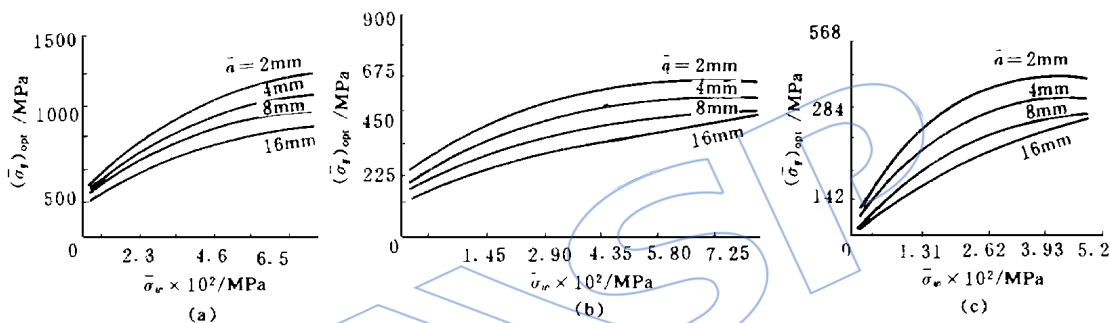


图 4 构件的 $(\sigma_y)_{opt} \sim \bar{\sigma}_w$ 曲线 ($V_w = 0.2$, $V_y = 0.1$, $V_f = 0.25$) (a) 钢材 (b) 钛合金 (c) 铝合金

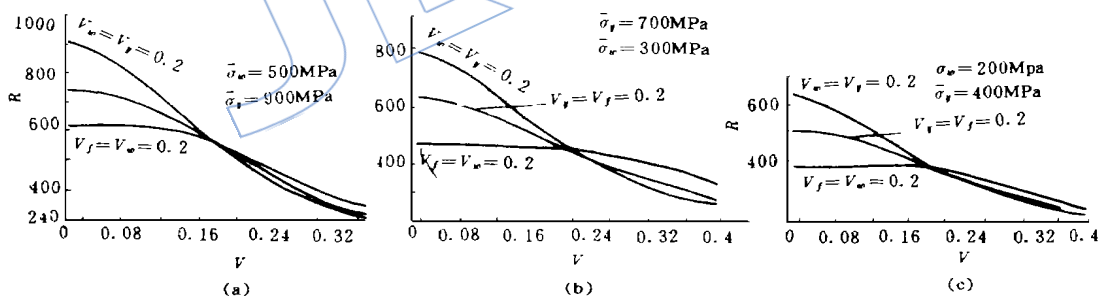


图 5 构件的 $R \sim V$ 曲线 ($\bar{a} = 8\text{mm}$) (a) 钢材 (b) 钛合金 (c) 铝合金

的分散性, 故对 R 影响最显著。因此, 控制材料断裂韧性和裂纹尺寸的分散性对提高结构可靠度具有重要意义。

参 考 文 献

- 1 航空工业部科技委编著. 飞机损伤容限设计指南. 北京: 科技情况研究所出版, 1985
- 2 Besaover P M, et al. Failure Analysis Associates 《Probabilistic Fracture Mechanics》. PB- 246255, 1975
- 3 Provan J W 主编, 《FFD》系统工程办公室译. 概率断裂力学和可靠性. 北京: 航空工业出版社, 1989

(责任编辑 王震华)

OPTIMIZATION OF MATERIALS YIELD LIMIT FOR RELIABILITY DESIGN

Gu Yuan and Hong Qilin

(4th Dept., Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)

Zang Yuedun (Aeroengine Institute 608 412002)

ABSTRACT

According to aeroengine structure integrity program, fracture critical components must be analysed with damage tolerance concept. Due to crack propagation produced by material defects, working defects or fatigue defects can make structure fracture. Therefore, the sufficient damage tolerance should be maintained. It is realized by selecting material correctly, controlling stress level, using the anti-fracture structures and reliable inspection. In this paper, the structural reliability concept is applied to studying optimization of materials for maximum reliability under certain stress levels and crack sizes, to investigating variation influences of material strength and stress level on structure reliability.

Key words Reliability design Damage Yield limit

OPTIMAL CONTROL OF STRUCTURAL DYNAMIC SYSTEM

Deng Zichen

(5th Dept., Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

ABSTRACT

A control mathematical model of the dynamic system is established according to the differential equation obtained from the structural dynamic system. Mixed-energy of time-interval is defined and condensation formulas are given with the help of the variational principle. Further the substructural condensation method in structural mechanics is used for the Riccati equation solution, based on the simulation relation between computational structural mechanics and optimal control. Then, the optimal control of the dynamic system is obtained. The numerical example shows the effectiveness of this method.

Key words Dynamic structural analysis Dynamical systems Optimal control

A $k-\epsilon-k_p-\epsilon_p$ TURBULENCE MODEL FOR GAS-SOLID TWO-PHASE FLOWS AND ITS APPLICATION

Wang Yunliang Xu Zhong, Miao Yongmiao

(Dept. of Power, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

ABSTRACT

Based on $k-\epsilon$ two-equation turbulence model of gaseous phase, the $k-\epsilon-k_p-\epsilon_p$ two-phase turbulence model is presented, which includes the turbulent kinematic energy equation of particulate phase and the dissipation rate equation of that energy. The numerical computations are made for the turbulent gas-solid two-phase flows in two vertical straight channels. The mean velocities and turbulence intensities of gaseous phase and particulate phase, which are predicted with the presented turbulence model, are in good agreement with the experimental results. And it is concluded, that the turbulence intensity of particulate phase is often greater than that of gaseous phase. This conclusion is consistent with available LDV experimental results. Since the algebraic model of particles has no ability to describe the characteristics, the presented turbulence model is very successful in predicting the flow characteristics of turbulent gas-solid two-phase flows.

Key words Two-phase systems Coupling Turbulence model