

各向同性钢材的断裂模型和屈服模型

王万祯

(宁波大学 建筑工程与环境学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 基于钢材断裂前必先屈服的基本事实, 以钢材断裂面为屈服面后继扩大直至材料完整性(连续性)发生破坏为假设, 以已有的屈服模型的共同特征为切入点, 建议了各向同性钢材在主应力空间的二次函数型断裂模型和屈服模型. 根据不同钢材的特征应力值, 量化了各向同性钢材的二次函数型断裂模型和屈服模型. 依据不同钢材的特征应力值的相互关系, 建议的各向同性钢材的二次函数型断裂模型和屈服模型相应地描述为主应力空间的圆柱面、椭球面、抛物面和双曲面. 建议的各向同性钢材的二次函数型断裂模型和屈服模型较已有的强度模型更具一般性.

关键词: 各向同性钢材; 断裂模型; 屈服模型; 特征应力; 主应力空间; 二次函数

中图分类号: O346.1; TG111.91 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-5132 (2013) 02-0068-05

钢材断裂是结构、桥梁、船舶、机械、航空航天、压力容器、压力管道、军工等领域普遍存在的共性问题. 在焊接结构取代铆接结构期间, 脆断频率一度增高, 非过载断裂事故时有发生.

一些关键部件的断裂导致飞机和飞行器坠毁或解体的事故屡有报道, 如 2003 年 2 月“哥伦比亚”号航天飞机返回途中解体等.

1977 年, 美国一座三跨连续焊接板桥梁, 刚完工还未交付使用时, 发生断裂倒塌. 一艘在船坞中试航的油轮突然断成两截, 船上的载重只有最大设计内力的一半^[1]. 在第二次世界大战中, 有 200 多艘焊接船舶发生断裂.

在 1994 年美国 Northridge 地震、1995 年日本 Kobe 地震和 1999 年中国台湾 921 大地震中, 钢框架梁柱节点发生了大量脆断, 显示出现行设计规范的不尽合理, 反映了人们对建筑钢材断裂机理认识不足及对断裂预防困惑的现状.

我国《钢结构设计规范》^[2]虽然增加了“提高寒冷地区结构抗脆断能力的要求”的内容, 但对结构钢的断裂防治没有量化公式, 仅给出了寒冷地区预防钢材脆断的构造建议.

钢材脆断是最令人头疼的一种灾变行为. 钢

材脆断时, 结构并未超载, 几乎观察不到构件的塑性发展过程, 传统的强度计算解决不了这一问题^[1].

断裂力学对钢材裂纹体断裂给出了较合理的解释, 断裂力学中的断裂模型, 如应力强度因子 K_{IC} 、裂纹张开位移理论(COD 理论)和 J 积分等, 都要引入初始裂纹尺寸. 但初始裂纹并非断裂的必要条件, 断裂力学在求解钢材无裂纹体断裂时陷入了困境.

若把初始裂纹看作几何边界, 则钢材裂纹体和无裂纹体的断裂机理并无力学上的本质区别, 裂纹体和无裂纹体的断裂模型存在统一解的可能.

文献[3-6]分别建议了钢材的应变型断裂模型, 但均是对试验数据拟合回归得到的, 物理概念不清晰. 汤安民等^[7]建议了拉断型和剪断型断裂模型, Chen 等^[8]提出了裂纹试样解理断裂模型.

若把断裂看作相对于屈服的另一种强度破坏模式, 则断裂模型(断裂破坏面)应具有强度破坏面的一般特征, 即断裂破坏面应是连续、光滑和外凸的. 文献[7-8]建议的断裂模型不具有上述一般特征.

王万祯^[9]以铝合金在三轴等拉伸应力状态下屈服和断裂的重合性为保守假设, 建议了椭球面断裂模型.

需要指出的是, 完全或绝对意义上的弹性断裂是不大可能发生的, 因弹性被定义为卸载后能恢复到初始未变形状态的特性, 则弹性断裂意味着卸载后能恢复到初始未破损状态, 这一推论显然是不可信的. 断裂过程必须满足热力学条件, 是一种不可逆的材料破坏过程. 断裂力学亦从弹性断裂力学发展到塑性断裂力学, 抛弃了弹性断裂的假定. 从工程角度看, 把残余变形较小的断裂模式定义为脆性断裂是合适的.

试验显示^[10], 稀薄空气中发生脆断的钢切口截面, 在伦琴射线也发现有明显的屈服滑移痕迹. 可见, 钢材断裂前必先屈服, 钢材断裂可看作屈服后继扩大直至材料完整性(连续性)发生破坏的一种行为. 笔者以探讨钢材的屈服模型为切入点, 构建钢材的断裂模型.

1 拉、压强度相等的各向同性钢材的屈服模型

Mises 屈服模型(主应力空间的圆柱面)是目前钢材分析中应用较广的屈服模型, 其表达式为:

$$\sigma_{seq} = \sqrt{1/2[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} = k. \quad (1)$$

Mises 屈服模型预测钢材双向等拉伸屈服强度和单向拉伸屈服强度相等, 但是试验并不证实该点^[10]. Mises 圆柱面屈服模型是由不很大的静水压力试验结果近似无限外推所得, 而反向无限外推至静水拉力区则缺乏试验支持. 不少试验表明^[11], 平均应力对许多材料的屈服极限和塑性性能有明显的影响.

Drucker 和 Prager 建议的广义 Mises 屈服模型为主应力空间的圆锥面, 其表达式为:

$$\sqrt{J_2} - \alpha I_1 - k = 0. \quad (2)$$

俞茂宏^[11]提出的双剪强度模型为主应力空间的棱柱面, 其表达式为:

当 $\tau_{12} \geq \tau_{23}$ 时,

$$F(\tau_{12}, \tau_{13}) = 1/2 [\sigma_1 - 1/2(\sigma_2 + \sigma_3)] = k, \quad (3)$$

当 $\tau_{12} < \tau_{23}$ 时,

$$F(\tau_{13}, \tau_{23}) = 1/2 [1/2(\sigma_1 + \sigma_2) - \sigma_3] = k, \quad (4)$$

(2)~(4)式建议的屈服模型在主应力空间有尖角(不可导), 不满足钢材强度破坏面光滑的特征.

王万祯^[9]建议的铝合金椭球面屈服模型为:

$$\sigma_{seq}^2 + (\sigma_m / q)^2 = 3\tau_y^2. \quad (5)$$

由上可见, 钢材的屈服模型多采用主应力空间 $(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$ 的二次函数曲面, 笔者亦假定钢材的屈服模型为主应力空间的二次函数曲面.

主应力空间二次函数型曲面的通用表达式为:

$$a_1\sigma_1^2 + a_2\sigma_2^2 + a_3\sigma_3^2 + b_1\sigma_1\sigma_2 + b_2\sigma_2\sigma_3 + b_3\sigma_3\sigma_1 + c_1\sigma_1 + c_2\sigma_2 + c_3\sigma_3 + d_0 = 0. \quad (6)$$

某些钢材(如结构钢)的拉、压屈服强度近似相等且表现了较好的各向同性, 为简化分析, 该类钢材可看作拉、压屈服强度相等的各向同性材料.

对于各向同性材料, 主应力 σ_1, σ_2 和 σ_3 在屈服面中的权重和位置是对等的, 即 σ_1, σ_2 和 σ_3 对调或轮换不改变屈服模型的外形, 则(6)式中必有 $a_1 = a_2 = a_3, b_1 = b_2 = b_3$ 和 $c_1 = c_2 = c_3$.

对于拉、压屈服强度近似相等的材料, 单向拉伸屈服强度和单向压缩屈服强度同时满足屈服模型, (6)式中必有 $c_1 = c_2 = c_3 = 0$. 则拉、压强度相等的各向同性钢材的屈服模型(公式(6))可简化为:

$$a_1(\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2) + b_1(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1) + d_0 = 0. \quad (7)$$

令 $b = b_1 / a_1, d = d_0 / a_1$, (7)式变形为:

$$(\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2) + b(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1) + d = 0, \quad (8)$$

(8)式中待定参数 b, d 可由钢材的单向拉伸屈服强度和双向等拉伸屈服强度量化.

(1) 单向拉伸屈服时, $\sigma_1 = f_y > 0, \sigma_2 = \sigma_3 = 0$, 解得 $d = -f_y^2$.

(2) 双向等拉伸屈服时, $\sigma_1 = \sigma_2 = f_{yy} > 0$ (定义 f_{yy} 为双向等拉伸屈服强度), $\sigma_3 = 0$, 解得: $b = (f_y^2 / f_{yy}^2) - 2$. 则拉、压强度相等的各向同性钢材的屈服模型量化为:

$$(\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2) + (f_y^2 / f_{yy}^2 - 2)(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1) - f_y^2 = 0. \quad (9)$$

将(9)式变形为(10)式的形式:

$$[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] + f(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)^2 + g = 0, \quad (10)$$

将公式(10)展开, 得:

$$(\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2) + (2f - 2) / (f + 2)(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1) + g / (f + 2) = 0. \quad (11)$$

令(9)式与(11)式等价, 解得:

$$\frac{f_y^2}{f_{yy}^2} - 2 = \frac{2f - 2}{f + 2}, \text{ 则 } f = \frac{2f_y^2 - 2f_{yy}^2}{4f_{yy}^2 - f_y^2}.$$

当 $f = (2f_y^2 - 2f_{yy}^2) / (4f_{yy}^2 - f_y^2) = 0$ 时, 即 $f_y = f_{yy}$ 时, (10)式即(9)式, 描述的是主应力空间的圆柱面(Mises 屈服模型).

当 $f = (2f_y^2 - 2f_{yy}^2) / (4f_{yy}^2 - f_y^2) > 0$ 时, 即 $f_{yy} < f_y < 2f_{yy}$ 时, (10)式即(9)式, 描述的是主应力空间的椭球面, 类似于(5)式建议的椭球面.

当 $f = (2f_y^2 - 2f_{yy}^2) / (4f_{yy}^2 - f_y^2) < 0$ 时, 即 $f_y < f_{yy}$ 或 $f_y > 2f_{yy}$ 时, (10)式即(9)式, 描述的是主应力空间的双曲面.

2 拉、压强度相等的各向同性钢材的断裂模型

如前述, 钢材断裂可看作屈服后继扩大直至材料完整性(连续性)发生破坏的一种行为, 因此, 钢材断裂模型定性地采用和屈服模型相同的函数类型较为合理. 笔者假定钢材断裂模型亦为主应力空间的二次函数曲面, 主应力空间二次函数型曲面的通用表达式亦为公式(6).

对于拉、压屈服强度近似相等的各向同性钢材, 经与文中第 1 节相似的推导, 得到公式(12)所示的断裂模型:

$$(\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2) + j(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1) + k = 0, \quad (12)$$

式中, 待定参数 j, k 可由钢材的单向拉伸断裂强度和双向等拉伸断裂强度量化.

(1) 单向拉伸断裂时, $\sigma_1 = f_f > 0$ (f_f 为钢材的单向拉伸断裂强度), $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$, 解得: $k = -f_f^2$.

(2) 双向等拉伸断裂时, $\sigma_1 = \sigma_2 = f_{ff} > 0$ (f_{ff} 为钢材的双向等拉伸断裂强度), $\sigma_3 = 0$, 解得: $j = (f_f^2 / f_{ff}^2) - 2$. 则拉、压强度相等的各向同性钢材的断裂模型量化为:

$$(\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2) + ((f_f^2 / f_{ff}^2) - 2)(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1) - f_f^2 = 0. \quad (13)$$

经和第 1 节类似的推导, 可得如下推论:

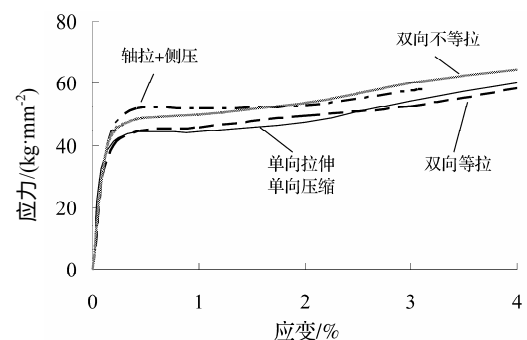
当 $f_f = f_{ff}$ 时, (13)式描述的是主应力空间的圆柱面, 相当于 Mises 屈服模型的扩大圆柱面.

当 $f_{ff} < f_f < 2f_{ff}$ 时, (13)式描述的是主应力空间的椭球面, 类似于文献[9]建议的铝合金椭球面断裂模型, 但放弃了钢材在三轴等拉伸应力状态下断裂和屈服重合性的保守假设, 更具一般性.

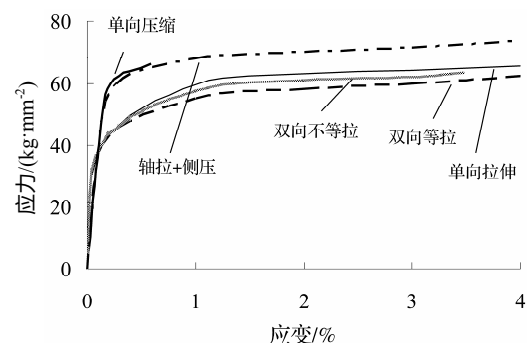
当 $f_f < f_{ff}$ 或 $f_f > 2f_{ff}$ 时, (13)式描述的是主应力空间的双曲面.

3 拉、压强度不等的各向同性钢材的断裂模型和屈服模型

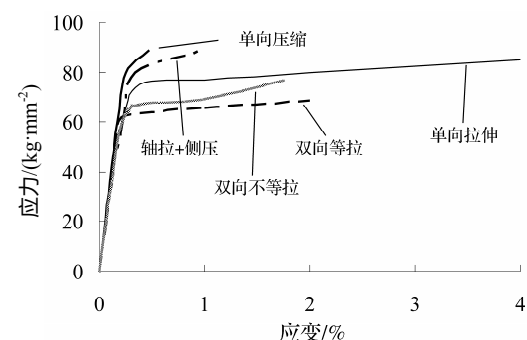
文献[10-11]的研究表明, 航空航天工业广泛使用的高强度不锈钢(如美国航空工业用钢 4330 钢)、某些高碳钢和中碳钢(如前苏联 Y12 钢)、高强度合金钢、特种钢和铸铁等, 其单向压缩屈服强度和单向压缩极限强度分别高于单向拉伸屈服强度和单向拉伸断裂强度, 且随着温度的降低, 其拉、压强度差效应愈加显著, 如图 1 所示.



(a) 温度 $T = -50\text{ }^{\circ}\text{C}$



(b) 温度 $T = -100\text{ }^{\circ}\text{C}$



(c) 温度 $T = -150\text{ }^{\circ}\text{C}$

图 1 碳钢的真应力—真应变曲线^[10]

图 1 所示的碳钢的真应力—真应变曲线显示了如下规律: 单向拉伸曲线高于双向等拉伸曲线, 且单向拉伸屈服强度和断裂强度均不超过双向等拉伸相应值的 2 倍; 单向拉伸曲线低于单向压缩曲

线和轴拉+侧压应力曲线.

上述钢材可看作拉、压强度不等的各向同性材料, 其屈服模型和断裂模型亦可假设为主应力空间的二次函数曲面, 即(6)式.

因其为各向同性材料, (6)式中有: $a_1 = a_2 = a_3$, $b_1 = b_2 = b_3$ 和 $c_1 = c_2 = c_3$. 可得拉、压强度不等的各向同性钢材的屈服模型为:

$$a_1(\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2) + b_1(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1) + c_1(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) + d_0 = 0. \quad (14)$$

令 $b = b_1/a_1$, $c = c_1/a_1$, $d = d_1/a_1$, (14)式改写为:

$$(\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2) + b(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1) + c(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) + d = 0, \quad (15)$$

式中, 3 个待定参数可以由单向拉伸屈服强度 ($f_{ty} > 0$), 单向压缩屈服强度 ($f_{cy} < 0$) 和双向等拉伸屈服强度 ($f_{tby} > 0$) 试验值量化.

(1) 单向拉伸屈服时, $\sigma_1 = f_{ty}$, $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$, 解得:

$$f_{ty}^2 + cf_{ty} + d = 0. \quad (16)$$

(2) 单向压缩屈服时, $\sigma_1 = \sigma_2 = 0$, $\sigma_3 = f_{cy}$, 解得:

$$f_{cy}^2 + cf_{cy} + d = 0. \quad (17)$$

(3) 双向等拉伸屈服时, $\sigma_1 = \sigma_2 = f_{tby}$, $\sigma_3 = 0$, 解得:

$$(b+2)f_{tby}^2 + 2cf_{tby} + d = 0. \quad (18)$$

联合(16)~(18)式, 解得:

$$b = \frac{2f_{tby}(f_{cy} + f_{ty} - f_{tby}) - f_{cy}f_{ty}}{f_{tby}^2},$$

$$c = -(f_{cy} + f_{ty}), \quad d = f_{cy} \cdot f_{ty},$$

则拉、压强度不等的各向同性钢材的屈服模型量化为:

$$\begin{aligned} & \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + (2f_{tby}(f_{cy} + f_{ty} - f_{tby}) - f_{cy}f_{ty})/f_{tby}^2 \cdot \\ & (\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1) - (f_{cy} + f_{ty}) \cdot \\ & (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) + f_{cy}f_{ty} = 0. \end{aligned} \quad (19)$$

将(19)式变形为(20)式的形式.

$$[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] + l(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)^2 + m(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) + n = 0, \quad (20)$$

将公式(20)展开, 并令其与公式(19)等价, 解得:

$$l = \frac{4f_{tby}(f_{cy} + f_{ty}) - 2f_{cy}f_{ty} - 2f_{tby}^2}{4f_{tby}^2 - 2f_{tby}(f_{cy} + f_{ty}) + f_{cy}f_{ty}},$$

$$m = \frac{-6f_{tby}^2(f_{cy} + f_{ty})}{4f_{tby}^2 - 2f_{tby}(f_{cy} + f_{ty}) + f_{cy}f_{ty}},$$

$$n = \frac{6f_{tby}^2f_{cy}f_{ty}}{4f_{tby}^2 - 2f_{tby}(f_{cy} + f_{ty}) + f_{cy}f_{ty}}.$$

图1所示的碳钢试验结果中有:

$f_{tby} < f_{ty} < -f_{cy} < 2f_{tby}$, 则

$$4f_{tby}^2 - 2f_{tby}(f_{cy} + f_{ty}) + f_{cy}f_{ty} = (2f_{tby} - f_{cy})(2f_{tby} - f_{ty}) > 0.$$

当 $l = \frac{4f_{tby}(f_{cy} + f_{ty}) - 2f_{cy}f_{ty} - 2f_{tby}^2}{4f_{tby}^2 - 2f_{tby}(f_{cy} + f_{ty}) + f_{cy}f_{ty}} = 0$ 时, 即

$2f_{tby}(f_{cy} + f_{ty}) - f_{cy}f_{ty} - f_{tby}^2 = 0$ 时, (19)式描述的是主应力空间的抛物面.

当 $l = \frac{4f_{tby}(f_{cy} + f_{ty}) - 2f_{cy}f_{ty} - 2f_{tby}^2}{4f_{tby}^2 - 2f_{tby}(f_{cy} + f_{ty}) + f_{cy}f_{ty}} > 0$ 时, 即

$2f_{tby}(f_{cy} + f_{ty}) - f_{cy}f_{ty} - f_{tby}^2 > 0$ 时, (19)式描述的是主应力空间的椭球面.

当 $l = \frac{4f_{tby}(f_{cy} + f_{ty}) - 2f_{cy}f_{ty} - 2f_{tby}^2}{4f_{tby}^2 - 2f_{tby}(f_{cy} + f_{ty}) + f_{cy}f_{ty}} < 0$ 时, 即

$2f_{tby}(f_{cy} + f_{ty}) - f_{cy}f_{ty} - f_{tby}^2 < 0$ 时, (19)式描述的是主应力空间的双曲面.

同理推知, 拉、压强度不等的各向同性钢材的断裂模型亦为(15)式的形式, 3 个待定参数由单向拉伸断裂强度 ($f_{tf} > 0$), 单向压缩极限强度 ($f_{cu} < 0$) 和双向等拉伸断裂强度 ($f_{tff} > 0$) 试验值量化后, 得拉、压强度不等的各向同性钢材的断裂模型为:

$$\begin{aligned} & \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + (2f_{tff}(f_{cu} + f_{tf} - f_{tff}) - f_{cu}f_{tf})/f_{tff}^2 \cdot \\ & (\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1) - (f_{cu} + f_{tf})(\sigma_1 + \\ & \sigma_2 + \sigma_3) + f_{cu}f_{tf} = 0, \end{aligned} \quad (21)$$

(21)式建议的断裂模型在主应力空间的曲面性质和(19)式所示的屈服模型相似, 描述如下:

当 $2f_{tff}(f_{cu} + f_{tf}) - f_{cu}f_{tf} - f_{tff}^2 = 0$ 时, (21)式描述的是主应力空间的抛物面.

当 $2f_{tff}(f_{cu} + f_{tf}) - f_{cu}f_{tf} - f_{tff}^2 > 0$ 时, (21)式描述的是主应力空间的椭球面.

当 $2f_{tff}(f_{cu} + f_{tf}) - f_{cu}f_{tf} - f_{tff}^2 < 0$ 时, (21)式描述的是主应力空间的双曲面.

不难看出, 当 $f_{ty} = -f_{cy} = f_y$, $f_{tby} = f_{yy}$ 和 $f_{tf} = -f_{cu} = f_f$, $f_{tff} = f_{ff}$ 时, (19)式建议的屈服模型和(21)式建议的断裂模型分别退化为(9)式和(13)式.

4 结语

笔者认为钢材断裂前必先屈服(否定了钢材弹性断裂的观点), 钢材裂纹体和无裂纹体的断裂模型存在统一解的可能.

以钢材断裂面为屈服面后继扩大直至材料完整性(连续性)发生破坏为假设前提, 建议了各向同性钢材在主应力空间的二次函数型断裂模型和屈服模型. 依据不同钢材的特征应力值的相互关系, 建议的各向同性钢材的二次函数型断裂模型和屈服模型相应地描述为主应力空间的圆柱面、椭球面、抛物面和双曲面. 建议的各向同性钢材的二次函数型断裂模型和屈服模型包含了已有的强度模型, 更具一般性.

参考文献:

- [1] 陈绍蕃. 钢结构设计原理[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [2] GB 50017-2003, 钢结构设计规范[S].
- [3] Hancock J W, MacKenzie A C. On the mechanisms of ductile failure in high-strength steel subjected to multi-axial stress-states[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1976, 24(3):147-169.
- [4] Bao Y. Dependence of ductile crack formation on stress triaxiality, stress and strain ratio in tensile tests[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2005, 72(4):505-522.
- [5] Bao Y. Dependence of fracture ductility on thickness[J]. *Thin-Walled Structures*, 2004, 42(8):1211-1230.
- [6] Wierzbicki T, Muragishi O. Calibration of ductile fracture from compression and tension tests[R]. MIT, Cambridge, MA: Report 21 Impact & Crashworthiness Laboratory, 1999.
- [7] 汤安民, 师俊平, 卢智先. 几种金属材料断裂条件的实验研究[J]. *力学季刊*, 2003, 24(4):517-521.
- [8] Chen J H, Wang G Z. Study of mechanism cleavage fractures at low temperature[J]. *Metallurgical Transactions*, 1992, 23A(2):509-517.
- [9] 王万祯. 铝合金宏观断裂准则[J]. *西安交通大学学报*, 2007, 41(5):616-620.
- [10] 皮萨林科 Г С, 列别捷夫 А А. 复杂应力状态下的材料变形与强度[M]. 江明行, 译. 北京: 科学出版社, 1983.
- [11] 俞茂宏. 双剪强度理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 1998.

Fracture-and-Yield Model of Isotropic Steels

WANG Wan-zhen

(Faculty of Architectural, Civil Engineering and Environment, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: Based on the fundamental fact that yield occurs prior to fracture in steel, and on the assumption that the fractured area can be accounted as the enlargement of yield surface until the integrity and the continuum of material fail, both the fracture model and yield model expressed with quadratic functions in the principal stress space are constructed for isotropic steels, in which the common features of the existing yield models are examined with great care. The proposed fracture model and yield model are quantified with characteristic stresses of steels of manifold types, which can be described using column surface, ellipsoidal surface, parabolic surface and hyperboloid in the principal stress space determined by the relations of characteristic stresses of steels. The presented models are more generalized and universalized than the existing yield models in that the latter is the special cases of the former.

Key words: isotropic steels; fracture model; yield model; characteristic stresses; principal stress space; quadratic function

(责任编辑 史小丽)