

铝合金宏观断裂准则

王万祯

(兰州理工大学土木工程学院, 730050, 兰州)

摘要: 为研究铝合金抗断设防, 借鉴金属静水应力型屈服概念, 给出了铝合金广义屈服椭球面的新诠释. 基于三向等拉伸应力状态下铝合金屈服和断裂的重合性假设, 导出了铝合金在三轴应力空间的椭球面断裂准则及参数量化方法, 并给出了铝合金抗断设防图及广义屈服椭球面的物理解释. 该断裂准则使铝合金在三轴应力空间的屈服和断裂两种破坏模式得到了统一, 具有物理概念清晰、形式简单、便于工程应用的特点. 铝合金开孔板断裂试验的数值模拟结果显示, 该断裂准则具有较高的精度.

关键词: 铝合金; 屈服; 断裂; 三轴应力空间

中图分类号: TG111.91; O346.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2007)05-0616-05

Macro Fracture Criterion of Aluminum Alloy

Wang Wanzhen

(School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: In order to investigate fracture design of aluminum alloy, a new annotation was given to the generalized yield ellipsoidal surface of aluminum alloy referring to the hydrostatic yield conception of metal. Based on the assumption of yield and fracture simultaneity of aluminum alloy in tri-axial mean pull stress field, the ellipsoidal surface fracture criterion and the corresponding parameter were deduced for aluminum alloy in three-dimensional stress space, then the fracture design frame of aluminum alloy and mechanics explanation of the generalized yield ellipsoidal surface were proposed. The fracture simulations of the aluminum alloy plates with circular hole show higher accuracy of the suggested fracture criterion, which enables to unify the yield and fracture criteria of aluminum alloy in three-dimensional stress space. This fracture criterion is convenient to use in engineering.

Keywords: aluminum alloy; yield; fracture; three-dimensional stress space

金属发生宏观脆断时结构并未超载, 且几乎观察不到塑性发展过程, 这种破坏后果是灾难性的, 传统的强度计算解决不了金属宏观脆断这一类特殊问题. 虽然人们运用现代损伤力学和断裂力学对金属微观断裂进行了大量的研究工作^[1-2], 但宏观上如何防止其脆断仍缺乏有效的对策. 将微观断裂机理和宏观经典力学联系起来制定简单有效的抗断设防理论, 不仅具有重要的理论意义, 更具有重大的工程价值.

1 铝合金广义屈服轨迹

在古典强度理论中, 第三和第四强度理论中的开口棱柱面和圆柱面, 是由不很大的静水压力试验结果近似无限外推所得, 而将不很大的静水压力试验结果反向无限外推至静水拉力区, 则缺乏理论基础和试验依据. 在力学发展史上, 仍有不少试验表明^[3]: 静水应力对许多材料的屈服极限和塑性性能有明显影响.

第三强度理论因没有考虑中间主应力的效应而存在明显缺陷,事实上,第三强度理论似乎很少被试验证实过^[4].文献[5]对铝和铜的试验确立了第四强度理论在金属屈服领域时至今日的统治地位,但这一状况也限制了人们对新屈服准则的研究和认识.要突破第四强度理论的概念和相应的屈服面范畴并建立新的屈服准则,是一个极具诱惑力而又异常困难的课题.

文献[6]建议的金属静水应力型广义屈服函数为

$$(\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2) - \frac{2\mu(2-\mu)}{1+2\mu^2}(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1) + (\sigma_c - \sigma_y)(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) = \sigma_c\sigma_y \quad (1)$$

式中: σ_c 、 σ_y 和 μ 分别为材料的抗压屈服强度、抗拉屈服强度和泊松比.当 $0 < \mu < 0.5$ 时,方程(1)确定的广义屈服面是以平均应力 σ_m 和等效应力 σ_{seq} 为主轴的旋转椭球面,对于各向同性铝合金材料,其等效于方程(2)确定的广义屈服椭球面

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

由方程(2)可得:等效剪切屈服强度 $3^{1/2}\tau_y = \frac{(1+9q^2)^{1/2}}{3q}\sigma_y$,三向等拉伸屈服强度 $\sigma_{y,tt} = q3^{1/2}\tau_y = \frac{(1+9q^2)^{1/2}}{3}\sigma_y$.由方程(1)解得各向同性铝合金材料的三向等拉伸屈服强度 $\sigma_{y,tt} = \frac{(1+2\mu^2)^{1/2}}{3^{1/2}(1-2\mu)}\sigma_y$.对比三向等拉伸屈服强度,可解得方程(2)中的参数 $q = \frac{2^{1/2}(1+\mu)}{3(1-2\mu)}$.

2 铝合金宏观断裂准则

断裂力学作为现代固体力学的一个重要分支,对金属断裂给出了更合理的解释,但其中的断裂准则都要引入初始裂纹尺寸 a ,这使得断裂力学在分析无初始裂纹试件的断裂时受到限制.

将断裂看作铝合金的另一种破坏模式,则断裂面应具有连续、光滑和外凸特征.考虑到铝合金断裂和屈服是两个紧密联系的破坏过程^[7],屈服面和断裂面定性地采用相同的函数类型则更为合理.参照铝合金广义屈服面的函数类型,断裂准则可采用以 σ_m 和 σ_{seq} 为主轴的椭球面,这是满足上述特征的最简单的曲面之一.

根据现代损伤力学^[8]的观点,金属断裂延性随应力三轴比率 σ_m/σ_{seq} 的增加而降低,高三轴比率使材料变脆.可以预见,对于 $\sigma_m/\sigma_{seq} \approx \infty$ 的三向等拉伸

状态,铝合金断裂延性最低,而屈服和断裂同时发生的理想脆断是断裂延性的下限.因此,本文有理由假定铝合金在三轴等拉伸应力状态下趋于理想脆断,即屈服和断裂重合.

铝合金的断裂面和屈服面为相切于三向等拉伸破坏点的两个旋转椭球面,此椭球面的断裂准则为

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

不难看出,参数 r 可由平均应力 $\sigma_m=0$ 的纯剪切状态下的剪切断裂破坏点确定.由方程(3)可得纯剪切断裂时: $(\sigma_{seq}/r)^2 = (3^{1/2}\tau_f/r)^2 = 3\tau_y^2$.可见,参数 r 等于纯剪切状态下剪切断裂强度 τ_f 与剪切屈服强度 τ_y 的比值,即: $r = \tau_f/\tau_y \geq 1$.

在理论上, τ_f 和 τ_y 可由薄壁圆管扭转试验测定,但是薄壁圆管在扭转屈服后容易发生失稳,因此剪切断裂强度 τ_f 和参数 r 存在试验测试上的困难.

材料科学认为,单向拉伸颈缩时的第一真实主应力达到了材料断裂强度,从而在有缺陷的心部形成了微裂纹^[7].从工程角度看,颈缩后的曲线段已没有实用价值,因此颈缩时的第一真实主应力可作为断裂强度的近似值.

作者建议按下述方法来近似量化铝合金断裂准则:首先由泊松比 μ 求出广义屈服面参数 q ,并解出等效剪切屈服强度 $3^{1/2}\tau_y = \frac{(1+9q^2)^{1/2}}{3q}\sigma_y$;然后由式(3)和式(2)解得单向拉伸断裂强度与单向拉伸屈服强度之比 $\frac{\sigma_f}{\sigma_y} = \frac{r(1+9q^2)^{1/2}}{(r^2+9q^2)^{1/2}}$;最后把单向拉伸颈缩时的第一真实主应力 σ_u 与 σ_y 之比 $\sigma_u/\sigma_y \approx \sigma_f/\sigma_y$ 代入,来近似量化参数 r .

考虑到单向拉伸试件的心部缺陷及颈缩强度为平均取值等因素,颈缩时的第一真实主应力略小于材料断裂强度,上述近似量化使参数 r 的取值略偏于保守.

为验证上述断裂准则的普适性及精度,下面对文献[9]的铝合金开孔板断裂试验进行数值模拟分析.

3 铝合金开孔板断裂试验的数值模拟分析

3.1 试验描述

文献[9]共进行了如图1所示的18个中心开圆孔铝合金(Al2024-T351)矩形板的单向拉伸断裂试验,试件的宽度均为50 mm,其余的几何尺寸如表1所示.



图1 开孔板外形

试验时,试件一端固定,另一端采用一个 200 kN 测力计以 0.2 mm/s 的速度施加位移.试验测量的位移为对称于试件中心布置、间距为 50 mm 的两点位移之差.

3.2 数值模拟

采用通用有限元软件 ANSYS 中的 20 节点三维实体元 Solid95,对图 1 所示的铝合金开孔进行了数值模拟.铝合金材性取自文献[9]中拉伸试验的真应力-真应变值,即

$$E = 69\,000 \text{ N/mm}^2; \mu = 0.3; \epsilon_y = 0.005\,07$$

$$\sigma_y = 350 \text{ N/mm}^2; \epsilon_u = 0.172; \sigma_u = 574 \text{ N/mm}^2$$

数值模型的长度均取为宽度的 8 倍(即 400 mm),以减弱边界约束端和加载端对圆孔周边圣维南效应的影响.有限元模型的网格如图 2 所示.



图2 有限元模型网格

试件 1~18 数值模拟的力-位移曲线如图 3 所示,图中虚线为试验曲线.

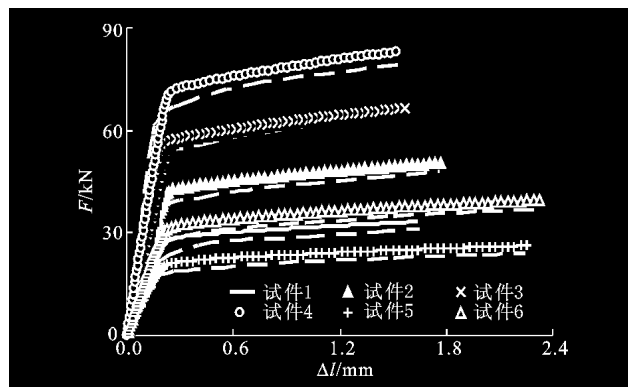
由图 3 可见:模拟计算的屈服载荷(加载位移约为 0.3 mm 处)均高于试验值,其中孔径和板厚均较大的试件 10、11、17 和 18 误差最大,约为 14.7%.究其原因是:随板厚增加,试件内部的微观缺陷概率、孔径和缺陷的影响权重都增大,因此导致大孔径厚板试件的模拟计算误差偏大.

对于模拟计算的开裂载荷,试件 10、11 和 17 的误差较大,分别为 11.1%、10.5%和 14.2%.其余试件模拟计算的开裂载荷与试验值吻合较好.

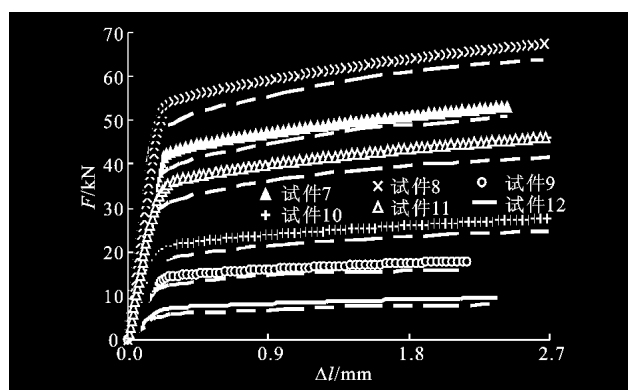
3.3 断裂分析

对于上述铝合金材料,可解得其广义屈服面参数 $q = \frac{2^{1/2}(1+\mu)}{3(1-2\mu)} \approx 1.53$,等效剪切屈服强度

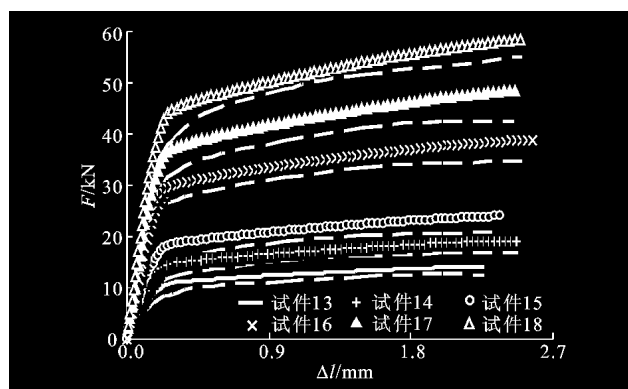
$3^{1/2}\tau_y = \frac{(1+9q^2)^{1/2}}{3q}\sigma_y \approx 358.2 \text{ N/mm}^2$.该铝合金单向拉伸颈缩强度与屈服强度之比 $\sigma_u/\sigma_y \approx 1.64$,因此,其断裂强度与屈服强度之比 $\frac{\sigma_f}{\sigma_y} = \frac{r(1+9q^2)^{1/2}}{(r^2+9q^2)^{1/2}} \approx 1.64$,将 $q \approx 1.53$ 代入,解得断裂面参数 $r \approx 1.71$.



(a) 试件 1~6



(b) 试件 7~12



(c) 试件 13~18

图3 模拟计算的力-位移曲线

表1 试件几何尺寸

试件号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
厚度/mm	2	3	4	5	2	3	4	5	2	3	5	2	3	4	5	8	10	12
孔径/mm	10	10	10	10	20	20	20	20	30	30	30	40	40	40	40	40	40	40

该铝合金的椭球面断裂准则量化为

$$[(\sigma_{\text{seq}}/1.71)^2 + (\sigma_m/1.53)^2]^{1/2} = 358.2 \text{ N/mm}^2 \quad (4)$$

图4为初始开裂时由式(4)确定的断裂参数 $C_I = [(\sigma_{\text{seq}}/1.71)^2 + (\sigma_m/1.53)^2]^{1/2} / 358.2$ 沿危险断面中线的分布(横坐标0和1代表板外侧边和孔边),由图可见:所有试件孔边的断裂参数 C_I 均大于板侧边,暗示试件孔边先于板侧边形成裂纹.在断裂载荷下,所有试件的孔边 C_I 均接近1.0,说明由方程(4)确定的 C_I 具有较高的精度.

从图4也可以看出:小孔径试件(如试件1~8)的危险断面上 C_I 的梯度较大,孔边的 C_I 远大于板侧边,说明小孔径试件在孔边开裂时板侧边仍可能保持完好.随着孔径增大,危险断面上 C_I 的梯度趋于平缓,大孔径试件(如试件12~18)孔边的 C_I 和板侧边的相差不多,说明大孔径试件一旦在孔边开裂导致应力释放,裂纹将迅速扩展,试件沿整个危险断面断裂的可能性较大.该分析结论和文献[9]的板件断裂试验中,小孔径试件仅在孔边断裂、大孔径试件沿薄弱截面全宽断裂的结果相吻合.

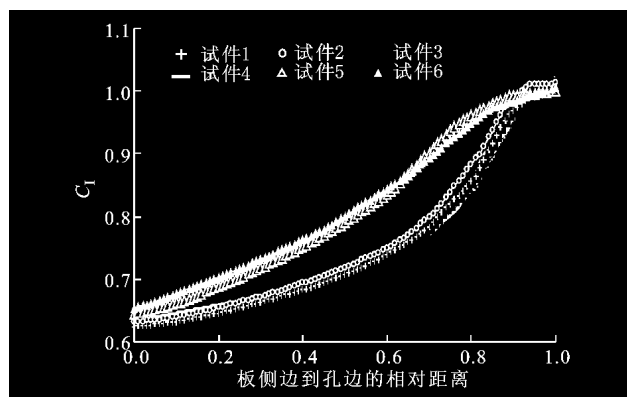
当孔边形成微观裂纹时,必导致孔边轴向应力的释放和危险断面上应力的重新分布,相当于加速了危险断面靠近孔边区域微裂纹的发展.根据图4的预测,这种状况对大孔径试件应更为显著.本文的数值模拟中没有考虑微裂纹扩散过程,因此图3模拟计算的宏观断裂载荷高于试验值,模拟计算误差随孔径的增大而增大.

从整体上看,量化的椭球面断裂准则对预测铝合金开孔板宏观断裂具有较高的精度.

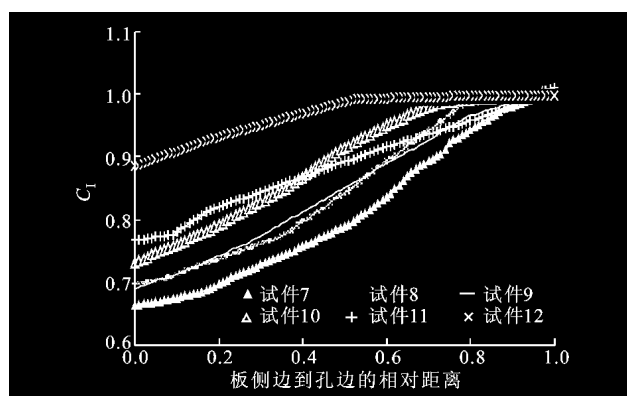
4 铝合金抗断设防

图5为铝合金抗断设防图,给定的应力状态确定了图中的应力路径(即图中的斜直线).直线斜率的倒数是应力三轴比率,该比率愈大,断裂强度与屈服强度的比值愈小,铝合金愈趋于宏观脆断,从而直观地解释了高三轴应力等效于高宏观脆断概率的事实.

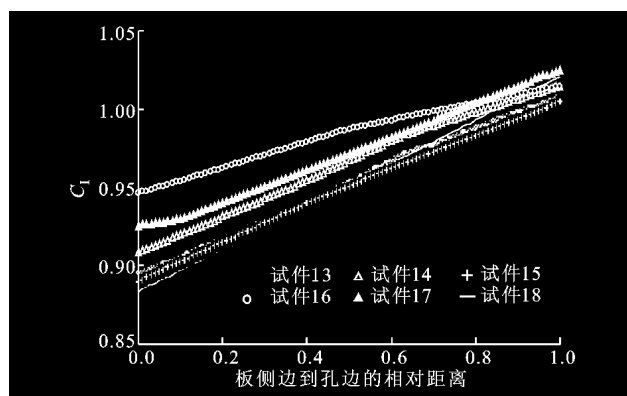
方程(2)确定的广义屈服椭球面是介于畸变应变能理论和总应变能理论之间的一种静水应力型广义屈服准则,相当于部分考虑了静水应力对屈服面的缩小效应.方程(3)建议的椭球面断裂准则暗示,铝合金宏观脆断和韧断并无绝对的界限,但从破坏后果的严重性及应给予的重视程度看,人为地把断裂分为宏观脆断和韧断的思想,仍不失其工程价值.



(a)试件1~6



(b)试件7~12



(c)试件13~18

图4 危险断面上断裂参数 C_I 的分布

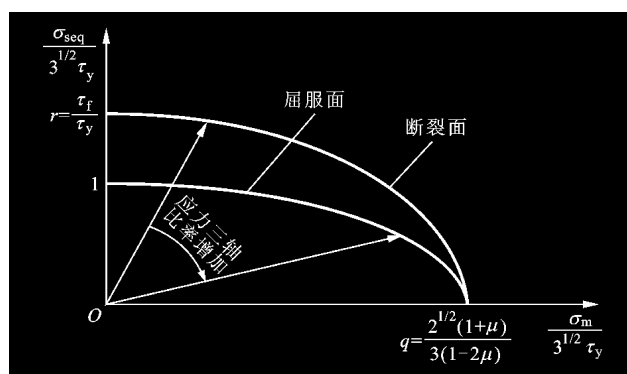


图5 铝合金抗断设防图

5 结 论

本文以铝合金静水应力型广义屈服椭球面及三向等拉伸状态下屈服和断裂的重合性假设为切入点,导出了铝合金在三轴应力空间的椭球面断裂准则及断裂参数量化方法. 椭球面断裂准则使铝合金在应力三轴空间的屈服和断裂两种破坏模式得到了统一,具有物理概念清晰、形式简单、便于工程应用的特点. 对18个铝合金开孔板断裂试验的数值模拟结果显示,本文提出的椭球面断裂准则对预测铝合金宏观断裂具有较高的精度.

参考文献:

- [1] 李继红,张建勋. 含损伤焊接接头裂纹体J积分的有限元数值研究[J]. 西安交通大学学报,2003,37(9): 937-940.
- Li Jihong, Zhang Jianxun. Numerical investigations to J-integral in cracked weldment containing damage based on finite element method [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2003, 37(9): 937-940.
- [2] 柳永宁,冯耀荣,宋小龙,等. X65 管线钢的动态断裂行为研究[J]. 西安交通大学学报,2001, 35(11): 1171-1174.
- Liu Yongning, Feng Yaorong, Song Xiaolong, et al. Dynamic fracture of pipeline steel X65 [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2001, 35(11): 1171-1174.
- [3] 王仁,黄克智,朱兆祥. 塑性力学进展[M]. 北京:中国铁道出版社,1988: 144-216.
- [4] 俞茂宏. 双剪强度理论及其应用[M]. 北京:科学出版社,1998: 59~817.
- [5] Taylor G I, Quinney H. The plastic distortion of metal [J]. Phil Trans Roy Soc, 1931, 230(3): 323-362.
- [6] 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,1983:35-94.
- [7] 刘孝敏. 工程材料的微观结构和力学性能[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,2003: 97-153.
- [8] Lemaitre J A. A course on damage mechanics [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1996: 15-47.
- [9] Bao Yingbin. Dependence of fracture ductility on thickness [J]. Thin-Walled Structures, 2004, 42(8): 1211-1230.

(编辑 葛赵青)