

文章编号: 1000-4750(2008)05-0027-05

# 结构钢开裂准则及断裂试验分析

王万祯

(兰州理工大学土木工程学院, 甘肃, 兰州 730050)

**摘 要:** 为探寻结构钢开裂机理及抗断设防, 给出了结构钢在应力三轴空间的广义屈服轨迹方程。结合古典强度理论和现代损伤力学对金属屈服和断裂解释的力学原理, 基于三向等拉伸应力状态下结构钢屈服和宏观脆断重合性假设, 导出了结构钢在应力三轴空间的开裂准则。在结构钢开孔板的单向等速拉伸断裂试验中, 较为精确地测量了初始开裂时的加载位移及全程载荷-位移曲线。试验结果显示, 初始裂纹位于孔边且扩展迅速。通过对结构钢开孔板断裂试验的数值模拟分析, 对比验证了该开裂准则的普适性及精度。最后, 给出了结构钢广义屈服和开裂模型的物理解释及抗断设防。

**关键词:** 金属材料; 结构钢; 强度理论; 试验; 数值模拟; 广义屈服; 开裂准则

**中图分类号:** TG111.91; TB301 **文献标识码:** A

## CRACK CRITERION AND FRACTURE TESTS OF STRUCTURAL STEEL

WANG Wan-zhen

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

**Abstract:** In order to study the crack mechanism and fracture design theory of structural steel, generalized yield locus in the three-dimensional stress space is brought forward. Combining the theories of metal yielding and fracture in classical strength theory with those in damage mechanics, crack criterion of structural steel in the three-dimensional stress space is deduced based on the assumption of simultaneous yielding and fracture in the isotropic tensile stress field. In the fracture tests of rectangular steel plates with circular hole subjected to uniaxial tension with mean velocity, the load-displacement curves at initial cracking were accurately measured. Test results reveal that the first crack lies at the edge of the circular hole and spreads rapidly. By numerically simulating the stress field at initial cracking in the fracture tests, the applicability and accuracy of the crack criterion are comparatively verified.

**Key words:** metal; structural steel; strength theory; test; numerical simulation; generalized yield; crack criterion

结构钢宏观脆断时, 结构并未超载且几乎观察不到塑性发展过程, 破坏后果是灾难性的, 传统的强度计算解决不了结构钢宏观脆断这一类特殊问题<sup>[1]</sup>。

虽然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<sup>[2-6]</sup>, 但宏观上如何防止结构钢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以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 结构钢广义屈服轨迹

第四强度理论的圆柱屈服面是不很大静水压力实验无限外推的结果, 将不很大的静水压力实验结果反向无限外推至静水拉力区则缺乏理论和实验基础。

文献[7]对铝和铜的实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

收稿日期: 2006-10-21; 修改日期: 2007-02-10

基金项目: 甘肃省自然科学基金项目(3ZS051-A25-044); 兰州理工大学建工七七基金(TM-TK-0706)

作者简介: 王万祯(1974—), 男, 河南周口人, 副教授, 博士, 从事结构钢开裂机理及抗断设防研究(E-mail: wwz1975@lut.cn)

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[8]建议的金属静水应力型广义屈服函数为:

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

式中,  $\sigma_c$ 、 $\sigma_y$  和  $\mu$  分别为材料抗压屈服强度、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  $\sigma_m$  和等效应力  $\sigma_{seq}$  为长轴、短轴的旋转椭球面。对于拉压相等的各向同性结构钢而言, 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, 结构钢等效剪切屈服强度  $\sqrt{3}\tau_y = \frac{\sqrt{1+9q^2}}{3q}\sigma_y$ , 三向等拉伸屈服强度  $\sigma_{y,u} = q\sqrt{3}\tau_y = \frac{\sqrt{1+9q^2}}{3}\sigma_y$ , 其中,  $\sigma_y$  为单向拉伸屈服强度。由方程(1)解得拉压相等的各向同性结构钢的三向等拉伸屈服强度  $\sigma_{y,u} = \frac{\sqrt{1+2\mu^2}}{\sqrt{3}(1-2\mu)}\sigma_y$ 。对比结构钢三向等拉伸屈服强度, 可解得方程(2)中的参数  $q = \frac{\sqrt{2}(1+\mu)}{3(1-2\mu)}$ 。

## 2 结构钢开裂准则

断裂力学作为现代固体力学的一个重要学科分支, 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中受到限制。

将断裂看作结构钢的另一种破坏模式, 则断裂面应具有连续、光滑和外凸特征。参照结构钢广义屈服面函数类型, 则以  $\sigma_m$  和  $\sigma_{seq}$  为主轴的椭球断裂面仍是满足该特征的简单曲面。

损伤力学认为<sup>[9]</sup>, 金属断裂延性随应力三轴比率  $\sigma_m/\sigma_{seq}$  的增加而降低, 高三轴比率使材料变脆。可以预见, 对于  $\sigma_m/\sigma_{seq} \approx \infty$  的三轴等拉伸应力状态, 结构钢趋于理想脆断, 即屈服和断裂重合。

因此, 结构钢断裂面和屈服面应相切于静水拉力轴线与破坏面的交点。可见, 其断裂椭球面方程为:

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

结构钢纯剪切断裂时, 平均应力  $\sigma_m = 0$ 。此时,

由方程(3)解得:  $(\sigma_{seq}/r)^2 = (\sqrt{3}\tau_y/r)^2 = 3\tau_y^2$ 。可见, 参数  $r = \tau_f/\tau_y \geq 1$ 。

理论上,  $\tau_f$  和  $\tau_y$  可由薄壁圆管扭转试验测定, 但考虑到薄壁圆管在扭转屈服后容易发生失稳, 因此, 剪切断裂强度  $\tau_f$  和参数  $r$  存在试验测试上的困难。

材料科学认为<sup>[10]</sup>, 结构钢单向拉伸颈缩时, 第一主应力达到了断裂强度而在有缺陷的心部形成了微裂纹。从工程意义看, 颈缩后的曲线已没有实用价值。因此, 结构钢颈缩强度可作为此时断裂强度的近似值。

作者建议按如下方法量化结构钢断裂面方程: 首先, 由材料泊松比  $\mu$  求出广义屈服面参数  $q$ , 并解出等效剪切屈服强度  $\sqrt{3}\tau_y = \frac{\sqrt{1+9q^2}}{3q}\sigma_y$ ; 然后, 由方程(3)和方程(2)解得单向拉伸断裂强度与单向拉伸屈服强度比值  $\sigma_f/\sigma_y = \frac{r\sqrt{1+9q^2}}{\sqrt{r^2+9q^2}}$ 。把结构钢单向拉伸颈缩强度  $\sigma_u$  与单向拉伸屈服强度  $\sigma_y$  的比值  $\sigma_u/\sigma_y \approx \sigma_f/\sigma_y$  代入, 量化参数  $r$ 。

## 3 结构钢开孔板断裂试验及数值分析

### 3.1 试验描述

本文对低合金高强结构钢 Q345 制成的 R 和 LR 系列共 10 个开孔板进行了单向拉伸断裂试验, LR 系列试件外形如图 1 所示。试件宽度均为 50mm, 长度约为宽度的 9 倍—10 倍, 以减弱约束端和加载端对圆孔周边圣维南效应的影响。其余几何尺寸如表 1 所示。

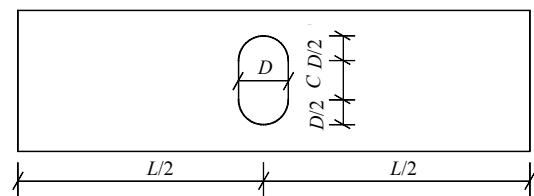


图 1 LR 系列试件外形

Fig.1 Shape of LR specimens

表 1 试件几何尺寸

Table 1 Geometrical dimensions of specimens

参 数	R1	R2	R3	R4	R5	R6	LR1	LR2	LR3	LR4
厚度/mm	4	4	4	10	10	10	4	4	10	10
D/mm	10	20	30	20	30	10	10	20	20	10
C/mm	/	/	/	/	/	/	20	10	10	20

试验采用 30t 万能实验机以 0.05mm/s 的速度施加轴向位移,交叉布置的 4 台经纬仪对预测的初始开裂点进行跟踪观测,试验较精确地记录了初始开裂时的加载位移。为屏蔽加载端可能出现的滑移误差,采用变形规测量了距中心均为 50mm 的两点相对加载位移。为观测清晰起见,试验前对试件孔边进行了打磨除锈。试件及试验装置如图 2 所示。



图 2 试件及试验装置

Fig.2 Specimen and test setup

试验结果显示,初始开裂点位于孔边且扩展迅速。削弱较多的试件,如 R3、R5 和 LR 系列,初始开裂和宏观断裂几乎同时发生,而削弱较少的试件,如 R6,初始开裂后仍需施加较大的位移才导致宏观断裂。宏观断裂时,载荷急剧下降并伴随着很大“砰”的一声响。图 3 为部分试件断裂后的照片。

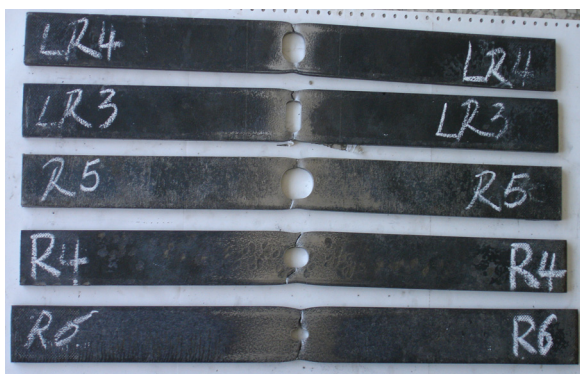


图 3 试件断裂照片

Fig.3 Fracture pictures of specimens

除试件 R1 和 LR3 因操作和观测等人为因素而试验失败外,其余试件试验较为成功。其载荷-相对位移曲线如图 4 所示,图中△为观测的开裂点。

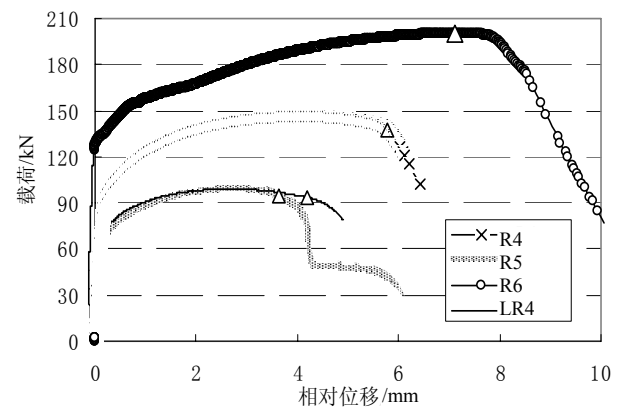
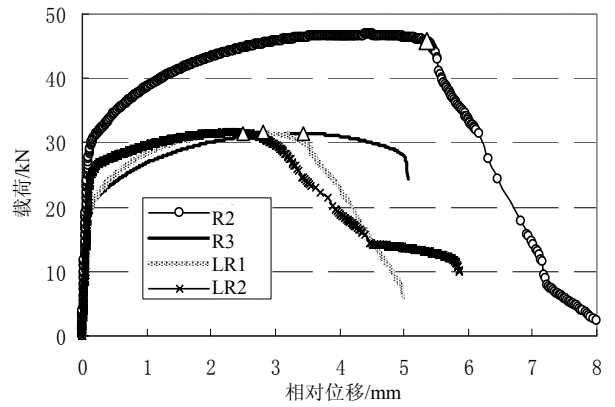


图 4 载荷-相对位移全程曲线

Fig.4 Load-relative displace curves

### 3.2 数值模拟

本节采用有限元软件 ANSYS 中的二十节点三维实体元 Solid 95 对上述结构钢开孔板断裂试验进行了数值模拟。试件 LR1 的有限元网格如图 5 所示。

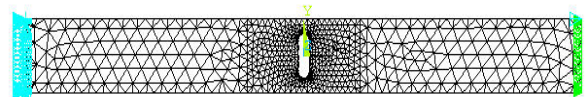
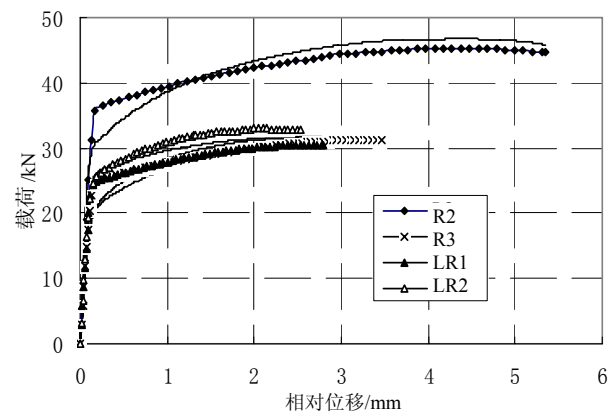


图 5 试件 LR1 的有限元网格

Fig.5 Finite element meshes of specimen LR1

图 6 是数值模拟开裂时的载荷-相对位移曲线,图 6 中实线为对应的试验曲线。



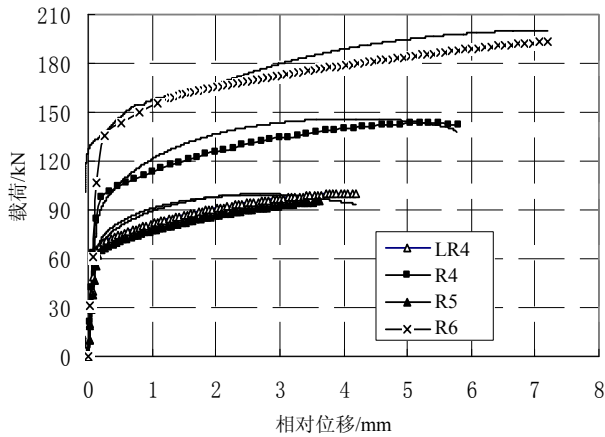


图 6 模拟的载荷-相对位移曲线

Fig.6 Simulated load relative displace curves

由图 6 可见，试件 R2 的模拟结果和试验值有一定的误差，模拟的屈服载荷高出约 7%，且曲线强化低于试验值。原因是该试件内部缺陷较大，导致屈服载荷偏低，材质波动，后期强化较高，而数值模拟中没有考虑缺陷影响且采用了材性试验中的统一参数。其余试件的模拟载荷-相对位移曲线和试验吻合较好，模拟计算的开裂荷载几乎和试验完全一致。

### 3.3 断裂分析

对于本试验中  $\sigma_y \approx 333\text{MPa}$ 、 $\mu \approx 0.276$  的结

构钢，可得其广义屈服面参数  $q = \frac{\sqrt{2}(1+\mu)}{3(1-2\mu)} \approx 1.34$

和等效剪切屈服强度  $\sqrt{3}\tau_y = \frac{\sqrt{1+9q^2}}{3q} \sigma_y \approx 343.1\text{MPa}$ 。

该结构钢单向拉伸颈缩强度与屈服强度之比  $\sigma_u/\sigma_y \approx 1.54$ ，因此，其单向拉伸断裂强度与屈服强

度之比  $\sigma_f/\sigma_y = \frac{r\sqrt{1+9q^2}}{\sqrt{r^2+9q^2}} \approx 1.54$ 。将  $q \approx 1.34$  代入上

式，解得断裂面参数  $r \approx 1.61$ 。则该结构钢断裂椭球面方程为：

$$\sqrt{(\sigma_{seq}/1.61)^2 + (\sigma_m/1.34)^2} = 343.1 \quad (4)$$

图 7 为初始开裂时由公式(4)确定的断裂参数  $CI = \sqrt{(\sigma_{seq}/1.61)^2 + (\sigma_m/1.34)^2} / 343.1$  沿危险截面中面的分布(横坐标 0 和 1 分别代表孔边和板外侧边)。

由图 7 可见：试件 LR2 和 R5 在孔边起裂的可能性较大，其余试件在距孔边相对位置约 15%—30%的区域起裂，这与试验观测到的初始裂纹位于板中面薄弱断面上圆孔边缘的结果有少许误差。

初始开裂时，各试件薄弱截面上断裂参数  $CI$  峰值均接近 1.0，其中，峰值最大的 R6 约为 1.22，峰值最小的 R3 约为 1.01，说明公式(4)建议的断裂参数  $CI$  用于预测结构钢初始开裂具有较高的精度。

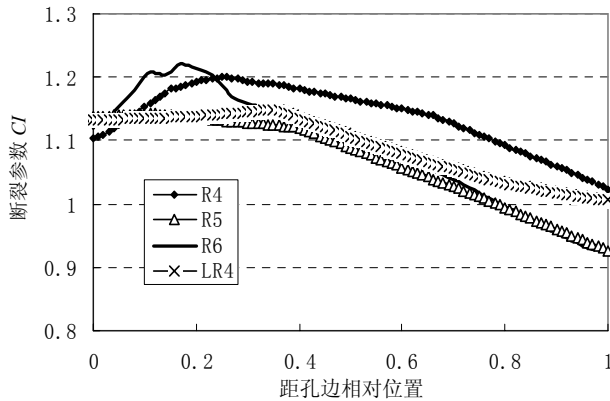
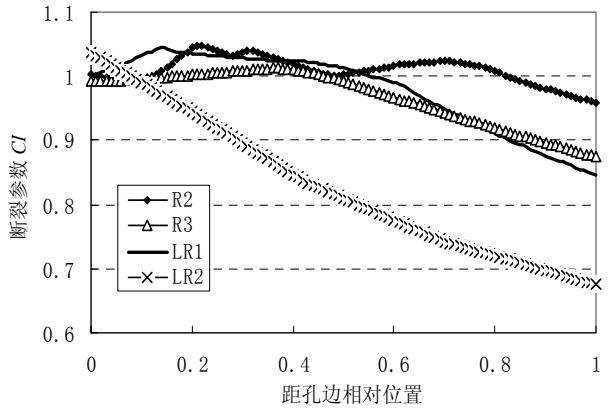


图 7 危险截面上断裂参数  $CI$  分布

Fig.7 Distribution of crack index  $CI$  across the critical section

除 R5 以外的其余中厚板试件中，薄弱截面上的断裂参数  $CI$  均大于或等于 1.0，表明公式(4)建议的开裂准则对中厚板试件初始开裂的预测偏于保守。相对而言，断裂参数  $CI$  对于薄板试件初始开裂的预测精度高于中厚板试件。

导致上述误差的解释如下：本试验是采用放大倍数约为 30 倍的经纬仪观测试件初始开裂的，如此小的放大倍数的经纬仪可能错过了观测更微小裂纹的机会，也无法观测到板内部的初始开裂及扩展。不难想象，若采用放大倍数较大的裂纹观测仪，观测的初始开裂时间将提前，断裂参数  $CI$  对中厚板试件初始开裂预测的保守程度将降低。另外，中厚板试件内部存在缺陷的几率大于薄板试件，也导致断裂参数  $CI$  对其初始开裂的预测偏于保守。

## 4 结论

图 8 为结构钢抗断设防图，给定的应力状态确定了图中的应力路径(即图中斜直线)。直线斜率的

倒数是应力三轴比率, 该比率愈大, 结构钢断裂强度与屈服强度比值愈小, 结构钢愈趋于宏观脆断, 直观解释了高三轴应力等效于高宏观脆断几率的事实。

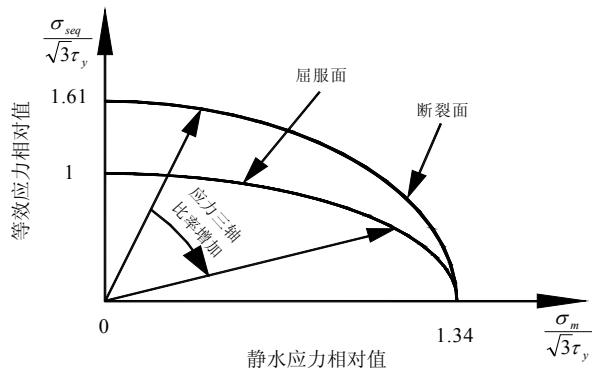


图8 结构钢抗断设防图

Fig.8 Fracture design frame of structural steels

在结构钢开孔板断裂试验中, 较精确地测量了初始开裂时的加载位移及全程载荷-位移曲线。通过对数值模拟初始开裂点的应力场分析, 验证了建议的开裂准则用于预测结构钢初始开裂具有较高的精度。

#### 参考文献:

- [1] 陈绍蕃. 钢结构设计原理[M]. 北京: 科学出版社, 1998.  
Chen Shaofan. Principle of steel structure design [M]. Beijing: Science Press, 1998. (in Chinese)
- [2] Bao Yingbin. Dependence of ductile crack formation in tensile tests on stress triaxiality, stress and strain ratios [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2005, 72(4): 505—522.
- [3] Bao Yingbin, Wierzbicki Tomasz. On the cut-off value of negative triaxiality for fracture [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2005, 72(7): 1049—1069.
- [4] 吴德飞, 童根树. 含初始缺陷钢结构损伤累积至断裂及后期的调查分析[J]. 工程力学, 2006, 23(8): 160—167.  
Wu Defei, Tong Genshu. Damage accumulation, fracture and post fracture analyses for initially flawed steel structures [J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(8): 160—167. (in Chinese)
- [5] 蒋玉川, 王启智. 形状改变比能密度因子断裂准则[J]. 工程力学, 2005, 22(5): 31—35.  
Jiang Yuchuan, Wang Qizhi. Fracture criterion of the maximum size of plastic zone of mixed mode crack growth [J]. Engineering Mechanics, 2005, 22(5): 31—35. (in Chinese)
- [6] 韦未, 李同春. 一种新的用于各向同性损伤模型的四参数等效应变[J]. 工程力学, 2005, 22(6): 91—96.  
Wei Wei, Li Tongchun. New four-parameter equivalent strain for isotropic damage model [J]. Engineering Mechanics, 2005, 22(6): 91—96. (in Chinese)
- [7] Taylor G I, Quinney H. The plastic distortion of metal [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A — Mathematical Physical and Engineering Sciences, 1931, 230(3): 323—362.
- [8] 皮萨林科 Γ C, 列别捷夫 A A. 复杂应力状态下的材料变形与强度[M]. 北京: 科学出版社, 1983.  
Pesaliker Γ C, Libieqief A A. Distortion and strength of material under complex stress field [M]. Beijing: Science Press, 1983. (in Chinese)
- [9] Lemaitre J A. A course on damage mechanics [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1996.
- [10] 弗里德曼 P W. 金属机械强度(第一册)[M]. 北京: 机械工业出版社, 1982.  
Bridgman P W. Mechanical strength of metal (Volume I) [M]. Beijing: China Machine Press, 1982. (in Chinese)