

# 金属材料试件在压缩、扭转、拉伸断裂过程中的应力状态变化及表征

伍星星 刘建湖 孟利平 王海坤 汪俊

#### Variation of Stress Distribution in Metal Fracture Process under Compressive, Torsional, and Tensile Loading

WU Xingxing, LIU Jianhu, MENG Liping, WANG Haikun, WANG Jun

#### 引用本文:

伍星星, 刘建湖, 孟利平, 等. 金属材料试件在压缩、扭转、拉伸断裂过程中的应力状态变化及表征[J]. 高压物理学报, 2020, 34(5):054204. DOI: 10.11858/gywlxb.20200517

WU Xingxing, LIU Jianhu, MENG Liping, et al. Variation of Stress Distribution in Metal Fracture Process under Compressive, Torsional, and Tensile Loading[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2020, 34(5):054204. DOI: 10.11858/gywlxb.20200517

在线阅读 View online: https://doi.org/10.11858/gywlxb.20200517

#### 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

#### 金属材料失效分析的新方法

A New Approach for the Failure of Metallic Materials 高压物理学报. 2019, 33(1): 014103 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20180613

# 金属内冲击波跨晶界传播的应力分配机制初探

Preliminary Investigation on Stress Distribution Mechanism of Shock Propagating across Grain Interface in Metal 高压物理学报. 2019, 33(5): 052201 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20180608

#### 应力波在散体颗粒中的传播规律

Attenuation Law of Stress Wave in Granular Particles 高压物理学报. 2020, 34(4): 044202 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20200508

## 冲击载荷下分层梯度泡沫材料中的应力波传播特性

Stress Waves Propagation in Layered Graded CellularMaterials under Dynamic Crush Loading 高压物理学报. 2019, 33(6): 064102 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20190724

#### 弹体材料在超高速碰撞过程中的物相演化

Material Phase Evolution in Hypervelocity Impact Process 高压物理学报. 2019, 33(6): 064101 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20190723

#### 材料参数拟合方法对弹靶侵彻仿真的影响

Influence of Different Material Constants Fitting Method on Predicting Warhead Impacting Metal Targets 高压物理学报. 2019, 33(4): 045105 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20180661 DOI: 10.11858/gywlxb.20200517

# 金属材料试件在压缩、扭转、拉伸断裂 过程中的应力状态变化及表征

伍星星,刘建湖,孟利平,王海坤,汪 俊

(中国船舶科学研究中心, 江苏 无锡 214082)

摘要:为更好地拟合断裂准则(JC、BW、MMC)参数,借助数值模拟手段,对Q345B和 921A钢的压缩、扭转、拉伸试件的断裂过程进行了模拟,以应力三轴度、Lode参数作为衡量应力 状态变化的重要指标,分析了两种金属材料断裂过程中试件典型位置的变化过程及断裂时刻试 件的径向分布趋势,对比分析了Q345B和921A钢的不同类型试件在不同应力三轴度、不同 Lode参数表征下的结果。计算结果表明:(1)除扭转试件外,压缩、拉伸试件在断裂过程中的 应力状态不断发生变化,试件断裂时刻端口剖面的应力状态分布也不一致;(2)试件断裂过程 是一个应力状态不断变化的过程,采用平均应力三轴度、平均Lode参数进行描述更加妥当; (3)对于同一尺寸的拉伸试件,不同金属材料断裂过程中的平均应力三轴度不尽相同。研究 成果可为后续断裂准则(JC、BW、MMC)参数的拟合及材料断裂力学性能试验的开展提供指导。

关键词:断裂试验;应力三轴度;Lode参数;应力状态

#### 中图分类号:O346.12 文献标识码:A

结构在冲击载荷作用下的断裂损伤与材料的应力状态存在重要关系,应力三轴度和 Lode 参数是 应力状态的两种重要表征方式,常见的 JC、BW 断裂准则<sup>[1-2]</sup>引入了应力三轴度对失效应变的影响, MMC 断裂准则<sup>[3]</sup>兼顾了应力三轴度和 Lode 参数的影响。Borvik 等<sup>[4]</sup>借助 JC 断裂准则对圆柱形平头 弹体的穿甲过程进行了仿真分析; Gupta 等<sup>[5]</sup>借助 JC 模型研究了弹体头部不同形状对穿甲性能的影 响,探讨了不同头部形状对靶板的毁伤破坏模式;肖新科等<sup>[6]</sup>采用包含 Lode 参数影响的 MMC 断裂准 则以及仅考虑应力三轴度影响的 BW 断裂准则,对平头钢弹体撞击下 6061-T6 铝合金薄靶的断裂行为 和弹道极限进行了数值模拟研究,结果表明,两种断裂准则预测的弹体剩余速度与试验结果均具有较 好的一致性,两者预测的弹道极限相近。但在预测 2024-T351 铝合金 Taylor 杆的断裂试验中,肖新科等<sup>[7]</sup> 指出,相较于 JC、BW 准则, MMC 断裂准则能更好地预测弹体的裂纹形式。

开展材料断裂试验是获取 JC、BW、MMC 断裂准则参数的基础, Borvik 等<sup>[8]</sup>、Bao 等<sup>[9]</sup>、Gilioli 等<sup>[10]</sup>、 Teng 等<sup>[11]</sup>通过开展系列扭转、压缩和拉伸试验, 拟合得出了 Weldox460E、6061-T6、2024-T351 等材料 的断裂准则参数。李营<sup>[12]</sup>通过开展系列 Q235 钢断裂力学性能试验, 拟合得到了 JC 失效参数。由于压 缩、扭转和拉伸试件在断裂过程中的应力状态不断发生变化, 若采用的应力状态评价标准不统一, 可导 致拟合得到的断裂准则参数存在较大差别, 因此有必要系统地了解压缩、扭转和拉伸试件在受载过程 中的应力状态变化过程及合适的表征方式, 从而为后续恰当准确地拟合断裂准则(JC、BW、MMC)提 供可靠依据。

 <sup>\*</sup> 收稿日期: 2020-02-26; 修回日期: 2020-03-06
 基金项目:国家安全重大基础研究项目(613279);国防基础科研重点项目(JCKY2017207B054)
 作者简介: 伍星星(1989-),男,硕士,工程师,主要从事舰船抗爆抗冲击研究. E-mail: 1063426501@qq.com

第34卷

# 1 应力状态表征

应力状态的表征通常可以通过应力三轴度和 Lode 参数来表示,其中应力三轴度定义为静水压力  $\sigma_{m}$ 与 Mises 等效应力 $\sigma_{eq}$ 之比,表达式为

$$\eta = \frac{\sigma_{\rm m}}{\sigma_{\rm eq}} = \frac{(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3}{\sqrt{2} \left[ (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 \right] / 2}$$
(1)

式中: $\eta$ 为应力三轴度; $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 、 $\sigma_3$ 为主应力,且假设 $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ 。

Lode 参数表示为应力状态的中间主应力与其他两个主应力的相对比值,表达式为

$$\mu_{\sigma} = \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} \tag{2}$$

# 2 断裂力学性能试验

为系统地研究试件在断裂过程中的应力状态变化,分别对 Q345B 钢(代表低碳钢)及 921A 钢(代 表高强钢)进行断裂试验,试件类型包括光滑圆棒试件、缺口圆棒拉伸试件、扭转试件、压缩试件等。 两种钢材的试件设计尺寸完全一致。

# 2.1 光滑圆棒和缺口圆棒的拉伸试验

光滑圆棒和缺口圆棒试件尺寸分别如图 1、图 2 所示,缺口圆棒试件的缺口半径分别为 2、6、8 和 18 mm,参照 GB/T 228—2002《金属材料室温拉伸试验方法》制作。拉伸试验利用国防科学技术大学力学 实验室的 WDW-100DIII 微机控制电子万能试验机开展,在试件标距段安装引伸计,引伸计标距为 50 mm, 量程为 25 mm,重复进行 5 次试验以保证试验数据的有效性。









图 2 缺口圆棒拉伸试件尺寸(单位:mm)

Fig. 2 Dimensions of notched round tension specimen (Unit: mm)

# 2.2 扭转试验

扭转试验在国防科学技术大学力学实验室的 NDW-500 Ⅲ 微机控制电子万能试验机上进行,采用 扭转试验专用夹具,试验机的两夹头之一可以沿轴向自由移动,对试件无附加轴向力,两夹头保持同 轴。扭转试件的尺寸如图 3 所示,试件制作标准参照拉伸试验,重复进行 5 次试验以保证试验数据的 有效性。

(3)



图 3 扭转试件尺寸(单位:mm) Fig. 3 Dimensions of torsion specimen (Unit: mm)

# 2.3 压缩试验

压缩试验在国防科学技术大学力学实验室 的WDW-100DⅢ微机控制电子万能试验机上进 行。试件制作标准参照拉伸试验,压缩试件的长 径比为3:2,此长径比既可保证试件有足够的压 缩空间,又避免了试件过于细长导致的压杆失 稳。试件与试验机的接触面预制倒角,避免试验 时试件接触面边缘产生应力集中。试件尺寸如图4 所示,重复进行5次试验以保证试验数据的有效性。





# 3 试件断裂过程中的应力状态

#### 3.1 计算模型

通过 ABAQUS 程序建立有限元模型。为提高计算效率,光滑圆棒、缺口圆棒、扭转和压缩试件均 采用二维轴对称模型,模型一端固定,另一端施加位移或者转角载荷。模型如图 5 所示,其中 R 为缺口 半径。依据文献 [13],当有限元模型网格尺寸小于 0.1 mm 时,网格尺寸对试件失效应变的影响可忽略, 本研究中所有试件的有限元模型网格尺寸均取 0.1 mm。考虑到模拟的主要目的是获取试件断裂过程 中应力状态的变化,为得到与试验较为一致的准确值,需保证计算输出的载荷-位移曲线与试验曲线一 致。图 6、图 7 分别显示了 Q345B 和 921A 钢试件的试验载荷-位移曲线与有限元计算结果对比。针对 光滑圆棒、压缩和扭转试件,模拟过程中的材料参数选取 JC 本构模型参数,取值如表 1 所示。对于缺 口拉伸试件,采用上述参数难以获得与试验一致的效果,初步分析原因为材料的应力状态对其本构模 型存在一定影响,因此计算过程中反复调试输入应力、应变值,直至仿真载荷-位移曲线与试验曲线一 致。JC 模型表示为

$$\overline{\sigma} = (A + B\varepsilon^n) [1 + C\ln(\varepsilon/\dot{\varepsilon})]$$

式中: $\overline{\sigma}$ 为应力,A为屈服强度,B为硬化强度,n为硬化指数,C为应变率参数, $\varepsilon$ 为应变, $\dot{\varepsilon}$ 为参考应变率。



图 5 试件的有限元模型

Fig. 5 Finite element models of tested specimens



图 6 试验和有限元计算得到的载荷-位移曲线对比(Q345B 钢)

Fig. 6 Comparisons of the displacement-load curves between experimental results and simulation results(Q345B steel)



Fig. 7 Comparisons of the displacement-load curves between experimental results and simulation results (921A steel)

	表 1	JC 强度模型参数
Table 1	Para	meters of JC strength model

Material	A/MPa	<i>B</i> /MPa	n	С	$\dot{oldsymbol{arepsilon}}/{ m S}^{-1}$
Q345B steel	360	700	0.547	0.046	0.002
921A steel	700	706	0.580	0.013	0.002

# 3.2 结果分析

#### 3.2.1 断裂过程中的应力状态变化

计算发现,Q345B 和921A 钢试件的应力状态变化趋势基本一致,本节以 921A 钢试件为例进行分析。 压缩试件在模拟过程中需要考虑摩擦,这里摩擦系数取为 0.1。对于压缩试件,选取压缩后直径最 大截面处的中心单元(Center element)和表面单元 (Radicel element) 作为典型单元,压缩试件受力过程中 典型单元的应力三轴度、Lode 参数变化如图 8 所示。由图 8 可以看出,中心单元基本处于压缩状态,对 应的应力三轴度从最初的-0.33 最低下降至-0.65 左右,最终断裂时刻的应力三轴度为-0.55,而 Lode 参 数在此过程中始终保持为 1.00,这主要是由于该单元处于轴对称模型中心处,有两方向的主应力相 等。表面单元的应力状态变化较复杂,从最初的单向受压状态依次转变为压剪、拉剪状态,因此应力三 轴度基本处于不断上升过程,而对应的 Lode 参数却呈现相反的趋势,处于不断下降过程。根据试件破 坏状态来看,压缩试件的断裂一般从试件外表面开始。



Fig. 8 Changes of stress triaxiality and Lode value in the loading process of compression specimen (921A steel)

试件在扭转过程中表面上的点往往最先开始断裂,选取中间区域同一截面处中心单元和表面单元 进行分析,扭转试件受力过程中典型单元的应力三轴度、Lode 参数变化如图 9 所示。由图 9 可以看出, 两处单元的应力三轴度基本为零,但中心单元的 Lode 参数为-0.96,表面单元的 Lode 参数为-0.61,根据 试件破坏状态来看,扭转试件的断裂一般从试件中心开始。



图 9 加坡风性交力过程中应力三相反和 Lode 参数变化(921A 柄) Fig. 9 Changes of stress triaxiality and Lode value in the loading process of torsion specimen (921A steel)

拉伸过程中试件的塑性应变基本集中在颈缩区域,断裂也往往从颈缩区域的中心部位开始,选取 光滑拉伸试件和 R=8 mm 缺口拉伸试件作为典型代表,分别选取试件颈缩处的中心单元和表面单元进 行分析,其受力过程中典型单元的应力三轴度、Lode 参数变化分别如图 10 和图 11 所示。由图 10 可 知,对于光滑拉伸试件,中心单元的应力三轴度在开始阶段一直处于单轴拉伸状态,当试件开始发生颈 缩后,单元应力三轴度逐渐增大;表面单元的应力三轴度在开始阶段也处于单轴拉伸状态,而后开始先 减小后增大,基本处于拉剪状态。两处单元的应力三轴度在开始阶段也处于单轴拉伸状态,而后开始先 减小后增大,基本处于拉剪状态。两处单元的应力状态变化表明,试件颈缩后应力状态由单向应力状 态转变为复杂应力状态。从 Lode 参数来看,中心单元的 Lode 参数值始终为-1.00,同压缩试件类似,主 要是由于该单元处于轴对称模型中心处;表面单元的 Lode 参数值在开始阶段保持为-1.00,进入颈缩阶 段后先增大后减小,与该单元的应力三轴度变化呈现相反的趋势。由图 11 可知,8 mm 缺口拉伸试件 中心单元进入塑性变形后应力三轴度先跳跃式增大,然后稍微减小,随后随着拉伸位移的增大应力三 轴度不断增大,但在此过程中单元 Lode 参数值始终为-1.00;表面单元在进入塑性变形后应力三轴度先 小幅增大,然后快速减小,最后逐步增大,而 Lode 参数却基本呈现相反的变化趋势。从试件破坏状态 来看,拉伸试件的断裂一般从试件中心开始。





图 10 光滑拉伸试件受力过程中应力三轴度和 Lode 参数变化(921A 钢)

Fig. 10 Changes of stress triaxiality and Lode value in the loading process of smooth tension specimen (921A steel)





#### 3.2.2 断裂时刻的应力状态分布

本节主要分析压缩、扭转、拉伸试件断裂时刻断口应力状态的径向分布,其中压缩试件取墩粗直 径最大的中间截面,扭转试件取中间截面,拉伸试件取颈缩面。计算发现,Q345B和921A钢试件的应 力状态径向分布趋势基本一致,本节以Q345B钢试件为例进行分析。

压缩试件在断裂时刻的应力三轴度、Lode参数的径向分布如图 12 所示,其中横坐标 *R*\*为无量纲 距离,表示断面上点到中心的距离与断面半径的比值。



Fig. 12 Radial distribution of stress triaxiality and Lode value of the compressive specimen at final failure(Q345B steel)

054204-6

由图 12 可以看出,压缩试件在开始阶段的最大截面应力三轴度、Lode 参数基本保持一致,但在断裂时刻截面应力状态分布十分不均匀,应力三轴度沿着径向逐渐增大,应力状态逐渐由中心区域的压缩状态向边界区域的拉剪状态转变。

扭转试件在断裂时刻的应力三轴度和 Lode 参数的径向分布如图 13 所示。扭转试件断面各 处应力三轴度、Lode 参数在初始阶段、断裂阶段 基本都为零,保持剪切状态。

选取光滑试件和 2 mm 缺口试件作为典型代 表分析拉伸试件在断裂时刻应力三轴度和 Lode 参数的径向分布,分别如图 14 和图 15 所示。由图 14 和图 15 可知:对于光滑试件,初始阶段截面各处 应力三轴度、Lode 参数保持一致;而对于 2 mm 缺 口试件,初始阶段截面各处应力三轴度沿径向逐 渐减小,Lode 参数沿径向逐渐增大。断裂时刻两 种试件的应力三轴度分布趋势基本一致,即沿径 向逐渐减小,试件中心处应力三轴度最大,在断裂 时刻截面各处的 Lode 参数基本为-1.00。



图 13 断裂时刻扭转试件应力三轴度和 Lode 参数的 径向分布(Q345B 钢)

Fig. 13 Radial distribution of stress triaxiality and Lode value of the torsion specimen at final failure(Q345B steel)



图 14 断裂时刻光滑拉伸试件应力三轴度和 Lode 参数的径向分布(Q345B 钢)

Fig. 14 Radial distribution of stress triaxiality and Lode value of the smooth tension specimen at final failure(Q345B steel)



图 15 断裂时刻带有 2 mm 缺口的拉伸试件的应力三轴度和 Lode 参数径向分布(Q345B 钢) Fig. 15 Radial distribution of stress triaxiality and Lode value of the tensile specimen with a 2 mm notch at final failure(Q345B steel)

由此可知,压缩、扭转、拉伸试件在受力过程中断裂面各处不仅应力状态时刻发生变化,而且应力 状态分布也不一致。若直接采用试件受力初始阶段的应力状态进行表征,将引起较大的误差,采用断 裂时刻的应力状态进行表征又过于偏大,忽略了变形过程中应力状态的变化,因此取整个过程应力状 态的平均值进行表征比较恰当。

## 3.3 对比分析

表 2、表 3 分别给出了各类试件应力三轴度、Lode 参数的不同表征方法,其中平均应力三轴度可 参考文献 [14] 中的方法进行计算

$$\eta_{\text{avg}} = \frac{1}{\varepsilon_{\text{f}}} \int_{0}^{\varepsilon_{\text{f}}} \eta(\varepsilon_{\text{eq}}) \mathrm{d}\varepsilon_{\text{eq}}$$
(4)

式中: $\eta_{avg}$ 为平均应力三轴度, $\varepsilon_{f}$ 为失效应变, $\varepsilon_{eq}$ 为等效应变。

Table 2         Comparison of the stress triaxiality among different specimens						
Specimen type	Stress triaxiality (Q345B steel)			Stress triaxiality (921A steel)		
	Initial	Fracture	Average	Initial	Fracture	Average
Compression	-0.333	0.179	-0.120	-0.333	0.156	-0.116
Torsion	0	0	0	0	0	0
Smooth tension	0.333	0.841	0.562	0.333	0.987	0.668
With a 18 mm notch	0.413	0.867	0.663	0.413	1.075	0.825
With a 8 mm notch	0.505	0.915	0.752	0.505	1.133	0.919
With a 6 mm notch	0.556	0.947	0.805	0.556	1.160	0.973
With a 2 mm notch	0.893	1.123	1.085	0.893	1.451	1.400

表 2 各类试件应力三轴度不同表征方法对比 ole 2 Comparison of the stress triaxiality among different specime

表 3 各类试件 Lode 参数不同表征方法对比

Specimen type	Lode (Q345B steel)			Lode (921A steel)		
	Initial	Fracture	Average	Initial	Fracture	Average
Compression	1.00	-0.73	0.24	1.00	-0.22	0.45
Torsion	0	0	0	0	0	0
Smooth tension	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00
With a 18 mm notch	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00
With a 8 mm notch	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00
With a 6 mm notch	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00
With a 2 mm notch	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00

 Table 3
 Comparison of the Lode parameter among different specimens

同理,平均Lode参数也可参照类似方法求出

$$\mu_{\sigma \text{avg}} = \frac{1}{\varepsilon_{\text{f}}} \int_{0}^{\varepsilon_{\text{f}}} \mu_{\sigma}(\varepsilon_{\text{eq}}) \mathrm{d}\varepsilon_{\text{eq}}$$
(5)

从应力三轴度不同的表征方法来看,除扭转试件外,压缩、拉伸试件断裂时刻的应力三轴度、平均 应力三轴度与初始值相比均发生较大变化,但从 Lode 参数不同的表征方法来看,仅有压缩试件断裂时 刻的 Lode 参数、平均 Lode 参数发生了改变,扭转、拉伸试件基本保持不变。

不同类型试件断裂时刻的应力三轴度、平均应力三轴度相对初始应力三轴度的变化规律如图 16 所示,其中:η<sub>mit</sub>表示初始应力三轴度,δ表示相对初始应力三轴度增大的百分比。总体而言,试件断裂 时刻的应力三轴度、平均应力三轴度相对初始应力三轴度增大的幅度与初始应力三轴度存在较大关 系。对于压缩试件,Q345B和921A钢试件增大的 百分比基本一致。但对于拉伸试件,断裂时刻的 应力三轴度、平均应力三轴度增大的幅度随着初 始应力三轴度的增大而减小,且921A钢增大的幅 度大于Q345B钢。从增大幅度来看,与初始应力 三轴度相比,断裂时刻的应力三轴度最大可提高 196%,平均应力三轴度最大可提高100%。

综合分析可知:采用不同的应力状态表征方 法描述试件的应力状态会存在较大偏差,考虑到 断裂过程是一个应力状态不断变化的过程,采用 平均应力三轴度和平均 Lode 参数进行描述更加 稳妥,因此后续断裂准则(JC、BW、MMC)拟合过 程中应采用平均应力三轴度和平均 Lode 参数。

考虑到现阶段常用的商业软件基本集成了 JC 失效模型,根据分析结果,采用平均应力三轴 度拟合获得的 JC 失效模型参数(D<sub>1</sub>、D<sub>2</sub>、D<sub>3</sub>)见表4。

此外,对于同一尺寸拉伸试件,921A钢拉伸 的平均应力三轴度较Q345钢要大,Bao等<sup>[15]</sup>提出 的平均应力三轴度修正公式表示为

$$\eta = \frac{1}{3} + 1.4 \ln\left(1 + \frac{a}{2R}\right) \tag{6}$$



图 16 不同试件断裂时刻应力三轴度、平均应力三轴度 增加百分比的对比

Fig. 16 Increases of the stress triaxiality and Lode parameter for specimens at final failure

表 4 拟合 JC 参数取值 Table 4 JC failure model constant

Material	$D_1$	$D_2$	$D_3$
Q345B steel	1.816	-0.353	1.056
921A steel	2.475	-0.661	0.650

式中:a为圆棒缺口中心处半径, R为缺口半径。该公式并非适用于任何金属材料。

# 4 结 论

以前期开展的Q345B、921A钢材料断裂力学性能试验(压缩、扭转和拉伸试验)为基础,借助数值 仿真手段,对压缩、扭转、拉伸试件的断裂过程进行了模拟,分析了各试件断裂过程中典型位置的应力 状态变化及断裂时刻断口截面的应力状态分布,得出如下结论:

(1)扭转试件断裂过程中应力状态基本保持不变,断裂时刻断口截面各处的应力状态基本一致,基本保持为剪切状态,应力三轴度和Lode参数基本都为零;

(2)压缩、拉伸试件断裂过程中应力状态处于不断变化过程,压缩试件中心单元的应力三轴度基本处于不断减小的状态,而拉伸试件中心单元的应力三轴度处于不断增大的状态;

(3)压缩试件断裂时刻断口截面各处的应力三轴度沿着径向呈逐渐增大趋势,拉伸试件断裂时刻 断口截面应力三轴度沿着径向呈逐渐减小趋势;

(4)试件断裂过程是一个应力状态不断变化的过程,采用平均应力三轴度、平均 Lode 参数进行描述更加妥当,因此后续断裂准则(JC、BW、MMC) 拟合过程中应采用平均应力三轴度、平均 Lode 参数。

# 参考文献:

- [1] JOHNSON G R, COOK W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures [C]//Proceeding of the 7th International Symposium on Ballistic. The Hague, Netherlands, 1983: 541–547.
- [2] BAO Y B, WIERZBICKI T. A comparative study on various ductile crack formation criteria [J]. Journal of Engineering Material and Technology, 2004, 126: 314–324.
- [3] BAO Y B, WIERZBICKI T. Application of extended Mohr-Coulomb criterion to ductile fracture [J]. International Journal of Fracture, 2010, 161(1): 1–20.

- [4] BORVIK T, HOPPERSTAD O S. A computational model of viscoplasticity and ductile damage for impact and penetration [J]. European Journal of Mechanics Solids, 2001, 20(5): 685–712.
- [5] GUPTA N K, IQBAL M A. Experiment and numerical studies on the behavior of thin aluminum plates subjected to impact by blunt and hemispherical-nosed projectile [J]. International Journal of Impact Engineering, 2006, 32(12): 1921–1944.
- [6] 肖新科, 王要沛, 王爽, 等. 应力状态在球形弹丸撞击 6061-T6 铝薄靶弹道行为数值预报中的作用 [J]. 振动与冲击, 2015, 34(22): 87-91.

XIAO X K, WANG Y P, WANG S, et al. Effect of stress state on the numerical prediction of ballistic resistance of thin 6061-T6 aluminum alloy targets against sphere projectile impacts [J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(22): 87–91.

[7] 肖新科, 王要沛, 张伟. 应力状态在 2024-T351 Taylor 杆断裂行为数值预报中的作用 [J]. 北京理工大学学报, 2016, 36(1): 157–161.

XIAO X K, WANG Y P, ZHANG W. Effect of stress state on the numerical prediction of the fracture behavior of 2064-T351 aluminium alloy Taylor rods [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2016, 36(1): 157–161.

- [8] BORVIK T, HOPPERSTAD O S. Numerical simulation of plugging failure in ballistic penentriion [J]. International Journal of Solids and Structures, 2001, 38(25): 6241–6264.
- [9] BAO Y B, WIERZBICKI T. On fracture locus in the equivalent strain and stress triaxiality space [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2004, 46(12): 81–98.
- [10] GILIOLI A, WIERZBICKI T. Predicting ballistic impact failure of aluminium 6061-T6 with the rate-independent Bao-Wierzbicki fracture model [J]. International Journal of Impact Engineering, 2015, 76(15): 207–220.
- [11] TENG X, WIERZBICKI T. Evaluation of six fracture models in high velocity perforation [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2006, 73(12): 1653–1678.
- [12] 李营. 液舱防爆炸破片侵彻作用机理研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2014.

LI Y. Fragment resistant mechanism research of safety liquid cabin [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2014.

- [13] 孟利平. 应变率和应力三轴度对船用钢变形和断裂的影响研究 [D]. 无锡: 中国船舶科学研究中心, 2016.
   MENG L P. Influence of strain rate and stress triaxiality on the deformation and fracture behavior of ship hull steel [D]. Wuxi: China Ship Scientific Research Center, 2016.
- [14] BAO Y B, WIERZBICKI T. On fracture locus in the equivalent strain and stress triaxiality space [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2004, 46(1): 81–98.
- [15] BAO Y B, WIERZBICKI T. On the cut-off value of negative triaxiality for fracture [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2005, 72(7): 1049–1069.

# Variation of Stress Distribution in Metal Fracture Process under Compressive, Torsional, and Tensile Loading

WU Xingxing, LIU Jianhu, MENG Liping, WANG Haikun, WANG Jun

(China Ship Scientific Research Center, Wuxi 214082, Jiangsu, China)

**Abstract:** In order to accurately fit the failure criteria in JC failure model, BW failure model, and MMC failure model, numerical simulations for metal materials Q345B and 921A under various loading conditions of compression, torsion, tension were performed in this work. The variation of stresses, indicated by stress triaxiality and Lode parameter, was investigated during the fracture progress. The results indicated: (1) exclusive of torsional loading, the stress distribution varied in the cracking plane as the crack growth; (2) the average stress triaxiality and Lode parameter are more suitable for describing the stress status; (3) for specimens having the same size, the value of average stress triaxiality was dependent on metal properties. This work would provide useful knowledge for obtaining the failure criterion from material failure experiments.

Keywords: failure experiments; stress triaxiality; Lode parameter; stress status