

# HTPB 推进剂细观损伤机理的 声发射实验研究<sup>\*</sup>

阳建红, 李学东, 赵光辉, 刘兵吉

(第二炮兵工程学院 机电工程系, 陕西 西安 710025)

**摘 要:** 采用测定单轴定速拉伸条件下标准哑铃形 HTPB 推进剂试件声发射 (AE) 信号的方法, 对 HTPB 复合固体推进剂在载荷作用下细观损伤及其扩展的机理进行了研究。实验结果表明: 声发射累计能量对应于细观损伤产生和扩展两个不同阶段, 提出了一个描述 HTPB 复合固体推进剂细观损伤扩展的物理模型, 该模型解释了不同拉伸速率下 HTPB 复合固体推进剂破坏后出现的不同物理现象。

**关键词:** 端羟基聚丁二烯推进剂; 裂纹扩展; 缺陷分析; 声发射

中图分类号: V435

文献标识码: A

文章编号: 1001-4055(2000)03-0067-04

## Acoustic emission experimental study on meso-damage mechanism of HTPB propellant

YANG Jian-hong, LI Xue-dong, ZHAO Guang-hui, LIU Bing-ji

(Dept. of Mechanics and Electrics, Second Artillery Engineering Coll. Xi'an 710025, China)

**Abstract:** By way of measuring the Acoustic Emission (AE) signal of HTPB composite solid propellant in condition of uniform speed, the mecro mechanism of meso-damage and its propagation of HTPB composite solid propellant were studied. The results of AE test show that AE cumul-energy corresponds to two stages of generation and propagation of meso-damage of HTPB composite solid propellant. A physical model describing meso-damage propagation of HTPB composite solid propellant was put forward and it has explained the mecro mechanism for the phenomenon varied from the strain speed after the destruction of the HTPB composite solid propellant.

**Key words:** Hydroxy terminated polybutadiene propellant; Crack propagation; Defect analysis; Acoustic emission

## 1 引 言

HTPB 复合固体推进剂是一种高聚物多组分的复合材料, 高能固体颗粒含量达 86%~90%, 材料力学性能呈粘弹性。从细观力学的角度分析, 这些颗粒形状尺寸各异 (颗粒直径从几  $\mu\text{m}$  到几百  $\mu\text{m}$ ), 颗粒的分布和相互作用也存在差异, 特别是随着载荷作用, HTPB 复合固体推进剂内部产生损伤, 基体、颗粒界面出现微裂纹, 并随着载荷的增加, 逐渐发展为宏观裂纹, 这个过程一方面决定了 HTPB 复合固体推进剂的贮存寿命, 另一方面, 材料的非线性行为也与这个过程有密切关系, 因此对材料内部的缺陷以及

加载后微裂纹的产生、扩展的研究引起了国内外许多学者的兴趣<sup>[1,2]</sup>。文献 [3] 对承受应变的固体推进剂, 用扫描电镜观察了细观裂纹的起始、扩展、汇合直至断裂全过程; 文献 [4] 采用单向拉伸和扫描电子显微镜研究了慢拉伸速率下丁羟复合固体推进剂破坏断面特征; 文献 [5] 也用扫描电镜研究了颗粒填充聚合物的细观行为。HTPB 复合固体推进剂在外载作用下, 材料内部产生细观裂纹并逐渐扩展为宏观裂纹, 整个过程中有强烈的能量释放出来, 并产生声发射信号。本文用声发射实验监测了 HTPB 复合推进剂内部细观裂纹的产生、发展与汇合行为, 并提出了该推进剂的细观损伤扩展模型。

\* 收稿日期: 1999-04-12; 修订日期: 1999-09-22。

作者简介: 阳建红 (1963—), 女, 博士, 研究领域为失效物理与可靠性。

2 声发射实验

实验所用的 HTPB 复合固体推进剂中固体填充颗粒的重量百分含量为 87%，其中 AP 含量为 68.5%，Al 粉的含量为 18.5%。根据航天部标准 QJ924-85 将推进剂制成标准哑铃形试件，试件标距  $l=52\text{ mm}$ 。

实验采用声发射技术(AE)研究单轴定速拉伸条件下标准哑铃形试件的声发射特性,所用的 AE 系统为美国 PAC 公司产的 LOCAN AT 型 14 通道声发射仪,总增益为 85 dB, 门槛电平为 30 dB, 通带为 100 kHz~300 kHz。

将标准哑铃形试件连接在 Instron 5500 型万能材料试验机的加载装置上。图 1 为声发射试验装置简图。用两个声发射探头对称装在试验两侧以保证拉伸

时受力均匀,并用橡皮带将两个探头固定好,探头和试件之间用凡士林作声耦合剂。

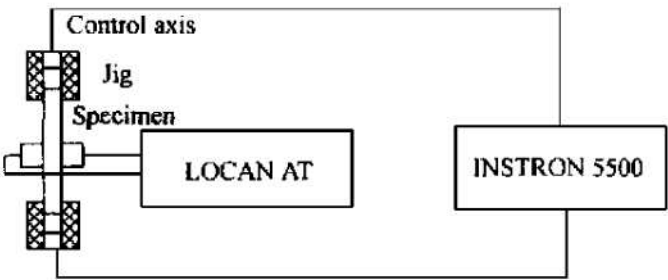


Fig. 1 Apparatus of AE experiment

图 2、图 3 分别给出了应变率为  $\dot{\epsilon}=0.577\text{ min}^{-1}$ ,  $\dot{\epsilon}=0.960\text{ min}^{-1}$  (或十字头速度为 30 mm/min, 50 mm/min) 的单向定速拉伸试件的累计声发射能量和载荷关系的典型试验曲线, 图 4、图 5 给出了试件的声发射事件数和信号幅度的典型试验结果。

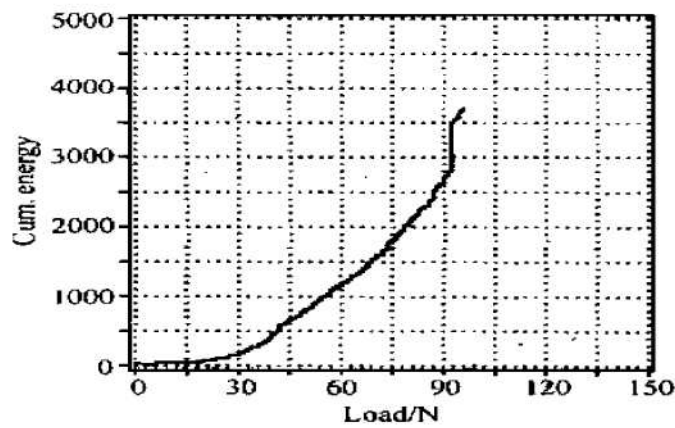


Fig. 2 Relation between AE cumul-energy and load ( $\dot{\epsilon}=0.577\text{ min}^{-1}$ )

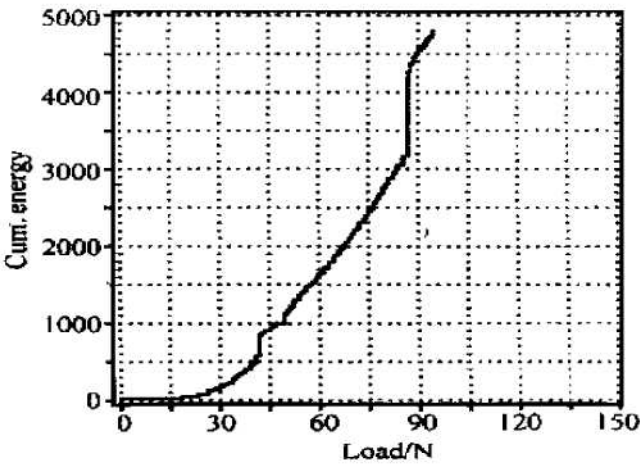


Fig. 3 Relation between AE cumul-energy and load ( $\dot{\epsilon}=0.960\text{ min}^{-1}$ )

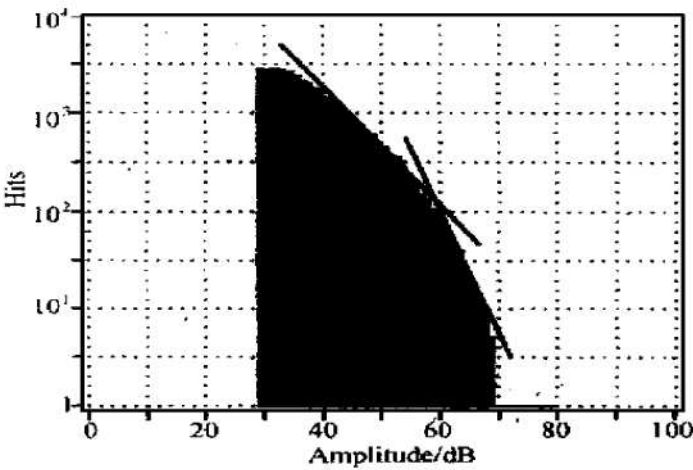


Fig. 4 Experimental cure between AE hits and signal amplitude ( $\dot{\epsilon}=0.577\text{ min}^{-1}$ )

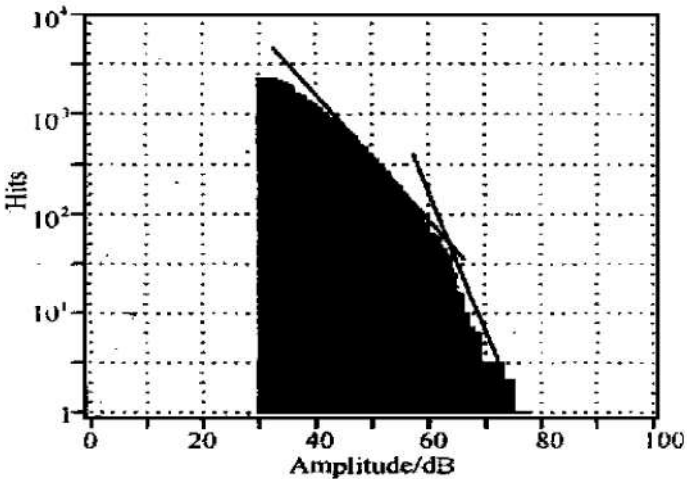


Fig. 5 Experimental cure between AE hits and signal amplitude ( $\dot{\epsilon}=0.960\text{ min}^{-1}$ )

### 3 实验结果分析

由图 2、图 3 可以看出, 载荷小于某一值时, 声发射测得的累计能量为 0 或很小。载荷超过该值后, 声发射信号急速增加, 且增加速率不断上升, 材料进入损伤成核、扩展和汇合阶段。由于声发射信号是由材料内部的微开裂现象引起的, 此值作为材料微裂纹损伤的门槛值  $\sigma_{th}$ 。

由图 4、图 5 可以看出, 在试验中存在着两种类型的波形, 对应着两类不同的 AE 源: 第一类波的范围很宽, 对应的峰值也较大, 信号大约分布在 30 dB ~ 60 dB 区域内, 信号分布斜率大约为 0.46, 这类波由粘合剂基体和颗粒界面开裂引起, 这些基体和颗粒界面的微裂纹形状尺寸大致相当, 相互之间作用很小, 数量随着载荷作用的增加而增加; 当应力足够大, 微裂纹的数目逐步增多时, 进入第二类波, 该波的范围较窄, 幅度较高, 信号分布在 60 dB ~ 70 dB 区域内, 信号分布斜率大约为 0.58, 损伤形式主要表现为微裂纹的扩展和汇合, 且扩展和汇合的概率极大, 很快发展为“脱湿”或引起宏观裂纹, 失去承载能力, 试样全面破坏断裂。因此可以看出微裂纹在基体和界面成核和产生阶段的寿命比微裂纹汇合阶段的寿命要大得多。

### 4 HTPB 复合固体推进剂细观损伤物理模型

根据统计细观损伤力学, 材料损伤研究的第一步是对单个微损伤状态进行描述, 给出决定材料状态变化的细观损伤扩展物理模型。为了从统计细观损伤力学的角度来研究 HTPB 复合固体推进剂的力学损伤行为, 首先需要根据声发射实验结果提出其细观损伤物理模型。

在 HTPB 复合固体推进剂材料中, 采用了性能优良的键合剂和偶联剂, 在固体填充颗粒周围建立了一个高模量的粘合剂层, 基体与固体颗粒间相互作用, 大大改善了粘合剂和固体颗粒界面的粘结力学性能。我们进行了不同拉伸速率的单向拉伸实验 (十字头速度为 2 mm/min, 30 mm/min, 50 mm/min, 100 mm/min)。结果表明: 对于拉伸速率高的试件, 拉断后试件外表颜色变化很小, 几乎不存在“脱湿”, 破坏形式为基体微裂纹产生、扩展和汇合。说明基体强度比界面强度弱, 基体和固体填充颗粒及两相界面裂纹开裂断裂韧性应满足关系式:

$$K_{IC}^{\text{基体}} < K_{IC}^{\text{界面}} < K_{IC}^{\text{固体颗粒}} \quad (1)$$

对于拉伸速率低的试件, 破坏试件外表颜色发白, 有明显的“脱湿”现象存在, 这是由于实验时间较长, 基体首先产生微裂纹导致基体强度减弱, 微裂纹开始在界面产生, 而界面一旦有微裂纹产生, 其强度即遭到破坏, 这时, 基体和固体填充颗粒及两相界面裂纹开裂断裂韧性应满足关系式:

$$K_{IC}^{\text{界面}} < K_{IC}^{\text{基体}} < K_{IC}^{\text{固体颗粒}} \quad (2)$$

微裂纹在界面扩展、汇合, 直至“脱湿”破坏。

根据上述分析, 细观损伤物理模型如图 6 所示: 一般, 初始损伤为 0, 如图 6 (a) 所示, 对应于声发射临界值以下; 随着载荷作用, HTPB 复合固体推进剂这种颗粒高填充比复合材料, 由于基体强度最弱, 故微裂纹起初在基体成核, 如图 6 (b) 所示, 随着载荷作用的增加, 基体微裂纹数量增加; 只有当应力足够大, 作用时间足够长时, 颗粒界面才开始出现微裂纹等损伤, 这些基体和颗粒界面的微裂纹形状尺寸大致相当, 且相互作用很小, 如图 6 (c) 所示, 损伤形式主要表现为微裂纹的数目不断增多, 对应着声发射的第一类 AE 源; 当微裂纹的数目足够多时, 微裂纹

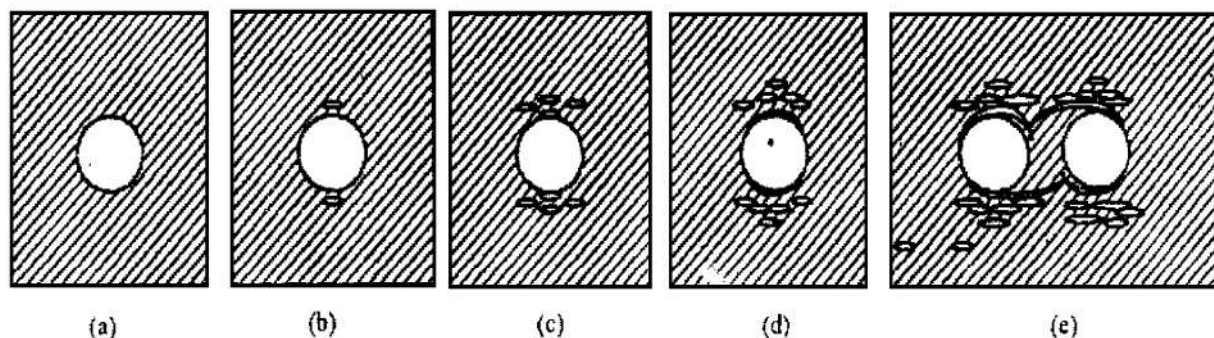


Fig. 6 Schematic diagram of meso-damage propagation of composite solid propellant

(a) Initial state (b) Microcrack nucleation in base (c) Microcrack nucleation in base and interface (d) Microcrack propagation (e) Microcrack collection

之间开始产生相互作用,主要表现为微裂纹的扩展,如图 6 (d) 所示,并很快导致微裂纹汇合 (基体与颗粒界面之间微裂纹的汇合,基体与基体之间微裂纹的汇合,颗粒界面与颗粒界面之间微裂纹的汇合等),如图 6 (e) 所示,最后发展为“脱湿”或引起宏观裂纹,对应着声发射的第二类 AE 源。通常,微裂纹在基体和界面成核和产生阶段的寿命比微裂纹扩展和汇合阶段的寿命要大得多。

5 结 论

根据 HTPB 复合固体推进剂材料特性及 AE 试验结果(定速拉伸试验结果和 AE 试验结果),提出了 HTPB 复合固体推进剂细观损伤物理模型。首先,该物理模型首次从细观机理方面解释了不同拉伸速率下,HTPB 复合固体推进剂材料破坏的不同宏观表现特征 (低拉伸速率推进剂破坏后材料呈明显“脱湿”特征,而快速拉伸推进剂破坏后材料几乎不存在“脱湿”特征),较完整地描述了 HTPB 复合固体推进剂在拉伸过程中材料由损伤到破坏的全过程,为损伤变量和损伤演化赋予了较真实的物理过程,有助于对

HTPB 复合固体推进剂损伤过程的本质认识;其次,该物理模型指出:微裂纹在基体和界面成核和产生阶段的寿命比微裂纹聚合阶段的寿命要大得多,所以可以忽略微裂纹聚合阶段,着重研究微裂纹在基体和界面成核和产生阶段的寿命,为以后进一步损伤数学模型的建立提供了物理依据。

参 考 文 献

[ 1 ] Hutchinson J W. Crack tip shielding by micro-cracking in brittle solids [J]. Acta Metall, 1987, 58 (3) .

[ 2 ] Schapery R A, A theory of crack initiation and growth in viscoelastic media-I, theoretical development[J]. Int J Fract, 1975, 79 (1) .

[ 3 ] 蒋谦逊, 固体推进剂的细观断裂形态 [R] . 航天科技报告, HT-880062N, 1988.

[ 4 ] 王亚平, 王北海. 丁羟推进剂拉伸脱湿的电子显微镜观测 [J] . 固体火箭技术, 1998, 21 (2) .

[ 5 ] 王晓明, 沈亚鹏, 李录贤. 颗粒填充汇合物破坏的细观行为 [R] . 西安交通大学工程力学系, 1992.

(责任编辑: 龚士杰)

简 讯

1998 年航天系统部分科技期刊的影响因子

A 刊 1998 年的影响因子  $IF^{98}(A) = 1998 \text{ 年“源刊”对 A 刊 1996 年文章的引用次数} / A \text{ 刊 1997 年可供引用的文章数}$ 。影响因子揭示了期刊中每篇文章的平均被引证频次,具有客观、公正、及时、准确的评价功能,愈来愈多地被科学界所接受。期刊的影响因子越大,相对来说影响也越大,直接反映期刊的内在质量。中国科技信息研究所每年度对科技论文进行一次统计与分析,现将 1998 年度报告中航天系统部分期刊的影响因子摘列如下。

| 刊 名       | 影响因子   | 刊 名      | 影响因子   |
|-----------|--------|----------|--------|
| 推进技术      | 0. 171 | 遥测遥控     | 0. 084 |
| 中国空间科学技术  | 0. 138 | 航天控制     | 0. 083 |
| 系统工程与电子技术 | 0. 137 | 强度与环境    | 0. 067 |
| 计算机仿真     | 0. 123 | 红外与激光工程  | 0. 061 |
| 低温工程      | 0. 115 | 宇航学报     | 0. 034 |
| 宇航材料工艺    | 0. 105 | 宇航计测技术   | 0. 030 |
| 固体火箭技术    | 0. 100 | 微电子学与计算机 | 0. 026 |
| 计算机工程与设计  | 0. 092 |          |        |