

SRM装药界面力学性能研究进展

乔栋, 强洪夫, 王哲君

引用本文:

乔栋, 强洪夫, 王哲君. SRM装药界面力学性能研究进展[J]. [兵器装备工程学报](#), 2020, 41(9): 13–18.

您可能感兴趣的其他文章

1. [火炮装药内弹道性能次要功计算系数测试方法](#)

引用本文: 赵煜华, 闫光虎, 严文荣, 等. 火炮装药内弹道性能次要功计算系数测试方法[J]. [兵器装备工程学报](#), 2020, 41(9): 90–93.

2. [一种TNT基熔铸装药的加速老化研究](#)

引用本文: 邓海, 梁争峰, 闫峰. 一种TNT基熔铸装药的加速老化研究[J]. [兵器装备工程学报](#), 2020, 41(9): 42–45.

3. [一种点传火管特性参数的理论预估与实验验证](#)

引用本文: 焦旭英, 严蕊, 周敬, 等. 一种点传火管特性参数的理论预估与实验验证[J]. [兵器装备工程学报](#), 2020, 41(10): 183–187.

4. [起圈织物复合材料的力学行为与渐进损伤分析](#)

引用本文: 李向阳, 吴将, 王校培, 等. 起圈织物复合材料的力学行为与渐进损伤分析[J]. [兵器装备工程学报](#), 2020, 41(10): 130–134.

5. [自动机凸轮曲线动力学性能改进](#)

引用本文: 李利, 李加昭, 刘明敏. 自动机凸轮曲线动力学性能改进[J]. [兵器装备工程学报](#), 2020, 41(9): 139–143.

SRM 装药界面力学性能研究进展

乔 栋, 强洪夫, 王哲君

(火箭军工程大学, 西安 710025)

摘要:从力学性能的实验测试方法、界面破坏过程数值模拟以及界面破坏理论3个方面,综述了SRM装药界面力学性能的研究进展:目前研究中的难点是动态加载条件下SRM装药界面力学性能的实验测试方法,可以借鉴针对复合固体推进剂的中高应变率的实验测试方法;低温条件下对SRM装药界面力学性能实验开展极少,可以借鉴针对其他非金属材料粘接试件的低温力学实验研究方法;装药界面数值模拟研究与实际需求还存在较大的差距,将成为今后研究的重点;当前急需一种高效且准确的模型参数获取方法,可以基于内聚力模型做进一步扩展。

关键词:SRM;装药界面;力学性能;实验测试方法;数值模拟;界面破坏理论

本文引用格式:乔栋,强洪夫,王哲君. SRM装药界面力学性能研究进展[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(09): 13-18.

Citation format: QIAO Dong, QIANG Hongfu, WANG Zhejun. Research Progress on Mechanical Properties of SRM Charge Interface[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2020, 41(09): 13-18.

中图分类号: TJ55; V512

文献标识码: A

文章编号: 2096-2304(2020)09-0013-06

Research Progress on Mechanical Properties of SRM Charge Interface

QIAO Dong, QIANG Hongfu, WANG Zhejun

(Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China)

Abstract: The research progress of SRM charge interface's mechanical properties was introduced from three aspects, which are experimental method of mechanical properties, numerical simulation of interface failure process and interface failure theory. The shortcomings in current research and the content of further research were proposed as well: at present, the difficulty in the research is the experimental test method of SRM charge interface's mechanical properties under dynamic loading, which can use the method adopted by composite solid propellant at medium and high strain rate for reference; the experiment of SRM charge interface's mechanical properties under low temperature has hardly been carried out, which can use the method adopted by other non-metallic materials bonding specimens at low temperature for reference; There is a big gap between the research of numerical simulation and the actual demand for reference charge interface, which can be the focus of future research; Currently, there is an urgent need for an efficient and accurate method to obtain model parameters, which can be further expanded based on cohesion model.

Key words: SRM; charge interface; mechanical properties; experimental test method; numerical simulation; interface failure theory

固体火箭发动机(Solid Rocket Motor, SRM)主要由固体推进剂制成的药柱、燃烧室、含推力矢量控制装置的喷管和

安全点火装置四大部分组成^[1],是导弹武器装备的最主要动力来源。经过战后十几年的发展,到60年代初,固体推进技

收稿日期: 2019-12-09; 修回日期: 2019-12-28

基金项目: 国防科技重点实验室基金项目(6142701190201)

作者简介: 乔栋(1996—),男,硕士研究生,主要从事固体火箭发动机装药结构完整性分析研究, E-mail: 1196184554@qq.com。

通讯作者: 强洪夫(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事飞行器结构完整性分析理论与技术研究, E-mail: Qiang@263.cn。

术应用于战略导弹的主要问题得到解决。随着武器装备性能的不提高,药柱装填比例和燃烧室工作压强进一步增大,SRM 在点火时的装药结构完整性问题成为热点难点问题^[2]。

美国《空间飞行器设计规范》明确指出:引起热试车和发射失败的主要原因在于结构完整性的破坏^[3]。20 世纪 60 年代中期,美国航空喷气公司共进行了 14 464 台固体火箭发动机试车,总失败率为 10%,对事故原因进行详细分析,其中绝热层、衬层、人工脱粘层的界面损坏和脱粘占 31.9%。统计了国外 1959—1989 年间 110 次固体火箭发动机故障原因,其中由界面脱粘造成故障的比率为 21.2%。2005 年,国内某航天企业连续发生了三台大型固体火箭发动机前人工脱粘层根部凸环附近衬层和推进剂界面脱粘的质量事故^[4]。这些现象的发生,造成了重大经济损失,严重滞后了该型战术导弹的研制进程。

庞爱民^[5]从化学组成分布特征与细观物理结构方面,揭示了界面化学粘接机理、界面老化与失效机理,为改善 NEPE 推进剂装药界面粘接奠定了理论基础。本研究主要针对 SRM 装药界面力学性能的宏观方面,从实验测试方法、粘接界面破坏过程数值模拟以及界面破坏理论研究进展出发,对近年来的研究进行了梳理、总结和展望,并就其中存在的问题指出了解决方法。

1 装药界面力学性能实验测试方法

针对固体推进剂装药界面,国内外研究者们对不同试验件构型,在不同角度和不同条件下进行了多种力学性能实验。

1.1 对不同试验件的力学性能实验

Anderson^[6]设计了多种装药界面粘接件试件构型并进行了力学性能试验,给出了不同载荷条件对粘接界面的影响。Bills^[7]设计了 scarf-joint 试件[见图 1(a)],缓解了试件边缘处的应力集中程度,通过试验测得了固体推进剂/衬层界面能。Christiansen^[8]、Kuhlmann^[9]等在壳体 and 绝热层之间引入了预制裂纹,分别设计了圆锥形粘合实验件和矩形粘合实验件,有效弥补了界面应力分布不均且具有奇异性的缺点。美国聚硫橡胶公司的“锥台”形结构模拟件[见图 1(b)],具有轴对称结构形式。国内有学者采用了圆周型试件[见图 1(c)],充分模拟发动机构造,获得了较好的实验结果。除此之外,研究者们还设计了众多剪切、剥离和扯离试件^[10-12][见图 1(d)]。

1.2 不同角度下力学性能实验

SRM 在固化降温及贮存、运输、点火、飞行过程中,其装药粘结界面所承受的载荷应力方向也会发生变化,导致其承受了拉伸、剪切和混合应力等多种载荷状态,因此在分析其力学行为时,必须考虑载荷角度。

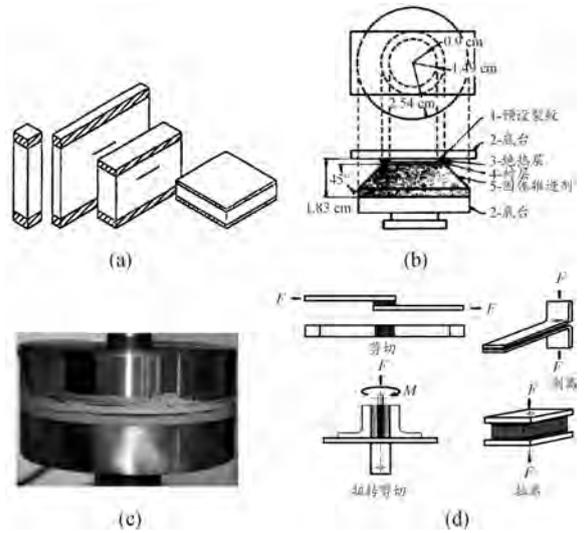


图 1 多种形式的粘接试件结构

姜爱民等^[13]通过单轴拉伸实验观察了粘接界面模拟件脱粘破坏过程,整个过程表现为裂纹的起裂、扩展和失效(图 2),在人工脱粘尖端推进剂与衬层之间形成宏观裂隙。钮然铭^[14]对推进剂/衬层界面 II 型断裂模式进行了研究,计算获得了纯剪切状态下界面断裂参数,最终构建了 HTPB 推进剂/衬层界面率相关 II 型内聚力模型并进行了验证(图 3)。Gregory 等^[15]采用了一种多角度拉伸夹具[图 4(a)]进行了混合载荷条件下的力学性能测试,发现粘结强度受载荷角度影响明显,总断裂能随相位角增大而增大。Kuhlmann 等^[16-17]分析了矩形试件在多角度拉伸条件下的试验结果,结果表明界面粘接强度在最大拉应力、最大剪应力和最大畸变能准则作为强度准则时受拉伸角度影响较大,在最大主应力作为强度准则时受拉伸角度影响较小。邱欣等^[18]改进了实验夹具,设计了一种能够测试标准试件在混合载荷状态下力学性能的新夹具[图 4(b)],开展了 SRM 矩形粘接件在常温准静态下拉伸实验,分析了多种载荷角度下粘接界面的性能及破坏情况,说明界面起裂时最大主应力随拉伸角度增大而减小。

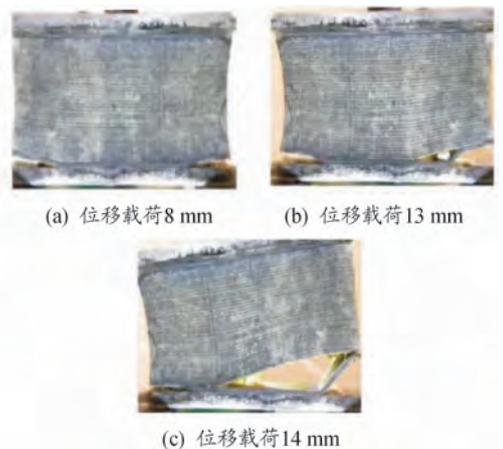


图 2 粘接试件拉伸起裂过程图

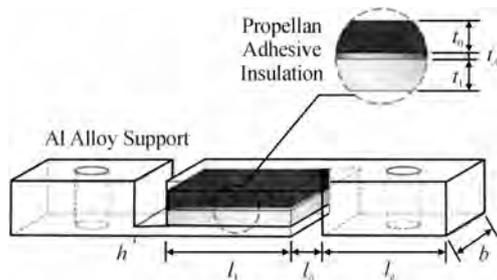


图3 界面 II 型断裂实验装置示意图

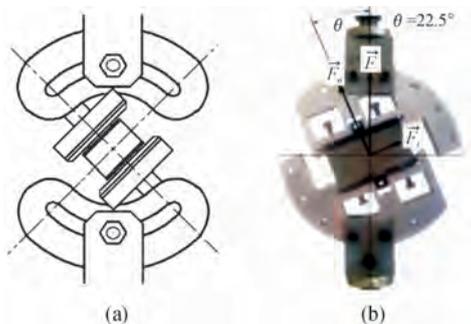


图4 适用于粘接试件的多角度拉伸夹具示意图

1.3 不同条件下力学性能实验

目前,针对 SRM 装药粘接界面的力学性能实验研究,按温度范围划分,其主要有常温状态和高温状态;按应变率范围划分,其主要测试方法有准静态力学性能实验和动态力学性能实验。

何国强和肖育民^[19]研究了发动机点火时高增压条件下对界面脱粘扩展的影响,并得到了脱粘传播速度与燃烧室点火压强梯度的经验关系式。Ho^[20]对推进剂/包覆层试样的热循环开展了动力热力学研究,讨论了热循环和高温热加速老化加载下 SRM 装药粘接界面的性能和可能的失效模式,得出双材料的内部耗散能可以用于判断界面处的不完美粘接和预测可能的失效模式(推进剂的内聚失效或者界面处的粘接失效)。邱欣等^[21]在常温准静态下通过单轴拉伸实验观察了推进剂/衬层/绝热层粘接体系的失效过程,揭示了推进剂/衬层界面失效过程中存在颗粒脱湿与胶黏剂的纤维断裂这两种不同断裂过程。陈刚等^[22]将 NEPE 推进剂/衬层粘接试件在常温、高温、低温 3 种条件下进行拉伸,并采用原位拉伸扫描电镜观测裂纹扩展规律,发现 3 种情况下均在推进剂/衬层连接处首先产生裂纹,且裂纹扩展存在相互竞争关系。

1.4 当前研究中存在的不足和展望

目前,SRM 装药界面力学性能实验测试方法研究,主要存在以下两方面的不足:

1) 动态加载条件下装药界面的力学性能实验测试方法研究较少,当前研究主要集中于准静态($< 1 \text{ s}^{-1}$)条件下,对于中应变率($1 \sim 10 \text{ s}^{-1}$)和高应变率($> 10 \text{ s}^{-1}$)条件下力学性能实验研究较少;

2) 针对低温 $1 \sim 100 \text{ s}^{-1}$ 应变率范围内装药界面动态力

学性能和破坏情况的研究,开展极少,这就导致针对 SRM 装药结构在低温点火条件下的完整性分析,仍采用基于常温准静态加载下获得的固体推进剂力学性能数据以及时温等效原理开展,计算结果可靠性不足。

3) 可以在以下两个方面开展进一步的研究:第一,借鉴针对复合固体推进剂的中高应变率单轴拉伸力学性能实验测试方法对粘接界面试验件进行拉伸实验,但要特别注意实验过程中应变率的稳定性以及实验件的安装方法等问题,同时还要注意高应变率下试件破坏过程不易捕捉的问题;第二,借鉴针对多种非金属材料粘接件的力学性能实验研究的测试方法,将这些测试方法应用在 SRM 装药界面上,可以成为今后开展装药结构力学性能实验研究的新方法。

2 粘接界面破坏过程数值模拟

实验方法直观准确,但对实验设备,实验条件和相关技术要求较高,而数值模拟方法经济性好、可重复性强。王至存等^[23]对含人工脱粘层的矩形粘结试件进行三维粘弹性有限元分析,给出了应力集中系数的变化规律。许萌萌等^[24]通过在界面处引入奇异裂纹单元,计算了点火内压下推进剂/衬层、绝热层/壳体界面裂纹尖端应力强度因子,并给出随裂纹深度的发展规律。刘甫^[25]通过构建粘弹性增量界面元,采用有限元方法对 SRM 装药界面脱粘进行了研究,结果表明界面损伤的模式与界面强度有较大的关系,界面前段适当增加开口长度,可以提高装药结构完整性。邱克等^[26-27]基于经典的粘弹性断裂力学方法,构建了推进剂/衬层界面含有裂纹的三区域界面层模型,结果表明界面层模量随贮存时间的延长而降低时,应力强度因子逐渐减小,界面层厚度对应力强度因子的影响则不明显。郑晓亚和柳青^[28]基于热黏弹性接触理论,采用接触算法模拟装药应力场边界条件,构建了能够快速判断脱粘的失效准则。王广等^[29]建立了固体推进剂/衬层粘接体系二维细观数值模型,采用 cohesive 单元表征分析,数值模拟了不同老化时间条件下界面的脱粘过程。为准确描述和预测 SRM 装药不同界面的粘接性能,马晓琳等^[30]提出算法在 ABAQUS 软件二次开发和基于势函数的 PPR 内聚力单元,对不同加载速率下粘接界面的断裂与损伤特性进行了相关研究。当前对复合固体推进剂进行数值模拟及力学性能分析的工作已经开展了很多,但对粘接界面进行细观数值建模并进行力学分析则比较少。数值模拟结果可以作为实验的有力补充和验证,进一步完善装药界面的力学性能参量。

3 界面破坏理论研究进展

当前,对材料进行失效分析研究大多采用连续介质力学方法。但是连续介质力学有着其局限性,其假设材料或者结构本身是连续的,一旦分析的材料多于一种,便不再适用,而粘接界面破坏针对多种材料,明显地与这种假设相违背。在

计算裂纹尖端处的应力时是具有奇异性的,所以需要引入断裂力学方法进行研究。

3.1 线弹性断裂力学

线弹性断裂力学主要描述脆性材料线弹性的断裂问题。Griffith 提出,当裂纹扩展释放的弹性应变能大于新裂纹形成的表面能时,裂纹就会扩展。之后 Irwin 提出了应力强度因子 K ,在此基础上又提出了能量释放率的概念。并将裂纹扩展单位长度所释放的应变能定义为应变能释放率,记为 G 。I 型断裂时的应变能释放率 G_I 的柔度表达式为^[31]:

$$G_I = \frac{1}{2B} P^2 \frac{\partial C}{\partial a} \quad (1)$$

其中: B 是试样宽度; P 是载荷; C 是柔度; a 是裂纹长度。基于 G 的断裂准则如下:

$$G = G_c \quad (2)$$

G_c 是材料的断裂韧度,反映了材料抵抗材料断裂的能力。基于应力强度因子 K 的断裂准则如下:

$$K = K_c \quad (3)$$

即当裂纹尖端应力强度因子达到材料断裂韧性的临界应力强度因子时,裂纹就开始扩展。二者联系如下:

$$G_I = \frac{K_I^2}{E} \quad (4)$$

3.2 弹塑性断裂力学

对于大范围屈服条件,线弹性力学特性便不再满足,因此有必要将线弹性断裂理论拓展到弹塑性断裂的层面。引入了一个重要的断裂参数:裂纹张开位移 (Crack Opening Displacement, COD)^[32]。但应该认识到,与裂纹尖端相关的应变场和裂纹张开位移随着试样形状的不同而不同。因此,对于一种给定的材料,不能采用与 K_I 类似的方式定义单一的临界裂纹张开位移值。

1968 年, Rice 引入 J 积分, J 积分不仅能够描述裂纹尖端区域的应力、应变场的强度,更主要的它可以通过实验直接测定。基于能量守恒定律, Eshelby 表明对于一个闭合回路, J 积分值为 0, 即

$$J = \int_{\Gamma} \left(W dx_2 - T_i \frac{\partial u_i}{\partial x_1} ds \right) = 0 \quad (5)$$

式中: W 是应变能密度; T_i 是应力分量; u_i 是位移分量。

所以,对于一条裂纹,在其周围作一个闭合路径 $AFBDECA$ (如图 5 所示),其 J 积分

$$J_{\Gamma+\Gamma'} = J_{\Gamma} + J_{\Gamma'} + J_{BD} + J_{AC} = 0 \quad (6)$$

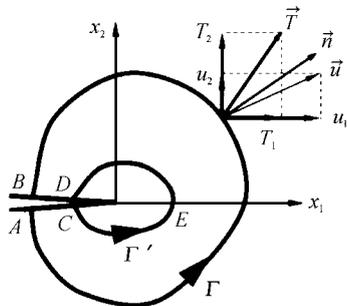


图 5 裂纹周围的 Eshelby 路径示意图

又沿着 AC 和 BD (裂纹表面), 牵引力 T 等于 0, 法向应力和切向应力也均为 0, $J_{BD} = J_{AC} = 0$ 。所以

$$J_{\Gamma} = -J_{\Gamma'} \quad (7)$$

因此,围绕一条裂纹的两个不同路径的 J 积分相同的值。也就是说,围绕一条裂纹的 J 积分通常与路径无关。根据物理学观点,围绕一条裂纹的 J 积分等于该裂纹扩展的势能该变量。因此,对于一个厚度为 B 的物体

$$J = \frac{1}{B} \frac{\partial U}{\partial a} \quad (8)$$

式中: U 为势能; a 为裂纹长度; B 为板厚。对于小范围屈服, J 积分与能量释放率 G 相等。

J 积分的路径无关性连同这种基于能量观点的解释,使其成为一个强大的分析工具, Sorensen^[33] 将 J 积分应用于粘接件中,得到了较为可信的结果。常新龙等^[34] 应用等效积分区域法建立推进剂含裂纹试件有限元模型,计算了推进剂试件含不同长度 I 型裂纹起裂点的 J 积分值。赵光辉等^[35] 根据标准 SRM 矩形粘结试件,将人工脱粘层开在了推进剂/衬层界面,用实验方法测定了粘接界面的 J 积分。孙博^[36] 采用三维黏弹性有限元方法探讨了界面裂纹在点火发射时的稳定性,结果表明 J 积分值随着脱粘深度的增加呈单调增长趋势,当脱粘深度到达一定值后将失稳扩展。王阳^[37] 运用 J 积分理论和数字图像相关 (DIC) 方法得到的变形场计算复合型裂纹尖端的 J 积分,验证了 DIC 方法可以有效地计算 J 积分。但运用 J 积分对粘接界面进行计算也有一定的局限性,需要对网格重新划分,计算时间会相应增加,计算效率会降低。

3.3 界面力学

界面,是指不同材料结合之后形成的接触面。在我们进行力学分析的时候,不能简单的只在几何意义上将界面看成是一个分界面,而是要将其视为一个区域,这就是所谓的界面层。界面层和两侧材料所承受的应力大小及方向均不同,且界面层的自由能更大,它们的能量状态也就不一样。所以,结合体界面层的性能与其两侧材料都不相同,这就导致了界面往往是影响结合体可靠性的薄弱环节,在界面处尤其是界面上的形状突变处,极容易出现应力集中的问题,使得界面附近的材料承受过高的应力。因此,为了研究界面问题的特殊性,一个新的力学分支—“界面力学”应运而生,使我们能够对结合体的强度进行定量测量并进行优化。

常见界面如图 6 所示,主要有以下 3 种:

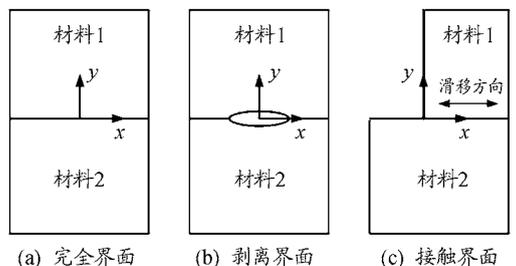


图 6 界面示意图

图 6 界面示意图

① 完全结合界面[图 6(a)]。界面无缺陷,界面上各处应力与位移均连续;

② 剥离界面[图 6(b)]。界面上有裂纹,且在裂纹处上下材料相互分离;

③ 接触界面[图 6(c)]。材料仅因受力而互相接触,实际未结合。

依照之前应力分析,结合体的失效一般始于界面。界面失效形式与界面粘接强度,界面两侧材料性质以及应力大小有关,常见的开始于界面的失效形式如图 7 所示,主要有以下 4 种:

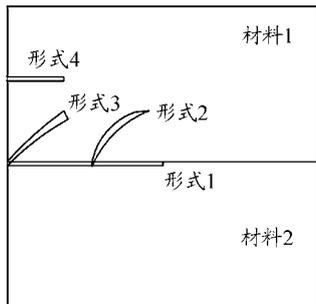


图 7 界面破坏形式示意图

① 纯界面失效。失效形式为纯粹的界面脱粘。当界面粘接强度较小时,容易出现此类失效;

② 界面与材料混合失效。失效形式为,界面先发生脱粘,然后裂纹向两侧材料处延伸。当界面粘接强度较高且应力较小时,容易出现此类失效;

③ 从界面端发生的材料失效。失效形式为界面未脱粘,但界面两侧材料出现裂纹。当界面粘接强度较高且应力较大时,容易出现此类失效(此类失效也容易出现在界面缺陷处);

④ 非界面处的材料失效。失效形式为界面未脱粘,但稍远于界面处的材料出现裂纹。当界面粘接强度极高且失效侧材料变形较大时,容易出现此类失效。

界面力学模型中发展最为成熟的就是内聚力模型(Cohesive Zone Model, CZM)。内聚力模型能够反映裂纹间隙的增长,微裂纹的变形等非线性断裂过程区的力学行为,它的提出使得裂纹尖端奇异性的问题得以解决。当含有裂纹的结构承受载荷时,在裂尖会出现由上、下两个微裂纹面围成的非线性损伤区,即内聚力区。同时,由于两个微观裂纹面之间的距离非常小,在两个表面存在分子或原子的相互作用力,即内聚力。显然,内聚力的大小与两个裂纹面之间的距离有关。在内聚力区,材料存在一个损伤演化的过程,Dugdale^[38]引入了内聚力和间距的本构关系,即内聚法则(Cohesive law),又叫牵引力—分离(T-S)法则。Barenblatt^[39]第一次把材料的断裂形容为两个表面的分离。内聚法则根据T-S关系的不同,将内聚力模型分为四种:双线性、梯形、多项式型和指数型(图 8)。Mi^[40]在 1998 年提出双线性内聚力模型;Tvergaard 和 Hutchinson^[41]建立了梯形模型,利用无量纲的位移参数 λ 同时包含法向和切向位移,该模型分为弹性、塑性和退化 3 个线性阶段;Xu 和 Needleman^[42]建立了指

数和多项式相结合的内聚力模型。

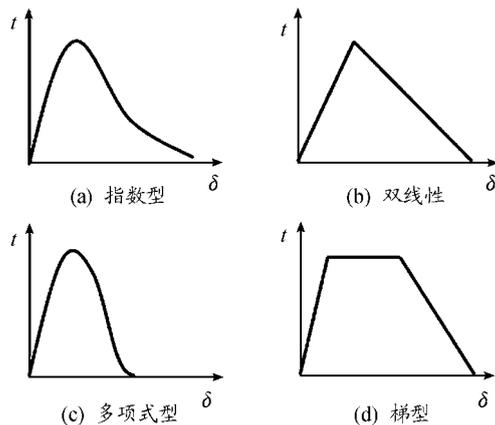


图 8 4 种典型内聚力模型示意图

3.4 当前研究中存在的不足和展望

内聚力模型可以根据材料的不同而定义不同的断裂准则,因而具有比线弹性断裂力学更好的适用性。但内聚力模型中参数较多而且很多参数的物理意义不清晰,材料的本构与界面的本构也是相互独立的,因此在实际应用中,很难通过实验获得各项模型参数的精确值。并且从实验法中提取的有限参数,如应力极限峰值,并不能直观地解释失效破坏的内在机理。当前采用的反演分析方法可以将实验获得的有限参数与数值计算方法相结合,但反演过程繁琐,信息量大,算法的计算效率又较低。因此,亟需一种高效且准确的模型参数获取方法,今后可以对反演分析算法开展进一步优化,从有限的实验信息中获得真实可靠的材料力学性能参数以及界面微观损伤演化参数。

4 结论

从 SRM 装药界面的力学性能实验测试方法、界面破坏过程的数值模拟以及界面破坏理论研究进展 3 个方面,对装药界面力学性能的研究进展以及当前研究中存在的不足进行了论述和分析,认为今后需要重点研究的内容可以概括为:建立低温中高应变率条件下粘接界面试验件单轴拉伸力学性能实验新方法,填补测试空白;在数值模拟上做进一步研究和优化,获得更为完备粘接界面细观数值模型,完善装药界面破坏机理;在粘接界面力学模型方面开展研究,争取获得更高效且准确的模型参数获取方法。

参考文献:

- [1] 陈汝训. 固体火箭发动机设计与研究[M]. 北京: 宇航出版社, 1991.
- [2] 侯林法. 复合固体推进剂[M]. 北京: 宇航出版社, 1994.
- [3] DOUGLASS H W, COLLINS J H, NOEL J S, et al. Solid propellant grain structural integrity analysis[R]. NASA SP-8073, 1972.
- [4] 郭翔. NEPE 推进剂/衬层界面粘结、破坏机理与力学性

- 能调控技术研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2017.
- [5] 庞爱民,池旭辉,尹华丽. NEPE 推进剂/衬层界面研究进展[J]. 固体火箭技术,2018,41(2):181-202.
- [6] ANDERSON J M. Techniques for Assessing Case Liner-Bond Integrity in Solid Propellant Rocket Motors [R]. AD768315,1973,9.
- [7] BILLS K W. Development of The Scarf - Joint Test for the Measurement of Bond Fracture Energy [R]. AIAA/SAE/ASME 17th Joint Propulsion Conference,1981,7.
- [8] FIELD J E, PROUD W G, SIVIOUR C R, et al. Dynamic deformation properties of energetic composite materials [R]. University of Cambridge, SP 1154,2005.
- [9] KUHLMANN T L, PEETERS R L, BILLS K W. Modified Maximum Principal Stress Failure Criterion Applied to Propellant Liner Bond Failures [R]. AIAA-1985-1439.
- [10] RODIC V. Case Bonded System for Composite Solid Propellants [J]. Scientific Technical Review,2007,7(3):77-82.
- [11] MORGAN. Studies on Interface Properties of Propellant Liner for Case Bonded Composite Propellants [J]. J. Energ. Mater.,2003,21(2):45-52.
- [12] A. 达维纳. 固体火箭推进剂技术 [M]. 北京:中国宇航出版社,1997.
- [13] 姜爱民,李高春,黄卫东,邱欣. HTPB 推进剂/衬层粘接试件变形破坏过程试验与数值模拟 [J]. 兵工学报,2014,35(10):1619-1624.
- [14] 钮然铭. 丁羟推进剂/衬层 II 型界面断裂研究 [D]. 南京:南京理工大学,2015.
- [15] GREGORY B, JULIEN J, MARTIN E R, et al. Strength of Adhesively Bonded Joints Under Mixed Axial and Shear Loading [J]. Int. J. Adhes Adhes,2012,35:27-35.
- [16] KUHLMANN T L, PEETERS R L, BILL K W. Modified Maximum Principal Stress Criterion for Propellant Liner Bond Failures [J]. J. Propul. Technol.,1987,3(3):235-240.
- [17] KUHLMANN T L, PEETERS R L, BILLS K W. Modified Maximum Principal Stress Failure Criterion Applied to Propellant Liner Bond Failures [R]. AIAA-1985-1439.
- [18] 邱欣,李高春,姜爱民,等. 固体推进剂矩形粘接试件的多角度拉伸试验. [J] 含能材料,2014(06):786-791.
- [19] 何国强,肖育民. 装药燃烧增压过程中脱粘扩展条件实验分析 [J]. 固体火箭技术,1998,21(1):16-19.
- [20] HO K, CROFOOT T, NELSON S. Gelled Propellants for Tactical Missile Applications [R]. AIAA 99-2976,1999.
- [21] 邱欣,李高春,丁彪,等. 基于原位拉伸的推进剂/衬层界面力学性能研究 [J]. 推进技术,2014,35(1):115-122.
- [22] 陈刚,王小英,张雪. 未老化 NEPE 推进剂/衬层粘接试件拉伸失效模式研究 [J]. 固体火箭技术,2012,35(6):787-791.
- [23] 王至存,朱祖念,张善祁. 固体发动机药柱粘接试件的三维应力分析 [J]. 宇航学报,1996,17(4):34-38.
- [24] 许萌萌,胡春波,何国强. 固体火箭发动机界面脱粘裂纹分析 [J]. 固体火箭技术,2008,31(2):121-124.
- [25] 刘甫. 粘弹性界面断裂与固体火箭发动机界面脱粘研究 [D]. 长沙:国防科技大学,2005.
- [26] 邱克,杨月诚,张昆鹏. 固体推进剂/衬层界面裂纹的界面层模型有限元分析 [J]. 固体火箭技术,2012,(6):751-755.
- [27] 邱克,杨月诚. 固体推进剂/衬层界面脱粘裂纹的三区域界面层模型 [J]. 推进技术,2012,33(4):603-608.
- [28] 郑晓亚,柳青,王卫祥. 固体装药结构界面应力分析 [J]. 航空动力学报,2012(8):1861-1866.
- [29] 王广,赵奇国,武文明. 复合固体推进剂/衬层粘结合界面细观结构数值建模及脱粘过程模拟 [J]. 科学技术与工程,2012,10:7972-7977.
- [30] 马晓琳,申志彬,崔辉如. 固体发动机推进剂/绝热层界面 I 型脱粘力学行为试验与仿真研究 [J]. 固体火箭技术,2018.
- [31] 伍颖. 断裂与疲劳 [M]. 北京:中国地质大学出版社,2008.
- [32] 王自强,陈少华. 高等断裂力学 [M]. 北京:科学出版社,2009.
- [33] SORENSEN B F, JACOBSEN T K. Determination of Cohesive Laws By the J Integral Approach [J]. Engineering Fracture Mechanics,2003,70(14):1841-1858.
- [34] 常新龙,余堰峰,张有宏,等. 基于有限元理论的 HTPB 推进剂 I 型裂纹 J 积分数值模拟 [J]. 火炸药学报,2010,33(5):60-64.
- [35] 赵光辉,强洪夫,张永敬. 推进剂/衬层脱粘 J 积分判据实验研究 [J]. 上海航天,2000(5):23-27.
- [36] 孙博,朵英贤,蒙上阳. 基于 J 积分分析固体火箭发动机药柱界面裂纹的稳定性 [J]. 北京理工大学学报,2018,38(2):124-129.
- [37] 王阳,李高春,伍鹏,等. 基于数字图像相关方法的端羟基聚丁二烯推进剂复合型裂纹 J 积分测量 [J]. 兵工学报,2019,40(2):284-291.
- [38] DUGDALE D S. Yielding of Steel sheets Containing Slits [J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids,19-60,8(2):100-104.
- [39] BARENBLATT G I. The Mathematical Theory of Equilibrium Cracks in Brittle Fracture [J]. Advances in Applied Mechanics,1962,7(55):104.
- [40] MI Y, CRISFIELD M A, DAMES GAO. Progressive delamination composite using interface elements [J]. Journal of Composite Materials,1998,32:1246-1272.
- [41] TVERGAARD V, HUTCHINSON J W. The Relation Between Crack Growth Resistance and Fracture Process Parameters in Elastic Plastic Solids [J]. J Mech Phy Solids,1992,40(6):1377-1397.
- [42] XU X P, NEEDLEMAN A. Void Nucleation by Inclusion Debonding in a Crystal Matrix [J]. Model Simul. Master Sc. 1993,1(2):111-132.