

DOI: 10.11883/bzycj-2020-0220

基于细观建模的电子束预控弹体 破裂机理数值研究*

邱 浩, 蒋建伟, 门建兵, 王树有, 李 梅

(北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081)

摘要: 为研究电子束预控弹体的破裂机理。提出了基于电子束预控弹体细观几何特性的参数化建模方法, 建立了含基体、熔融区、过渡区和空腔区弹体的三维有限元模型, 采用 LS-DYNA 软件对典型弹体的爆炸驱动和破裂过程进行了数值模拟分析。结果表明: 电子束预控弹体破裂过程可分为: 弹体膨胀后的空腔区在环向拉应力作用下产生拉伸断裂、过渡区产生裂纹扩展和拉伸断裂以及空腔区底部基体在两侧拉应力和底部压应力作用下产生与弹体内壁法线呈 45° 的剪切破坏 3 个阶段。数值模拟结果与回收的破片截面形状和破坏模式吻合较好。研究结果对电子束预控弹体破片成型控制具有参考价值。

关键词: 电子束刻槽; 预控破片; 数值模拟; 细观建模

中图分类号: O389; TJ413

国标学科代码: 13035

文献标志码: A

Numerical study on the fracture mechanism of electron beam controlled projectile based on micro modeling

QIU Hao, JIANG Jianwei, MEN Jianbing, WANG Shuyou, LI Mei

(State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology University, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to study the fracture mechanism of the projectile melted by the electron beam, a parameterized modeling method based on the micromechanical characteristics of the projectile was proposed. Scanning electron microscope and hardness tester were used to accurately obtain the characteristics of the electron beam melted zone. The typical electron beam controlled area was composed of the melting zone, the transition zone, the hollow zone and the matrix zone. Three hypotheses were proposed based on the mesoscopic characteristics of the electron beam controlled projectile. First, the structural characteristic parameters of the electron beam controlled projectile were summarized. Second, diamond-shaped finite element mesh elements were constructed through translation nodes. Third, the electron beam controlled pattern was constructed by combining diamond-shaped finite elements. Finally, the materials of melting zone and transition zone are defined, and finite elements of the hollow zone were deleted. A three-dimensional finite element model of the projectile with matrix, melting zone, transition zone and hollow zone was established. The explosion driving and fracture process of the typical projectile was simulated and analyzed by LS-DYNA software. The results show that the fracture process of the projectile can be divided into three stages: the tensile fracture in the hollow zone after the expansion of the projectile under the action of the circumferential tensile stress; the crack propagation and tensile fracture in the transition area; and the shear failure of the matrix at the bottom of the cavity area under the action of the tensile stress at both sides and the compressive stress at the bottom, which is 45° to the normal of the inner wall of the projectile. The numerical simulation results are in good agreement with the recovered

* 收稿日期: 2020-07-01; 修回日期: 2020-09-25

基金项目: 国家自然科学基金(11872123)

第一作者: 邱 浩(1990—), 男, 博士研究生, qiuhaomail@foxmail.com

通信作者: 蒋建伟(1963—), 男, 博士, 教授, bitjw@bit.edu.cn

fragment section shape and failure mode. The research results are of reference value to the forming control of projectile fragments by electron beam controlled.

Keywords: electron beam grooving; controlled fragmentation; numerical simulation; ammunition engineering

电子束弹体预控技术是一种无需像机械刻槽一样削减弹体的新型预控破片成型技术, 具有提高弹丸破片杀伤威力和保证结构强度的优点, 在高膛压制导炮弹战斗部上具有极广泛的应用前景。

受电子束扫描弹体区域的域材料强度会发生变化, 这将对弹体破碎产生直接影响, 破片成型与电子束扫描区域的破裂密切相关, 破裂机理决定了弹体破裂后形态, 继而决定预控破片的形状与质量, 最终影响战斗部的威力。研究电子束预控弹体破裂机理, 有助于了解电子束预控弹体破裂行为, 对电子束预控破片成型控制与破片设计具有重要意义, 需要加以详细研究。目前的研究主要集中在实验方面, 文献 [1-4] 对激光束、电子束等加工试件开展了冲击断裂试验或静态拉伸试验, 对扫描区域微观组织与断口形貌进行了观察和硬度测试, 扫描后的区域材料发生了显著变化, 断裂发生在扫描区域。文献 [5-10] 通过对 40CrMnSiB、40Cr、93W 等材料弹体进行电子束加工, 开展了扇形靶和破片回收实验, 结果表明弹体在电子束扫描区域断裂, 获得了良好的预控效果。由于试验手段不能直接观察到弹体的破裂过程, 难以直观呈现弹体的破裂机理。计算机数值模拟作为重要的研究手段, 能够展现出弹体裂纹扩展过程及破坏形态, 并反映出弹体的断裂破坏机理。对于电子束等高能束的数值模拟, 学者们开展了一些研究并取得成果^[11-12]。这些研究中电子束预控弹体建模主要是将刻槽区域按机械刻槽处理^[11]; 或将刻槽区简化为单一改性区, 比较了有无缺陷区的影响, 缺乏弹体破裂过程与机理分析^[12]。由于电子束扫描区域材料依然保留且相对弹体原始材料发生了显著改变。简化模型的数值模拟分析对电子束预控弹体断裂的起始位置, 裂纹的扩展, 断裂区域等破碎机理的认识还不够。为了深入研究电子束预控弹体的破裂机理必须建立弹体细观模型, 从细观结构分析其破裂机理。

本文针对电子束预控弹体细观特征, 提出参数化的弹体三维细观建模方法, 建立弹体细观离散化模型; 采用 LS-DYNA 有限元软件对局部电子束预控弹体爆炸加载下的破裂过程进行了数值模拟, 分析弹体的破裂过程, 揭示电子束预控弹体的细观破裂机理。

1 数值模拟模型

1.1 典型电子束预控弹体结构

图 1 为扫描电镜下电子束预控区域剖面照片, 电子束将材料局部迅速加热到熔化状态, 金属材料基体将熔化的金属迅速冷却, 使得材料的局部组织和性能发生变化。因此, 电子束预控区域可由图 2 所示的熔融区、过渡区、空腔区和基体组成。通过在预控区域中部沿纵向及横向对硬度分布测试, 表 1 给出了测量的硬度值, 表中数据显示了熔融区硬度较基体提高约 12%, 过渡区较基体降低约 10%。图 3 为硬度值沿纵横向距离的关系, 可以看出沿横方向的硬度呈先减后增再趋平稳的趋势, 而沿纵向的硬度变化较平缓。

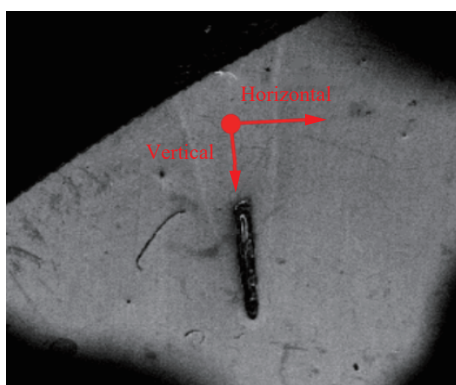


图 1 电子束预控区域

Fig. 1 Electron beam controlled zone

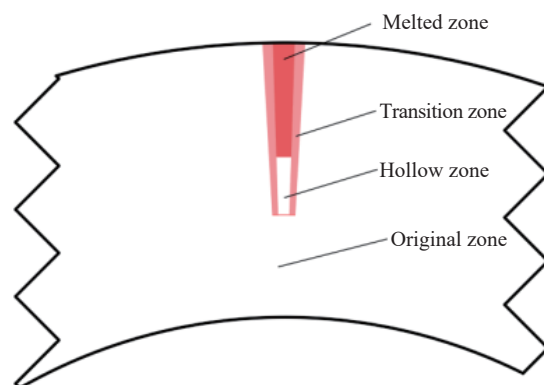


图 2 电子束预控区域示意

Fig. 2 Schematic of electron beam controlled zone

表 1 测量的硬度值
Table 1 Measured hardness value

区域	维氏硬度					
横向	410	410	425	415	413	406
	369	324	330	369	376	—
纵向	391	391	386	392	403	—
基体	366	361	372	—	—	—

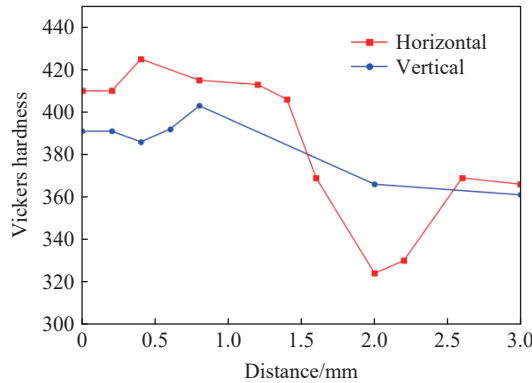


图 3 硬度值沿纵横向距离的关系

Fig. 3 Relationship of hardness value along the vertical and horizontal distance

典型的电子束预控弹体几何特征参数包括刻槽宽度 w 、深度 h 、间隔 δ 、角度 θ 、弹体长度 L 、内径 D_1 、厚度 T 和电子束入射角度 α 。图 4 为典型电子束预控弹体的几何特征参数。

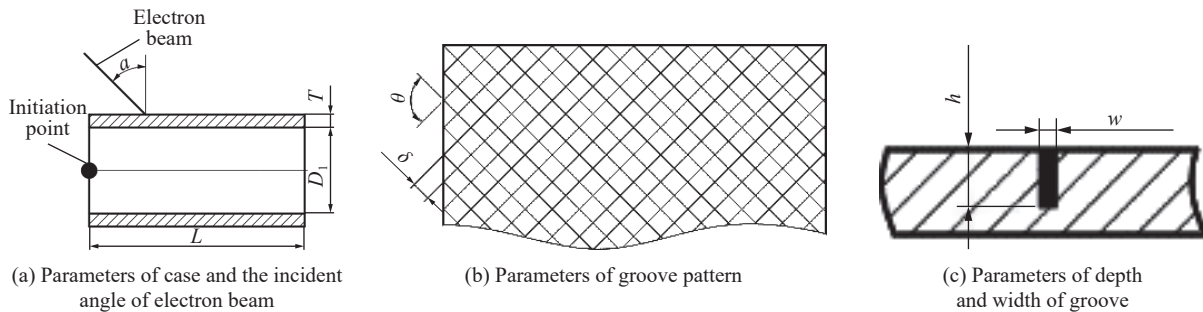


图 4 典型电子束预控弹体的几何特征参数

Fig. 4 Geometric characteristic parameters of typical electron beam controlled projectile

1.2 电子束预控弹体细观建模方法

根据电子束预控弹体细观特征, 本文提出一种参数化的电子束预控弹体细观建模方法。

首先对本文模型作如下基本假设: (1) 电子束预控区域由熔融区, 过渡区和空腔区组成; (2) 各区域为均一材料, 且具有明显分界面; (3) 空腔区沿电子束扫描路径是相通的。

然后通过如下步骤进行建模。

(1) 计算电子束扫描区域形成的槽线相交所得菱形的边长。图 5 为槽线相交所得菱形边长用 l 表示, 表达式为:

$$l = \frac{w}{\sin \theta} \quad (1)$$

(2) 计算柱坐标系下的 r 、 φ 、 z 方向的剖分数。取弹体一端圆心为柱坐标原点, 由原点指向弹体另一

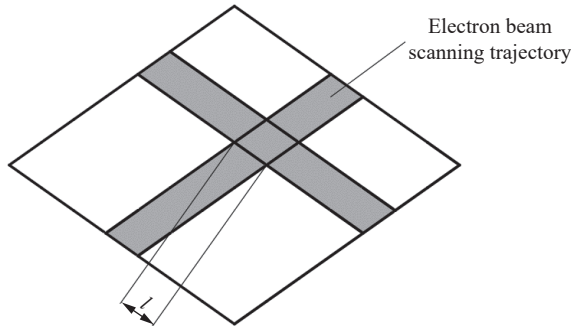


图 5 槽线相交菱形的边长

Fig. 5 Side length of rhombus with groove lines intersecting

端面圆心为 z 轴正方向。径向剖分数为 N_r , 周向剖分数为 N_φ , 轴向剖分数为 N_z , 径向剖分数 N_r 可以根据需要给一个定值, 径向剖分数 N_r 可以控制径向网格尺寸。周向剖分数 N_φ 和轴向剖分数 N_z 表达式为:

$$N_\varphi = N \frac{2\pi(R_1 + T)}{2l \sin \frac{\theta}{2}} \quad (2)$$

$$N_z = N \frac{L}{l \cos \frac{\theta}{2}}$$

式中: R_1 为弹体内部半径, N 为单个槽的网格数量。图 6 为单个槽网格数量示意图。 $N=1$ 时, 在槽线宽度方向上仅有 1 个网格单元(图 6(a)); $N=2$ 时, 在槽线宽度方向上有 2 个网格单元(图 6(b))。单个槽网格数量 N 可根据要划分的网格尺寸指定。由于网格单元是菱形, 改变 N 的值, 则同时改变了弹体周向和轴向的网格尺寸, 因此网格尺寸可以通过单个槽网格数量 N 和径向剖分数 N_r 来指定。

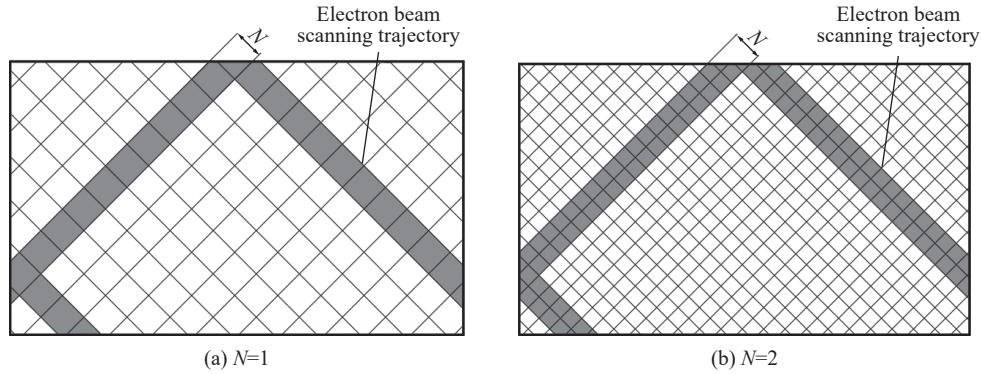


图 6 单个槽网格数量示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the number of grids in a single groove

(3)生成体节点。根据径向剖分数 N_r , 周向剖分数 N_φ , 轴向剖分数 N_z 在柱坐标系下生成体节点, 由线的端点得到线的节点, 由对边节点得到面的节点, 由对面节点得到体的节点。筒特征有相同的轴截面, 由对边节点确定轴截面节点分布, 然后对每个节点应用点对轴旋转的算法得到弹体的体节点^[11]。节点按照 z 、 φ 、 r 方向的顺序进行存储, 方便后续步骤构造单元。

(4)周向移动节点。如图 7 所示, 对节点进行周向移动, 在柱坐标系下, r 、 φ 、 z 三个方向的节点索引分别为 i 、 j 、 k , 图中 z_0 、 z_1 、 \dots 、 z_k 为 z 方向索引值, 则每个节点的移动量可表示为

$$\Delta\varphi_{ijk} = \frac{\pi}{N_\varphi} k \quad (3)$$

(5)根据电子束入射角度轴向移动节点, 移动的距离 Δz 为

$$\Delta z = (r_i - D_1/2) / \tan \alpha \quad (4)$$

式中: r_i 为节点的 r 方向坐标值。

(6)计算径向刻槽区域的单元数 N'_r 。径向要刻槽的单元数 N'_r 为

$$N'_r = N_r \frac{h}{T} \quad (5)$$

(7)径向移动节点使槽底节点和刻槽深度一致。在柱坐标系下, r 、 φ 、 z 三个方向的节点索引分别为 i 、 j 、 k , 对索引 $i = N_r - N'_r$ 的节点进行径向移动, 为使槽底部节点和刻槽深度一致, 移动距离 Δr 采用下式计算

$$\Delta r = h - N'_r \left(\frac{T}{N_r} \right) \tag{6}$$

(8) 计算空腔区径向单元数 H_r :

$$H_r = \frac{h_0}{T} N_r \tag{7}$$

式中: h_0 为空腔区高度。

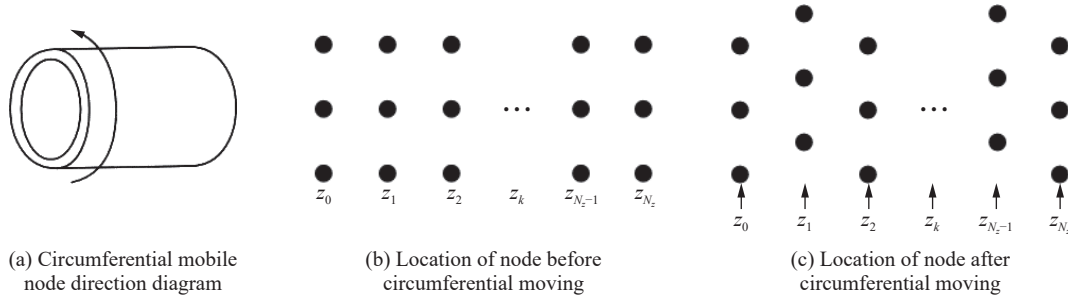


图 7 周向移动节点

Fig. 7 Circumferential mobile node

(9) 径向移动节点使空腔区上部节点与空腔区高度一致。在柱坐标系下, r 、 φ 、 z 三个方向的节点索引分别为 i 、 j 、 k , 对索引 $i = N_r - N'_r + H_r$ 的节点进行径向移动, 移动距离 Δr_h 为:

$$\Delta r_h = h - h_0 - \frac{(N'_r - H_r)T}{N_r} \tag{8}$$

(10) 由节点构造单元。由 8 个节点构造一个单元, 对于按照 z 、 φ 、 r 方向顺序存储的体节点, 单元的节点索引 P_i 为

$$\begin{aligned} P_1 &= (N_z + 1)(N_\varphi + 1)i + (N_z + 1)(j - 1) + k + 1 \\ P_2 &= P_1 + (N_z + 1)(N_\varphi + 1) \\ P_3 &= P_4 + (N_z + 1)(N_\varphi + 1) \\ P_4 &= (N_z + 1)(N_\varphi + 1)i + (N_z + 1)j + k \\ P_5 &= P_1 + 1 \\ P_6 &= P_2 + 1 \\ P_7 &= P_3 + 1 \\ P_8 &= P_4 + 1 \end{aligned} \tag{9}$$

构造的单元按照 r 、 φ 、 z 方向的顺序进行存储, 方便后续刻槽。

(11) 生成前端面和后端面节点。前后端面的节点通过复制 z 方向的起始端两列和结束端两列节点然后 z 方向移动得到, 对于起始端的第一列和结束端的最后一列移动距离可取 $L/(2N_z)$, 起始端第二列和结束端的第二列可取 $3L/(2N_z)$, 确保移动后的点 z 方向的坐标均相同。将复制的节点和被复制的节点按照 z 、 φ 、 r 方向的顺序进行存储, 方便后续步骤构造单元。图 8 给出了节点的生成方式。

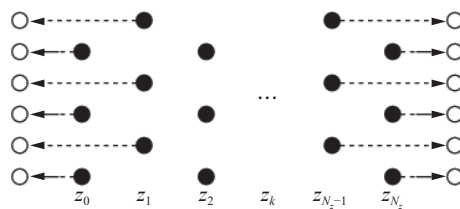


图 8 端部节点的生成

Fig. 8 Generation of end nodes

(12)由节点构造前端和后端单元。由 8 个节点构造一个单元^[11]。对于按照 z 、 φ 、 r 方向顺序存储的体节点, 单元的节点索引 P_i 为

$$\begin{aligned} P_1 &= (N_z + 1)(N_\varphi + 1)i + (N_z + 1)j + k \\ P_2 &= P_1 + (N_z + 1)(N_\varphi + 1) \\ P_3 &= P_2 + (N_z + 1) \\ P_4 &= P_1 + (N_z + 1) \\ P_5 &= P_1 + 1 \\ P_6 &= P_2 + 1 \\ P_7 &= P_3 + 1 \\ P_8 &= P_4 + 1 \end{aligned} \quad (10)$$

(13)计算周向刻槽间隔单元数 N'_φ 。周向刻槽间隔单元数由刻槽宽度和单个槽的单元数量计算得到:

$$N'_\varphi = N \frac{\delta}{w} \quad (11)$$

(14)设置过渡区。由周向刻槽间隔单元数和径向刻槽单元数分别确定刻槽区域单元的周向索引和径向索引, 设置单元中所有满足周向索引和径向索引的单元为过渡区。三个方向的单元索引 i_e 、 j_e 、 k_e 分别满足条件:

$$N_r - 1 - N'_r < i_e \leq N_r - 1 \quad (12)$$

$$j_e = \begin{cases} j_0 + nN'_\varphi & (\text{逆时针方向}) \\ N_\varphi + j_0 - nN'_\varphi & (\text{顺时针方向}) \end{cases} \quad (13)$$

$$0 \leq k_e \leq N_z - 1 \quad (14)$$

式中: j_0 为开始的索引, 取值为 $0, 1, 2, \dots, N_\varphi$; n 取值为 $0, 1, 2, \dots, [N_\varphi/N'_\varphi]$ 。

(15)计算熔融区径向单元数 H_m 和熔融区宽度上单元数 N_m :

$$H_m = N_r - H_r \quad (15)$$

$$N_m = NS_0 \quad (16)$$

式中: S_0 为熔融区宽度与刻槽宽度的比值。

(16)设置熔融区。由周向刻槽间隔单元数和径向熔融区单元数分别确定熔融区域单元的周向索引和径向索引, 设置单元中所有满足周向索引和径向索引的单元为熔融区。单元索引 i_e 和 j_e 分别满足条件:

$$N_r - 1 - N_m < i_e \leq N_r - 1 \quad (17)$$

$$j_e = \begin{cases} j_0 + nN'_\varphi & (\text{逆时针方向}) \\ N_\varphi + j_0 - nN'_\varphi & (\text{顺时针方向}) \end{cases} \quad (18)$$

式中: j_0 取值为 $(N - N_m)/2, (N - N_m)/2 + 1, \dots, (N - N_m)/2 + N_m$; n 取值为 $0, 1, 2, \dots, [N_\varphi/N'_\varphi]$ 。

(17)删除空腔区单元。由周向刻槽间隔单元数和径向空腔区单元数分别确定空腔区域单元的周向索引和径向索引, 删除单元中所有满足周向索引和径向索引的单元构造出空腔区。单元索引 i_e 和 j_e 满足条件:

$$N_r - 1 - N'_r < i_e \leq N_r - 1 - N_m \quad (19)$$

$$j_e = \begin{cases} j_0 + nN'_\varphi & (\text{逆时针方向}) \\ N_\varphi + j_0 - nN'_\varphi & (\text{顺时针方向}) \end{cases} \quad (20)$$

式中: j_0 取值为 $(N - N_m)/2, (N - N_m)/2 + 1, \dots, (N - N_m)/2 + N_m$ 。 n 取值为 $0, 1, 2, \dots, [N_\varphi/N'_\varphi]$ 。

轴向索引 k_e 满足条件为式(14)。

(18)柱坐标变换到直角坐标。为了可依据不同求解器的格式要求, 格式化输出单元的节点和单元信息, 根据下式变换得到直角坐标:

$$\begin{cases} x = r \cos \varphi \\ y = r \sin \varphi \\ z = z \end{cases} \quad (21)$$

图 9 为采用本方法获得的电子束预控弹体离散化模型, 图 9(b) 为轴截面的图像, 电子束刻槽区域由熔融区、过渡区和空腔区组成。

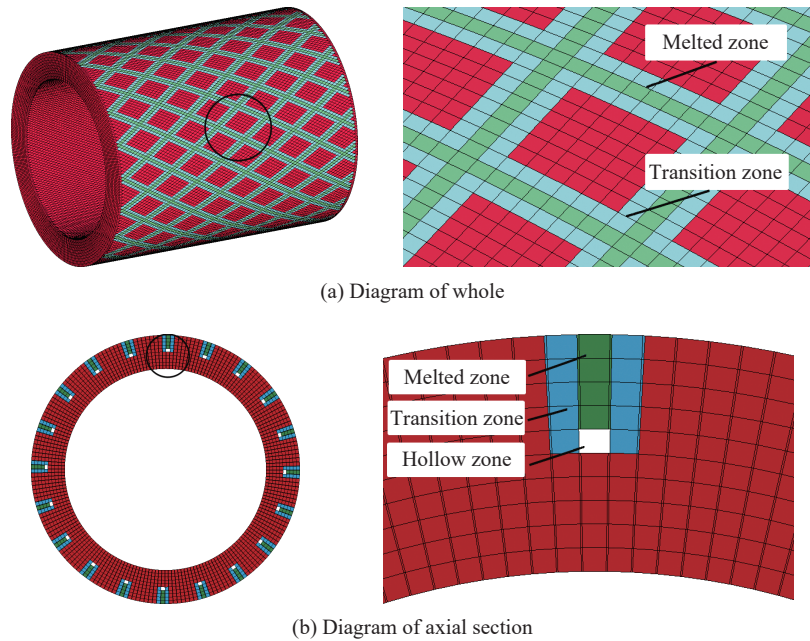


图 9 电子束预控弹体离散化模型

Fig. 9 Finite element model of electron beam controlled projectile

1.3 仿真模型

选取了电子束预控战斗部局部区域, 采用 LS-DYNA 软件对电子束预控弹体在爆炸加载下的破裂过程进行了数值模拟。

1.3.1 计算方法

仿真模型由电子束预控弹体、装药和空气域组成。采用电子束预控弹体参数化建模方法建立了离散化模型, 网格尺寸约为 0.2 mm。弹体采用拉格朗日单元描述, 空气域和装药采用任意拉格朗日欧拉(ALE)单元描述, 弹体与装药和空气间设置流固耦合, 起爆点设置在装药中心位置。空气域外部施加无反射边界条件, 仿真模型施加轴向约束边界条件。图 10 为电子束预控弹体和选取的局部区域, 空气域直径是弹体外径的 2 倍。

1.3.2 材料模型

弹体材料为钢, 基体和电子束预控区域的过渡区和熔融区均采用 *MAT_JOHNSON_COOK 强度模型和 *EOS_Grüneisen 状态方程描述, 并通过 *MAT_ADD_EROSION 添加可以反映拉伸和剪切破坏的有

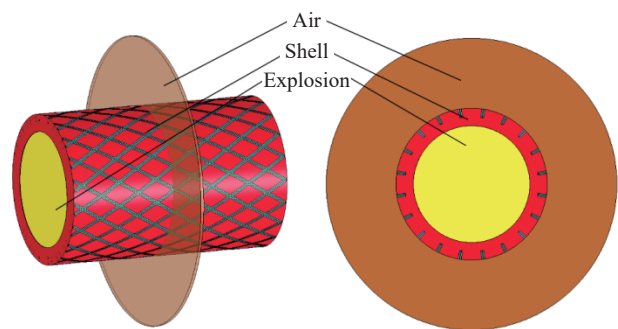


图 10 典型电子束预控弹体和选取的局部区域

Fig. 10 The typical electron beam controlled projectile and the selected local area

效塑性应变破坏判据^[13]; Johnson-Cook 本构模型考虑材料的应变硬化、应变率效应以及温度效应, 具体形式为:

$$\sigma = (A + B\varepsilon_p^n)(1 + C \ln \dot{\varepsilon}^*)[1 - (T^*)^m] \quad (22)$$

式中: σ 为 von Mises 流动应力; ε_p^n 为等效塑性应变; $\dot{\varepsilon}^*$ 为相对塑性应变率, $\dot{\varepsilon}^* = \dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0$, $\dot{\varepsilon}$ 为压缩应变率, $\dot{\varepsilon}_0$ 为参考应变率; T^* 为无量纲温度项, $T^* = (T - T_r)/(T_m - T_r)$, 其中 T 为实验温度, T_r 为室温, T_m 为熔点温度; A 、 B 、 n 、 C 和 m 为常数, 由实验拟合得到^[13]。表 2 给出了金属的 Johnson-Cook 本构模型参数, ρ_0 为初始密度, G 为剪切模量。

表 2 35CrMnSi Johnson-Cook 本构模型参数^[14]

Table 2 Parameters of Johnson-Cook constitutive equation for 35CrMnSi^[14]

$\rho_0/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	G/GPa	A/MPa	B/MPa	n	C	m	T_m/K
7.83	77	1440	1501	0.4403	0.039	0.404	1793

依据过渡区和熔融区相对基体硬度的变化, 对过渡区和熔融区的屈服强度参数进行了调整。调整后基体、过渡区和熔融区的屈服强度分别为 1440、1290 和 1620 MPa。仿真模型的装药材料为 COMP B 炸药, 采用 *MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN 强度模型和 *EOS_JWL 状态方程描述^[15]; 空气采用 *MAT_NULL 和 *MAT_LINEAR_POLYNOMIAL 分别描述其强度与状态。炸药采用的 JWL 状态方程能够比较精确地描述爆轰产物的膨胀驱动过程, 形式如下:

$$p = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 \bar{V}}\right) e^{-R_1 \bar{V}} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 \bar{V}}\right) e^{-R_2 \bar{V}} + \frac{\omega E}{\bar{V}} \quad (23)$$

式中: A 、 B 、 R_1 、 R_2 和 ω 为系数, 由实验拟合得到; E 为初始体积内能, $E = \rho_0 e$, ρ_0 为初始密度, e 为比内能; $\bar{V} = V/V_0$ 为相对比容, 其中 V 为体积, V_0 为初始体积, ρ 为密度。表 3 给出了 COMP B 炸药状态方程参数, D 为爆速, P_C 为爆压。

表 3 COMP B 炸药的 JWL 状态方程参数^[15]

Table 3 Parameters of JWL equation of state for COMP B explosive^[15]

$\rho_0/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	A/GPa	B/GPa	R_1	R_2	ω	$D/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	p_C/GPa	$E/(\text{GJ}\cdot\text{m}^{-3})$
1.712	5.2423	0.07678	4.2	1.1	0.34	7980	0.295	0.085

2 电子束预控弹体破裂机理

2.1 电子束预控弹体破裂过程分析

通过仿真计算获得了电子束预控弹体在爆炸加载下的破裂过程, 图 11 为电子束预控弹体不同计算时刻应力云图。在 3.0 μs 时刻, 内部炸药爆炸产物的压力施加于弹体内壁在弹体中产生环向拉应力并到达电子束预控区域底部; 在 4.0 μs 时刻, 拉应力已经传递到弹体外壁, 在外壁发生反射, 产生了稀疏波, 由于电子束预控区域的存在, 稀疏波阵面呈现起伏状, 同时由于弹体的向外膨胀, 弹体处于环向拉伸状态, 电子束预控的空腔区发生了明显变形; 在 5.0 μs 时刻, 内部装药爆炸产生的压力持续传入弹体, 在靠近弹体内壁区域存在较高的拉应力, 空腔区发生显著破裂, 在空腔区周围产生了稀疏波, 拉应力卸载; 在 6.0 μs 时刻, 弹体膨胀变薄, 空腔区破裂沿着过渡区向弹体外壁扩展; 在 7.0 μs 时刻, 空腔区上部裂纹沿着过渡区向弹体外壁扩展, 弹体外壁电子束刻槽区域发生显著凹陷, 在空腔区两侧存在较高的拉应力, 在空腔区底部存在较高的压应力; 在 8.0 μs 时刻, 空腔区上部的裂纹向弹体外壁扩展, 在空腔区两侧的拉应力和底部的压应力作用下, 在空腔区底部出现向弹体内壁扩展的裂纹; 在 9.0 μs 时刻, 位于过渡区的裂纹继续向弹体外壁扩展, 同时在空腔区底部出现与弹体约呈一定角度的压应力带; 在 10.0 μs 时刻, 过渡区的裂

纹到达弹体外壁, 在空腔区底部出现与弹体呈一定角度的明显裂纹; 在 $11.0 \mu\text{s}$ 时刻空腔区底部的裂纹继续沿着与弹体呈一定角度的方向扩展; 在 $12.0 \mu\text{s}$ 时刻, 空腔区底部的裂纹扩展到弹体内壁, 弹体形成了形状一致的预控破片。

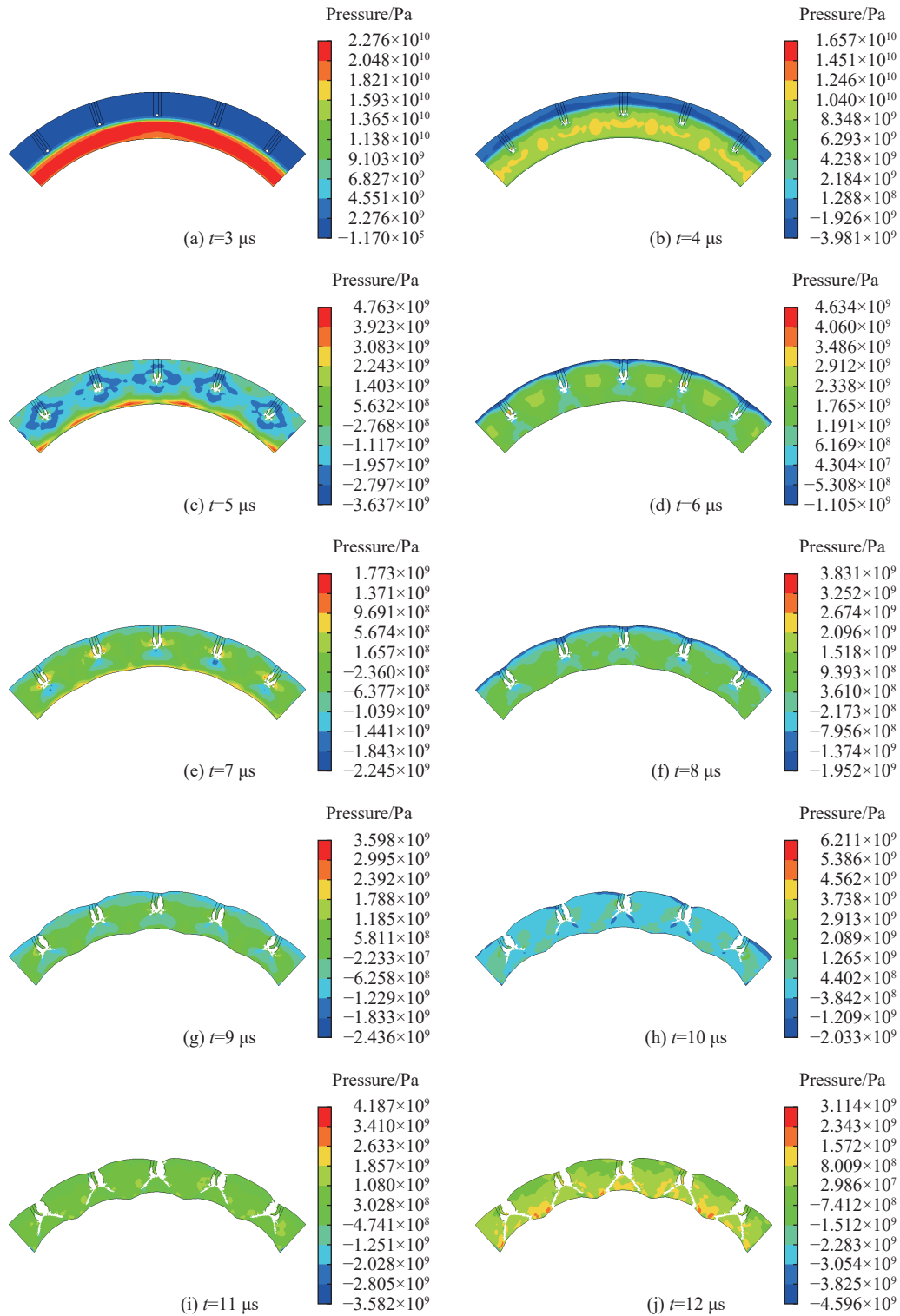


图 11 电子束预控弹体不同计算时刻应力云图

Fig. 11 Contours of Pressure of electron beam controlled projectile with different time

2.2 电子束预控弹体空腔区破裂理论分析

电子束预控弹体可以看作一个承受内压等于爆轰压力的圆筒容器^[16]。图 12 为弹体内的应力分量示意图, σ_r 、 σ_θ 和 σ_z 为柱坐标系下弹体内的应力分量, 均为主应力。

图 13 为空腔区受力分析, 空腔区两侧受到 σ_θ 环向拉应力, 底部受到 σ_r 压应力, 在二向应力状态下, 法向倾角为 α_0 的斜面上正应力 σ_{α_0} 和切应力 τ_{α_0} 表达式^[17] 为

$$\sigma_{\alpha_0} = \frac{\sigma_\theta + \sigma_r}{2} + \frac{\sigma_\theta - \sigma_r}{2} \cos(2\alpha_0) - \tau_{\theta r} \sin(2\alpha_0) \quad (24)$$

$$\tau_{\alpha_0} = \frac{\sigma_\theta - \sigma_r}{2} \sin(2\alpha_0) - \tau_{\theta r} \cos(2\alpha_0) \quad (25)$$

当 $\alpha_0=45^\circ$ 时, σ_{α_0} 和 τ_{α_0} 有极值, 则与刻槽区域即弹体壁面法向方向呈 45° 的斜面具有最大剪应力, 因此空腔区底部的裂纹是与弹体内壁法线呈 45° 的剪切破坏。

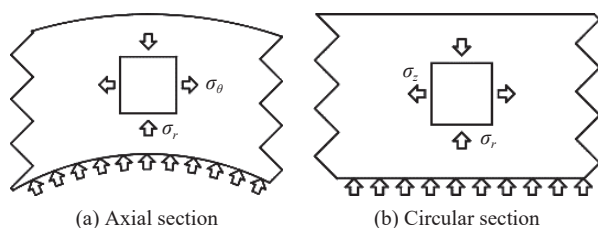


图 12 弹体内的应力分量
Fig. 12 The stress components in the projectile

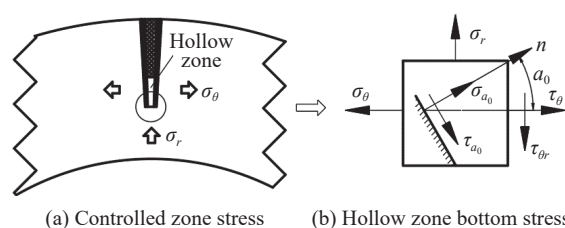


图 13 空腔区受力分析
Fig. 13 Stress analysis of hollow zone

2.3 电子束预控弹体破裂过程描述

通过对电子束预控弹体破裂过程分析和空腔区破裂理论分析, 可知电子束预控弹体的破裂是自空腔区开始, 在靠近弹体外壁一侧是位于过渡区的拉伸破坏, 在靠近弹体内壁一侧是位于基体的与弹体内壁法线呈 45° 的剪切破坏。电子束预控弹体的破裂可以描述为 3 个阶段: 第 1 阶段, 弹体在内部爆炸产物压力作用下膨胀变形, 空腔区在环向拉应力作用下首先出现拉伸断裂; 第 2 阶段, 在环向拉应力作用下裂纹在过渡区扩展和拉伸断裂; 第 3 阶段, 在空腔区两侧的拉应力和底部压应力作用下, 空腔区底部出现与弹体内壁法线呈 45° 的剪切破坏。

图 14 为 $12 \mu\text{s}$ 时刻预控破片截面图像与回收破片截面, 仿真所获得的电子束预控破片截面形状与回收的破片截面形状一致, 在靠近弹体外壁一侧的区域 I 和区域 II 是与弹体内壁法线平行且呈锯齿状的拉伸破坏断口, 在靠近弹体内壁的区域 III 和 IV 是与弹体内壁法线呈 45° 的较整齐的剪切破坏断口, 且区域 IV 的倾斜断口并未延伸至弹体内壁, 说明剪切破坏是自壳体中间的空腔区向弹体内壁扩展的。仿真计算结果与试验回收的破片截面形状和破坏模式吻合较好。

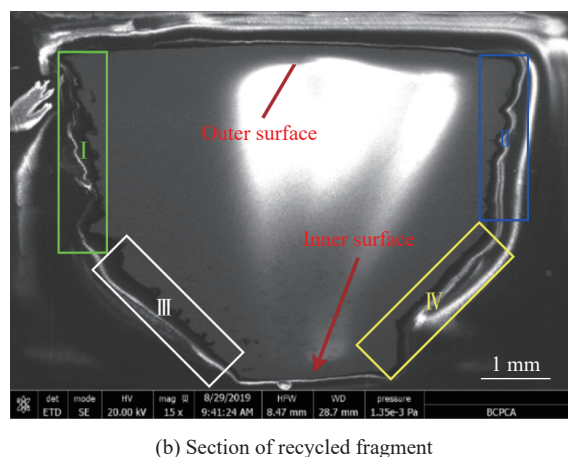
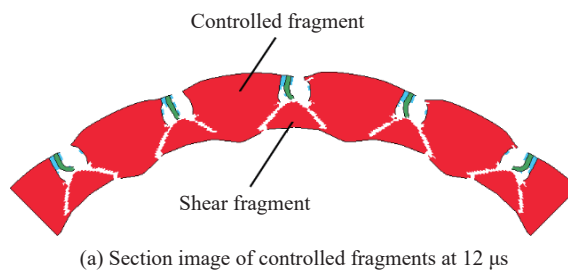


图 14 $12 \mu\text{s}$ 时刻预控破片截面图像与回收破片截面
Fig. 14 Section image of controlled fragments at $12 \mu\text{s}$ and section of recycled fragment

3 结 论

本文基于电子束预控弹体细观特征,提出了电子束预控弹体参数化细观建模方法,对典型电子束预控弹体破裂过程进行了数值模拟分析,结论如下。

(1)电子束预控弹体的破裂可以描述为3个阶段:第1阶段,弹体在内部爆炸产物压力作用下膨胀变形,空腔区在环向拉应力作用下首先出现拉伸断裂;第2阶段,在环向拉应力作用下裂纹在过渡区扩展和拉伸断裂;第3阶段,在空腔区两侧的拉应力和底部压应力作用下,空腔区底部出现于弹体内壁法线呈 45° 的剪切破坏。

(2)仿真所获得的电子束预控破片形状与回收的破片截面形状一致,在靠近弹体外壁一侧拉伸破坏,在靠近弹体内壁为剪切破坏。仿真计算结果与试验回收的破片截面形状和破坏模式吻合较好。

(3)基于本文提出的电子束预控弹体细观建模方法和材料模型与算法,为解决电子束预控弹体破裂数值模拟分析等问题提供了一个理想的手段,研究结果对电子束预控弹体破片成型控制具有参考价值。

参考文献:

- [1] 李超,李德元,万仁毅,等.激光和等离子弧加工弹体材料脆性带的对比[J].*成都工业学院学报*,2013,16(1):22-24. DOI: 10.3969/j.issn.1008-5440.2013.01.007.
LI C, LI D Y, WAN R Y, et al. Comparison between the brittleness belts of shell materials treated by laser hardening and plasma-arc hardening [J]. *Journal of Chengdu Technological University*, 2013, 16(1): 22-24. DOI: 10.3969/j.issn.1008-5440.2013.01.007.
- [2] 赵力.局部激冷处理弹壳材料破碎过程模拟[D].沈阳:沈阳工业大学,2014.
ZHAO L. Simulation of local chilling treatment shell material crushing process [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2014.
- [3] 石岩,刘东炜,刘佳,等.硬脆钢50SiMnVB激光预控裂纹工艺试验研究[J].*兵工学报*,2018,39(10):1997-2005. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2018.10.016.
SHI Y, LIU D W, LIU J, et al. Research on laser crack-precontrolling technology for 50SiMnVB [J]. *Acta Armamentarii*, 2018, 39(10): 1997-2005. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2018.10.016.
- [4] 马宇宇,李梅,邱浩,等.电子束局部扫描对35CrMnSiA钢组织和力学性能的影响[J].*兵器装备工程学报*,2019,40(9):204-207. DOI: 10.11809/bqzbgcxb2019.09.042.
MA Y Y, LI M, QIU H, et al. Effect of electron beam local scanning on microstructure and mechanical properties of 35CrMnSiA steel [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2019, 40(9): 204-207. DOI: 10.11809/bqzbgcxb2019.09.042.
- [5] 刘峰涛,袁书强,陈炯,等.高能束控制破碎弹体威力对研究[J].*兵器材料科学与工程*,2008,31(1):67-70. DOI: 10.3969/j.issn.1004-244X.2008.01.018.
LIU F T, YUAN S Q, CHENG J, et al. Comparative study on the shell power after high-energy-beam controlled fragmentation [J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2008, 31(1): 67-70. DOI: 10.3969/j.issn.1004-244X.2008.01.018.
- [6] 李华,李国昌,陈炯,等.高能束控制破碎模拟弹体破片分布试验研究[J].*兵器材料科学与工程*,2009,32(5):81-83. DOI: 10.3969/j.issn.1004-244X.2009.05.024.
LI H, LI G C, CHENG J, et al. Fragment distribution of high-energy-beam controlled fragmentation simulation shell [J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2009, 32(5): 81-83. DOI: 10.3969/j.issn.1004-244X.2009.05.024.
- [7] 陈炯,袁书强,周春华,等.高能束控制破碎钨合金壳体破碎效果研究[J].*兵器材料科学与工程*,2010,33(6):62-64. DOI: 10.3969/j.issn.1004-244X.2010.06.019.
CHEN J, YUAN S Q, ZHOU C H, et al. Fragment effect of tungsten alloy shells controlled by high-energy-beam [J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2010, 33(6): 62-64. DOI: 10.3969/j.issn.1004-244X.2010.06.019.
- [8] 沈正祥,袁书强,陈炯,等.局部淬火金属柱壳破碎性的研究[J].*高压物理学报*,2015,29(4):293-298. DOI: 10.11858/gywlxb.2015.04.009.

- SHEN Z X, YUAN S Q, CHEN J, et al. Fragmentation of metal cylindrical shell treated by local quenching [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2015, 29(4): 293–298. DOI: 10.11858/gywlxb.2015.04.009.
- [9] 袁书强, 沈正祥, 李亚哲, 等. 弹体材料性能对预控破片威力的影响 [J]. *科学技术与工程*, 2016, 16(9): 195–195. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2016.09.034.
- YUAN S Q, SHEN Z X, LI Y Z, et al. Influence of case material on controlled fragmentation performance [J]. *Science Technology and Engineering*, 2016, 16(9): 195–195. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2016.09.034.
- [10] 沈正祥, 袁书强, 杨辉, 等. 电子束局部扫描对 40CrMnSiB 钢组织与冲击性能的影响 [J]. *金属热处理*, 2017, 42(1): 87–90. DOI: 10.13251/j.issn.0254-6051.2017.01.020.
- SHEN Z X, YUAN S Q, YANG H, et al. Effect of electron beam local scanning on microstructure and impact property of 40CrMnSiB steel [J]. *Heat Treatment of Metals*, 2017, 42(1): 87–90. DOI: 10.13251/j.issn.0254-6051.2017.01.020.
- [11] 刘桂峰. 激光加工弹体破片形成及杀伤威力研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2015.
- LIU G F. Study on the formation and lethality of fragments of laser processing casing [D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2015.
- [12] 陈帅. 弹体改性区对弹丸过载性能和破片形成的影响 [D]. 南京: 南京理工大学, 2014.
- CHEN S. Influence of projectile property-changing zone to overloading capability and to form fragments [D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2014.
- [13] JOHNSON G R, COOK W H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1985, 21(1): 31–48. DOI: 10.1016/0013-7944(85)90052-9.
- [14] 李硕. 强冲击载荷下 35CrMnSi 动态力学行为与断裂机理研究 [D]. 太原: 中北大学, 2015.
- LI S. Research on dynamic mechanical behavior and fracture mechanism of 35CrMnSi under strong impact load [D]. Taiyuan: North University of China, 2015.
- [15] MURPHY M J, LEE E L. Modeling shock initiation in Composition B [C]// 10th International Detonation Symposium. US: Lawrence Livermore National Laboratory, 1993, 963–970.
- [16] 隋树元, 王树山. 终点效应学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2000: 57–58.
- SUI S Y, WANG S S. Terminal effects [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2000: 57–58.
- [17] 刘鸿文. 材料力学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2010: 217–219.
- LIU H W. Material mechanics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2010: 217–219.

(责任编辑 王小飞)