第 30 卷第 8 期 Volume 30 Number 8 2020 年 8 月 August 2020

DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2020-37612

基于细观损伤力学的铅套成形破裂预测

徐戊矫,谢 丹,李 芳,高元鹏

(重庆大学 材料科学与工程学院, 重庆 400044)

摘 要: 对子弹铅套成形过程中的破裂缺陷进行预测。采用单向拉伸实验获得纯铅真实应力-应变数据,选取应 变 0.006 ≤ ε ≤ 0.2 范围内的数据进行拟合和外延处理获得材料无损伤的本构模型。结合扫描电镜分析法和基于响 应面的有限元反求法获得纯铅的 GTN 细观损伤模型参数,对比分析单向拉伸中模拟与实验获得的载荷-位移曲线 和铅材料孔洞体积分数,验证了所建立的纯铅 GTN 细观损伤模型的准确性。基于 ABAQUS 模拟仿真平台,耦合 所建立的 GTN 损伤模型对铅套成形过程中的破裂行为进行仿真预测,并开展了铅套反挤压和变薄拉深成形实验。 结果表明:实验结果与基于 GTN 损伤模型的仿真结果匹配良好;对铅套成形缺陷的准确预测是铅套成形优化的 重要基础。

关键词: 铅套成形; GTN 细观损伤模型; 响应面法; 扫描电镜; 破裂预测 文章编号: 1004-0609(2020)-08-1866-10 中图分类号: TB31 文献标志码: A

金属塑性变形过程中,材料内部细观层面的损伤 主要是微孔洞。TVERGAARD 等^[1]和 NEEDLEMAN 等^[2]在 GURSON^[3]研究的基础上,考虑了孔洞的聚合 和孔洞之间的相互作用,引入孔洞体积分数的概念对 Gurson 模型进行了进一步地修正,提出了目前应用最 为广泛的 GTN 模型。

GTN 损伤模型参数众多,不同材料的 GTN 模型 参数也不同。只有获得正确的 GTN 参数,才能获得 这种材料孔洞演化的过程和损伤力学性能。ABBASSI 等^[4]通过有限元模拟和人工神经网络的方法标定了 304 不锈钢的 GTN 损伤参数,通过响应面法和基于遗 传算法的有限元反向标定了 IF 钢的 GTN 损伤参数。 SIRINAKORN 等^[5]采用代表性体积单元法,确定了 DP 双相钢的 GTN 损伤参数。黄建科等^[6]通过建立关 于载荷位移曲线的误差函数,来获得 GTN 模型的参 数,并基于体胞模型推导出断裂临界应变的表达式。 陈志英^[7]针对各向异性板料冲压的问题,建立了 Barlat89-GTN 和 Hill48-GTN 各向异性材料的细观损 伤模型,并反向确定 GTN 参数,用于表征各向异性 板料在拉深过程中回弹和破裂的问题。BROGGIATO 等^[8]提出了一种较为新颖的损伤参数获取方法,通过 数字图形法来确定 GTN 损伤模型的参数。学者 ABBASI 等^[9]利用四因子三水平的响应面,选取拉深 试验后的载荷位移曲线上四个关键的点作为响应的目 标值,并利用 Minitab 软件确定了 GTN 模型中的损伤 参数。何敏等^[10]采用 Image-Pro Plus 图像分析软件来 分析扫描电镜的图片,确定了 5052 铝合金的 *f*₀、*f*_c 和 *f*_f 损伤参数,并得出有限元分析法与 GTN 损伤模型结 合可有效预测成形极限曲线。刘文权和盈亮等^[11-12]采 用响应面中心复合试验和遗传算法,确定了热成型高 强钢 22MnB5 在高温下(600~800 ℃)的 GTN 损伤参 数。

子弹弹头中的铅套,其作用是为了防止子弹在射击过程中弹头钢芯高速旋转,直接与弹头壳摩擦,造成弹头在射击过程中破坏失效;同时,铅套能有效提高子弹的杀伤力。但是纯铅的质地软、强度低,因此在铅套成形过程中容易出现破裂等问题。本文以某型号弹头中的铅套为研究对象,基于 ABAQUS 模拟仿真平台,耦合所建立的 GTN 损伤模型对铅套成形过程中的破裂行为进行仿真预测。开展了铅套反挤压和变薄拉深成形实验,将实验结果与基于 GTN 损伤模型的仿真结果进行了对比分析。

收稿日期: 2019-07-26; 修订日期: 2020-07-24

通信作者: 徐戊矫, 教授, 博士; 电话: 13368186252; E-mail: xuwujiao_cq@163.com

1 GTN 细观损伤模型

GTN 细观损伤模型是用孔洞体积分数来表征材料的损伤,并引入到材料屈服函数中,因此可以更好地预测材料在整个变形过程中的损伤行为。

GURSON^[3]首次提出的 Gurson 损伤模型是 GTN 损伤模型的前身,他第一次建立了孔洞演变规律和材料塑性势函数之间的关系,并将孔洞体积分数的概念 引入到材料的屈服准则中,提出了包含材料孔洞体积 分数的屈服函数:

$$\phi = \left(\frac{\sigma_{\rm e}}{\sigma_{\rm m}}\right)^2 + 2f\cosh\left(\frac{\sigma_{\rm H}}{\sigma_{\rm m}}\right) - (1+f^2) = 0 \tag{1}$$

$$\sigma_{\rm e} = \sqrt{\frac{3}{2} S_{ij} S_{ij}} \tag{2}$$

式中: σ_{e} 表示材料宏观 Von Mises 等效应力; S_{ij} 表示 应力偏张量; σ_{m} 表示当前基体的等效屈服应力; σ_{H} 表示宏观静水应力;f表示基体材料的孔洞体积分数。 当f等于0时屈服函数式(1)就变为最经典的 Von Mises 屈服函数。

Gurson 模型是将材料的屈服与损伤联系起来,随着基体材料孔洞体积分数的不断增加,屈服面将逐渐减少,从而材料的强度随着损伤的增加而不断退化, 直至材料发生断裂失效。

TVERGAARD 等^[1] 和 NEEDLEMEN 等^[2] 对 Gurson 损伤模型进行了修正,引入等效孔洞体积分数 f^* 和屈服函数的修正系数 q_1 、 q_2 、 q_3 ,为目前应用最 为广泛的 GTN 细观损伤模型,如式(3)所示:

$$\phi = \left(\frac{\sigma_{\rm e}}{\sigma_{\rm m}}\right)^2 + 2f^* q_1 \cosh\left(\frac{3q_2\sigma_{\rm H}}{2\sigma_{\rm m}}\right) - (1 + q_3 f^{*2}) = 0 \quad (3)$$

式中: q_1 、 q_2 、 q_3 表示屈服函数修正系数; f^* 表示等效孔洞体积分数,它是一个关于孔洞体积分数f的函数,其表达式为

$$f^{*} = \begin{cases} f, f < f_{\rm C} \\ f_{\rm C} + \frac{f_{\rm u} - f_{\rm C}}{f_{\rm F} - f_{\rm C}} (f - f_{\rm C}), f_{\rm C} < f < f_{\rm F} \\ f_{\rm u}, f > f_{\rm F} \end{cases}$$
(4)

$$f_{\rm u} = \frac{1}{q_1} \tag{5}$$

式中: fc 表示孔洞聚合时的临界体积分数; f_F 表示材料断裂失效时的孔洞体积分数。当材料中孔洞体积分

数超过孔洞聚合时的临界体积分数*f*c时,孔洞开始聚合,材料孔洞体积分数迅速增加,材料的承载能力开始迅速降低。当材料的孔洞体积分数达到断裂孔洞体积分数*f*F时,材料发生宏观的裂纹,将彻底失去承载能力。

孔洞的演化分为三个阶段:孔洞的形核、长大和 聚合阶段。因此孔洞体积分数*f*的增加分为两个部分, 分别是新孔洞的形核和孔洞的长大,所以孔洞的增量 表达式为:

$$df = df_{\text{nucleation}} + df_{\text{growth}}$$
(6)

孔洞生长的表达式为:

$$df_{\text{growth}} = (1 - f) d\varepsilon_{\text{kk}}^{\text{p}}$$
(7)

基于塑性应变的形核机制,孔洞形核表达式为:

$$df_{\text{nucleation}} = A d\overline{\varepsilon}_{\text{m}}^{\text{p}} \tag{8}$$

$$\mathrm{d}\overline{\varepsilon}_{\mathrm{m}}^{\mathrm{p}} = \frac{\sigma_{ij}\mathrm{d}\varepsilon_{ij}^{\mathrm{p}}}{(1-f)\overline{\sigma}_{\mathrm{m}}} \tag{9}$$

式中: dēn 表示材料等效塑性应变的增量; A 是表示材料孔洞形核强度的正态分布函数, 其函数表达式为

$$A = \frac{f_{\rm N}}{S_{\rm N}\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\overline{\varepsilon}_{\rm m}^{\rm p} - \varepsilon_{\rm N}}{S_{\rm N}}\right)^2\right]$$
(10)

式中: f_N 表示材料孔洞形核粒子的体积分数; S_N 表示 孔洞形核发生时等效塑性应变的标准差; ε_N 表示材料 孔洞形核发生时平均等效塑性应变; $\overline{\varepsilon}_m^P$ 表示材料在变 形过程中累积的等效塑性应变。

GTN 细观损伤模型中损伤变量即孔洞体积分数 有明确的物理意义和几何意义,该模型将基体材料的 损伤与材料的塑性变形紧密联系在一起。

2 铅力学性能测试

本研究利用挤压获得圆柱形纯铅棒料,并通过轧 制获得铅板。采用电火花线切割机,线切割轧制后的 铅板截取准静态拉伸试样,拉伸试样尺寸参考 GB/T 228-2002《金属拉伸实验方法》中规定的拉伸试样尺 寸,如图 1 所示。室温准静态拉伸实验在 CMT5305 型电子万能拉伸实验机上进行,拉伸速度采用恒定的 6 mm/min,并一直加载至拉伸试样断裂为止。拉伸实 验数据均取 3 组稳定实验的平均值。原始拉伸试样和 拉伸后的试样如图 2 所示。



图1 拉伸试样尺寸

Fig. 1 Tension specimen size (Unit: mm)



图 2 原始拉伸试样和拉伸后的试样

Fig. 2 Original and post-tension specimens

用单向拉伸全过程试验数据计算得到的真实应 力-应变数据是包含了材料损伤演化影响的,用其建 立 GTN 模型并耦合进行成形过程数值模拟时,会造 成模拟结果误差较大。因此,为保证仿真结果更加贴 合实际情况,需要使用基体材料无损伤的应力-应变 数据作为材料的本构模型^[13]。在单向拉伸的初期阶段 材料损伤较小,实验测得单向拉伸初期的材料真实应 力-应变曲线更为贴近材料的无损伤状态。可以利用 材料的本构方程 $\sigma = \sigma_0 + K \varepsilon^n$,通过数据拟合将单向 拉伸初期的材料真实应力-应变曲线作为基体材料无 损伤的真实应力-等效塑性应变关系。

拟合材料无损伤的本构模型时,如何选择恰当的 应变点区间很关键。首先需保证选择的区间处于塑性 应变下,因此选择ε≥0.006。对发生不同应变量的单 向拉伸试样进行扫描电镜观察,并对不同应变量下试 样的孔洞体积分数进行统计分析,如图3所示。从图



图 3 不同应变下单向拉伸试样截面的孔洞体积分数

Fig. 3 Void volume fraction of uniaxial tension specimens with different strains: (a) ε =0.1; (b) ε =0.2; (c) ε =0.3; (d) ε =0.35

3 可以看出,应变 0.2 是一个临界点;当应变为 0.2 时 基材内微观孔洞较少、分布均匀,且并未发生聚合。 为保证拟合得到的材料应力-应变曲线更贴近材料无 损伤状态下,因此本研究中选取的应变拟合点间距为 [0.006,0.2],拟合结果如图 4 所示,表 1 中所列为纯 铅的弹塑性力学行为参数,其中 *E* 表示为材料的弹性 模量; *v* 表示为材料的泊松比; *σ*₀ 表示材料的屈服应 力;*K* 表示该材料本构参数;*n* 表示材料的硬化指数。



Fig. 4 Acquisition of damage free stress-strain curves of pure lead

表1 纯铅的无损伤弹塑性力学参数

 Table 1
 Damage-free elastoplastic behavior parameters of pure lead

E/MPa	ν	σ_0	Κ	п
14000	0.4	3.89276	28.97183	0.63738

3 GTN 参数的标定

GTN 细观损伤模型中包含三类共计 9 个参数, 分别是屈服函数的修正系数 q_1 、 q_2 、 q_3 , 孔洞形核参数 f_N 、 ε_N 、 S_N 和孔洞体积分数 f_0 、 f_C 、 f_F 。其中, f_N 表示 形核粒子的孔洞体积分数, S_N 为形核时的等效塑性应 变, S_N 是形核应变的标准差, f_0 表示材料初始的孔洞体积分数, f_C 表示孔洞聚合时的临界体积参数, f_F 表示材料发生破坏失效时的孔洞体积分数。不同的参数 组合对模拟结果的影响较大,因此,确定一种材料的 GTN 损伤模型参数是研究这种材料孔洞演化过程和 细观损伤机理的基础。目前确定 GTN 细观损伤模型 参数的方法大致分为三类^[14-16]:金相分析法、代表性体积单元法和有限元逆向法。

在这里,假设挤压得到的圆柱形纯铅的棒料是无 损伤材料,因此铅的初始孔洞体积分数 f_0 取值 0。 q_2 和 q_3 根据 TVERGAARD 的研究结果,取 $q_2 = 1$, $q_3 = q_1^2$ 。形核应变的标准差 S_N 对于一般的韧性材料 可以取值为 0.1,即 $S_N=0.1$ 。本文通过 SEM 扫描电镜 分析法和基于响应面有限元反求法相结合的方式来获 取铅其余 5 个 GTN 损伤模型参数(q_1 、 f_N 、 ε_N 、 f_C 、 f_F)。

3.1 扫描电镜分析法

图 3 所示为铅拉伸试样断口的扫描电镜图片。从 图 3 中可以观察到,铅断口处有明显的韧窝分布。

通过 Image-Pro Plus 软件对铅断口的扫描电镜图 片进行分析,可以计算铅断口扫描电镜图片上孔洞的 面积百分比。但散布在真实材料中的孔洞是三维的, 为获得断口处的孔洞体积分数,假设基体材料中任一 孔洞的形状是规则的球形,通过截取基体材料中任一 孔洞的形状是规则的球形,通过截取基体材料的任一 平面,获得单位面积内的孔洞个数为 N_s,在该截面的 单位高度内的孔洞个数为 N_h。假设该截面内的任意一 个孔洞的半径为 r,那么该截面内任意一个孔洞的截 面面积的范围在 0~πr²之间。根据概率论的知识,可 以求得所截截面的孔洞平均面积为:

$$S = \frac{2}{3}\pi r^2 \tag{11}$$

该截面孔洞半径为:

$$r = \frac{2N_{\rm h}}{\pi N_{\rm s}} \tag{12}$$

单位面积内的孔洞面积分数为:

$$f_{\rm s} = \frac{2}{3}\pi r^2 N_{\rm s} \tag{13}$$

单位体积内的孔洞体积分数为:

$$f_{\rm v} = \frac{8N_{\rm h}^2}{3\pi N_{\rm s}} \tag{14}$$

孔洞面积分数和体积分数的关系为:

$$f_{\rm s} = \frac{2}{3}\pi r^2 N_{\rm s} = \frac{2}{3}\pi \left(\frac{2N_{\rm h}}{\pi N_{\rm s}}\right)^2 N_{\rm s} = \frac{8N_{\rm h}^2}{3\pi N_{\rm s}} = f_{\rm v}$$
(15)

通过公式(15),可以推导统计得到的扫描电镜图 片中孔洞面积分数和孔洞体积分数是相等的,因此可 以通过测量计算 SEM 像中孔洞的面积百分比来确定 材料该处的孔洞体积分数。通过测量并取平均值可以 得到断口处孔洞体积分数为10%,因此认为本文中铅 断裂时的孔洞体积分数*f*_F为0.1,即*f*_F=0.1。

3.2 有限元反求法

在利用扫描电镜分析法获得了铅断裂时的孔洞体 积分数 $f_{\rm F}$ 以后,借助响应面法,利用 ABAQUS 模拟 仿真软件进行单向拉伸的有限元模拟仿真,反求损伤 参数 q_1 、 $f_{\rm N}$ 、 $\varepsilon_{\rm N}$ 、 $f_{\rm C}$ 。响应面法是通过建立响应值与损 伤参数之间的二次多项式模型进行回归分析,其一般 表达式为:

$$Y = a_0 + \sum_{i=1}^{4} a_i X_i + \sum_{i=1}^{4} a_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^{3} \sum_{j=i+1}^{4} a_{ij} X_i X_j$$
(16)

式中: Y 是响应面的响应值; a₀为常数, a_i、a_{ii}和 a_{ij} 分别为回归模型的一次项、二次项和交叉项的系数; X_i、X_j代表损伤参数 q₁、f_N、 ε_N、f_C。本文中响应目标 值选取拉伸试验得到的载荷-位移曲线上的 5 个点, 如图 5 所示,分别为最大拉伸载荷处的拉伸位移(R₁)、 最大拉伸载荷(R₂)、承载能力迅速下降时的拉伸位移 (R₃)、承载能力迅速下降时的拉伸载荷(R₄)和断裂失效 时的拉伸位移(R₅)。

通过多次模拟结果的比对,确定出损伤参数的高 水平(1)、中间水平(0)和低水平(-1),如表2所示。

本文通过 Minitab 软件设计了 27 组试验,并基于 ABAQUS 平台对这 27 组试验进行仿真模拟,从模拟 结果中获取对应的 5 个响应目标值,最终结果如表 3



图 5 载荷-位移曲线中响应值的选取

Fig. 5 Selection of response value

表2 损伤参数高低水平的选取

Level	q_1	$f_{ m N}$	\mathcal{E}_{N}	$f_{\rm C}$
1	2.7	0.012	0.21	0.0044
0	2.5	0.011	0.2	0.0042
-1	2.3	0.010	0.19	0.0040

所示。模拟中纯铅的密度为 ρ=11.4 g/cm³。模拟仿真 的拉伸试样与图 1 的尺寸完全相同,并且设置的边界 条件与实际拉伸试验一致。有限元模型中单元类型采 用带有沙漏控制的 8 节点缩减积分体单元(C3D8R)。 最终获得 5 个响应值的回归模型,如式(17)所示:

$$\begin{aligned} R_{\rm I} &= 10.8268 + 0.294\varepsilon_{\rm N} - 0.0891f_{\rm N} - 0.1483q_{\rm I}^2 - \\ & 0.18884\varepsilon_{\rm N}f_{\rm N} + 0.1194\varepsilon_{\rm N} - 0.2946f_{\rm C} \\ R_{\rm 2} &= 181.194 + 1.196\varepsilon_{\rm N} - 0.834f_{\rm N} - 0.647\varepsilon_{\rm N}^2 - \\ & 0.473f_{\rm N}^2 + 0.609\varepsilon_{\rm N}f_{\rm N} + 0.62\varepsilon_{\rm N}q_{\rm I} - 0.394f_{\rm N}f_{\rm C} \\ R_{\rm 3} &= 14.275 + 0.215\varepsilon_{\rm N} - 0.3744f_{\rm N} + 0.2806f_{\rm c} - \\ & 0.1689q_{\rm I} - 0.2487f_{\rm C}^2 - 0.343\varepsilon_{\rm N}f_{\rm N} + 0.227f_{\rm N}f_{\rm C} \\ R_{\rm 4} &= 177.965 + 0.8\varepsilon_{\rm N} - 0.909f_{\rm N} + 0.226f_{\rm C} + 0.299q_{\rm I} - \\ & 0.461\varepsilon_{\rm N}^2 - 0.407f_{\rm N}^2 - 0.468f_{\rm C}^2 - 0.773q_{\rm I}^2 + \\ & 1.073\varepsilon_{\rm N}f_{\rm N} + 0.654\varepsilon_{\rm N}q_{\rm I} \\ R_{\rm 5} &= 15.483 + 0.1479\varepsilon_{\rm N} - 0.3635f_{\rm N} + 0.3131f_{\rm C} + \\ & 0.1381f_{\rm N}^2 - 0.2839\varepsilon_{\rm N}f_{\rm N} + 0.3563f_{\rm N}f_{\rm C} \end{aligned}$$

(17)

对回归模型进行方差分析,其结果如表 4 所示。 其中 5 个响应目标值的 *P* 值均小于 0.01, R^2 (*R*-sq)均 大于 90%,证明该模型显著,拟合程度较好并具有统 计学意义,能较好地反应各个损伤参数与响应面目标 值的关系。将真实试验获得的响应值作为目标值带入 回归模型方程中,从而求得最佳的损伤参数 $q_1=2.64$ 、 $\varepsilon_N=0.21$ 、 $f_N=0.0109$ 、 $f_C=0.00432$ 。

通过扫描电镜分析法和基于响应面的有限元反求 法最终得到了纯铅 GTN 损伤模型参数如表 5 所示。

3.3 验证 GTN 参数的准确性

为验证 3.2 小节中获得的纯铅 GTN 损伤模型参数 的准确性,将 GTN 模型耦合到单向拉伸模拟中。将 单向拉伸模拟与实验获得的载荷--位移曲线和铅材料 孔洞体积分数进行对比,以验证所建立的纯铅 GTN 模型中参数的准确性。

从图 6 可以看出,试验获得的载荷-位移曲线和 模拟结果匹配良好。通过单向拉伸试验获得不同应变 量下的拉伸试样,应变量分别为 0.1、0.2、0.3、0.35。 针对上述拉伸试样,对将发生缩颈或已发生缩颈处的 截面进行扫描电镜观察,获得对应的 SEM 像,如图 3 所示。通过 Image-Pro Plus 软件,统计截面的孔洞体 积分数,将其与模拟仿真获得的孔洞体积分数随等效 塑性应变的数据进行对比,如图 7 所示。从图 7 可以 看出,实验获得的铅材料孔洞体积分数随应变的变化 规律与模拟结果吻合较好。

第30卷第8期

表3 有限元模拟试验设计方案

 Table 3
 Test design scheme of finite element simulation

CN.		Facto	r level				Response value	;	
Case No	ε_{N}	$f_{\rm N}$	$f_{\rm C}$	q_1	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5
1	0.19	0.010	0.0042	2.5	10.3454	180.864	14.0355	177.882	15.5555
2	0.21	0.011	0.0042	2.3	10.8945	181.008	14.7918	176.467	15.8834
3	0.20	0.012	0.0042	2.3	10.6936	180.755	14.3183	175.000	15.5183
4	0.21	0.011	0.0042	2.7	10.8835	182.229	14.0234	178.392	15.3412
5	0.20	0.010	0.0042	2.7	10.6788	181.381	14.3912	178.917	15.9131
6	0.20	0.011	0.0040	2.3	10.5822	180.534	13.7013	176.099	15.0462
7	0.20	0.011	0.0044	2.3	10.5821	180.790	14.2795	177.420	15.5537
8	0.20	0.012	0.0042	2.7	10.3710	178.888	13.6313	176.055	14.9752
9	0.21	0.011	0.0040	2.5	10.6532	181.305	13.9993	177.527	15.4382
10	0.20	0.010	0.0044	2.5	10.8924	181.531	14.7476	178.018	16.0876
11	0.19	0.011	0.0042	2.3	10.2261	179.380	13.9070	176.282	15.267
12	0.21	0.011	0.0044	2.5	10.8994	181.627	14.2373	178.135	15.7561
13	0.20	0.01	0.0042	2.3	10.8426	180.444	15.1506	177.419	16.0000
14	0.19	0.011	0.0042	2.7	10.3182	178.123	13.8768	175.590	15.3168
15	0.19	0.012	0.0042	2.5	10.7003	177.659	14.1661	174.439	15.5261
16	0.20	0.012	0.0040	2.5	10.9511	180.095	13.0002	176.309	14.2033
17	0.20	0.011	0.0044	2.7	10.2906	181.108	14.2986	176.654	15.5786
18	0.20	0.011	0.0042	2.5	10.8268	181.194	14.2750	177.965	15.483
19	0.20	0.011	0.0042	2.5	10.8268	181.194	14.2750	177.965	15.483
20	0.19	0.011	0.0044	2.5	10.0985	179.404	13.9720	176.572	15.5000
21	0.20	0.011	0.0042	2.5	10.8268	181.194	14.2750	177.965	15.4830
22	0.19	0.011	0.0040	2.5	10.3300	178.677	13.5236	176.161	14.9627
23	0.20	0.012	0.0044	2.5	10.01903	178.816	14.3063	176.255	15.9263
24	0.21	0.010	0.0042	2.5	11.3073	181.529	15.1247	177.582	16.3247
25	0.21	0.012	0.0042	2.5	10.9085	180.760	13.8848	178.429	15.1597
26	0.20	0.011	0.0040	2.7	10.6936	180.755	13.9000	176.666	15.2054
27	0.20	0.010	0.0040	2.5	10.6462	181.236	14.3502	177.581	15.7899

表4 回归模型方差分析结果

 Table 4
 Analysis of variance of model

····· ,		
Parameter	Р	$R^2(R-sq)$
R_1	0	92.02%
R_2	0	94.33%
R_3	0.001	90.06%
R_4	0	93.01%
R_5	0	92.07%

通过分别对比模拟与实验获得的载荷--位移曲线 和铅材料孔洞体积分数随应变的变化规律,验证了获 得的铅 GTN 模型准确性较好;将其耦合到铅套成形 模拟过程中,以预测铅套成形过程的破裂行为。

表5 铅的 GTN 细观损伤模型参数

Table 5	GTN dama	age parameters of lead
Parameter		Value
	q_1	2.64
	q_2	1
	q_3	6.97
	S	0.1
	f_0	0
	$\varepsilon_{\rm N}$	0.21
	$f_{\rm N}$	0.0109
	$f_{\rm C}$	0.00432
	$f_{ m F}$	0.1



图6 单向拉伸模拟与实验的载荷--位移曲线对比

Fig. 6 Comparison of load-displacement curves between simulation result and test result



图 7 铅材料孔洞体积分数的模拟与实验结果对比

Fig. 7 Comparisons between simulation and experimental results of void volume fraction for Lead

4 铅套破裂行为的预测

铅套成形的工艺方案为:反挤压→变薄拉深,两 个步骤均是在室温下成形。为预测铅套成形过程中的 损伤行为,在 ABAQUS 平台上,将求得的纯铅 GTN 模型耦合进铅套成形的模拟仿真中。为了提高计算速 度,采用 2D 模型,模具设置成 Analytical rigid 模型, 并约束住凹模的 6 个方向上的自由度。坯料设置为 Deformable 分析模型。利用 ABAQUS 动态显示求解 器进行仿真模拟,网格采用 C3D8R,并加入 ALE 网 格自适应技术。模拟过程的摩擦因数取值为 0.15,冲 头的下压速度为 8 mm/s。

用孔洞体积分数来表征材料的损伤。如图8所示,

在反挤压后期,最大的孔洞体积分数集中在口部,但 未到材料失效时的孔洞体积分数 0.1。但在变薄拉深的 成形模拟中,如图 9 所示,当冲头下压行程达到 14 mm 时,铅套筒壁处的孔洞体积分数达到失效时的数值 0.1。基于模拟分析结果,推断铅套在变薄拉深时发生 了破裂损伤。图 10(c)中的模拟结果显示,铅套的破裂 失效主要集中在筒壁处,预测会发生明显的拉裂现象。 根据铅套成形的工艺方案开展了铅套成形实验。

图 10 所示分别为反挤压和变薄拉深后的铅套成形结 果。由图 10 可以发现,反挤压过后除了口部不规整之



图 8 反挤压过程中铅套的孔洞体积分数模拟结果

Fig. 8 Simulation results of void volume fraction in backward extrusion: (a) Punch stroke of 1.5 mm; (b) Punch stroke of 3 mm; (c) Punch stroke of 12 mm; (d) Punch stroke of 14.1 mm





Fig. 9 Simulation results of void volume fraction in lead sleeve during thinning and deep drawing: (a) Punch stroke of 3 mm; (b) Punch stroke of 7.5 mm; (c) Punch stroke of 10.5 mm; (d) Punch stroke of 15 mm

外铅套筒壁完好,但变薄拉深后铅套出现拉裂现象。 与耦合 GTN 模型的模拟结果对比发现,模拟结果与 试验结果匹配良好。耦合 GTN 损伤模型的数值模拟 可以对铅套成形过程中的破裂损伤行为进行较准确地 预测。

5 结论

 1)通过单向拉伸试验数据获得纯铅真实应力-应 变数据,选取应变 0.006≤ε≤0.2 范围内的数据进行拟 合和外延处理获得材料无损伤的本构模型,作为耦合 GTN 模型进行铅套成型数值模拟仿真的材料属性。

2) 将扫描电镜分析法和基于响应面的有限元反



图 10 铅套成型模拟和实验结果比对

Fig.10 Comparison between simulation and test results for formation of lead sleeve: (a) Stress distribution for backward extrusion; (b) Test result for backward extrusion; (c) Stress distribution for thinning and deep drawing; (d) Test result for thinning and deep drawing

求法相结合,获得了纯铅材料的 GTN 细观损伤模型 参数: $f_F=0.1$, $q_1=2.64$, $\varepsilon_N=0.21$, $f_N=0.0109$, $f_C=0.00432$ 。 通过分别对比模拟与实验获得的载荷-位移曲线和铅 材料孔洞体积分数,验证了获得的铅 GTN 模型参数 的准确性较好。

3) 在 ABAQUS 平台上,耦合获得的纯铅材料 GTN 细观损伤模型,模拟了铅套的成形过程,用材料 的孔洞体积分数来表征铅套在成形过程中材料的损伤 行为。通过模拟预测出,变薄拉深后铅套在壁部会出 现拉裂现象。实际的铅套成型实验结果与模拟结果匹 配良好。耦合 GTN 损伤模型的数值模拟可以对铅套 成形过程中的破裂损伤行为进行较准确的预测。这是 其后续成形优化工作的重要基础。

REFERENCES

- TVERGAARD V, NEEDLEMAN A. An analysis of the cup-cone fracture in a round tensile test bar[J]. Acta Metall, 1984, 32(1): 157–169.
- [2] NEEDLEMAN A, TVERGAARD V. An analysis of ductile rupture in notched bars[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1984, 32(6): 461–490.
- [3] GURSON A L. Continuum theory of ductile rupture by void nucleation and growth: Part I Yield criteria and flow rules for porous ductile media[J]. Engng Mater Technol, 1977, 99(1): 2–15.
- [4] ABBASSI F, BELHADJ T, MISTOU S, ZGHAL A. Parameter identification of a mechanical ductile damage using Artificial Neural Networks in sheet metal forming[J]. Materials & Design, 2013, 45: 605–615
- [5] SRIRNAKORN T, WONGWISES S, UTHAISANGSUK V. A study of local deformation and damage of dual phase steel[J]. Materials and Design, 2014, 64: 729–742.
- [6] 黄建科,董湘怀. 金属成形过程的细观损伤力学模型及韧性断裂准则研究[D]. 上海:上海交通大学,2009.
 HUANG Jian-ke, DONG Xiang-huai. Research on meso damage mechanics model and ductile fracture criterion of metal forming process[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2009.
- [7] 陈志英. 冲压成形中破裂和回弹的细观损伤力学分析[D].
 上海: 上海交通大学, 2009.
 CHEN Zhi-ying. Meso damage mechanics analysis of

fracture and spring back in stamping forming[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2009.

- [8] BROGGIATO G B, CAMPANA F, CORTESE L. Identification of material damage model parameters: An inverse approach using digital image processing[J]. Meccanica, 2007, 42(1): 9–17.
- [9] ABBASI M, BAGHERI B. Application of response surface

methodology to drive GTN model parameters and determine the FLD of tailor welded blank[J]. Computational Materials Science, 2012, 53(1): 368–376.

- [10] HE Min, LI Fu-guo, WANG Zhi-gang. Forming limit stress diagram prediction of aluminum alloy 5052 based on GTN model parameters determined by in situ tensile test[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2011, 24(3): 378–386.
- [11] 刘文权,盈 亮,王丹彤,鲁可心,胡 平. 热冲压成形 过程细观损伤演化机理研究[J]. 机械工程学报, 2016, 52(14): 31-39.
 LIU Wen-quan, YING Liang, WANG Dan-tong, LU Ke-xin,

HU Ping. Study on meso damage evolution mechanism of hot stamping process[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52 (14): 31–39.

- [12] 盈 亮,刘文权, 王丹彤, 胡 平, 王 琪. 7075-T6 铝合 金温成形损伤演化实验与仿真[J]. 中国有色金属学报, 2016, 26(7): 1383-1390.
 YING Liang, LIU Wen-quan, WANG Dan-tong, HU Ping, WANG Qi. Damage evolution experiment and Simulation of 7075-T6 aluminum alloy during warm forming [J]. Chinese
- [13] CUESTA I I, ALEGRE J, LACALLE R. Determination of the Gurson-Tvergaard damage model parameters for simulating small punch tests[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2010, 33(11): 703–713.

Journal of Nonferrous Metals, 2016, 26(7): 1383-1390.

- [14] STEGLICH D, BROCKS W. Micromechanical modelling of the behaviour of ductile materials including particles[J]. Computational Materials Science, 1997, 9(1/2): 7–17.
- [15] MAHNKEN R. Aspects on the finite-element implementation of the Gurson model including parameter identification[J]. Avian Diseases, 1997, 41(2): 326–329.
- [16] 闫玉曦. 带钢边部缺陷在轧制过程中的开裂行为研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2014.
 YAN Yu-xi. Study on cracking behavior of strip edge defects during rolling[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2014.

Fracture prediction of lead sleeve based on mesoscopic damage mechanics

XU Wu-jiao, XIE Dan, LI Fang, GAO Yuan-peng

(Chongqing University, College of Materials Science and Engineering, Chongqing 400044, China)

Abstract: The fracture prediction in the forming process of bullet lead sleeve was studied. The true stress-strain data of pure lead were obtained by uniaxial tensile test, in which the strain range of $0.006 \le \varepsilon \le 0.2$ was selected for fitting and extrapolating to obtain the damage free constitutive relationship. The parameters of the GTN micro-damage model of pure lead were acquired by means of scanning electron microscopy analysis and inverse finite element simulation based on response surface method. The load displacement curve and void volume fraction of lead material obtained by simulation and experiment in uniaxial tension were compared and analyzed, which verified the accuracy of the parameters in the GTN model of pure lead. Based on ABAQUS simulation platform, coupled with the GTN damage model, the fracture behavior of lead sleeve during forming process was simulated and predicted. The experiments of back extrusion and thinning deep drawing for lead sleeve were carried out. The results show that the experimental results match well with the simulation results based on GTN damage model. The accurate prediction of forming defects of lead sleeve is an important basis for forming optimization.

Key words: formation of lead sleeve; GTN micro-damage model; response surface method; scanning electron microscope; fracture prediction

Received date: 2019-07-26; Accepted date: 2020-07-24

Corresponding author: XU Wu-jiao; Tel: +86-13368186252; E-mail: xuwujiao cq@163.com

(编辑 何学锋)