

文章编号: 1001 - 2486(2011)03 - 0044 - 04

应变率和绝热软化对空腔膨胀影响的数值模拟*

晏麓晖, 冯兴民, 夏清波, 孔晓鹏

(国防科技大学 指挥军官基础教育学院, 湖南 长沙 410073)

摘要:采用数值模拟的方法研究金属材料球形空腔膨胀的空腔面径向应力与膨胀速度关系。理想弹塑性模型和幂次硬化模型的模拟结果与理论解吻合非常好,验证了该方法的有效性。在此基础上研究了应变率和绝热软化效应对空腔面径向力和膨胀速度的影响。结果表明,综合考虑应变率和热效应的侵深预测结果与试验值吻合得很好,只考虑应变率而不计热效应会高估侵彻阻力,造成侵深预测略为偏低,Warren解累积了材料可压缩性和不计热效应带来的误差,预测结果明显小于试验值。

关键词:空腔膨胀;数值模拟;应变率;绝热软化

中图分类号: O385 **文献标识码:** A

A Numerical Simulation of the Effects of Strain Rate and Adiabatic Softening on the Cavity Expansion Model

YAN Lu-hui, FENG Xing-min, XIA Qing-bo, Kong Xiao-peng

(College of Basic Education for Commanding Officers, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410072, China)

Abstract: A numerical method was used to study the relationship between the dynamic radial stress and the expanding velocity at a cavity wall in metal materials. The simulation results of the elastic-perfectly plastic and power-law model satisfied the theories' that proves the availability of the method. Then the influences of the strain-rate and adiabatic effects of the materials were analyzed by simulation. The results show that the predictions of penetration with the strain-rate and thermal effects of the materials corresponded well with the experiments. The penetration resistance will be overvalued if the thermal effects were neglected, resulting in slightly lower penetration prediction. The predictions of Warren's theory model are less than the experiments made in the current study because Warren's theory model accumulated the errors from compressibility but ignored the thermal softening.

Key words: spherical cavity expansion; numerical simulation; strain rate sensitivity; thermal softening

在侵彻力学中,空腔膨胀理论是公认的分析靶体材料抗侵彻阻力的有效模型之一^[1-2]。Forrestal^[3]采用理想弹塑性假设,得到了金属类韧性材料动态空腔膨胀理论的经典模型解,Luk^[4]将其推广到幂次强化材料。Warren^[5]考虑应变率影响,建立了一个包含应变率效应的动态空腔膨胀模型,然而,Warren解是通过对应变率效应和材料的压缩性解耦获得的,即在不可压缩基础上考虑应变率影响,然后将其附加到考虑可压缩的Luk解上,所得理论解并不完备。蒋志刚^[6]考虑了有限厚度靶板背面自由边界效应,建立了不可压缩弹塑性金属材料的有限空腔膨胀理论。

利用空腔膨胀模型可以得到与Poncelet侵彻阻力公式 $F = A_0(a + bV^2)$ (A_0 是弹体的横截面积, V 是撞击速度, a 和 b 是由实验确定的材料常数)几乎完全相同的公式,为阻力的预测提供了理

论基础。陈小伟^[7]认为完整的侵彻阻力公式包含靶材静强度项、靶材的黏性项、流动阻力和附加质量项,即 $\sigma_r = a + bV + cV^2 + d\dot{V}$,并基于空腔膨胀理论,提出了控制侵彻过程的三个无量纲常数,同时给出了无量纲深度的解析公式,丰富了空腔膨胀理论在侵彻问题中的应用。

在冲击侵彻作用下,靶材的可压缩性、动态性能和绝热软化等都对侵彻阻力有影响。目前还没有包含所有因素的空腔膨胀模型,主要困难是无法得到完整的解析解。Warren^[8]率先采用数值模拟研究了低强度混凝土的空腔压力与膨胀速度关系。最近,Rosenberg^[9-10]运用AutoDyn-2D对理想弹塑性材料的空腔膨胀进行了数值模拟,结果能很好地支持球形和柱形空腔膨胀模型的理论预测,并拟合得到了侵彻阻力系数与弹塑性材料参数的关系式。因此,通过数值方法进行空腔膨胀

* 收稿日期:2010-09-12

作者简介:晏麓晖(1962-),男,教授,硕士生导师。

模拟,研究材料相关力学特性、膨胀条件等对侵彻阻力影响已成为一条可行且有效的途径。

本文基于 LS-DYNA 程序,采用可综合考虑应变率和绝热效应的 Johnson-Cook 模型对金属材料的空腔膨胀过程进行模拟,研究了应变率和绝热软化效应对空腔压力的影响。

1 计算模型

采用内含微小空腔 ($r = 0.5\text{mm}$) 的三维球体模拟无限介质中球形空腔从 $r = 0$ 开始在恒定空腔面径向压力 P 作用下的膨胀。为了避免球体外边界的应力松弛和应力波反射对膨胀过程的影响,

取球体半径 100mm ,施加无反射边界条件。采用 SOLID164 单元、径向渐变映射建立 1/8 有限元模型,如图 1~图 3 所示。

材料模型选用能够反映材料非线性、应变率和绝热效应的 Johnson-Cook 本构模型。为了模拟材料可能存在的高应变率 ($\dot{\epsilon} > 10^3 \text{s}^{-1}$) 效应,这里采用 Huh 和 Kang^[11] 提出的 JC 修正模型

$$\sigma_y = [A + B(\epsilon^p)^n][1 + C \ln \dot{\epsilon}^* + C_2(\ln \dot{\epsilon}^*)^2] (1 - T^{*m}) \quad (1)$$

式中, A 为屈服强度; ϵ^p 为等效塑性应变, B 、 n 为应变硬化参数; $\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon}^p / \dot{\epsilon}_0$ 为无量纲塑性应变率,其中 $\dot{\epsilon}_0$ 为参考应变率, C 、 C_2 为应变率影响参数; $T^* = (T - T_r) / (T_m - T_r)$ 为无量纲温度,其中 T_r 和 T_m 分别为室温和熔点温度, m 为温度影响参数。

取 6061-T651 铝和 4340 钢进行分析,相关材料参数见表 1,其中 ρ_0 为密度, E 和 G 为弹性模量和剪切弹性模量, C_p 为比热, S_1 、 S_2 、 S_3 、 γ 和 C_0 为 Grüneisen 状态方程参数。

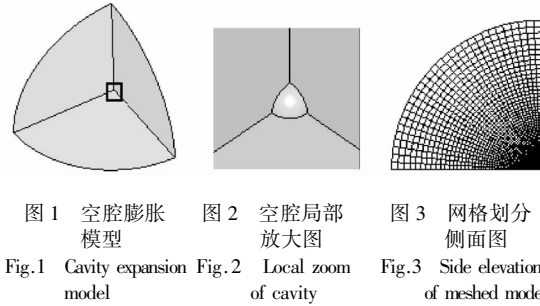


图 1 空腔膨胀模型 Fig.1 Cavity expansion model
图 2 空腔局部放大图 Fig.2 Local zoom of cavity
图 3 网格划分侧面图 Fig.3 Side elevation of meshed model

表 1 6061-T651 铝和 4340 钢的 JC 模型参数^[5,12]

Tab.1 JC model parameters of 6061-T651 Al and 4340 steel^[5,12]

材料	$\rho_0 / \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	E / GPa	G / GPa	A / MPa	B / MPa	n	C	C_2	$\dot{\epsilon}_0 / \text{s}^{-1}$
6061 铝	2710	68.9	25.8	308	137	0.27	0.032	0.0067	1000
4340 钢	7830	200	77	944	510	0.26	0.028	0.0084	1000
材料	m	T_m / K	T_r / K	$C_p / \text{J}(\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$	S_1	S_2	S_3	γ	$C_0 / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
6061 铝	1.34	853	298	896	1.4	0.0	0.0	2.0	5042
4340 钢	1.03	1793	298	477	1.4	0.0	0.0	1.16	4563

2 空腔面径向应力

2.1 理想弹塑性和幂次硬化模型

采用不计应变率和热效应的简化 JC 模型对 6061-T651 铝的可压缩理想弹塑性模型 (Elastic-Perfectly Plastic, 简称 EPP) 和幂次硬化模型 (Compressible and Power-Law Hardening, CH) 进行模拟。图 4 给出了两种材料模型在不同空腔压力 P 下空腔膨胀速度 V 随时间变化规律。从中可以看出,当 P 较小(如 $P = 1.0\text{GPa}$) 时, V 上升到最大值后,逐渐衰减到 0,膨胀最终停止,表明 P 不足以使空腔持续膨胀,此时空腔的抗力大于所施压力。当 P 超过一定值后, V 最终会趋于稳定。因此,对每个给定的 P ,空腔面都有一个稳定的 V ,即当空腔以一稳定速度膨胀时,空腔面径向应力 $\sigma_r = P$ 为一恒定值。

两种材料模型 σ_r 随 V 变化规律的模拟结果如图 5 所示,图中还给出了相应材料模型的 Forrestal 和 Luk 空腔膨胀理论解^[3-4],其中 Y 为材

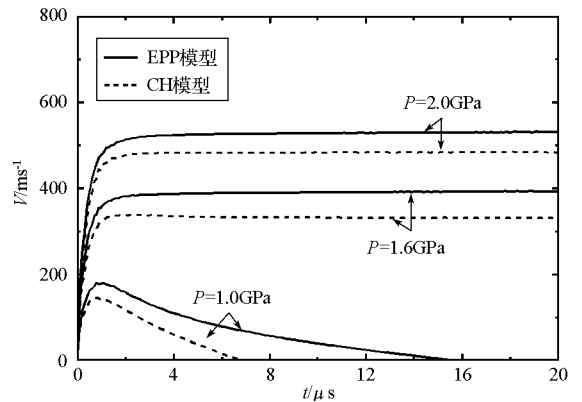


图 4 EPP 和 CH 模型空腔膨胀速度时程曲线

Fig.4 Cavity expansion velocity vs time of EPP and CH

料静屈服强度, ρ_0 为材料初始密度。结果表明, σ_r 与 V 的关系与 Forrestal 和 Luk 模型结果吻合得很好,由此可以证明本文数值模拟合理有效。

2.2 应变率效应和绝热软化效应

以 JC 模型为基础,分别考虑不可压缩应变率效应 (Incompressible、Hardening and Strain Rate, InCHR)、可压缩应变率效应 (Compressible、Hardening

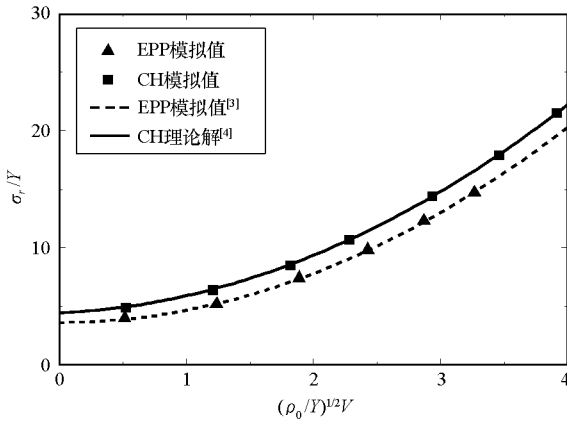


图5 EPP和CH模型空腔面径向应力模拟结果与理论解

Fig.5 Cavity radial stress of EPP and CH comparing simulations with theories

表2 A₁、A₂和A₃系数拟合值

Tab.2 The fit values of A₁、A₂ and A₃

材料模型	6061 - T651 铝			4340 钢		
	A ₁	A ₂	A ₃	A ₁	A ₂	A ₃
CH (理论)	4.4534	0.4680	0.9926	4.6253	0.3858	0.9803
InCHR (理论)	5.5468	0.6255	1.4377	5.4352	0.6871	1.4321
InCHR (模拟)	5.5436	0.6249	1.4396	5.4318	0.6902	1.4363
CHR (理论)	5.0394	0.9830	0.9402	5.2171	0.9253	0.9237
CHR (模拟)	5.0105	0.3113	1.0555	5.1986	0.3147	1.0312
CHRT (模拟)	4.6721	0.3612	1.0243	4.8961	0.3379	1.0137

由表2可知, InCHR模型的模拟结果与Warren不可压缩解吻合得很好。图6给出了Warren理论解 σ_{CHRw} 与模拟值 σ_{CHRs} 相对误差随空腔速度变化曲线。对于CHR模型,模拟值普遍低于Warren理论解,说明在Luk不计应变率效应的可压缩模型解基础上,直接加入考虑应变率效应不可压缩解的Warren理论解高估了空腔面径向应力。在 $0.4 \leq (\rho_0/Y)^{1/2} V \leq 3.5$ 范围内,两种材料的误差都超过5%,当 $(\rho_0/Y)^{1/2} V = 1.4 \sim 1.5$ ($V = 450 \sim 500\text{m/s}$)时,误差达到最大。由此可见,在低速膨胀区域,材料可压缩效应和应变率效应影响均较小;随着膨胀速度增大,材料可压缩效应逐

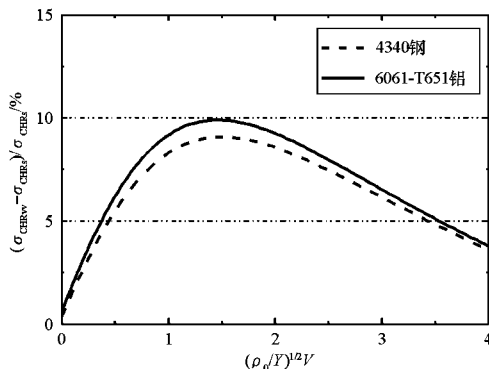


图6 CHR模型模拟值与理论解误差曲线

Fig.6 Errors between simulations and theoretics of CHR

渐增强,模拟解与Warren理论解误差也随之增大;当速度超过某一范围时,相对于可压缩效应而言,应变率效应成主要因素,误差相对随之降低。

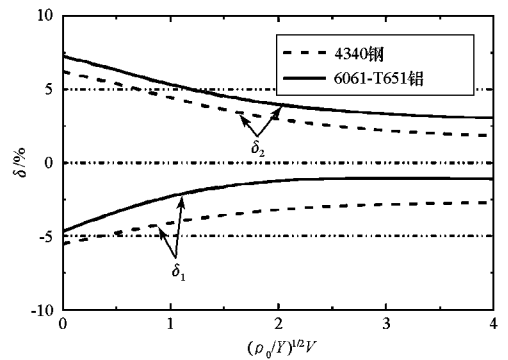


图7 CH、CHR和CHRT模型空腔面径向应力误差曲线
Fig.7 Errors of cavity radial stress in CH, CHR and CHRT

假设CHRT模型最符合实际材料性能(见下节),定义 $\delta_1 = (\sigma_{CH} - \sigma_{CHRT})/\sigma_{CHRT}$ 为CH模型与CHRT模型空腔面径向应力的相对误差, $\delta_2 = (\sigma_{CHR} - \sigma_{CHRT})/\sigma_{CHRT}$ 为CHR模型与CHRT模型的相对误差。由图7给出的误差随速度变化规律发现:(1)考虑材料应变率效应而不考虑热效应(CHR模型),空腔面应力会偏高,但误差最大不超过10%,且随着速度的增加而降低,在高速阶段,对于6061-T651铝,误差趋于3%,4340钢则趋于1.8%;(2)不计应变率和热效应CH模型低

估了空腔面径向应力,同样误差随着速度的增加而降低,在高速阶段,6061-T651 铝的误差稳定在1%左右,4340 钢的误差在2.7%左右;(3)应变率硬化与热软化有相互抵消作用,但应变率效应影响大于热软化效应,对于6061-T651 铝,热软化效应接近应变率效应,因此CH模型预测的空腔面径向应力比CHR模型预测的更接近实际。

3 侵深结果分析

对于6061-T651 铝,采用文献[5]的侵深计算模型,取文献[13]中的试验进行计算,球头弹体密度 $\rho_p = 8000\text{kg/m}^3$,弹头半径 $a = 3.555\text{mm}$,弹长为 $L = 35.56\text{mm}$;对于4340 钢,采用文献[1]的计算模型,试验源于文献[14],卵形弹体质量 $m_p = 110\text{g}$,弹体半径 $a = 10\text{mm}$,弹体长 $L_1 = 40\text{mm}$,弹头长 $L_2 = 10\text{mm}$ 。图8(a)、(b)分别给出了两种材料按CH模型、CHR模型和CHRT模型的模拟结果及可压缩Warren理论解(CHR模型)预测的侵深与试验结果的对比。

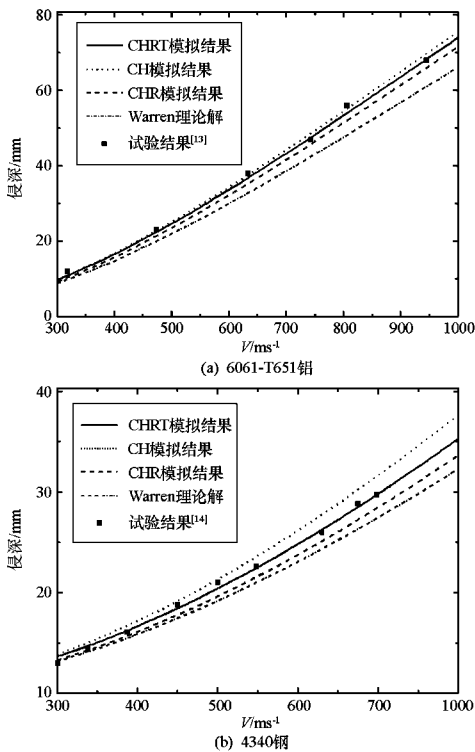


图8 侵深与撞击速度关系的理论预测和试验结果对比
Fig.8 Depth of penetration versus striking velocity between theoretical predictions and experimental data

由图8可知:(1)在三种材料模型中,CHRT模型结果与试验结果吻合得最好;(2)对于6061-T651 铝,CH模型结果同样与试验结果吻合得较好,CHR模型结果略有所偏低;而对于4340 钢,CHRT模型结果在CH模型和CHR模型之间,这与前面对空腔面径向应力的研究结果相一致;(3)

Warren理论解综合了材料可压缩性但没有考虑热效应的误差,随着撞击速度增加,误差累积增大,明显低于试验结果。

4 结论

本文采用LS-DYNA软件对金属材料球形空腔膨胀过程进行了数值模拟,研究了材料硬化、应变率和绝热效应对空腔膨胀压力的影响。研究表明,当空腔膨胀模型理论完备时,理论解(如Forrestal解和Luk解)与数值模拟解完全吻合;考虑应变率效应的可压缩材料Warren解,由于理论不完备,高估了空腔压力,最大偏差不超过10%;综合考虑应变率和热效应空腔膨胀模型预测的刚性弹侵深与试验结果吻合得最好;由于应变率效应和绝热软化效应有相互抵消作用,一定条件下不计二者影响可以获得较好预测结果,而只考虑应变率不计热效应(如Warren解)的预测结果误差最大。

参考文献:

- [1] Li Q M, Weng H J, Chen X W. A Modified Model for the Penetration Into Moderately Thick Plates by a Rigid, Sharp-nosed Projectile [J]. Int J Impact Eng, 2004, 30:193-204.
- [2] Forrestal M J, Warren T L. Penetration Equations for Ogive-nose Rods Into Aluminum Targets [J]. Int J Impact Eng, 2008, 35:727-730.
- [3] Forrestal M J, Luk V K. Dynamic Spherical Cavity-expansion in a Compressible Elastic-plastic Solid [J]. J Appl Phys, 1988, 55:275-279.
- [4] Luk V K, Forrestal M J, Amos D E. Dynamic Spherical Cavity Expansion of Strain-hardening Materials [J]. J Appl Mech, 1991, 58:1-6.
- [5] Warren T L, Forrestal M J. Effects of Strain Hardening and Strain-rate Sensitivity on the Penetration of Aluminum Targets with Spherical-nosed Rods [J]. Int J Solids Struct, 1998, 35:3737-3753.
- [6] 蒋志刚,曾首义,周建平.刚性尖头弹侵彻有限厚度金属靶板分析模型[J].兵工学报,2007,28(8):923-929.
- [7] 陈小伟,李小笠,陈裕泽,等.刚性弹侵彻力学中的第三无量纲数[J].力学学报,2007,39(1):77-84.
- [8] Warren T L, Fossum A F, Frew D J. Penetration Into Low-strength (23 MPa) Concrete: Target Characterization and Simulations [J]. Int J Impt Eng, 2004, 30:477-503.
- [9] Rosenberg Z, Dekel E. A Numerical Study of the Cavity Expansion Process and its Application to Long-rod Penetration Mechanics [J]. Int J Impact Eng, 2008, 35:147-154.
- [10] Rosenberg Z, Dekel E. Analytical Solution of the Spherical Cavity Expansion Process [J]. Int J Impact Eng, 2009, 36:193-198.
- [11] Huh H, Kang W J. Crash-worthiness Assessment of Thin-walled Structures with the High-strength Steel Sheet [J]. Int. J Vehicle Design, 2002, 30(1/2):1-21.
- [12] Ravichandran G. Mechanical Testing of 6061-T651 Aluminum Alloy and 4340 Steel [A]. California Institute of Technology, 1997, Pasadena, CA 91125, USA.
- [13] Forrestal M J, Brar N S, Luk V K. Penetration of Strain-hardening Targets with Rigid Spherical-nose Rods [J]. J Appl Mech, 1991, 58:7-10.
- [14] Dikshit S N, Sundararajan G. The Penetration of Thick Steel Plates by Ogive Shaped Projectiles-experiment and Analysis [J]. Int J Impact Eng, 1992, 12:373-408.