

文章编号: 1001-1455(2006)06-0498-07

圆柱形弹体 Taylor 撞击方法研究*

赵光明^{1,2}, 宋顺成², 孟祥瑞¹

- (1. 安徽理工大学资源开发与管理工程系, 安徽 淮南 231001;
2. 西南交通大学应用力学与工程系, 四川 成都 610031)

摘要: 研究了圆柱形弹体垂直撞击刚性靶体的 Taylor 撞击问题, 提出了弹体撞击过程中未发生变形部分的速度变化规律, 即二次非线性变减速运动, 并通过弹体的运动方程对 Taylor 撞击进行了理论分析; 同时利用再生核质点法(Reproducing kernel particle method, RKPM)对 Taylor 撞击过程进行了数值分析。利用该理论对五种具体材料进行分析, 结果表明, 解析结果与试验结果及数值分析结果吻合较好。

关键词: 爆炸力学; 动态屈服强度; RKPM; Taylor 撞击; 运动方程

中图分类号: O347.1

国标学科代码: 130·3530

文献标志码: A

1 引言

圆柱形弹体沿轴线方向对刚性靶体的垂直撞击过程称为 Taylor 撞击过程, 是由 G. I. Taylor^[1] 在 1948 年首先提出的, 该理论对于研究材料的动态力学性能和冲击过程等具有重要意义。

Taylor 撞击实验用于研究材料动态力学行为, 方法简单可行, 尤其高应变率下的材料行为研究已受到了普遍关注。在初期, G. I. Taylor^[1] 和 A. C. Whiffen^[2] 用 Taylor 撞击实验估计材料的动态屈服应力, 然而, 材料的动态屈服强度不能够完整描述材料行为。在随后的几十年内, 许多学者对此进行了拓展性研究, 如 E. H. Lee 等^[3]、J. B. Hawkyard 等^[4~5]、S. E. Jones 等^[6] 利用冲击过程中能量守恒代替了 Taylor 理论中的动量守恒, 提出了撞击过程平均应力、平均应变及平均应变率的计算方法; G. I. Barenblatt 等^[7] 和 T. C. Ting^[8] 将 Taylor 撞击应用到粘塑性材料; I. M. Hutching^[9] 提出了聚合物的动态屈服强度的估计方法。1987 年, S. E. Jones 等^[6] 提出了 Taylor 撞击的新的分析方法, 即 α, β 模型分析法, 这种方法能够放宽 Taylor 理论中的某些假设条件, 对于有些材料有很好的应用价值。但是, 该理论由于需要求解复杂的高度非线性微分方程, 计算过程相当复杂, 为此 J. W. House 等^[10] 在 α, β 模型理论基础上, 利用新的估计方法, 简化 α, β 模型中的数值计算过程, 计算结果与 α, β 模型的精度相近。

目前 Taylor 撞击研究主要分为两类, 一类是利用一维模型研究分析^[4,5,8], 通过建立撞击过程中的运动方程, 利用数学物理的解析法来研究, 解析法简单易行, 材料的本构关系通常考虑成理想弹塑性, 在很多情况下都有很好的应用。这类分析方法不能够估算出变形过程中任一时刻的物理量。另一类是考虑材料本构关系^[11~14], 并通过数值方法来计算出本构关系中的相关参数, 过程相对复杂, 但能够提供材料撞击中更多的物理参数, 能够分析出任意时刻的各种物理参量。

在本文中, 通过对 Taylor 撞击实验过程研究, 对撞击过程中弹体未发生塑性变形部分的运行速度作适当假设, 认为撞击过程中该部分的速度变化是二次非线性减速运动, 并假设撞击过程中塑性波速度不变, 利用弹体的运动方程, 借助数学解析法来分析 Taylor 撞击过程。此外, 为了验证比较, 也利用最新出现的再生核质点法(RKPM)^[15~16] 来模拟 Taylor 撞击过程, 由于 Taylor 撞击过程涉及到大变形、大应变、高应变率等非线性问题, RKPM 在处理此类问题时具有显著的优点。

* 收稿日期: 2005-09-01; 修回日期: 2006-02-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(50674002)

作者简介: 赵光明(1976—), 男, 博士, 副教授。

2 Taylor 撞击过程分析

在 Taylor 撞击的理论研究中,弹体变形部分的运动速度是不连续分阶段进行的运动过程,计算过程非常复杂,Taylor 撞击过程如图 1 所示。弹性波速度 c_0 比塑性区的扩张速度 u 高得很多。在应力波传播分析中,弹性波往返一次的时间很短,而在这样的一段时间里, u 和 v 的变化很小,并且相对于 c_0 很小,可以略去,这样应力波分阶段传播过程可以看作是个连续过程。根据参考文献[17~18]中的结果,

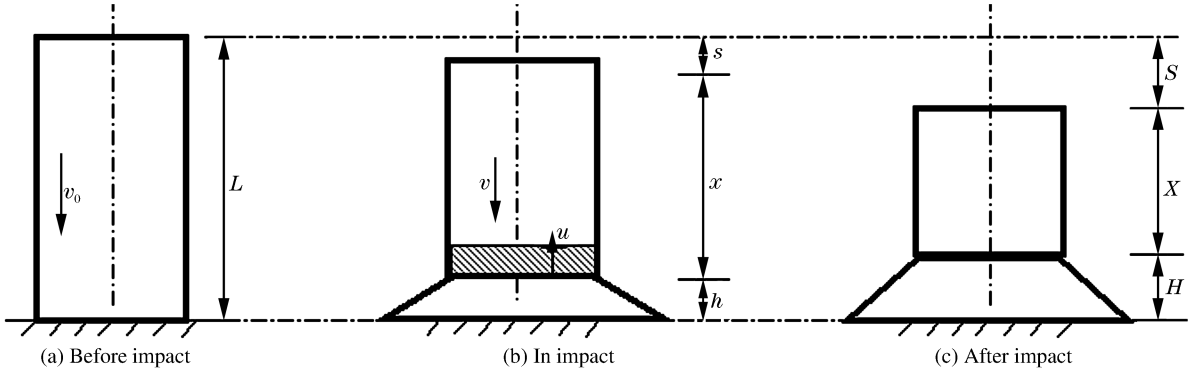


图 1 Taylor 撞击模型

Fig. 1 The model of Taylor impact

为方便对 Taylor 撞击进行理论分析,假设撞击过程中的速度变化是减速的。未变形部分的运动^[5]

$$x\dot{v} + \dot{x}(v - u) = \sigma(e)/(\rho(1 + e)) \tag{1}$$

式中：“·”表示时间导数； ρ 表示密度； σ, e 分别表示工程应力、工程应变。在 Taylor 撞击过程中,塑性区的扩张速度 u 比弹体的冲击速度 v 小得多,可以近似认为 $u=0$,于是式(1)可以改写成

$$x\dot{v} + \dot{x}v = \sigma(e)/(\rho(1 + e)) \tag{2}$$

根据 Jones 的理论 $e\dot{x} = v$ (3)

在图 1 中 $L = s + x + h$ (4)

对上式求导可以得到 $\dot{x} = -(\dot{s} + \dot{h})$ (5)

设塑性波速为常数 $\dot{h} = \lambda$,且 $\lambda > 0$,式(5)中 $\dot{s} = v$,故

$$\dot{x} = (v + \lambda) \tag{6}$$

由式(3)、(6)可得 $e = -v/(v + \lambda)$ (7)

将式(6)和(7)代入运动方程(1)中可得

$$x\dot{v} = (v + \lambda)(v + \sigma^D/(\rho\lambda)) \tag{8}$$

式中： σ^D 是动态屈服应力,式(8)可以写成

$$x \frac{dv}{dx} \frac{dx}{dt} = (v + \lambda)(v + \frac{\sigma^D}{\rho\lambda}) \tag{9}$$

将式(6)引入式(9) $\frac{xdv}{dx} = -(v + \frac{\sigma^D}{\rho\lambda})$ (10)

分离变量得到 $\frac{dx}{x} = -\frac{dv}{v + \sigma^D/(\rho\lambda)}$ (11)

对上式积分 $\frac{x}{L} = \frac{v_0 + \sigma^D/(\rho\lambda)}{v + \sigma^D/(\rho\lambda)}$ (12)

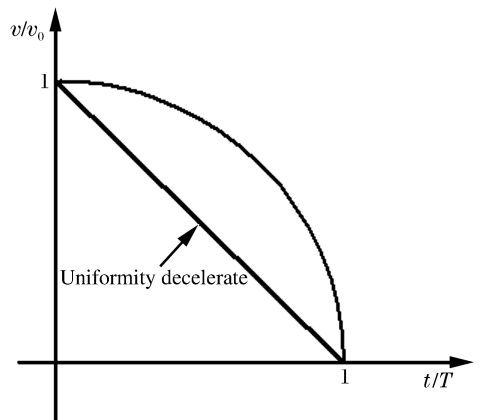


图 2 弹体冲击速度的变化

Fig. 2 Impact velocity variation of projectile

在文献[10]中,速度 v 是变减速运动,如图 2 所示。 v/v_0 与 t/T (T 为撞击过程的持续时间)的关系为非线性(等减速运动时,两者呈线性关系)。根据诸多的实验结果,假设 v/v_0 与 t/T 的关系为二次关系,并假定图 2 中速度曲线与两坐标轴围成部分的面积为常数 k ,于是可以得到速度变化与时间的关系

$$v/v_0 = (3 - 6k)(t/T)^2 + (6k - 4)(t/T) + 1 \tag{13}$$

由于

$$S = \int_0^T v dt \quad (14)$$

可以求解出

$$T = S / (k v_0) \quad (15)$$

及

$$\lambda = H / T = k v_0 H / S \quad (16)$$

撞击过程结束时,即 $v=0, x=X$ 时,由式(12)可以得到

$$X / L = 1 + v_0 \rho \lambda / \sigma^D \quad (17)$$

如果将式(16)代入(17),可以得到求解动态屈服应力 σ^D 的计算式

$$\sigma^D = (k \rho v_0^2 H / L) / ((X / L - 1) S / L) \quad (18)$$

3 实例研究

表1 材料静态特性

Table 1 Static characteristic of materials

材料	$\rho / (\text{kg}/\text{m}^3)$	σ^S / MPa	$E_{\text{lim}} / \text{MPa}$
OFE 铜	8 950		350
DPTE 铜	8 950		300
6061-T6 铝	2 700	315	340
2024-T4 铝	2 700	400	500
4340 钢	7 860	830	

为验证本文方法,将理论与实验结果比较。实验内容采用文献[10]中相关数据。对五种材料进行了 Taylor 撞击试验,弹体直径 7.595 mm,弹体长度与直径的比率为 1.5~10,刚性靶体材料为高强度合金钢, $R_C=58$,五种材料的静态力学特性(密度 ρ 、静态屈服应力 σ^S 、强度极限 E_{lim})如表1,

对应的 Taylor 撞击试验及分析结果如表2,从表2看出,按照 k 的第一种取值方案,计算出的五种材料的动态屈服应力 σ^D 与 Joe. W. Housel 理论结果^[10] $\sigma_{\alpha\beta}^D$ 基本一致,绝大部分的相对误差都在 5% 以内。

在表2中,给出了参数 k 的两种取值方法。根据研究,不同材料的 k 值不同,对于本例讨论材料, k 一般可取 0.62~0.65,并且 k 取值与弹体的长径比、撞击初速度的关系不大。在一般情况下,对于所有材料而言,可以在公式(21)中近似取 $k=0.63$,表2中也相应给出了本实例的计算结果,不难发现 $k=0.63$ 时本文方法计算出 σ^D 与 $\sigma_{\alpha\beta}^D$ 的误差 $|\Delta|$ 也不超过 10%。

表2 试验及分析结果

Table 2 The results of experiments and analysis

材料	$v_0 / (\text{m}/\text{s})$	H / L	X / L	$\frac{\rho v_0^2}{\sigma^D}$	$\frac{v_0 T}{L}$	$\sigma_{\alpha\beta}^{D[10]} / \text{MPa}$	k 第一取值方案			k 第二取值方案		
							k	σ^D / MPa	$ \Delta / (\%)$	k	σ^D / MPa	$ \Delta / (\%)$
OFE 铜	153	0.442	0.388	0.374	0.269	535	0.64	571	6.8	0.63	562	5.1
	180	0.451	0.300	0.613	0.395	481	0.64	481	0.1	0.63	474	1.5
	189	0.446	0.286	0.682	0.425	478	0.64	477	0.2	0.63	470	1.8
	123	0.446	0.428	0.259	0.200	496	0.64	538	8.4	0.63	529	6.7
	156	0.452	0.369	0.397	0.285	530	0.64	555	4.7	0.63	546	3.0
	168	0.448	0.327	0.536	0.358	466	0.64	476	2.1	0.63	468	0.5
	176	0.450	0.323	0.543	0.361	513	0.64	519	1.2	0.63	511	0.4
	184	0.452	0.311	0.574	0.377	528	0.64	535	1.3	0.63	526	0.3
DPTE 铜	144	0.470	0.349	0.398	0.286	457	0.63	469	2.7	0.63	469	2.7
	154	0.467	0.348	0.413	0.294	513	0.63	516	0.6	0.63	516	0.6
	150	0.463	0.352	0.411	0.294	482	0.63	490	1.7	0.63	490	1.7
	158	0.473	0.325	0.458	0.321	487	0.63	488	0.2	0.63	488	0.2
	236	0.446	0.423	0.269	0.208	554	0.65	577	4.1	0.63	559	0.9
6061-T6 铝	242	0.465	0.386	0.312	0.236	519	0.65	524	1.0	0.63	508	2.1
	251	0.458	0.393	0.313	0.236	551	0.65	562	2.0	0.63	545	1.1
	276	0.463	0.351	0.414	0.294	522	0.65	515	1.4	0.63	499	4.4
	235	0.434	0.441	0.256	0.197	577	0.65	606	4.9	0.63	587	1.7
	256	0.462	0.378	0.342	0.254	528	0.65	534	1.2	0.63	518	2.0
	271	0.458	0.371	0.373	0.271	552	0.65	551	0.2	0.63	534	3.3

续表 2

材料	$v_0 /$ (m/s)	$H /$ L	$X /$ L	$\frac{\rho v_0^2}{\sigma^D}$	$\frac{v_0 T}{L}$	$\sigma_{\alpha, \beta}^{D[10]}$ /MPa	k 第一取值方案			k 第二取值方案		
							k	$\sigma^D /$ MPa	$ \Delta /$ (%)	k	$\sigma^D /$ MPa	$ \Delta /$ (%)
2024-T4 铝	192	0.485	0.439	0.140	0.122	691	0.62	696	0.7	0.63	707	2.3
	266	0.534	0.330	0.271	0.216	756	0.62	692	8.4	0.63	704	6.9
	270	0.542	0.316	0.284	0.225	747	0.62	684	8.5	0.63	695	7.0
	290	0.539	0.300	0.332	0.255	750	0.62	674	10.1	0.63	685	8.7
	250	0.525	0.352	0.241	0.195	739	0.62	689	6.8	0.63	700	5.3
	270	0.540	0.316	0.292	0.229	742	0.62	668	10.0	0.63	679	8.5
	290	0.542	0.296	0.334	0.256	747	0.62	673	9.9	0.63	684	8.5
4340 钢	181	0.503	0.408	0.166	0.141	1 473	0.64	1 576	7.0	0.63	1 551	5.3
	183	0.511	0.403	0.160	0.137	1 571	0.64	1 671	6.4	0.63	1 645	4.7
	224	0.556	0.313	0.257	0.208	1 559	0.64	1 559	0.0	0.63	1 535	1.6
	234	0.521	0.350	0.255	0.204	1 691	0.64	1 722	1.8	0.63	1 695	0.2
	270	0.513	0.311	0.375	0.279	1 561	0.64	1 554	0.4	0.63	1 530	2.0
	215	0.548	0.317	0.267	0.214	1 388	0.64	1 382	0.4	0.63	1 361	2.0
	240	0.542	0.305	0.311	0.241	1 515	0.64	1 488	1.8	0.63	1 465	3.3

4 利用 RKPM 模拟 Taylor 撞击

RKPM 是由 W. K. Liu^[15] 在 1995 年提出的,目前在大变形等非线性领域得到广泛应用,基本思想是通过再生核函数构造出函数 $u(\mathbf{x})$ 的估值函数

$$u^R(\mathbf{x}) = \sum_{I=1}^{N_P} \widehat{w}_a(\mathbf{x} - \mathbf{x}_I) u(\mathbf{x}_I) \Delta V_{\mathbf{x}_I} = \sum_{I=1}^{N_P} \varphi_I u_I \quad (19)$$

\widehat{w}_a 是膨胀系数为 a 的核函数; $\Delta V_{\mathbf{x}_I}$ 是质点 \mathbf{x}_I 的体积; N_P 是计算域内所有质点数,其中形函数

$$\varphi_I = \mathbf{H}^T(\boldsymbol{\theta}) \boldsymbol{\lambda}^{-1}(\mathbf{x}) \mathbf{H}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_I) \widehat{w}_a(\mathbf{x} - \mathbf{x}_I) \Delta V_{\mathbf{x}_I} \quad (20)$$

利用增量形式的 RKPM 来模拟 Taylor 撞击过程^[16],其虚位移原理表达式为

$$\int_{t_\Omega} {}^t \rho \ddot{u}_k \delta u_k d\Omega + \int_{t_\Omega} {}^t S_{ij} \delta {}^t \epsilon_{ij} d\Omega + \int_{t_\Omega} {}^t \tau_{ij} \delta {}^t \eta_{ij} d\Omega = \int_{t_\Gamma} {}^t \bar{h}_k \delta u_k d\Omega + \int_{t_\Omega} {}^t b_k \delta u_k d\Omega - \int_{t_\Omega} {}^t \tau_{ij} \delta {}^t \epsilon_{ij} d\Omega \quad (21)$$

式中: ${}^t \rho$ 是密度; ${}^t \bar{h}_i$ 、 ${}^t b_i$ 分别表示面力和体力; ${}^t \tau_{ij}$ 是 Cauchy 应力; ${}^t S_{ij}$ 为 t 时刻的应力增量; ${}^t \epsilon_{ij}$ 、 ${}^t \eta_{ij}$ 分别表示应变增量 ${}^t \epsilon_{ij}$ 的线性项和二次项。

对于 Taylor 撞击过程的弹体材料,采用理想弹塑性本构关系。撞击过程伴随着大应变情况,为此在计算中引入 Jaumann 应力率张量

$${}^t \dot{\boldsymbol{\sigma}}_{ij}^{(J)} = {}^t \dot{\tau}_{ij} - {}^t \tau_{ip} {}^t \Omega_{pj} - {}^t \tau_{jp} {}^t \Omega_{pi} \quad (22)$$

与其对应的旋转张量可以表达式为

$${}^t \Omega_{ij} = \frac{1}{2} ({}^t \dot{u}_{j,i} - {}^t \dot{u}_{i,j}) \quad (23)$$

式中: 上标“ \cdot ”表示对时间的导数。

理想弹塑性本构关系可以利用 Jaumann 应力率与应变速率 ${}^t \dot{\epsilon}_{kl}$ 表示为

$${}^t \dot{\boldsymbol{\sigma}}_{ij}^{(J)} = {}^t D_{ijkl}^{(J)} {}^t \dot{\epsilon}_{kl} \quad (24)$$

式中: ${}^t D_{ijkl}^{(J)}$ 为本构张量。

将式(24)代入式(10)中,引入 RKPM 插值式(20),可以得到轴对称形式 Taylor 撞击过程控制方程

$$\mathbf{M} \Delta \ddot{\mathbf{u}} + (\mathbf{K}_L + \mathbf{K}_{NL}) \Delta \mathbf{u} = \mathbf{f}_{\text{ext}} - \mathbf{f}_{\text{int}} \quad (25)$$

式中

$$\begin{aligned}
{}^t\mathbf{K}_L &= \int_{\Omega} {}^t\mathbf{B}_L^T \cdot {}^t\mathbf{D}^{(J)} \cdot {}^t\mathbf{B}_L d\Omega \\
{}^t\mathbf{K}_{NL} &= \int_{\Omega} {}^t\mathbf{B}_{NL}^T \cdot \mathbf{Q} \cdot {}^t\mathbf{B}_{NL} d\Omega \\
\mathbf{f}_{\text{ext}} &= \int_{\Omega} \mathbf{\Psi}^T \cdot \mathbf{b} d\Omega + \int_{\Gamma} \mathbf{\Psi}^T \cdot \bar{\mathbf{t}} d\Gamma \\
\mathbf{f}_{\text{int}} &= \int_{\Omega} {}^t\mathbf{B}_L^T \cdot \mathbf{R} d\Omega
\end{aligned}$$

$${}^t\mathbf{B}_{L_i} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \varphi_i}{\partial x_1} & 0 \\ 0 & \frac{\partial \varphi_i}{\partial x_2} \\ \frac{\partial \varphi_i}{\partial x_2} & \frac{\partial \varphi_i}{\partial x_1} \\ \frac{\varphi_i}{x_1} & 0 \end{bmatrix}, \quad {}^t\mathbf{B}_{NL_i} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \varphi_i}{\partial x_1} & 0 \\ \frac{\partial \varphi_i}{\partial x_2} & 0 \\ 0 & \frac{\partial \varphi_i}{\partial x_1} \\ 0 & \frac{\partial \varphi_i}{\partial x_2} \\ \frac{\varphi_i}{x_1} & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{R} = \begin{bmatrix} {}^t\tau_{11} \\ {}^t\tau_{22} \\ {}^t\tau_{12} \\ {}^t\tau_{33} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{Q} = \begin{bmatrix} {}^t\tau_{11} & {}^t\tau_{12} & 0 & 0 & 0 \\ {}^t\tau_{12} & {}^t\tau_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & {}^t\tau_{11} & {}^t\tau_{12} & 0 \\ 0 & 0 & {}^t\tau_{12} & {}^t\tau_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & {}^t\tau_{33} \end{bmatrix}$$

\mathbf{R} 、 \mathbf{Q} 分别为应力向量和应力矩阵。

对于理想弹塑性材料,本构方程式(24)中

$${}^tD_{ijkl}^{(J)} = {}^tD_{ijkl}^{(e)} - {}^tD_{ijkl}^{(p)} \quad (26)$$

式中
$${}^tD_{ijkl}^{(e)} = 2G(\delta_{ik}\delta_{jl} + \frac{\nu}{1-2\nu}\delta_{ij}\delta_{kl}) \quad (27)$$

$${}^tD_{ijkl}^{(p)} = \begin{cases} \frac{3}{(\sigma^D)^2} \begin{matrix} {}^t\tau'_{ij} & {}^t\tau'_{kl} \end{matrix} & \text{弹塑性加载} \\ 0 & \text{弹性加载或卸载} \end{cases} \quad (28)$$

若采用 V. Mises 屈服条件,则后继屈服函数可以表示为

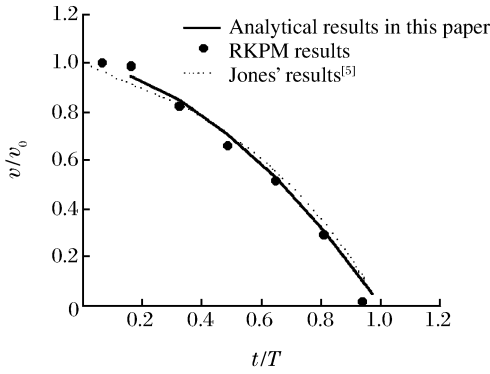
$$F = \frac{1}{2} {}^t\tau'_{ij} {}^t\tau'_{ij} - \frac{1}{3}(\sigma^D)^2 = 0 \quad (28)$$

式中: σ^D 是动态屈服强度; G 、 ν 分别表示剪切模量、泊松比, ${}^t\tau'_{ij}$ 表示 Cauchy 应力的偏量, δ 表示 Kronecker delta 符号。

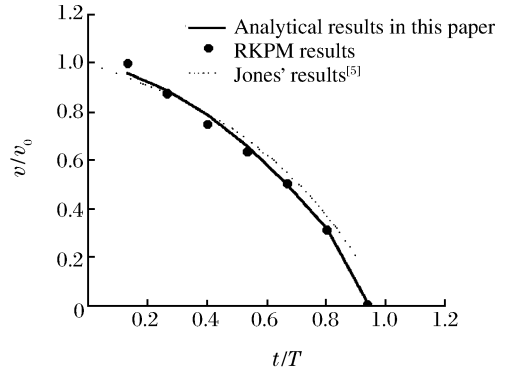
利用 RKPM 法对 OFE 铜弹以 123 m/s、DPTE 铜弹以 150 m/s、6061-T6 铝弹以 235 m/s、2024-T4 铝弹以 290 m/s 初速度进行 Taylor 撞击的过程进行了数值模拟。图 3 分别给出了本文的分析法、Jones 理论解析法^[5]和利用 RKPM 得到的 4 种弹体撞击过程中速度变化结果。从图中可以看出,在本文中提出的 Taylor 撞击分析法与 Jones 理论解析法得到结果完全一致,从而验证了本文中的速度假设。此外,利用 RKPM 法得到的数值计算结果与本文的分析法、Jones 理论解析法结果也相当吻合,说明了 RKPM 能够有效地分析 Taylor 撞击过程,从而为 Taylor 撞击分析提供了一种新的数值分析方法,同时它验证了本文的分析法。

5 结论

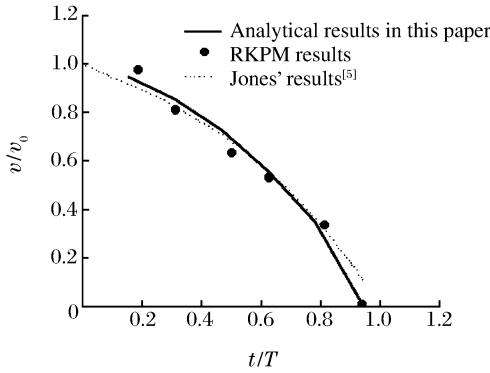
通过对诸多实验结果的分析,首先假设了 Taylor 撞击弹体未发生塑性变形部分的速度变化是二次非线性,并在假设中引入了积分常数 k ,利用弹体的运动方程对 Taylor 撞击进行了理论分析,得到了利用 Taylor 撞击试验结果计算材料动态屈服强度的分析方法;其次,为了便于比较,引入了在大变形、大应变计算中常见的新型无网格方法——RKPM,通过对 Taylor 撞击部分实验的模拟计算,结果表明,理论的分析结果与 RKPM 结果及实验结果基本一致,说明了本文分析的理论方法对于 Taylor 撞击分析是可行的、精确的。



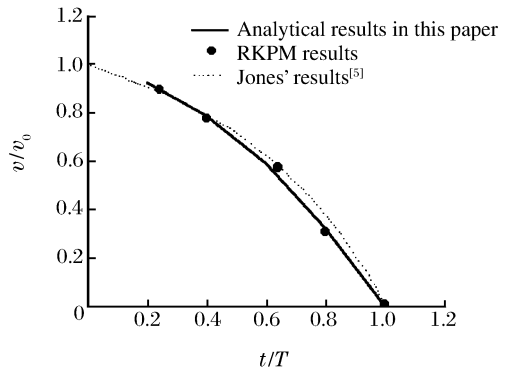
(a) OFE copper projectile, $v_0 = 123$ m/s



(b) DPTE copper projectile, $v_0 = 150$ m/s



(c) 6061-T6 aluminum projectile, $v_0 = 235$ m/s



(d) 2024-aluminum projectile, $v_0 = 290$ m/s

图 3 分析结果与 RKPM 模拟结果

Fig. 3 Analytic results and numerical simulative results by RKPM

参考文献：

[1] Taylor G I. The use of flat-ended projectiles for determining dynamic yield stress (I) : theoretical considerations [J]. Proceedings of the Royal Society of London, 1948, A194: 289—299.

[2] Whiffen A C. The use of flat-ended projectiles for determining dynamic yield stress (II) : test on various metallic materials[J]. Proceedings of the Royal Society of London, 1948, A194: 300—322.

[3] Lee E H, Tupper S J. Analysis of plastic reformation in a steel cylinder striking a rigid target[J]. Journal of Applied Mechanics-Transactions of the ASME, 1954, 21: 63—68.

[4] Hawkyard J B. A theory for the mushrooming of flat-ended projectiles impinging on a flat rigid anvil, using energy considerations[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1969, 11: 313—333.

[5] Hawkyard J B, Easton D, Johnson W. The mean dynamic yield strength of copper and low carbon steel at elevated temperatures from measurements of mushrooms of flat-end projectiles[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1968, 10: 929—935.

[6] Jones S E, Gillis P P, Jr Foster J C. On the equation of motion of the undeformed section of a Taylor impact specimen[J]. Journal of Applied Physics, 1987, 61: 499—502.

[7] Barenblatt G I, Ishlinskii A I. On the impact of viscoplastic bar on a rigid wall[J]. Prikl Math Mekh, 1962, 26: 497—503.

[8] Ting T C. Impact of nonlinear viscoplastic rod on a rigid wall [J]. Journal of Applied Mechanics-Transactions of the ASME, 1966, 33: 505—510.

[9] Hutching I M. Estimation of yield stress in polymers at high strain-rates using G I Taylor’s impact technique[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1979, 26: 289—299.

[10] House J W, Lewis J C, Gillis P P, et al. Estimation of flow stress under high rate plastic deformation[J]. International Journal of Impact Engineering, 1995,16(2):189—200.

- [11] Johnson G R, Holmquist T J. Evaluation of cylinder-impact test data for constitutive model constant[J]. Journal of Applied Physics, 1988,64:3 901—3 911.
- [12] Key S W, Heinstein M W, Stone C M, et al. A suitable low-order, tetrahedral finite element for solids[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1999,44:1 785—1 805.
- [13] Rule W K, Jones S E. A revised form for the Johnson-Cook strength model[J]. International Journal of Impact Engineering, 1998,21(8):609—624
- [14] Lapczyk I, Rajagopal K R, Srinivasa A R. Deformation twinning during impact-numerical calculations using a constitutive theory based on multiple natural configurations[J]. Computational Mechanics, 1998,21(1):20—27.
- [15] Liu W K, Jun S, Zhang Y F. Reproducing kernel particle method[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 1995,20:1 081—1 106.
- [16] 赵光明,宋顺成,杨显杰. 无网格方法在动力学中的应用[J]. 重庆大学学报,2006,29(4):54—57.
ZHAO Guang-ming, SONG Shun-cheng, YANG Xian-jie. The application of meshless method in dynamic mechanics[J]. Journal of Chongqing University(Natural Science Edition), 2006,29(4):54—57.
- [17] Jones S E, Paul J M, Joseph C F. An engineering analysis of plastic wave propagation in the Taylor test[J]. International Journal of Impact Engineering, 1997,19(2):95—106.
- [18] Jones S E, Drinkard J, Rule W K, et al. An elementary theory for the Taylor impact test[J]. International Journal of Impact Engineering, 1998,21(1/2):1—13.

Research on an analytic method for Taylor impact of a cylinder projectile

ZHAO Guang-ming^{1,2*}, SONG Shun-cheng², MENG Xiang-rui¹

(1. *Department of Resource Exploration and Management Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, Anhui, China;*

2. *Department of Applied Mechanics and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China)*

Abstract: A new method was developed to analyze the Taylor impact problem of the rigid target vertically impacted by a cylinder projectile. The quadric nonlinear velocity variation was proposed in this method for the part of a projectile that has not any deformation occurring during the impact process. An analytic formula for the Taylor impact was deduced from motion equations of projectiles, and the new meshless method, reproducing kernel particle method was applied to numerically simulate the Taylor impact. Theoretical analysis on the Taylor impact of five practical materials shows that the analytic results are in agreement with the experimental and numerical.

Key words: mechanics of explosion; dynamic yield strength; RKPM; Taylor impact; equation of motion

* Corresponding author: ZHAO Guang-ming
E-mail address: guangmingzhao@163.com
Telephone: 0554-6668455