

文章编号: 2095-2163(2021)08-0158-06

中图分类号: TP 399, TG376

文献标志码: A

# SPH 粒子法在高速冲击连接问题中的应用

孙 标, 廖秋慧, 何建萍

(上海工程技术大学 材料工程学院, 上海 201620)

**摘 要:** 高速冲击连接是特种焊接, 可连接异种材料, 由于冲击速度高, 时间短等特点, 信息很难被观察和测量, 数值模拟可成为一种研究方法。本文以带转速的纯铜子弹冲击一块固定的低碳钢板为例, 通过对比两类可适用于冲击大变形的数值模拟方法: ALE 网格法和 SPH 粒子法, 确定 SPH 粒子法在高速冲击连接中的可行性。采用 ALE 网格法模拟高速冲击连接过程发现, 冲击连接界面网格畸变无法获得稳定的界面波连接效果; 此外, 严重网格畸变使得数值模拟难以计算并终止。采用三维 SPH 粒子法, 可复现典型冲击连接在界面处的界面波形, 为探究转速因素对界面波形貌的影响, 本文利用 SPH 粒子法对比了子弹在转速与无转速条件时界面波形的差异。此外, 将 ALE 与 SPH 耦合进行计算, 可减少模拟的时间成本, 为后续子弹冲击连接的进一步研究提供参考。

**关键词:** SPH 粒子法; ALE 与 SPH 耦合; 数值模拟; 冲击连接

## Application of 3D SPH particle method in high speed impact connection problem

SUN Biao, LIAO Qiuhui, HE Jianping

(School of material engineering, Shanghai university of engineering and science, Shanghai 201620, China)

**【Abstract】** High-speed impact connection is a special type of welding, which can connect different kinds of materials. Due to the characteristics of high impact speed and short time, information is difficult to observe and measure. Therefore, numerical simulation can be a means to achieve this goal. This article takes the three-dimensional problem of a solid copper bullet impacting a fixed low-carbon steel plate as an example. By comparing two types of numerical simulation methods that can be applied to large impact deformation: ALE grid method and SPH particle method, the feasibility of SPH particle method in high-speed impact connection is determined. Specifically, the ALE grid method was used to simulate the high-speed impact connection process and found that the grid distortion of the impact connection interface could not obtain a stable interface wave connection effect; in addition, the severe grid distortion made the numerical simulation difficult to calculate and terminate. The three-dimensional SPH particle method is used to reproduce the interface waveform of the typical impact connection at the interface; in order to explore the influence of the speed factor on the interface waveform appearance, this paper uses the SPH particle method to compare the interface waveform of the bullet at the speed and the condition of no speed. difference. In addition, the method of coupling ALE and SPH for calculation can reduce the time cost of simulation. It provides reference value for the further research on the subsequent bullet impact connection.

**【Key words】** SPH particle method; Coupling of ALE and SPH; numerical simulation; impact connection

## 0 引 言

高速冲击类问题由于速度高, 物理过程难以观测, 还具有一定的破坏性。然而高速冲击却具有潜在的应用, 如在焊接方面, 高速冲击可以实现固态连接。基于材料的状态, 可对焊接技术分类, 可分为固态焊接和熔化焊接<sup>[1]</sup>。熔化焊接是利用金属熔化原子扩散, 经一定时间冷却后实现冶金结合; 固态焊接是低于材料熔点条件下将材料结合在一起。因为熔化焊接会在焊缝处出现金属间化合物, 金属间化

合物属于硬脆相, 其将严重影响材料连接后的性能。因此, 高速冲击连接异种材料的固态连接方法具有很好的应用前景。实现高速冲击连接, 关键点是要呈现出连接界面处的有规律的界面波<sup>[1]</sup>, 如图 1 所示。

数值模拟成为现实中工程问题以及科研问题的重要研究手段, 该技术为物理世界的现象理论提供了试验和检测, 并辅助理解工程中复杂问题, 同时可指导工程应用。数值模拟的关键点是需要将连续体离散化进行计算。有限元法 (FEM) 和有限差分法

**基金项目:** 青年科学基金项目 (面上项目) (51775327); 上海工程技术大学研究生科研创新项目 (17KY0502)。

**作者简介:** 孙 标 (1995-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 异种材料连接; 廖秋慧 (1972-), 女, 硕士, 副教授, 主要研究方向: 模具 CAD/CAM、塑性成型工艺及设备、塑料成型工艺; 何建萍 (1964-) 女, 博士, 教授, 主要研究方向: 异种材料旋转冲击连接接头组织和性能。

**通讯作者:** 廖秋慧 Email: qiuhui@sues.edu.cn

收稿日期: 2020-12-25

(FDM) 是基于网格划分进而离散, 然而传统 Lagrangian 算法对于大变形以及冲击类问题, 由于冲击使得网格变形, 该算法很难处理与原始网格不一致的网格, 并造成不连续界面; 同时, 为保证不连续界面的一致性, 通过不同时刻网格重构计算, 会增加计算成本, 同时网格畸变过大导致计算终止<sup>[2]</sup>。绝对拉格朗日-欧拉算法 (Arbitrary Lagrangian-Eulerian) 可模拟冲击大变形问题, 例如: 利用 ALE 算法研究弹塑性入水冲击问题, 水下爆炸冲击。

可随着材料的变形而变形, 也可以保持在空间中不动, 甚至可以在空间的一个方向保持固定, 在另一方向随物体的运动而运动<sup>[4]</sup>。在每一个时间间隔的计算中有两个阶段, 第一阶段计算时, 根据质量、动量、能量守恒方程运用拉格朗日算法获得平衡方程 (1) 和 (2)<sup>[5]</sup>:

$$\rho \frac{\partial v_i}{\partial t} = \sigma_{ij,j} + \rho b_i, \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial E}{\partial t} = \sigma_{ij} v_{i,j} + \rho b_i v_i. \quad (2)$$

在第二阶段中, 需要将发生移动的网格重新映射到最初的位置, 并计算穿越网格边界的动量、质量, 网格节点根据公式 (3) 和公式 (4) 更新速度与位移。

$$u^{n+1/2} = u^{n-1/2} + \Delta t \cdot \mathbf{M}^{-1} \cdot (\mathbf{F}_{ext} + \mathbf{F}_{int}), \quad (3)$$

$$\chi^{n+1} = \chi^{n-1} + \Delta t u^{n+1/2}. \quad (4)$$

其中,  $u$  为网格速度;  $\mathbf{F}_{ext}$  为外力矢量;  $\mathbf{F}_{int}$  为内力矢量;  $\mathbf{M}$  为质量对角矩阵。

### 1.2 SPH 光滑粒子法

SPH 的核心是核函数, 其可以被理解为一种在一定范围内其它临近粒子对研究粒子影响程度的权函数, 核函数的近似积分表示任意一点的场函数及其导数, 最后在偏微分方程组中运用粒子近似法, 得到只与时间相关的常微分方程<sup>[6-7]</sup>。SPH 算法一般需要两个步骤, 第一步是场函数核近似 (kernel approximation), 第二步是粒子近似 (particle approximation)。

对于任意连续宏观变量 (密度、温度、压力等), 函数  $f(x)$  可用表达式 (5) 描述<sup>[8]</sup>:

$$f(x) = \int_{\Omega} f(x') W(x - x', h) dx', \quad (5)$$

对场函数导数, 其可近似为式 (6):

$$\langle \nabla \cdot f(x) \rangle = - \int_{\Omega} f(x') \nabla W(x - x', h) dx'. \quad (6)$$

其中,  $\Omega$  为求解域;  $x$  为待求粒子在空间中的坐标;  $x'$  为待求粒子在求解域内的相邻粒子在空间中的坐标, 经过函数核近似计算, 上述场函数及其导数均可转化为场函数的值及核函数的积分表达式;  $W(x - x', h)$  为核函数, 满足归一化条件和紧支性条件<sup>[9-10]</sup>。

核函数  $W$  的选取决定粒子紧支域大小以及核近似和粒子近似的精度<sup>[3]</sup>。常用核函数包括钟形、高斯型、分段三次样条核函数。

在 SPH 算法中, 粒子近似法作为 SPH 的第二个关键步骤, 在核近似过程中将场函数转化为近似

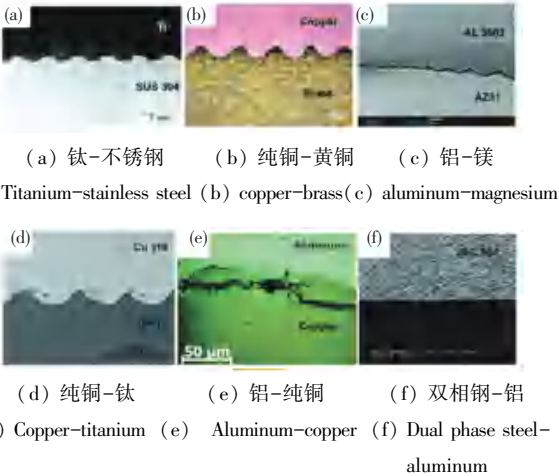


图 1 界面波

Fig. 1 Wavy morphology observed

无网格方法的关键思想是使用一组任意分布的节点或粒子为具有各种可能边界条件的积分方程或偏微分方程提供准确和稳定的数值解<sup>[3]</sup>, 光滑粒子流体动力学 (Smoothed Particle Hydrodynamics, 简称 SPH) 方法是无网格法中的一种, 该方法最早解决三维天体物理学中行星运动和碰撞问题, 后被广泛应用于流体动力学, 冲击模拟, 爆炸焊接, 水下爆炸冲击等问题。本文将以旋转的子弹作为研究对象, 该问题关键在于当子弹具有一定的转速后, 简化为二维问题, 难以观察其旋转的影响, 必须利用三维 SPH 粒子法, 这也会导致 SPH 粒子数增多, 进而会增加模拟计算的时间。

综上, 本文将对比网格法 FEM 与 SPH 粒子法的数值模拟结果, 确定合适的模拟方法; 为子弹冲击连接进一步研究做探索, 并对比子弹在有/无转速条件下的界面波形貌; 最后, 将 FEM 网格法与 SPH 粒子法进行耦合模拟, 确定冲击连接合适的算法模型。

## 1 理论算法概述

### 1.1 ALE 算法

ALE 算法是将网格建立在物体上, 但是网格既

连续性积分方程后,通过粒子近似法,得到相邻粒子的叠加求和的离散形式。粒子近似法如图 2 所示。

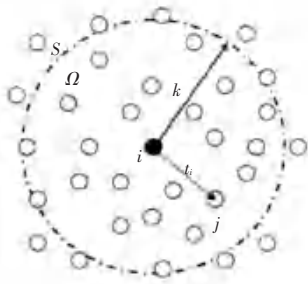


图 2 粒子近似法

Fig. 2 Method of particle approximation

若将积分近似式中表示粒子  $j$  处的无穷小体积  $dx'$  用离子体积  $\Delta V_j$  代替,则粒子质量  $m_j$  表达式(7):

$$m_j = \rho_j \Delta V_j, \quad (7)$$

其中,  $\rho_j$  为粒子  $j$  的密度。

表 1 模拟材料铜与低碳钢的性能<sup>[11]</sup>

Tab. 1 Property of material copper and low carbon steel<sup>[11]</sup>

材料	密度(kg/m <sup>3</sup> )	泊松比 ratio	杨氏模量/GPa	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%	洛氏硬度/HRB
铜(子弹)	8 930	0.34	110~128	345	276	55	25
低碳钢(基板)	7 700~8 030	0.27~0.30	190~210	634	372	27	70

第  $i$  个粒子的核近似函数  $f(x_j)$  最终转化为粒子近似<sup>[3]</sup>,式(8):

$$\langle f(x_j) \rangle = \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} f(x_j) W(x_i - x_j, h). \quad (8)$$

## 2 数值模型建立

### 2.1 几何模型及材料参数

采用圆柱型子弹冲击平面的基板建立数值模拟模型。子弹材料为铜,基板材料为低碳钢材料,性能参数见表 1。模型的尺寸分别是  $\phi 9 \times 6$  mm,  $10 \times 10 \times 5$  mm, 网格单元尺寸为 0.02 mm, 如图 3 所示。相比网格法,SPH 粒子法,没有单元信息,取而代之的是节点信息。SPH 粒子建模过程是将建立好的有限元网格模型,在软件 LS-dyna 前处理软件中 SPH generation 功能将单元信息生成节点信息即可。

### 2.2 数值分析模型

由于子弹冲击基板属于大变形和高应变率问题,Johnson-Cook 方程的材料行为适用于强冲击载荷,式(9)。因此,选择了 Johnson-Cook 模型作为模拟中子弹和基板的材料模型。

$$\sigma = (A + B(\epsilon^p)^n) (1 + C \ln \frac{\epsilon'^p}{\epsilon'_0}) (1 - T^{*m}). \quad (9)$$

其中,  $\epsilon^p$  是材料等效塑性应变;  $\epsilon'^p$  为材料实际应变率;  $\epsilon'_0$  为参考应变率;  $\frac{\epsilon'^p}{\epsilon'_0}$  为无量纲的等效应变速率;  $\frac{\epsilon'^p}{\epsilon'_0}$  为无量纲的等效应变速率;  $T^{*m} =$

$\frac{T - T_r}{T_m - T_r}$ ;  $T$  是无量纲温度;  $T_m$  是材料熔点;  $T_r$  是室温,  $A, B, C, n, m$  为材料参数。

材料模型参数见表 2。

表 2 铜与低碳钢 J-C 本构模型参数

Tab. 2 J-C Constitutive model parameters of Copper and low-carbon steel

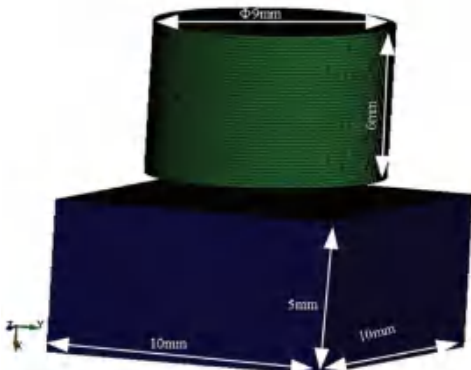
材料	剪切模量 $R_T$ /GP	密度 $\rho$ / (kg · m <sup>-3</sup> )	参数 C	参数 n	参数 m	熔点 T/ °C
铜	46	8 960	0.025	0.31	1.09	1 803
低碳钢	77	7 850	0.022	0.36	1.00	1 538

当利用 JC 材料模型时,必须有状态方程才能进



(a) SPH 模型

(a) SPH model



(b) ALE 模型

(b) ALE model

图 3 数值模型

Fig. 3 Numerical model

行模拟计算。材料的状态方程与密度、压力及一些热力学参数有关,能够反应材料的体积特性。Grüneisen 方程适用于固体中的波的传播,能够与波阵面中的冲击跳跃存在直接联系,且方程中参数也可以通过实验确定。因此,子弹和基板材料模型的状态方程为 Grüneisen 方程,其表达式(10)为:

$$p = \frac{\rho_0 c_1^2 \mu \left[ 1 + \left( 1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu - \frac{\alpha}{2} \mu^2 \right]}{\left[ 1 - (s_1 - 1) \mu - s_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_2 \frac{\mu^2}{(\mu + 1)^2} \right]} + (\gamma_0 + \alpha \mu) E. \tag{10}$$

式中,  $\rho_0$  为参考密度;  $C_1$  为  $u_s - u_p$  曲线的截距;  $\gamma_0$ 、 $\mu$ 、 $\alpha$  为 Grüneisen 方程系数;  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$  为  $u_s - u_p$  曲线斜率的系数;  $\mu = \frac{1}{v} - 1$ ,  $V$  为相对体积;  $\alpha$  为对  $\gamma_0$  的一阶体积修正;  $E$  为材料内能。

子弹和基板的状态方程参数见表 3。

表 3 铜与低碳钢的状态方程参数

Tab. 3 Parameters of the equation of state for copper and low carbon steel

材料	$C_1 / (\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$\gamma_0$	$\alpha$
铜	3.940	1.489	0	0	1.99	0.46
低碳钢	4.569	1.490	0	0	2.17	0.46

冲击连接可成功的速度范围一般在 150 ~ 1 500 m/s<sup>[6]</sup>。因此,选取模拟的初始条件为:冲击速度为 150 m/s,角速度 1 177 rad/s;为更好对比有无旋转影响的影响,将冲击角度设置为 0°,目的是有利于子弹施加旋转速度。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 ALE 网格法与 SPH 粒子法界面处波形

分别对 SPH 数值模型以及 ALE 数值模型计算,获得如图 4 所示的界面波。

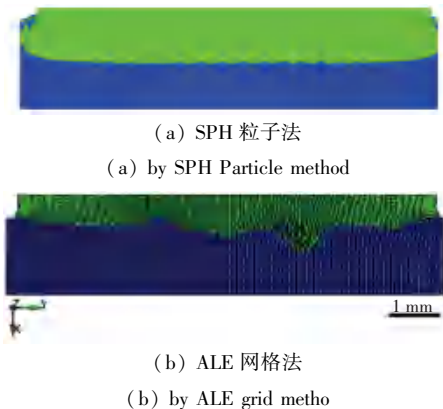
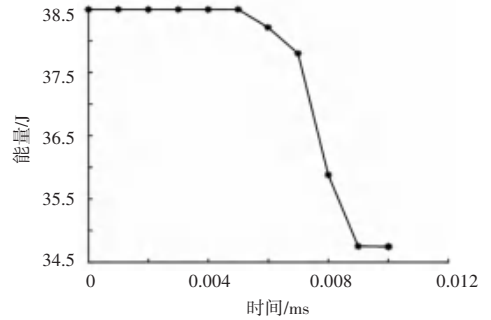


图 4 SPH 与 ALE 界面波形图

Fig. 4 SPH and ALE interface waveform

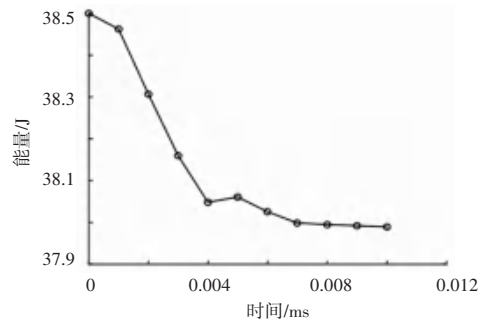
并对比高速冲击实验的界面波图 1 与图 4 模拟结果可知,采用 SPH 粒子法可模拟冲击界面处波浪状的界面波形如图 4(a);而采取 ALE 网格法其冲击界面处出现较大的扭曲和网格畸变如图 4(b)。因此,对于冲击类问题,SPH 粒子法呈现冲击过程的细节比 ALE 方法合适。

在数值计算过程中不同算法会出现能量损失,算法是否合适,能量守恒可作为判断标准;工程上一般在 10% 以内的能量波动是可接受的。图 5(a)和(b)分别为 SPH 粒子法与 ALE 网格法在 Ls-dyna 求解器中求得碰撞过程中的总能量变化;根据图 5(a)可计算得 SPH 粒子法总能量损失为 9.8%,该值在可接受的范围内;图 5(b) ALE 网格法能量损失 1.3%,相比之下 ALE 网格法能量损失较少。这是 SPH 粒子法本身特点决定的,因为每个粒子是单独个体,碰撞后期部分粒子被冲击散落而失效。综合 SPH 粒子法具有 2 个特点:可呈现出界面处的界面波形以及能量损失在可接受范围内;因此,采用 SPH 粒子法模拟冲击类问题更合适。



(a) SPH 粒子法

(a) by SPH Particle method



(b) ALE 网格法

(b) by ALEgrid method

图 5 碰撞过程的能量变化

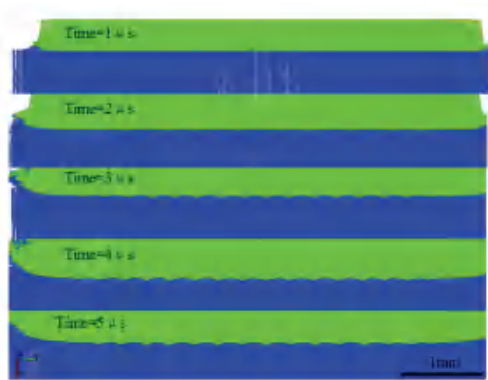
Fig. 5 Energy change curve during collision

#### 3.2 有、无转速条件下的界面波

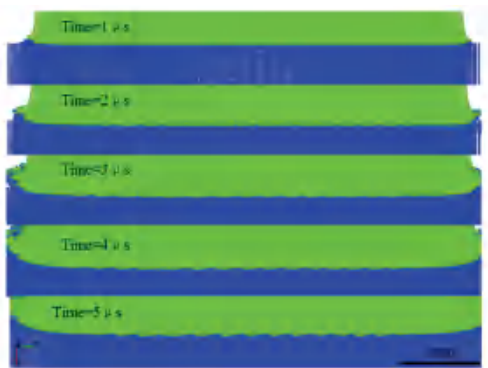
SPH 算法明显的呈现出高速冲击连接的界面波形,为探索转速对界面处形成波形的影响,数值模拟了在冲击条件一致时模拟有、无转速条件下界面



波差异如图 6 所示。



(a) 无转速冲击条件  
(a) bullet without angular velocity



(b) 有转速冲击条件  
(b) bullet with angular velocity

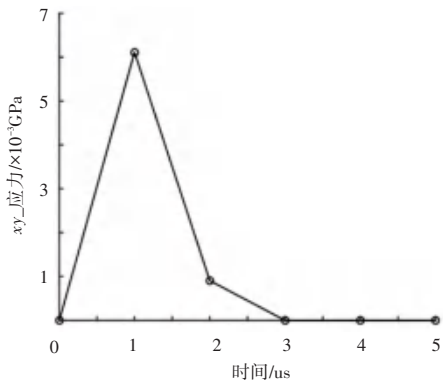
图 6 高速冲击条件下界面波形形成过程

Fig. 6 Formation process of interface wave under high speed impact

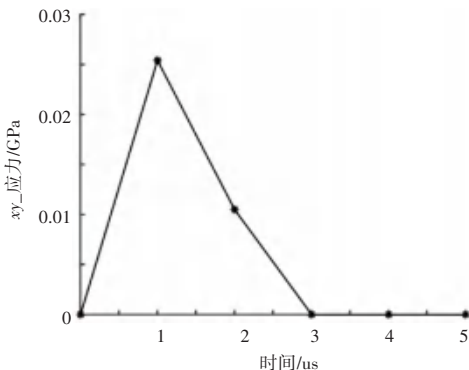
图 6 中可观测到在有转速冲击条件下,界面处波幅较小,其原因是冲击过程中的赋予子弹旋转产生的切应力所致,具体地,主要受到  $\tau_{xy}$  ( $X$  面上沿  $Y$  方向的切应力即图 7 中  $xy$ -应力) 的影响,图 7 (a) 为在无转速的条件下产生的  $\tau_{xy}$  切应力值为 6 MPa,图 7 (b) 为有转速的条件下界面处的  $\tau_{xy}$  切应力值达到 25 MPa。所以,利用 SPH 数值模拟方法,研究旋转因素对界面波形影响具有可行性。

### 3.3 ALE 与 SPH 耦合

实际上,当三维问题的结构复杂后,SPH 算法建模所需的粒子数会增加,从而增加了计算的时间成本;为减少计算成本,通常是进行并行计算处理,简化模型,减少粒子数。并行计算可以减少需要计算设备的支持,不是所有模型都可以被简化,例如本案例,当有转速时候,很难获得转速对界面的影响。如果减少粒子数,无法呈现出界面波形,减少粒子数会增加计算误差,粒子数与计算精度关系如图 8 所示。



(a) 无转速  
(a) Bullet without angular velocity



(b) 有转速  
(b) Bullet with angular velocity

图 7  $xy$ -应力对比图

Fig. 7  $Xy$ \_stress contrast chart

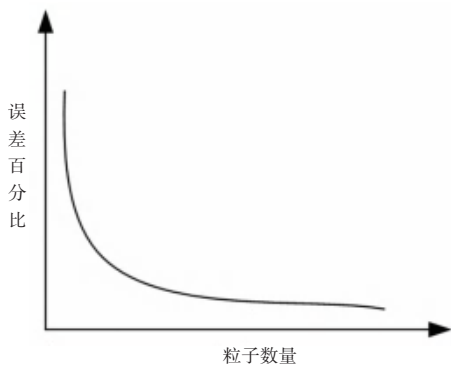


图 8 粒子数与计算精度的关系

Fig. 8 The relationship between the number of particles and calculation accuracy

因此,本案例利用 Ls-dyna 软件中的耦合关键字 \* CONTACT \_TIED \_NODES \_TO \_SURFACE, 将 SPH 粒子单元与 ALE 网格单元耦合;建模时对碰撞的非观察区域进行网格划分,观察区域进行粒子法近似处理,如图 9 所示。最终模拟计算出 ALE 与 SPH 耦合的结果如图 10 所示。

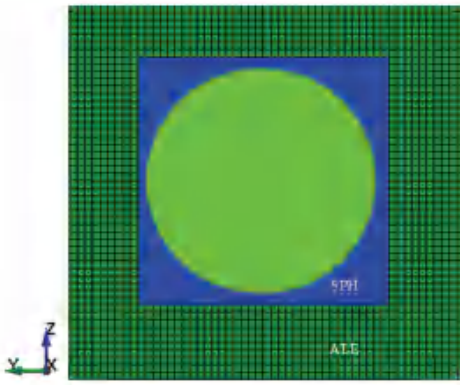


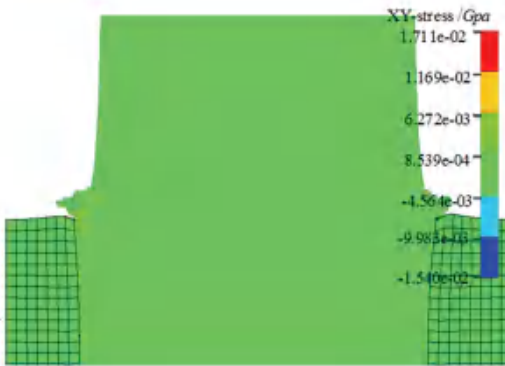
图 9 ALE 与 SPH 耦合模型

Fig. 9 Model of ALE and SPH coupling



(a) 耦合后的界面波形图

(a) Interface waveform simulated by ALE and SPH coupling



(b) ALE 与 SPH 耦合后的  $xy$  切应力图

(b)  $xy\_stress$  calculated by ALE and SPH coupling

图 10 ALE 与 SPH 耦合结果

Fig. 10 Result of ALE and SPH coupling

图 10 (a) 中可以发现,耦合后界面处的波形没有任何影响,图 10(b)为  $x$  面上  $y$  方向上的剪应力处于同一色块,应力传递具有一致性,意味着耦合的成功。即对于模型复杂或难以简化的模型,可采用 ALE 与 SPH 方法耦合的方法建模计算模型。

通过对比 3 种不同算法模型单位时间计算的粒子数见表 4,可确定当粒子数增加后,ALE 与 SPH 耦合的方式可减少直接利用 SPH 粒子法的时间成本。这对尺寸较大,结构复杂的三维模型作冲击连接数值计算具有一定的借鉴作用。

表 4 3 种不同算法模型单位时间计算的粒子数

Tab. 4 Number of particles calculated per unit time by three different algorithm models

算法	粒子数	耗时	单位时间计算的粒子数
ALE	1 206 067	约 5h	241 214
SPH	1 206 067	约 6h	201 012
ALE 与 SPH 耦合	1 506 067	约 6.5h	231 703

## 4 结束语

本文对比了 ALE 法和 SPH 粒子法旋转子弹冲击基板的案例,分析了 SPH 粒子法更适合应用于冲击类问题,并针对 SPH 粒子法存在的粒子数过多导致的计算成本增加,进行 ALE 与 SPH 粒子法耦合优化。综上,可获得如下结论:

(1) 高速冲击连接问题,相比于 ALE 算法,SPH 粒子法能够很好的呈现连接界面的波形;同时,SPH 粒子法也可呈现有转速与无转速时界面波波形的差异,可研究子弹转速对冲击界面波形貌的影响;

(2) 随着模型尺寸变大导致使用 SPH 粒子法粒子数增加,耗时过长;ALE 算法与 SPH 算法耦合的方式建模,可减少直接利用 SPH 粒子法的计算时间。

## 参考文献

- [1] WANG Huimin, WANG Yuliang. High-Velocity Impact Welding Process: A Review [J]. Metals, 2019, 9(2): 2-4.
- [2] NASSIRI A, ZHANG S, ABKE T, et al. Numerical Modeling of High-Velocity Impact Welding [C]//In: Meyers M. et al. (eds) Proceedings of the 3<sup>rd</sup> Pan American Materials Congress, 2017: 83-93.
- [3] 许庆新. 基于 SPH 方法冲击动力学若干问题研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2009.
- [4] 李珍珍, 蔚喜军, 贾祖朋, 等. ALE 方法中一种新的二阶保界守恒重映算法 [J]. 空气动力学学报, 2015, 33(6): 765-771.
- [5] 李文彬, 王晓鸣, 李伟兵, 等. 成型装药多模战斗部设计原理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2016: 157-160.
- [6] 刘谋斌, Liu G R, Liu M B. Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH): an Overview and Recent Developments [J]. Archives of Computational Methods in Engineering, 2010, 17(1): 25-76.
- [7] 张静, 刘文龙, 卢文虎. 基于 SPH 方法的海浪动态演变模拟仿真 [J]. 海洋信息, 2016(4): 8-12.
- [8] 焦培刚. 基于 SPH 的流体仿真数值算法及工程应用研究 [D]. 济南: 山东大学, 2010.
- [9] 上官子柠. 基于黎曼解的 SPH-ALE 方法在自由面流动问题中的应用研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2015.
- [10] 李海桥. 高速冲击问题的光滑粒子流体动力学的数值计算 [D]. 太原: 中北大学, 2014.
- [11] HE J, SIROIS D, LI S, et al. Ballistic impact welding of copper to low carbon steel [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 232: 165-174.