

LS-DYNA 模拟结构碰撞与连接件破坏的双重尺度模型

胡炜¹, 吴政唐¹, 吴有才¹, 潘小飞¹

(1. Livermore Software Technology Corporation, Livermore, CA 94551)

摘要: 本文将介绍 LS-DYNA 仿真软件模拟连接件破坏的粒子法模型, 拥有多连接的结构冲击碰撞分析, 以及所涉及的新型数值方法, 包括光滑粒子伽辽金法 (Smoothed Particle Galerkin, SPG)、键破坏模型、浸入式算法以及双重尺度计算。SPG 是一种无网格粒子法, 具有很好的数值稳定性, 非常适合处理车体常用的钢、铝等合金材料的非线性大变形问题。对于连接件破坏失效, SPG 结合键破坏模型无需删除粒子, 极大减小数值参数和网格对计算结果的影响。浸入式算法将 SPG 的适用范围拓展到纤维增强塑胶等轻量化复合材料的模拟。双重尺度计算模型可以把连接件的加工结果和精细的 SPG 计算模型带入车体大尺度零部件及整车结构分析中, 通过高效的并行计算, 模拟碰撞过程中多连接件及周边板材复杂的变形和破坏过程, 极大提高结构变形响应预测的精确性和可靠性。我们将给出多个计算实例, 包括流钻螺丝连接加工过程和强度分析, 纤维增强塑胶板和金属板的铆接过程模拟, 以及含多连接壳结构冲击吸能桶的碰撞仿真, 展示了 LS-DYNA 连接件仿真模块的独特性和有效性。

关键词: SPG; 浸入算法; 连接件; 破坏失效; 多尺度分析

1. 前言

随着汽车轻量化设计的发展, 轻质金属合金和复合材料逐渐得到广泛的应用, 其中包括高强度钢、镁铝合金以及各种纤维增强复合材料 (如图 1)。车体框架和很多零部件的材料组成越来越趋于多样化。这些材料的力、电及热等性能有很大的差别, 对加工、制造和连接组装都有更高的要求。



图 1 轻量化车身的材料构成 (来源: 丰田汽车技术报告)

轻量化设计带来的一个重要课题就是异种材料的连接问题。传统的车身用钢材为主, 电阻点焊是最常用的连接方式, 车身焊点可达 2000 到 6000 个。这些成熟的连接方式大多不适用于轻质合金和复合材料。近年来, 针对不同材料各具优势的新型连接技术成为设计研发的重点 (如图 2)。

Joining technology						
○=Candidates to use/develop in Toyota						
Combination of materials	SPR Self Piercing Rivet	FDS Flow Drill Screw	FSW Friction Stir Welding	FSJ Friction Spot Joining	LSW Laser Screw Welding	adhesive
Steel x Steel					○	○
AL x AL	○	○	○		○	○
Steel (LSS,HSS) x AL	○	○	○	○		○
Steel(UHSS) x AL			○	○		○
AL x CFRP(Random)	○	?	?	○		○
Steel (UHSS) xCFRP(Random)	○	?		○		○
CFRP x CFRP	○	?		○		○

图 2 各种新型连接技术（来源：丰田汽车技术报告）

以自冲铆（SPR）和流钻螺丝（FDS）为例，连接的加工过程产生材料局部大变形和破坏失效，这些都会影响连接的强度并在冲击碰撞载荷下对总体结构强度产生关键的影响。目前以有限元为主的 CAE 仿真工具对于此类加工过程的模拟存在很大的局限性，主要体现在局部变形引起的有限元网格畸变和基于材料破坏本构的单元删除技术无法可靠地模拟材料破坏，尤其是各种新型合金及复合材料的破坏失效。LS-DYNA 最新研发的粒子法求解模块很好地解决了这个问题，本文将在第二部分简要介绍新型 SPG 粒子法和键断裂模型处理金属等延展性和半脆性材料的连接加工及强度测试，在第三部分介绍浸入式 SPG 粒子法处理纤维增强塑胶等复合材料的连接破坏问题。

通过使用以 SPG 粒子法为代表的新型计算方法，连接件精细模型（中间尺度）已经可以对加工过程和强度测试得到很好的分析结果，但是将这些模型应用到大尺度结构计算中会面临诸多挑战：车体通常拥有数量庞大的多种连接件，使用精细模型将会极大增加计算量；精细模型单元尺度远小于车体（壳）单元尺寸，时间步长会显著减小；车体壳单元和连接件实体精细模型的耦合和建模存在很大的困难。目前在工程应用中，连接件主要以少量梁、杆或实体单元等简化模型来模拟（如图 3），通过引入连接件变形破坏响应曲线来定义等效的材料模型[1]。这种简化模型虽然能够节省计算时间，但是计算精度低，实际碰撞分析时需要大量人工的模型参数调整来拟合实验结果，可靠性不高。本文第四部分将介绍 LS-DYNA 新研发的双重尺度先进计算技术，它通过浸入算法将连接件精细模型和结构壳单元耦合，使用并行主/从任务管理和信息交互技术将大量连接件模型计算独立于结构分析计算之外，解决了由于时间步长差异产生地并行计算负载均衡的问题。这一新的计算技术能灵活地配合现有的连接件简化模型，提高含多连接大尺度结构分析的精度和总体计算效率。

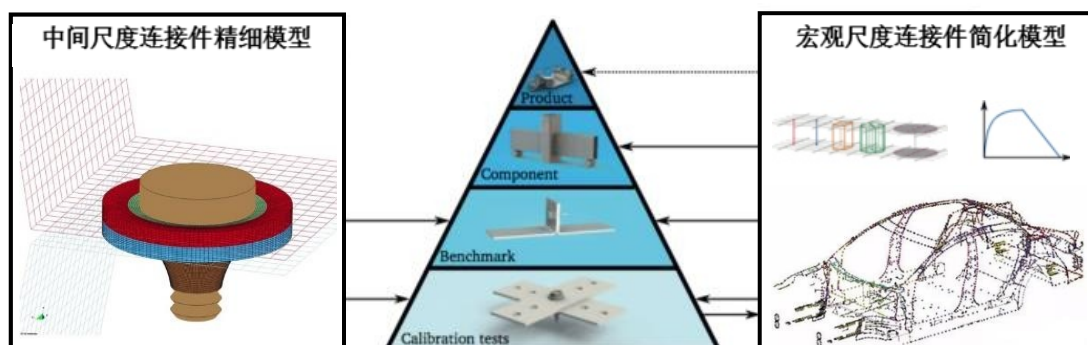


图 3 连接件的多尺度模型

2. 光滑粒子伽辽金法（SPG）与连接件加工、破坏分析

伽辽金法是一类广泛使用的经典理论框架，通过将离散近似函数引入待解微分方程的特定积分弱形式，进而对总体能量进行数值积分，建立并求解离散方程，得到离散模型的各种物理学量的数值结果。有限元是典型的伽辽金法（如图 4a）：基于节点和单元建立离散模型，通过构建单元近似函数建立节点间的相互影响，使用单元网格进行能量数值积分。无网格/粒子伽辽金法的离散模型（如图 4b）是完全基于节点的，节点之间通过各自影响域相互覆盖，建立的近似函数相对有限元更为光滑。在数值积分方面，无网格法和有限元类似，将有限单元作为背景积分网格，而粒子法通常基于节点积分，是完全的无网格方法。依赖网格进行积分的有限元和无网格法在结构分析计算中具有良好的数值稳定性和较高的精度，但很难处理大变形和材料破坏问题。粒子法虽然能更容易地解决这些问题，但在数值精度、稳定性和完善地处理材料破坏等方面仍然有很大的挑战。

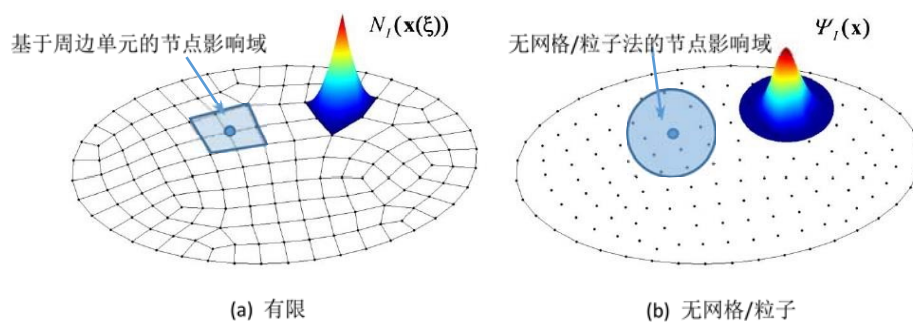


图 4 离散数值模型与近似函数 [2]

3. 光滑粒子伽辽金法

基于节点积分的伽辽金法最大的问题是数值振荡[3]，这是由数值积分点不足导致的。SPG 法利用无网格近似函数构造了位移场的光滑函数，给出了跟模型参数无关的数值稳定项[4]，用相对较少的计算代价解决了长期困扰粒子法的数值振荡问题（如图 5）。

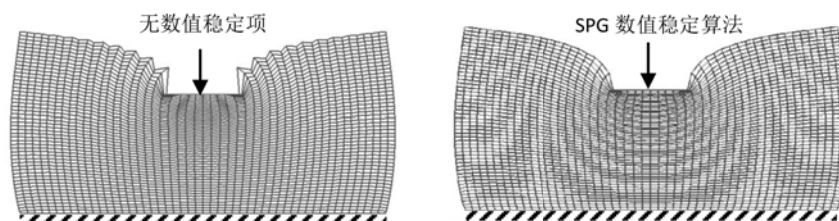


图 5 粒子伽辽金法的数值振荡问题演示（网格仅用于变形显示需要）[4]

为了处理材料大变形情况，粒子法通常使用空间不变影响域，即粒子影响域大小不随材料变形而变化。在拉伸情况下，粒子法容易出现本来相互影响的节点由于变形距离超过影响域范围而脱离，造成数值上的材料“断裂”，产生不稳定问题（如图 6a）。基于材料变形来调整节点影响域（如图 6b），虽然可以避免数值“断裂”，但在材料大变形情况下，随变形调整的影响域会出现类似有限元网格的“畸变”问题。SPG 通过结合影响域调整和不断更新节点周边影响点的办法同时解决了数值“断裂”和影响域“畸变”的问题[5]。在理想状况下无材料破坏的极大变形测试中(如图 6c)，SPG 能够一直保持大变形材料的连续性，获得数值稳定的结果，同时保证显式分析的时间步长在整个变形过程中无明显降低，相对有限元及其他无网格/粒子

法在这方面有明显的优势。

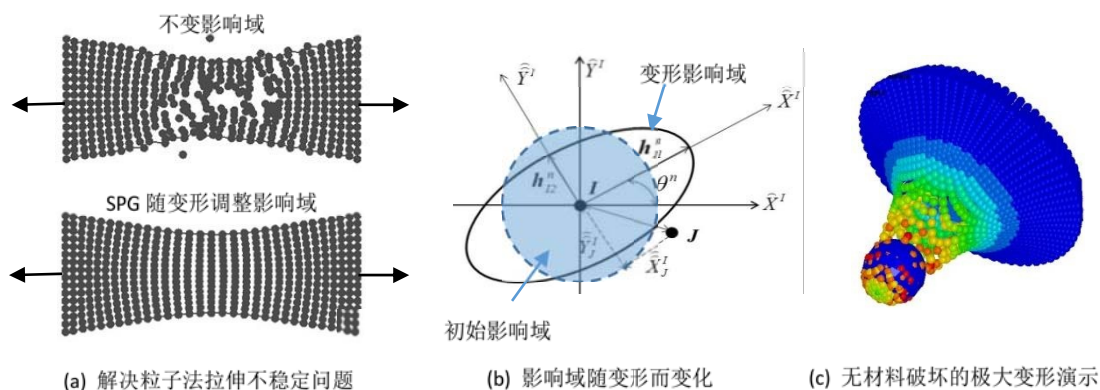


图 6 粒子影响域的调整[5]

SPG 离散节点可以与有限元通过共节点的方式耦合，便于将有限元网格转换成 SPG/FEM 混合模型，只在变形较大和破坏区域使用 SPG，获得在计算效率和精度上的平衡。

3.1. 键断裂模型

有限元中处理材料损伤破坏一般使用单元删除，以切削过程为例（如图 7a），如使用塑性应变准则判定材料破坏，图中红色区域为塑性应变较大的损伤破坏区域，需要删除相应的单元。这些删除单元对应的材料和能量从总体模型中“消失”，在物理上破坏了守恒方程，使得数值结果非常依赖单元尺寸和破坏准则的设定，极大降低了计算结果的可靠性和精度。SPG 法在离散节点上计算材料的所有物理力学参量，但材料破坏分离的准则和判定是基于节点之间的“键”（如图 7b 中的实直线）。SPG 节点通过影响域（如图 7b 中的虚线）相互联系，给定节点（如图 7b 中的实白点）总是会被周边多个节点的影响域覆盖，这些周边节点称为该节点的影响点。我们将每个节点和其影响点之间的连线定义为“键”。在塑性应变较大区域，如果任何“键”对应的两个节点上的塑性应变均值超过破坏阈值，该“键”判定为断裂。这时即使两节点仍然处于各自的影响域内，他们也不再是对方的影响点。在更新影响点信息并重新计算各自的近似函数之后，材料在这两点之间就自然出现了破坏分离。这一过程在数值上并不需要显式的追踪破坏表面，极大提高材料破坏的分析效率。

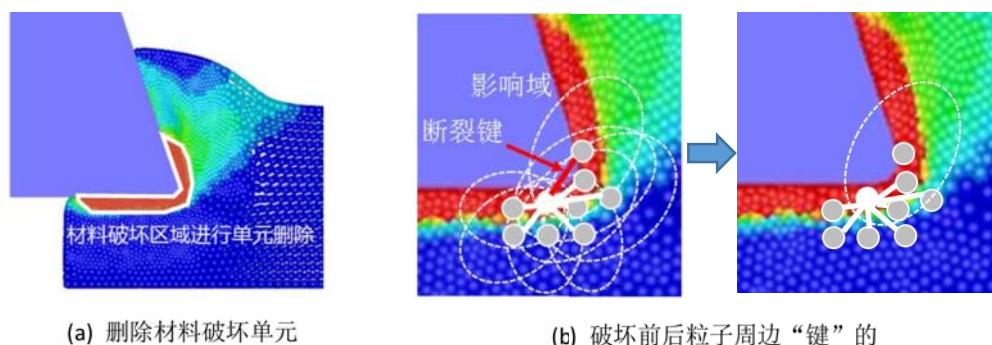


图 7 单元删除与键破坏模型的区别

在使用塑性应变等破坏准则时，很多情况下还需要考虑材料的应力状态。金属连接件在加工和强度测试时发生的破坏基本为局部拉伸和剪切，SPG 在键破坏模型中加入了键拉伸率等指标来考虑这些不同的应

力状态。包含应力三轴性的材料破坏模型，比如广泛使用的 Gissmo 模型，其损伤值也可以用于键破坏准则来处理更为复杂的破坏情况。总之，对于不同特性的材料，比如延展性和脆性材料，键断裂准则可以使用不同的力学参量，比如等效塑性应变、最大主应力、最大主应变、最大剪应变或材料模型的损伤参数值等。

3.2. 流钻螺丝连接加工过程及强度测试实例

流钻螺丝（FDS）可连接异种材料，连接强度高，常应用于车体关键的结构连接位置。FDS 加工过程的螺纹形成对于连接强度有直接的影响。由于螺纹区域发生材料局部大变形与损伤破坏，使用有限元单元删除法将会移除周边大部分的破坏材料造成无法形成螺纹。本文使用 SPG 法和键破坏准则来模拟 FDS 连接过程和拉拔强度测试。连接板设定为铝的材料本构，键破坏准则为等效塑性应变（阈值 0.4）。由于材料破坏以剪切为主，键破坏的拉伸率阈值设置为 1.15。

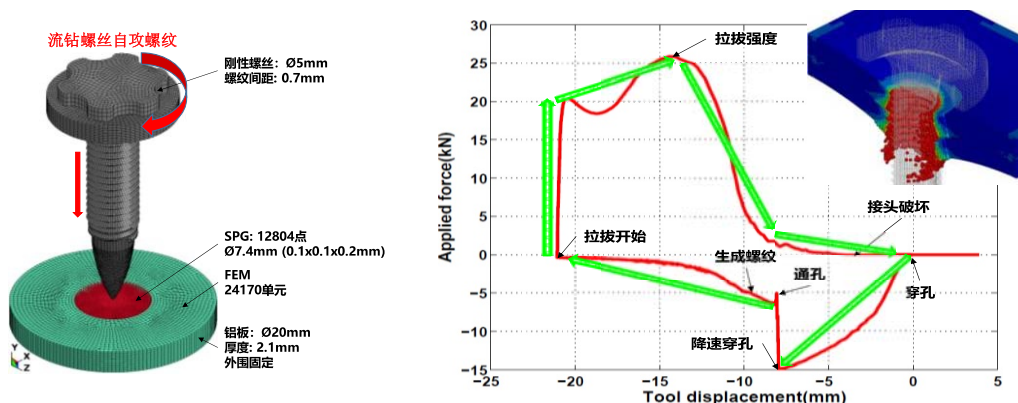


图 8 流钻连接穿孔、攻丝和反向拉拔过程模拟及力响应曲线

如图 8 所示，这个实例包含螺钉穿孔、攻丝、反向拉拔到最后完全破坏的过程。SPG 模拟的螺纹形成结果非常清晰，同时拉拔过程的力反馈显示处于破坏区域的螺纹提供了很强的接触力。螺纹形成过程虽然破坏了一部分 SPG 粒子之间的连接“键”，但由于没有任何粒子删除，螺纹形成后粒子间剩余的“键”很好地模拟了相应的材料强度，提供了连接力。

4. 浸入 SPG 法与纤维增强复合材料

车用纤维材料包含多层玻璃/碳纤维和基底树脂/热塑胶材料，沿纤维方向的拉伸强度通常超过基体材料三个数量级以上。纤维复合材料强度重量比高于很多合金材料，但材质较脆，纤维和基底材料都可发生损伤破坏，并且会出现纤维基底分离等复杂破坏情况。

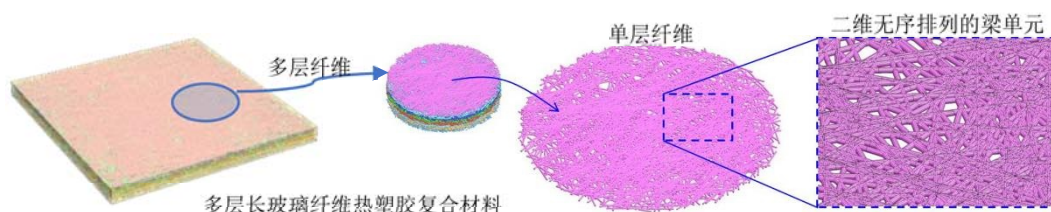




图 9 长玻璃纤维和绞线黏结式碳纤维的梁单元模型[6]

在 CAE 仿真分析时，纤维材料由有限元梁单元模拟，基底材料使用 SPG 离散节点和有限元混合建模。图 9 展示了两种不同的纤维复合材料：多层长玻璃纤维热塑胶（L-GFRP），纤维长度平均在 30-50 毫米，纤维在总的复合材料中体积占比 47%，热塑胶为聚酰胺尼龙材料；绞线黏结式碳纤维复材（S-CFRP），碳纤维平均长度 25 毫米，基底材料为环氧树脂。这里复合材料数值建模的主要问题是如何将纤维梁单元和实体单元有效地耦合在一起。共节点建模非常昂贵，在有复杂高密度纤维分布的情况下几乎无法实现。本文对计算模型的破坏区和非破坏区提出不同的解决方案：非破坏区域使用有限元模拟基底材料，利用单元插值函数建立梁单元节点和实体单元节点间的约束方程，包括定义完全约束、法向约束或沿轴向的约束力曲线（如图 10）；破坏区域使用 SPG 模拟基底材料，使用浸入式耦合算法[7]将描述纤维的梁单元节点转变成基底材料 SPG 粒子集合的一部分，从而实现纤维和基底材料的变形协调，并传递耦合约束力（如图 11）。

图 10 有限元实体和梁单元非共节点耦合约束

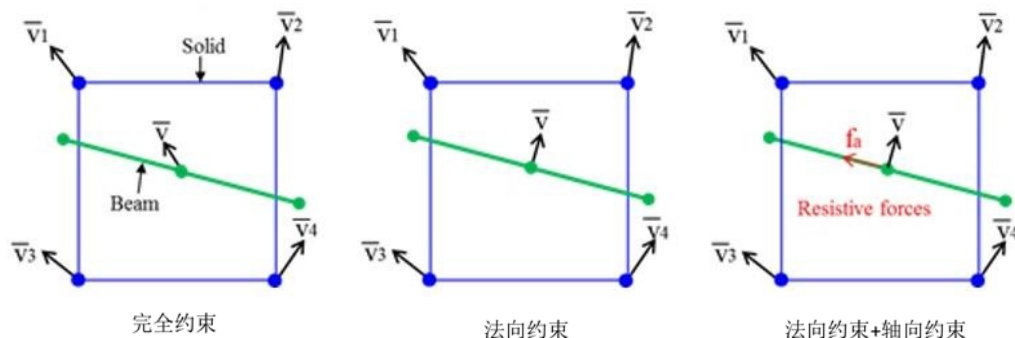


图 12 显示了一个自冲铆加工模型，其中上层板为碳素纤维增强热塑胶，下层为钢板。纤维部分我们使用梁单元，在铆接过程中由于材料破坏删除了部分纤维梁单元。塑胶基底部分采用 FEM/SPG 混合模型，其中 SPG 仅在破坏区域使用。纤维梁单元和基底 SPG 粒子耦合通过浸入算法实现。这是目前 CAE 仿真方面非常难的应用问题，浸入式 SPG 算法是比较新的技术，我们目前正在积极地参考实验数据，进一步提高这种算法的精度和效率。

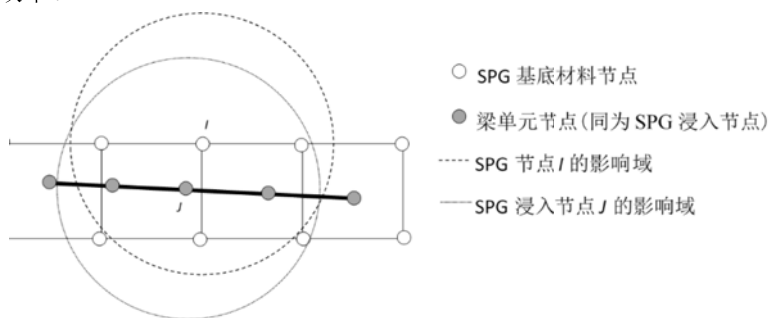


图 11 梁单元和 SPG 实体浸入式耦合模型

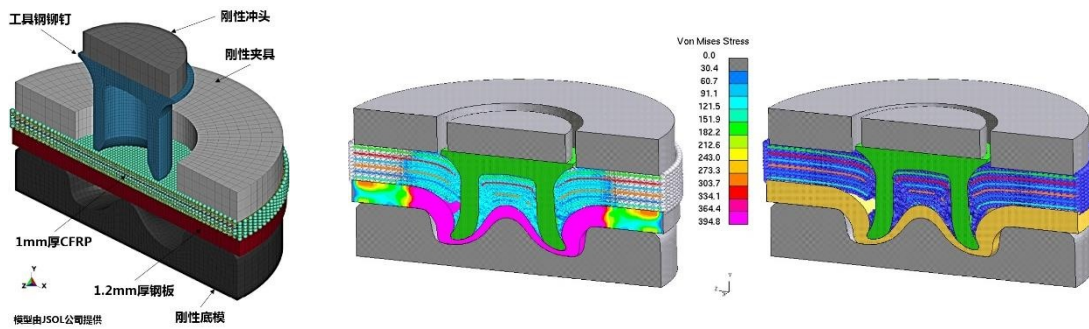


图 12 CFRP 和钢板自冲铆连接加工模拟

5. 双重尺度计算

双重尺度计算技术为解决含有连接件的大尺度结构分析提供了一个全新的方案（如图 13）：将连接件及周边板材的精细模型和主体结构模型分开成两个尺度（宏观和中间尺度）的并行计算作业，宏观尺度计算为中间尺度提供实时运动学参量作为边界条件，中间尺度反馈连接作用力作为宏观尺度的连接约束力。宏观尺度模型目前主要是结构的壳单元，中间尺度为连接件的 SPG 实体单元，信息交互通过定义跨尺度的浸入区域实现。壳单元浸入 SPG 实体的耦合计算类似于图 11 所示，将壳单元节点转变成基底材料 SPG 粒子集合的一部分。由于两个尺度的时间步长不同，信息交互在每个宏观尺度时间步发生，中间尺度的时间步长通过自动微调与宏观尺度保持信息交互的同步。通过并行过程的负载优化，我们可以在给定计算资源的前提下，获得精度和速度的平衡。

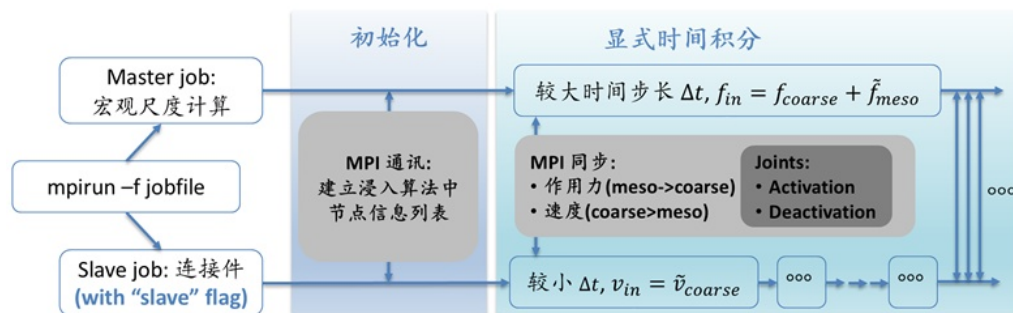
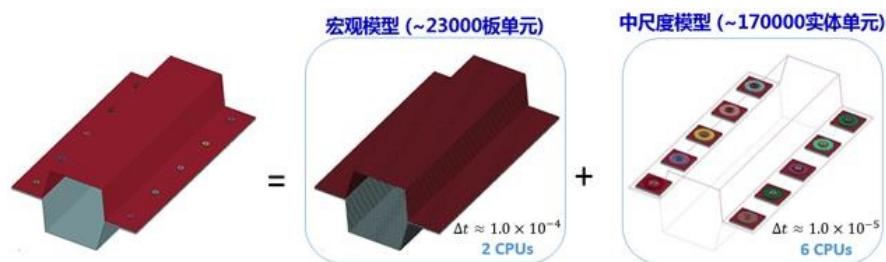
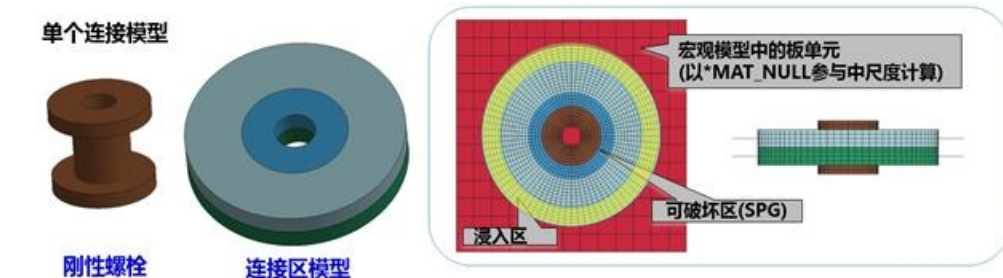


图 13 双重尺度计算流程



(a) 冲击桶双尺度模型



(b) 连接件精细模型



(c) 双重尺度计算结果

图 14 冲击吸能桶模型 1 和双重尺度计算

这里以冲击吸能桶模型为例介绍双重尺度法的具体应用。宏观模型由上下两个壳结构组成，含有五对连接件（如图 14a）。为了简化中间尺度模型，这里使用了简单的刚性连接件（如图 14b）。浸入区域包含来自宏观尺度壳单元节点和中间尺度 SPG 粒子。由于使用了精细模型，我们可以获得不同位置连接件具体的变形破坏情况（如图 14c），为整体结构的设计优化提供更为丰富的 CAE 分析数据。

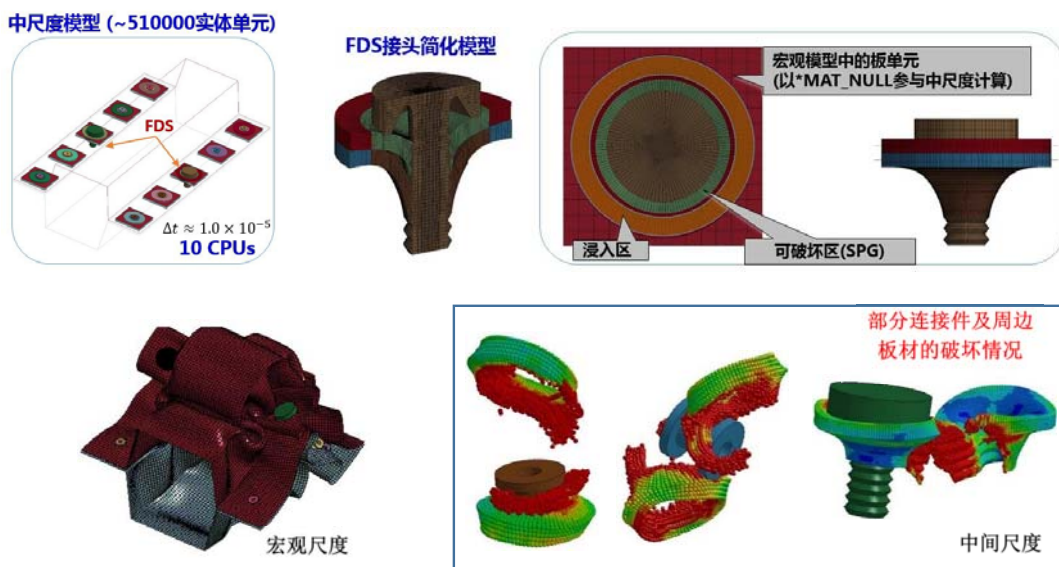


图 15 冲击吸能桶模型 2 和双重尺度计算

由于很多连接件通常是标准件，我们可以基于标准连接件加工过程的 CAE 结果和实验数据建立数据模型库，用于快速生成中间尺度模型。比如在图 14 所示的例子中，我们可以将其中一对连接件改为更为牢

固的流钻螺丝 FDS（如图 15）。在同样的载荷情况下，我们可以看见更好的结构变形吸能和完全不同的连接件破坏情况，这也反映在连接约束力的计算结果上（如图 16）。

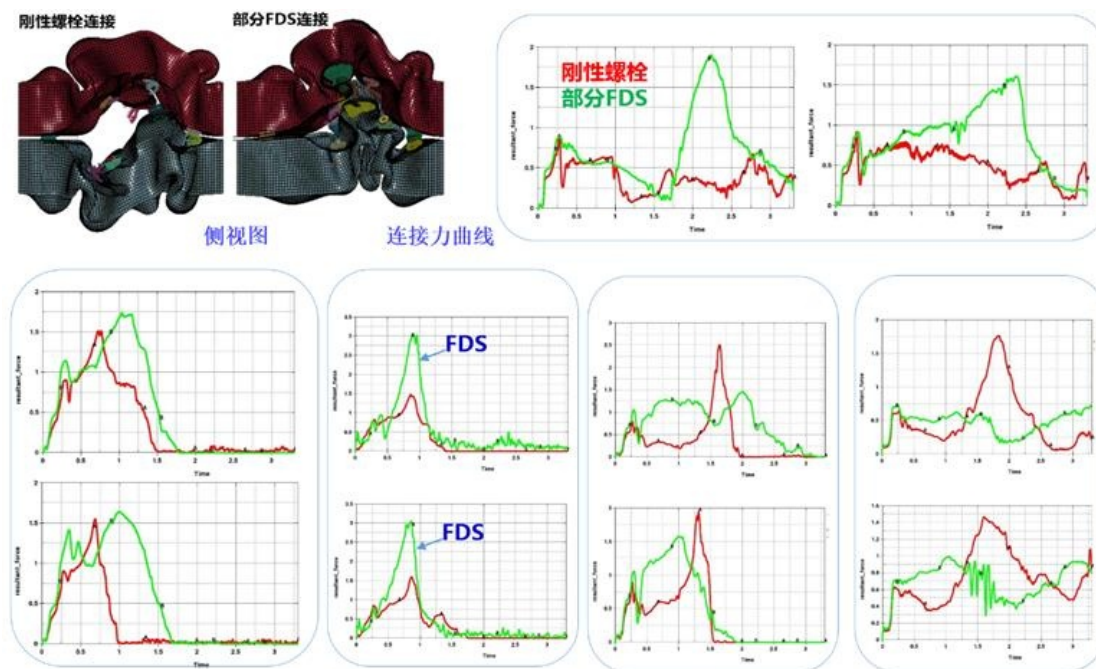


图 16 冲击吸能桶模型 1 和 2 的计算结果比较

6. 结论

本文主要针对车体零部件和结构仿真中的连接件问题，介绍了 LS-DYNA 新型 SPG 法、键破坏准则、浸入算法和双重尺度算法。SPG 粒子法结合键破坏准则为自冲铆、流钻螺丝等连接件加工和强度分析中的局部大变形和破坏问题提供了高效稳定的数值解决方案。浸入算法将 SPG 法的应用范围拓展到包含纤维增强复材等异种材料连接的分析模拟。在大尺度结构分析中，双重尺度先进计算方法可以用连接件的精细数值模型取代传统的简化模型，更为精确地模拟连接件及周边材料的变形和破坏失效，提高整体结构分析的数值精度和可靠性。

7. 参考文献

1. Sønstabø K.J., Morin D., Langseth M. Macroscopic modelling of flow-drill screw connections in thin-walled aluminium structures [J]. *Thin-Walled Structures* 2016, 105: 185-206.
2. Chen J.S., Hillman M., Chi S.W. Meshfree Methods: Progress Made after 20 Years [J]. *J. Eng. Mech.* 2017, 143(4): 04017001.
3. Beissel S., Belytschko T. Nodal integration of the element-free Galerkin method [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 1996, 139: 49-74.
4. Wu C.T., Koishi M., Hu W. A displacement smoothing induced strain gradient stabilization for the meshfree Galerkin nodal integration method [J]. *Comput. Mech.* 2015, 56: 19-37.
5. Wu C.T., Chi S.W., Koishi M., Wu Y. Strain gradient stabilization with dual stress points for the meshfree nodal integration method in inelastic analysis [J]. *Int. J. Numer. Methods Engrg* 2016, 107: 3-30.
6. Hayashi S., Chen H., Hu W. Compression Molding Analysis of Long Fiber Reinforced Plastics Using Coupled Method of Beam and 3D Adaptive EFG in LS-DYNA [R]. *European LS-DYNA Users Conference, Salzburg*, 2017.

7. Hu W., Wu C.T., Hayashi S. The Immersed Smoothed Particle Galerkin Method in LS_DYNA for Material Failure Analysis of Fiber-Reinforced Solid Structures [R]. *International LS-DYNA Users Conference, Detroit*, 2018.

Abstract

This paper introduces a new computational framework in LS-DYNA® to model joint failure using particle method and perform large scale structural analysis with joints. This involves multiple advanced numerical methods: Smoothed Particle Galerkin (SPG), bond-based failure model, meshfree immerse method and two-scale method. SPG is a particle method with good numerical stability, and is suitable for nonlinear large deformation analysis of various metal alloys used in car bodies. Combined with bond-based failure model, SPG is the most efficient numerical tool to model joint failure with no particle erosion, and significantly minimize numerical sensitivity on parameters and meshes. Immerse method enables SPG to model composite materials (e.g. fiber reinforced plastic) often used in lightweight vehicle. The advanced two-scale approach is able to efficiently bridge parallel analyses in different scales: one is failure analysis of joints and their surrounding material using SPG in the mesoscale; the other is large scale structural analysis. By doing this, the overall numerical analysis is greatly enhanced with better reliability and predictability. Several numerical examples are presented to demonstrate the uniqueness and effectiveness of this new module, including manufacturing and performance analyses of flow drilling screw (FDS) to join metal plates, self-piercing riveting (SPR) to join fiber-reinforced plastic and metal plates, and crash tube of shell structure with multiple joints under impact loading.