LS-DYNA 高级有限元、无网格和粒子法及其工业应用 (1)

胡炜，吴政唐，吴有才，潘小飞
计算多尺度力学部，LSTC
https://www.lstc-cmmg.org

一、引言

近十几年来，新型材料和加工工艺不断出现并广泛应用于各个工业领域，同时以工业 4.0 为代表的数字化制造正深刻地影响和改变着从材料、设计到制造的整个工业流程。大数据、制造互联以及产品快速迭代正逐渐成为制造业未来的发展方向。在这个大背景下，LS-DYNA 作为通用非线性有限元多物理场分析软件在产品设计过程中无疑将发挥越来越重要的作用，同时也面临全新的挑战：

1. CAE 分析结果的可靠性和可预测性。

   这里主要指在用户几何模型和标准化的实验及其他数据输入后，尽量减少或无需调整数值参数，并得到可接受的计算精度，从而适应工业数字化和快速迭代的产品设计周期的要求。以汽车工业为例，从零部件加工到整车碰撞测试的分析模拟目前仍然需要大量的人工参数调整，而且这些工作需要根据工况和模型本身的变化来重复进行。为了汽车轻量化而采用的镁铝合金，纤维增强材料以及相应的连接部分更是给传统的有限元分析带来了很大的挑战。这里的主要问题是如何在数值模型中更为准确地引入材料物理模型和描述材料破坏行为，单纯依靠材料本构模型和单元删除技术是无法达成高可靠性和可预测性要求的。我们需要寻求新型的数值方法并使之成为材料和破坏的数学物理模型在计算分析中的良好载体。

2. 材料、零部件到整体结构 CAE 分析结果的整合。

   从产品设计的角度，材料选择/加工、零部件设计制造和整体组装是一个完整的流程，综合影响终端产品的性能。传统的 CAE 分析工作往往分散在各个阶段，既不容易共享分析结果，也很难通过分步整合进一步提高分析精度。这方面的改进需要引入多尺度计算，通过发展全新高效的多尺度计算技术将不同尺度下的数学物理模型联系起来。根据具体应用的不同，多尺度模型会有不同的串联方式，例如线下对于大量材料微观结构在多载荷情况下 CAE 分析结果的机器学习到线上同质化的材料宏观机械性能模型，单个零部件的精细模型和大尺度结构的并行 CAE 分析等等。

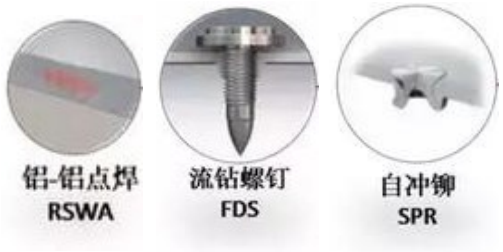
LSTC 计算多尺度力学部的主要研发目标是为从材料到结构分析不同尺度下的数学物理模型寻找新型数值计算方法以及多尺度串联技术，针对汽车、航空等领域的先进材料设计和加工制造过程的优化提供可靠、高效的 CAE 分析方案。我们将通过两篇文章来简要介绍我们

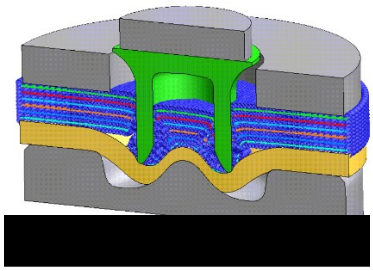
目前已经发布或即将完成的功能，详细的信息和更新请有兴趣的读者访问我们的网页或直接联系我们。

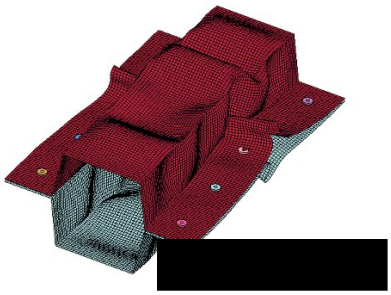
二、光滑粒子伽辽金法(SPG)简介

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，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，如何模拟连接的加工过程和分析加工后的连接对结构力学性能尤其是结构破坏的影响成为 CAE 仿真的重大课题。

本文将以点焊、自冲铆和流钻螺丝连接件为例，介绍光滑粒子伽辽金法(SPG)，键断裂模型和浸入计算技术，并给出连接件加工过程和含有多连接件的大尺度结构分析的实例，其中涉及金属和纤维增强复合材料。







连接件的加工和加载测试分析的难点在于模拟连接周边的材料破坏失效。近几年我们研发并逐步完善了一种全新的光滑粒子伽辽金法(SPG)。这是一种完全的无网格粒子法，通过引入特殊的位移场平滑算法，解决了典型的基于节点积分型无网格法的数值振荡问题。在显式大变形计算中，SPG 通过更新节点影响域和平滑位移场在处理大变形和破坏问题时能够保持稳定的时间步长，提高了计算效率。

SPG 在 LS-DYNA 中目前只有固体单元类型：ELFORM=47，对应的关键字是 *SECTION_SOLID_SPG。为了便于用户使用，SPG 模块自动接收各种 4 节点、6 节点和 8 节点固体有限元网格作为输入，LS-DYNA 将其自动转换成 SPG 所需的无网格节点信息。以下是 SPG 实体单元对应的关键字：

Card 2	**DX**	**DY**	**DZ**	**ISPLINE**	**KERNEL**	**LSCALE**	**SMSTEP**	**SWTIME**
Default	1.6	1.6	1.6	1	0	0	15	0
Card 3	**IDAM**	**FS**	**STRETCH**	**ITB**				
Default	1			1				

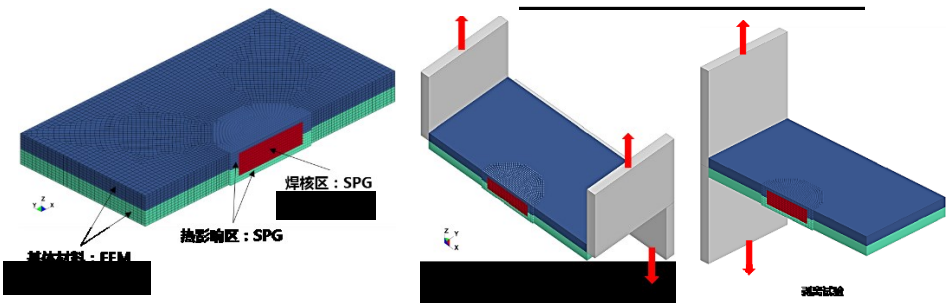
Card2 的关键字主要定义粒子法各种数值参数，包括影响域大小、核函数类型以及光滑数值稳定算法的使用频率。这些参数对于大部分问题用缺省设定就可以了，有兴趣了解 SPG 算法理论的读者可以参考我们网站上的技术文档。

Card3 的关键字主要用于定义键断裂的破坏模型参数，用于材料破坏失效模拟。材料破坏在物理上是一个非常复杂的过程，LS-DYNA 目前很多的材料模型都带有破坏失效准则，其中绝大部分都是基于宏观尺度实验数据的经验模型。这些模型在材料失效时会把应力置零，从而导致能量损失，因此，我们不建议在使用 SPG 时开启这类材料模型本身的失效准则。大量研究表明材料破坏本质上是一个多尺度问题，建立准确的破坏准则和模型不可避免地需要对材料的宏观/细观结构进行深入的理论、实验和数值研究。这是我们长期的研发方向，并一直保持与企业界和学术界的技术合作。

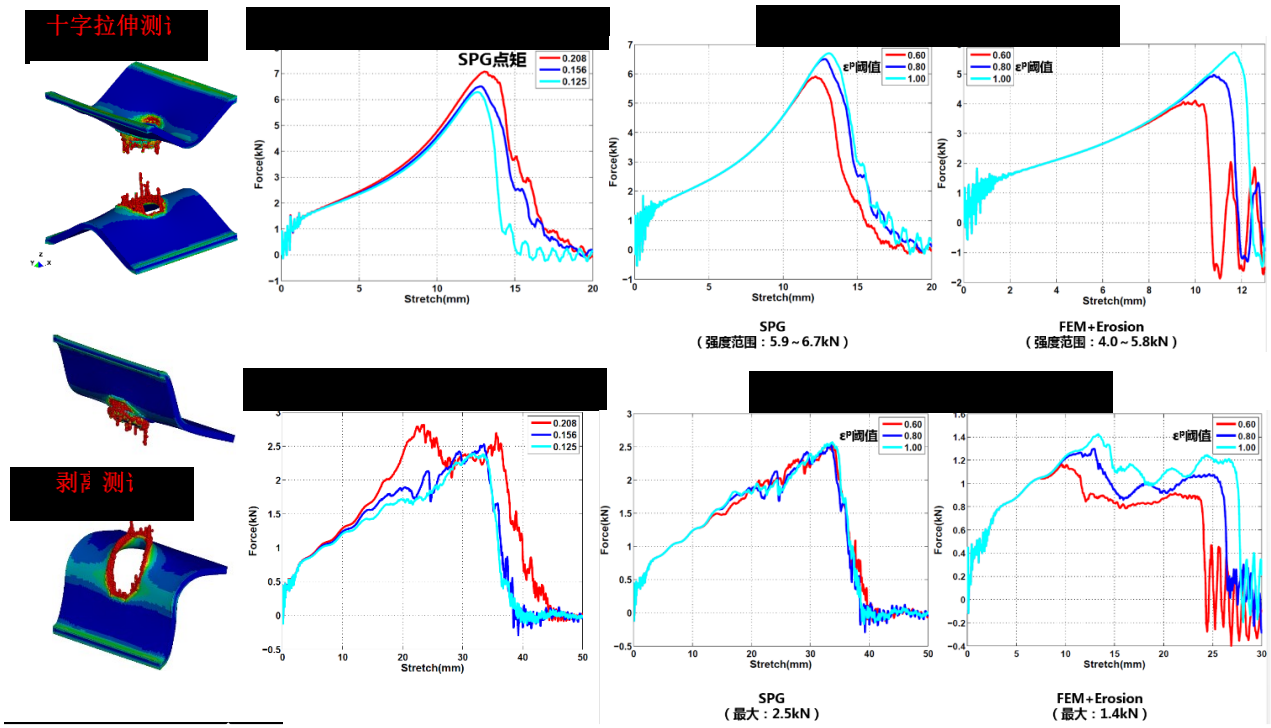
目前我们开发了基于“键”观念的简单宏观材料破坏准则：任何一对处于影响域内的节点（粒子）形成键，其断裂准则由 IDAM 来指定（如塑性应变、主应力、剪应变等），也可以用 MAT_ADD_EROSION 来指定（如等效应变、等效应力、GISSMO 损伤等）。对于延展性和半脆性材料通常依据节点平均的塑性应变是否超过 FS 值决定，同时考虑了键的相对拉伸情况 STRETCH。对于一般材料，断裂准则的 FS 值也可以来自材料模型的其他力学参量，比如广泛使用的 GISSMO 模型的损伤参数值。需要说明的是，不同于有限元中常用的单元删除，在 SPG 中用 MAT_ADD_EROSION 仅仅是让键断裂而不删除任何材料。需要注意的是，材料破坏是通过断开“键”而非删除粒子的方式实现，所以要关闭材料卡片中为材料失效而设定的破坏参数来避免因应力置零而造成的能量损失。

ITB 参数定义 SPG 不同的子算法：ITB=1 广泛适用于大变形及破坏分析；ITB=2 针对材料破碎飞溅优化了计算效率；ITB=3 提供更加光滑稳定的数值结果以及用于热固耦合分析。下面我们给出几个连接件分析中使用 SPG 的例子。

三、点焊接头强度分析



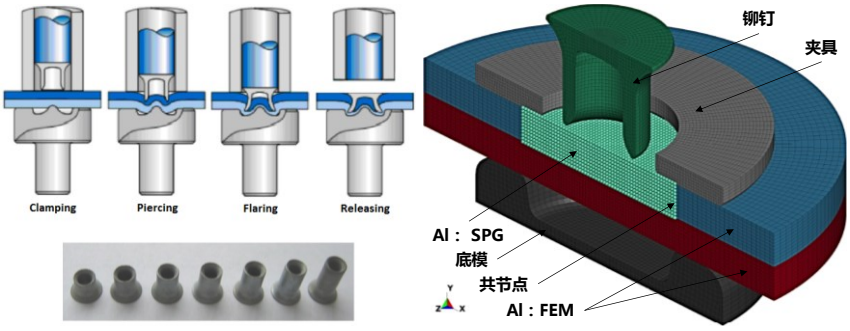
电阻点焊在目前常规汽车制造中是使用最为广泛的连接方式，主要用于钢板之间的连接。我们在这里给出的分析模型假设焊点已经形成，模型从材料性能上分为焊核区（强度高、脆性大，*MAT_24，屈服强度 460MPa，键破坏等效塑性应变 FS=0.3，STRETCH=1.2）和基体材料（强度低、韧性大，*MAT_15，屈服强度 268MPa，FS=0.8，STRETCH=1.5），主要讨论在加载情况下焊点及其周边的材料失效。在计算模型中，SPG 粒子法只用于潜在的大变形/破坏区域，其他区域仍然使用快速简单的有限元模型。由于 SPG 模块接收有限元网格，所以用户可以简单地将已有的有限元网格划出一部分定义为 SPG 实体单元，SPG 和其他有限元部分将自动通过共节点的方式连接在一起。这样极大降低了传统有限元用户在使用 SPG 模块时建模方面的负担。

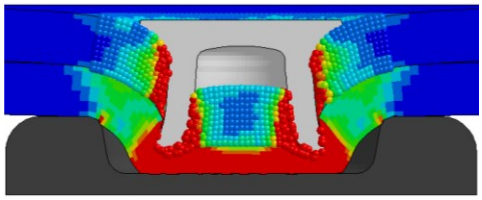


从十字拉伸和剥离试验两种加载模型的计算结果显示 SPG 和基于等效塑性应变的键破坏模型有很好的数值收敛性，对破坏准则的敏感度远低于利用单元删除描述材料破坏分离的传统有限元方法。

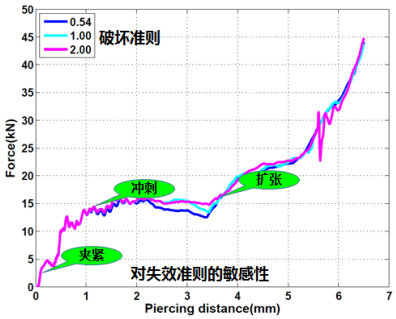
四、自冲铆加工过程及接头强度分析

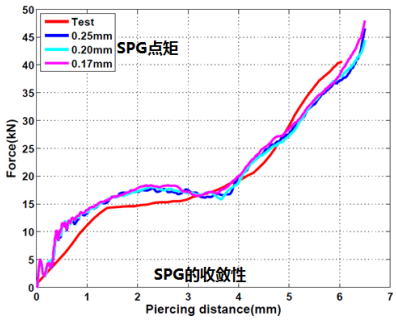
第二个例子是自冲铆，它可连接多层同种或异种材质难以用点焊连接的板材，接头疲劳强度高、静态紧固力高。这里考虑的板材使用 6111T4 Al 材料本构（*MAT_24，键破坏等效塑性应变 FS=0.54、拉伸率 STRETCH=1.3）。

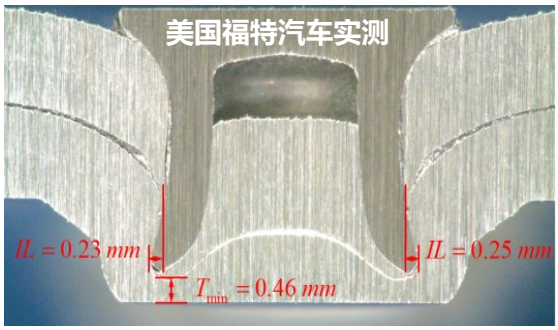


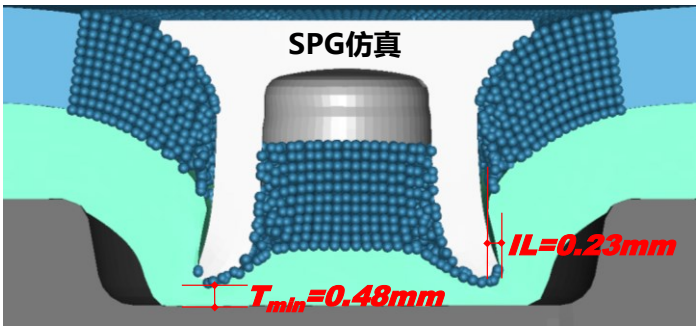


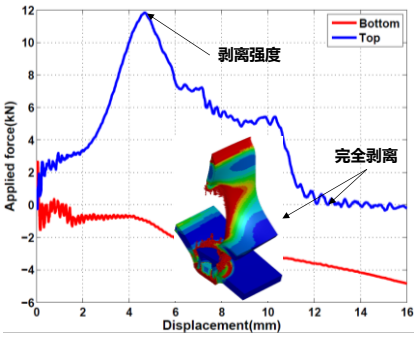
形成的铆接接头

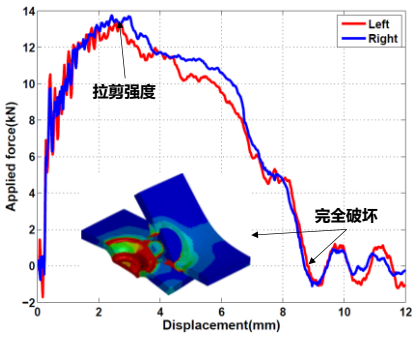












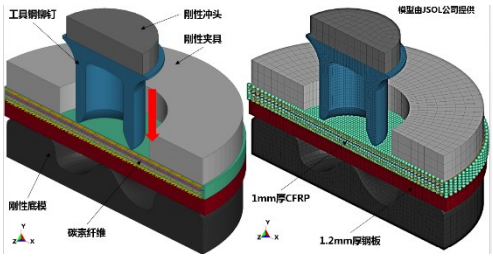
对自冲铆加工过程利用 SPG 和键破坏模型进行分析得到了和实验相似的结果，对网格尺寸和破坏准则并不敏感。剪切和剥离测试的结果定性上符合预期，力反馈等定量分析需要进一步和实验比对。

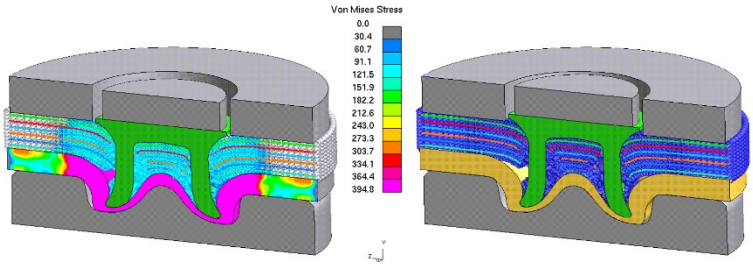
我们在介绍纤维增强塑胶/树脂和金属板材的自冲铆接之前，先简要描述一下浸入 SPG 算法模拟纤维增强材料的功能。纤维材料本身利用梁单元模拟，这里的主要问题是如何与

SPG 实体单元构建的基底材料（塑胶/树脂）进行耦合。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。使用*CONSTRAINED_BEAM_IN_SOLID(CBIS)可以解决一般变形的问题，但依赖实体单元的 CBIS 耦合算法无法处理材料破坏。新型浸入式耦合算法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。以下是*CONSTRAINED_IMMERSED_IN_SPG (CIIS)关键字的说明：

Card 1	**SPGPID**	**IPID1**	**IPID2**	**IPID3**	**IPID4**	**IPID5**	**IPID6**	**IPID7**
Default	0	0	0	0	0	0	0	0

这里 SPGID 是基底材料部分，IPID1~7 可以用来指定最多 7 个纤维增强部分。如果有更多的纤维部分可以用同一个 SPGID 定义多个 CIIS 关键字。

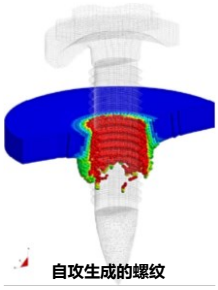


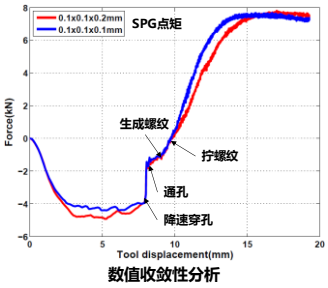


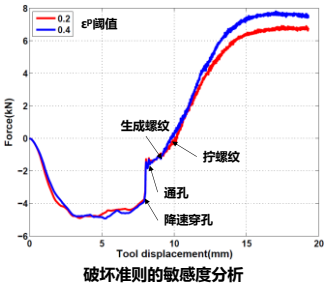
上图显示了一个自冲铆加工模型，其中上层板为碳素纤维增强热塑胶，下层为钢板。纤维部分我们使用梁单元，在铆接过程中由于材料破坏删除了部分纤维梁单元。塑胶基底部分使用 SPG 粒子和键破坏模型，材料破坏过程无需删除单元/粒子。纤维梁单元和基底 SPG 粒子耦合通过浸入算法实现。这是 CAE 仿真方面非常难的应用问题，浸入式 SPG 算法是这方面比较先进的技术，我们目前正在积极地参考实验数据，进一步提高这种算法的精度和效率。

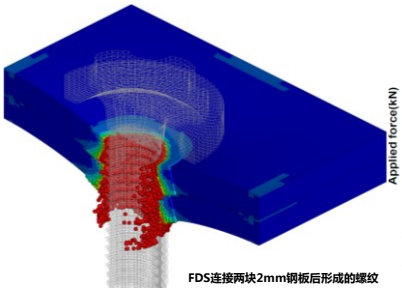
五、流钻连接加工过程及接头强度分析

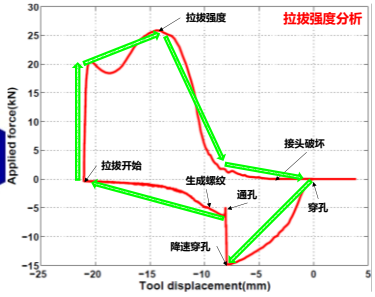
流钻螺丝（FDS）可连接异种材料，连接强度高，常应用于车体关键的结构连接位置。FDS 加工过程的螺纹形成对于连接强度有直接的影响，但相应模拟分析非常困难。这里考虑的模型使用铝的材料本构（*MAT_15, 键破坏等效塑性应变 FS=0.4、拉伸率 SWITCH=1.15）。我们可以看到下图中 SPG 计算模型的螺纹形成结果非常清晰，同时拉拔测试的力反馈结果显示处于破坏区域的螺纹提供了很强的接触力，这说明螺纹形成过程虽然破坏了一部分 SPG 粒子之间的连接“键”，但由于没有任何粒子删除，螺纹形成后粒子间剩余的“键”很好地模拟了相应的材料强度，提供了连接力。





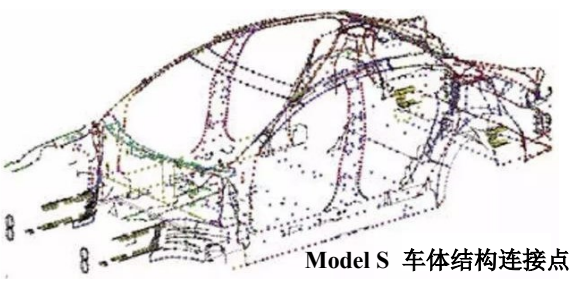


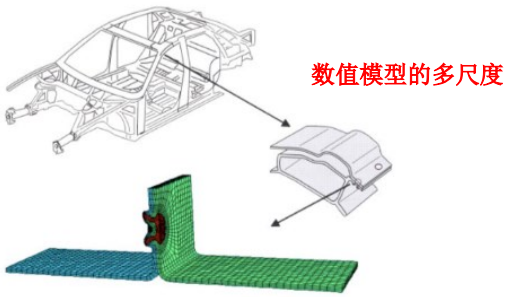




六、双尺度分析

通过前面三种复杂的连接件加工过程和测试分析实例，我们可以看到新的 SPG 法和键破坏模型能够提供可靠性高的预测分析结果，这为优化连接件及其加工过程提供了很好的 CAE 工具。对于一台典型的汽车结构，各种连接件数以千计，这些连接件对汽车碰撞安全起着非常重要的作用，问题是如何在整车碰撞分析中更为准确的为这些连接件建模并高效的执行计算分析。前面用于加工分析的实例所显示的连接件模型非常详细精确，但是考虑到连接件尺寸和车体结构（多为壳单元模型）的单元尺寸相当或者更小，即使不考虑建模的复杂度，精细的连接件模型将极大降低计算时间步长（至少一个到两个量级），同时带来总体模型单元数量的显著增加，综合的计算效率将无法满足设计周期的要求。

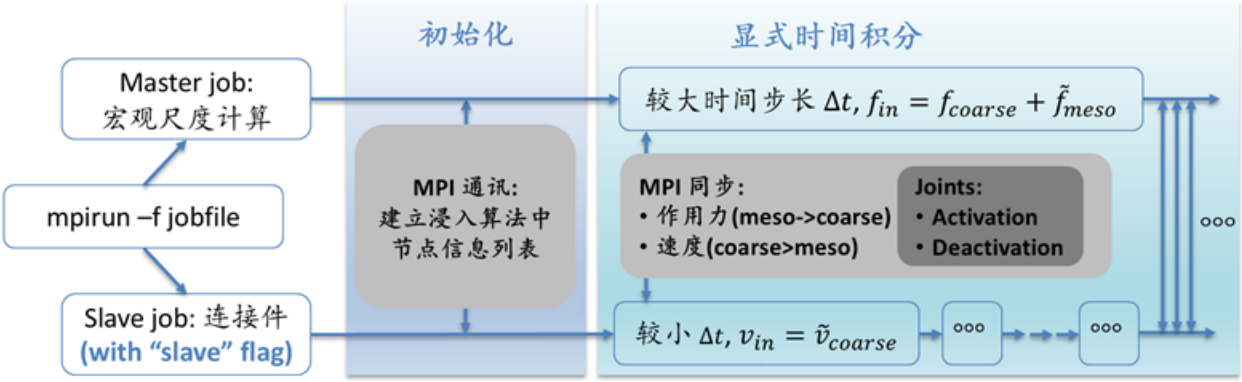




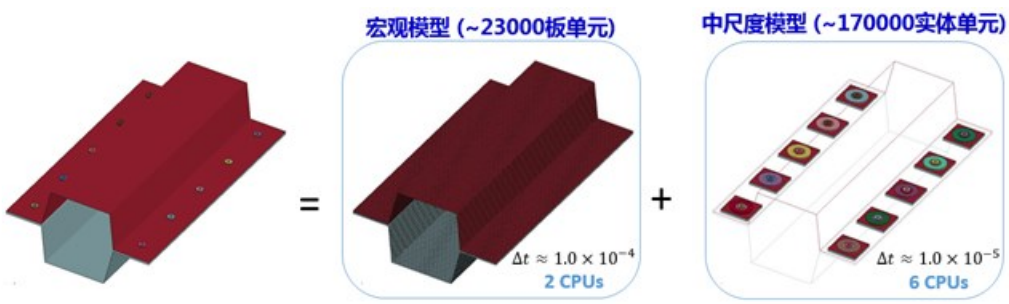
目前工程上普遍使用的方案是使用少量梁/实体单元作为连接件的简化模型，通过实验或 CAE 仿真获得各种连接件在典型加载工况下的力-变形曲线，然后在简化单元模型上应用类似材料宏观模型的方式描述连接件的力学行为。这样的做法虽然引入了一些描述连接件力学行为的数据，但由于简化模型本身在数值上无法捕捉复杂的破坏变形场，也没有办法描述连

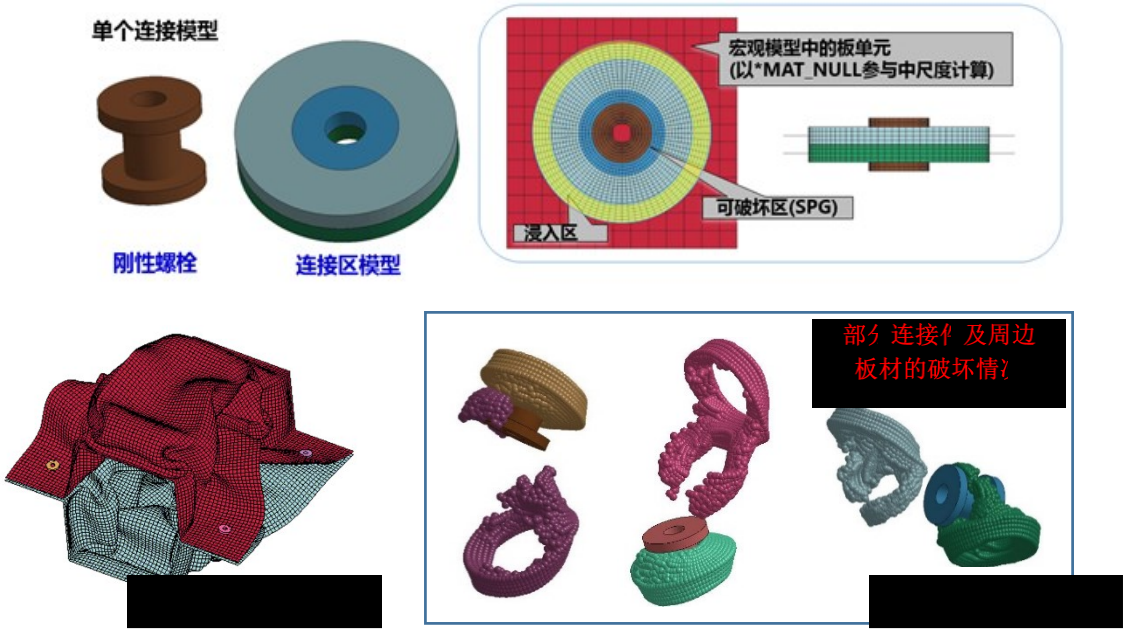
接件周边板材的破坏，从而极大地影响了计算精度或者得到完全错误的结构破坏响应。另外，考虑到车体上数量庞大且类型各异的连接件，工程分析人员为拟合各种工况的碰撞实验数据需要付出很大的代价来调整简化模型和大量参数，很大程度上降低了 CAE 仿真的可靠性和可预测性。

我们正在开发的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：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。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。

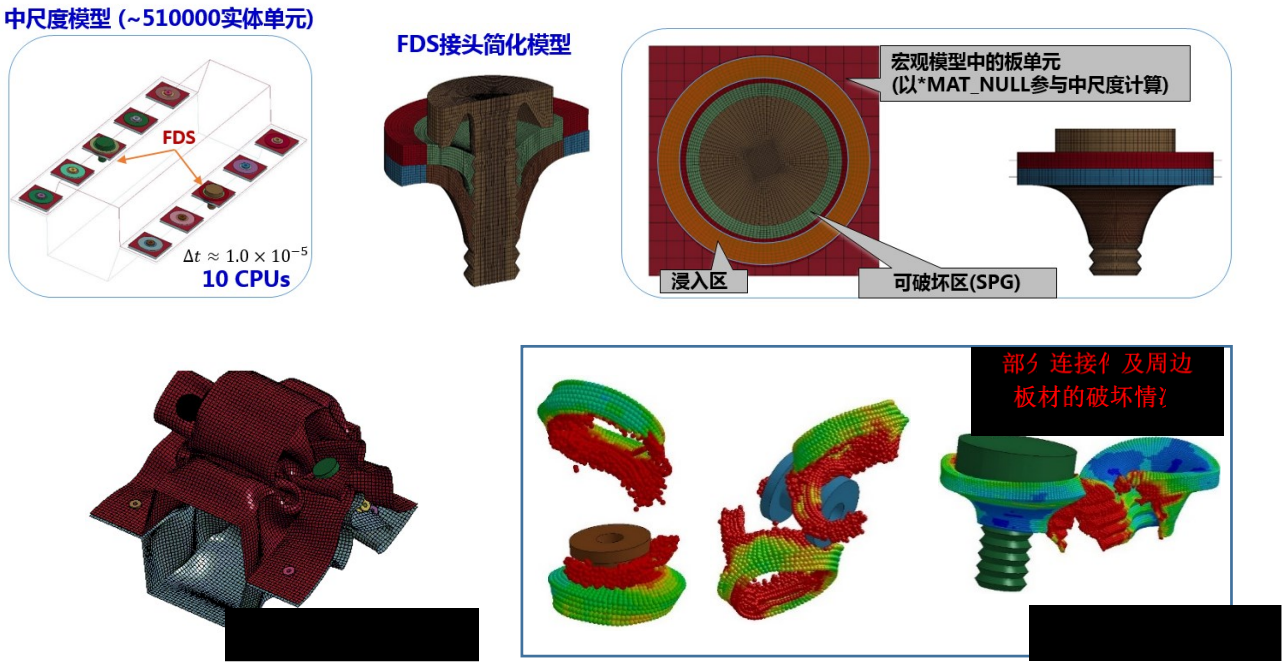


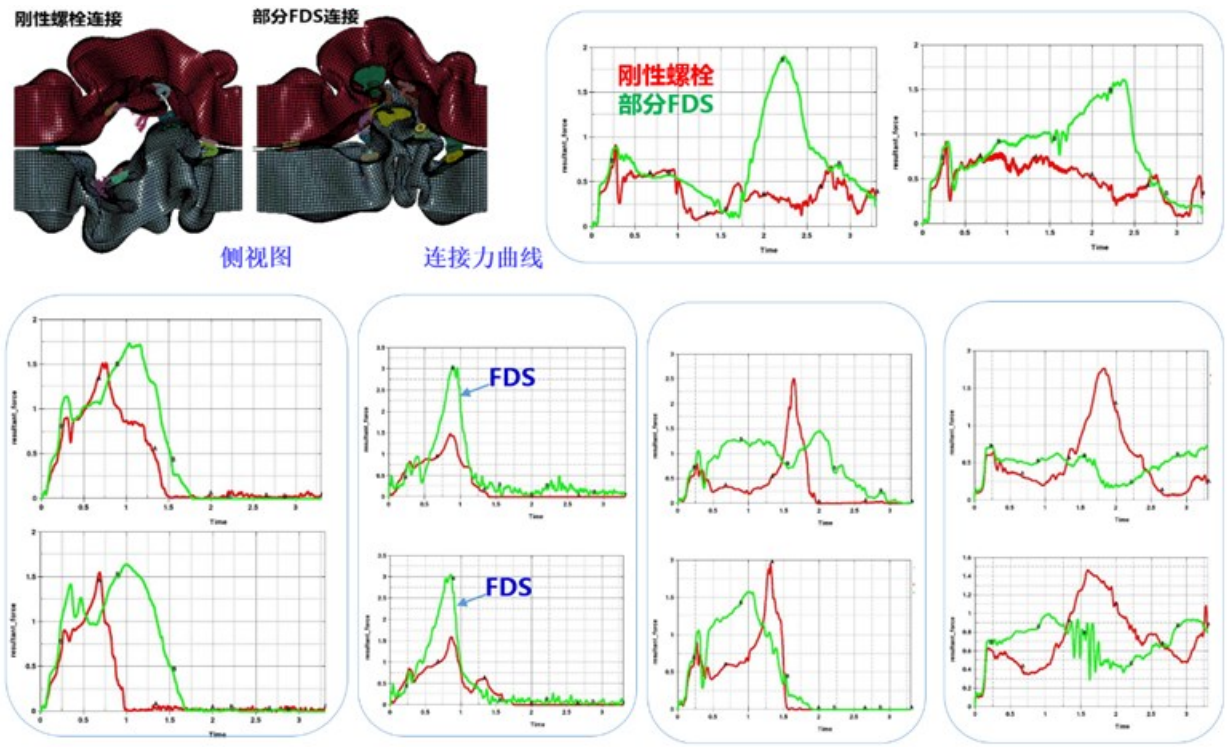
我们以一个冲击桶模型为例介绍双重尺度法的使用过程。模型由上下两个壳结构组成，包括五对连接件（共十个）。为了简化中间尺度模型，我们使用了简单的刚性连接件。浸入区域包含来自宏观尺度壳单元节点和中间尺度 SPG 粒子。由于使用了精细模型，我们可以获得不同位置连接件具体的变形破坏情况，为整体结构的设计优化提供更为丰富的 CAE 分析数据。





由于很多连接件通常是标准件，在未来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，来帮助用户快速生成中间尺度模型。比如在上一个例子中，我们可以将其中一对连接件改为更为牢固的流钻螺丝 FDS。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。





*胡炜博士于 2007 年毕业于美国加州大学洛杉矶分校土木工程系结构力学专业。此前，于 2001 年、2003 年获得北京清华大学工程力学系固体力学专业学士、硕士学位。从 2009 年至今，胡炜博士在 LSTC 从事三维自适应网格重构及无网格法相关的开发和工程问题的应用。

*吴政唐博士于 1999 年毕业于美国爱荷华大学机械系。主要专业为有限单元法及无网格法的研究及软体开发。吴政唐博士于 2001 年加入 LSTC 至今，主要从事宏观及微观尺度上的固体及结构力学问题的研究，开发和应用。

*吴有才博士 2005 年毕业于加州大学洛杉矶分校（UCLA）土木与环境工程系结构力学专业。随后加入美国 Karagozian & Case 公司，从事 LS-DYNA 在结构分析中的应用、材料本构模型和无网格技术的自主开发等。2015 年加入 LSTC，主要从事高级有限元及无网格技术的开发以及加工制造与材料失效等过程的集成结构分析。

*潘小飞博士 2006 年毕业于清华大学航空航天学院计算力学专业。之后他赴德国学习并在工业界任职机械系统和 CAE 研发工程师。他于 2017 年加入 LSTC，负责新型粒子法的研发并用于解决加工制造分析中的流固耦合以及多物理场问题。