

DP980 钢点焊接头强度模拟

吴有才，吴政唐，胡炜，潘小飞

Livermore Software Technology Corporation (LSTC)

7374 Las Positas Road, Livermore, CA 94551, USA

摘要：本文对 DP980 钢点焊接头的十字拉伸及剥离强度进行了数值模拟。针对强度模拟过程中出现的材料失效与破坏，文章简介了光滑粒子伽辽金法 (Smoothed Particle Galerkin – SPG) 的基本特点和功能以及基于 SPG 的键断裂机理。为找到点焊接头强度的有效预测方法，文章比较了 SPG 和有限元 (FEM) 的数值结果，也与相关的实验数据进行了对比，并在实验模拟中研究了数值方法的收敛性，以及数值响应对破坏准则的敏感性。

关键字：点焊接头；SPG；FEM；十字拉伸；剥离试验；破坏准则

1. 前言

随着汽车车身轻量化过程中广泛使用轻质高强材料如高强度钢、铝合金、镁合金、碳纤维复合材料等，汽车科技人员开发了大量新型连接技术，如自冲（锁）铆、流钻螺（热熔自攻）丝、胶接、摩擦搅拌焊等，它们各有优点，可用于不同环境、不同材料的连接。但是，作为连接高强度钢板的主要手段，电阻点焊仍然被广泛应用于汽车制造当中，每车最多有近 6000 个焊点。如此多焊点的存在，必然导致焊点的失效与破坏会对整车的碰撞安全响应有至关重要的影响。因此，在整车碰撞安全分析中，焊点的失效与破坏需要被准确模拟。

焊点的几何尺寸通常都很小，目前在整车碰撞安全分析中，它们常被简化为梁单元（若用实体单元则时间步极小，模拟难以有效完成），辅以其强度相关的位移载荷曲线。通过实验来准确地获取强度曲线会有很高的时间与物质成本，因而，用有效的数值方法来模拟就几乎成了唯一可行的途径。另一方面，简化模型通常不能完全模拟结构破坏的所有模式（如界面断裂、拔出断裂、混合断裂、母材断裂）。因此，采用精细实体单元来准确离散焊点结构对高精度仿真是很必要的。若想将焊点按实际尺寸离散成能更准确地描述其行为的实体单元参与在线模拟，则需要使用双尺度算法，即中尺度和宏观尺度。其中中尺度只做连接（如点焊、铆接、流钻连接等）的强度分析，而宏观尺度只做整车响应分析，而它们之间的数据交换通过浸入式算法进行。目前 LSTC 正在开发双尺度算法，两个尺度的计算分别在不同的 CPU 上同时进行。

针对双尺度算法中连接的强度分析，除了传统的 FEM 加单元删除法，LSTC 于近年来推出了光滑粒子伽辽金法 (Smoothed Particle Galerkin, SPG) 【1-4】。该方法采用直接点积分 (Direct Nodal Integration — DNI) 与稳定性增强项以及键断裂 (Bond Break) 模型，保证了质量、动量与能量的守恒以及数值稳定性、收敛性，因而能够有效地模拟材料的失效与破坏。为找到评估连接强度的有效方法，本文简介了 SPG 方法的特点和键断裂模型，比较了由 FEM 和 SPG 所模拟的 DP980 钢点焊接头十字拉伸和剥离响应，并研究了方法的数值收敛性以及数值结果对材料破坏准则的敏感性。

2. 无网格法—SPG 简介

对点焊结构进行强度分析往往会伴随有材料的失效和破坏。有限元加单元删除法因其简单、高效而被广泛地应用在结构的失效与破坏分析中。但是，单元的删除会导致质量和能量的损失，进而低估结构外力响应（强度）、错误预测结构失效模式。

为了更准确地模拟材料破坏，上世纪末兴起的无网格技术得到了重视和发展，在近十几年开始进入了工业应用领域。可是现有的无网格法仍有其自身的局限性，比如：基于强形式的配点法不能保证数值收敛性；欧拉核函数的拉伸不稳定性；对于伽辽金弱形式，用高斯积分（或任何基于背景网格的积分）不利于失效破坏分析（因破坏后难以建立有效的积分网格），而用直接点积分（Direct Nodal Integration — DNI）则会产生低能（沙漏）模式。因此，为了能够稳定有效地模拟材料的失效与破坏，LSTC 近年来开发了光滑粒子伽辽金法（Smoothed Particle Galerkin, SPG）【1-4】。

2.1 . SPG 基本理论

SPG 是采用直接点积分（DNI）的伽辽金法，它依照位移光滑理论【1】导出了数值稳定性的增强项，从而抑制了弱形式常规 DNI 导致的低能（沙漏）模式，能够获得稳定收敛的数值解，进而可用于材料的失效与破坏分析。文献【1】从位移光滑理论出发推导了数值稳定性的增强项并将 SPG 应用在了二维线弹性问题中，展示了其稳定性和收敛性；文献【2】把 SPG 扩展到了三维非线性弹塑性材料的失效与破坏分析当中；文献【3、4】则把 SPG 理论推广到了应变局部化及塑性断裂等问题当中。受限于篇幅，本文只简介 SPG 方法的主要概念，详细理论请参见相关文献。

通常情况下，求解显式动力学问题的半离散方程是：

$$\mathbf{M}^{lump} \ddot{\mathbf{U}} = \mathbf{f}^{ext} - \mathbf{f}^{int} \quad (1)$$

其中 $\mathbf{M}^{lump}$ 是集中质量矩阵， $\mathbf{f}^{ext}$ 是外力， $\mathbf{f}^{int}$ 是内力。内力是整个计算过程中最耗时的，因此，希望采用 DNI 以提高效率。但是，如前所述，直接使用 DNI 来计算伽辽金弱形式的内力，会产生低能模式。

为了抑制常规 DNI 所导致的低能模式，SPG 对位移进行了光滑处理（也因此命名为光滑粒子伽辽金法），导出了稳定性增强项。于是，要求解的半离散方程可被推导为【1】：

$$\mathbf{M}^{lump} \ddot{\mathbf{U}} = \mathbf{f}^{ext} - \mathbf{f}^{int} - \hat{\mathbf{f}}^{stb} \quad (2)$$

这里 $\hat{\mathbf{f}}^{stb}$ 就是因光滑位移而导出的稳定性增强项，其它变量与式(1)相同。通过 DNI， $\hat{\mathbf{f}}^{stb}$ 可由下式来计算：

$$\hat{\mathbf{f}}_I^{stb} = \sum_{N=1}^{DNI} \hat{\mathbf{B}}_I^T(\mathbf{X}_N) \hat{\boldsymbol{\sigma}}(\mathbf{X}_N) J^0 V_N^0 \quad (3)$$

式中 $\hat{\mathbf{B}}$ 是与位移光滑函数以及位移近似函数相关的梯度矩阵， $\hat{\boldsymbol{\sigma}}$ 是稳定增强应力。梯度矩阵 $\hat{\mathbf{B}}$ 以及稳定增强应力 $\hat{\boldsymbol{\sigma}}$ 的计算可参见文献【4，5】，这里不再重复。

SPG 法已在塑性及半脆性材料的失效与破坏分析中得到成功应用：文献【6】中 SPG 模拟的混凝土（半脆性）结构冲撞侵侧过程与实测结果有很高的可比性；文献【5】将 SPG 用在了铝合金（塑性）表面研磨过程的模拟中，得到了与实验很接近的研磨力，并捕捉到了研磨过程所产生的金属残片；文献【7】

则将 SPG 用在了铝合金及钢（塑性）的冲撞侵侧过程分析中，无论是穿透后的残余速度还是侵侧深度都与实测高度一致。

归纳起来，SPG 法有以下主要特点：

- 1) 采用了伽辽金弱形式以保证收敛性；
- 2) 引入了由位移光滑理论导出的稳定性增强项，无需调试参数便可获得稳定数值解；
- 3) 采用 DNI，是真正无网格法，不依赖任何网格来做空域积分，适用于分析材料破坏；
- 4) 通常采用与有限元相同的近似阶数，因此可自然地与有限元耦合（共节点）；
- 5) 采用固体有限元网格及材料本构作为输入，对有限元用户不产生额外的建模要求；
- 6) 引入了键断裂模型（下节详述），能有效处理材料的破坏与分离。

2.2 . 键断裂模型

为了模拟材料的破坏与分离，LSTC 在 SPG 的框架下开发了键断裂模型。在 SPG 法中，每个粒子都有一个大小一定的影响域，域内每两个粒子之间的联系都被视为一个键（类似于化学上的分子键），该键可以断裂以模拟材料的破坏。如图 1（a）所示，蓝色椭圆为点 3 的影响域，它覆盖点 3 本身及点 1、2、4，于是形成键 3-1、3-2、3-4；红色椭圆为点 4 的影响域，它覆盖点 4 本身及点 3、5、6，于是形成键 4-3、4-5、4-6。

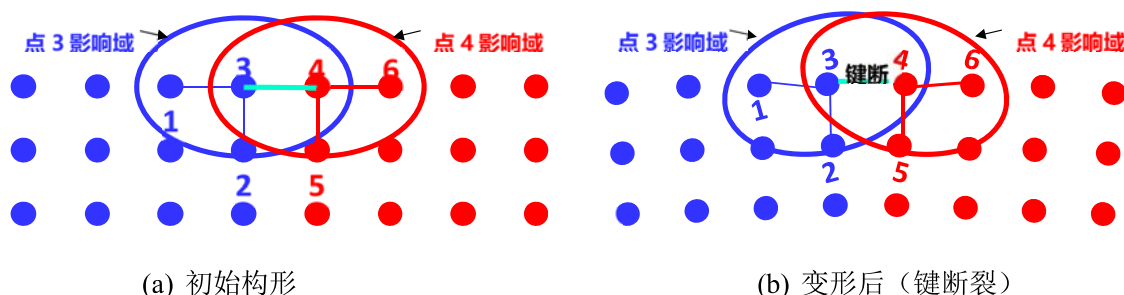


图 1 键断裂模型

经过变形后，破坏准则在键 3-4（或 4-3）上得到满足，则该键断裂（见图 1（b）），也就是发生材料破坏。于是，点 3 的近似函数在点 4 处被置零，反之，点 4 的近似函数在点 3 处也被置零。在此过程中，点 3、4 的应变计算方法与点 1、2、5、6 等并无不同，只是在计算点 3 的应变时没有点 4 的贡献，计算点 4 的应变时不考虑点 3 的贡献（尽管从几何空间上看，点 3、4 仍互相对对方的影响域内）。

因此，尽管有键断裂（材料失效或破坏）发生，应力依然可以由材料本构来给出，而不是像有限元那样把积分点（这里点 3、4 既是物质点又是积分点）的应力置零同时删除单元，从而导致动量及能量损失。所以，SPG 法仅仅是把键 3-4 切断，而不删除任何材料，也不把应（内）力归零，从而保证物质及能量守恒。

前文提到的键断裂的破坏准则是由用户指定的，它可以是由材料本构直接算出的变量，如等效塑性应变、损伤因子；也可以是演变于材料本构的变量，如最大主应力、主应变、剪应变、等效应变、最大压力等。因此，用户可以根据材料破坏的物理特点来指定相应的破坏准则。

3. 点焊接头强度分析

点焊接头的性能与焊接工艺有着直接的关系，如焊接电流、焊接压力、焊接时间等。为降低问题的复杂

性，本文只模拟点焊接头的强度（十字拉伸、剥离试验）而不对焊接过程进行仿真，也即假设点焊接头已经存在。另外，为简化几何模型的离散，本文不考虑熔核压痕（nugget indentation），因本文的研究重点是数值方法的可应用性和可靠性，而不是准确地捕捉点焊结构的所有物理特征。

3.1 焊点模型

按文献【8】所提供的焊接工艺参数，当用电阻点焊焊接厚度为 1.2 mm 的 DP980 钢板时，可获得焊核直径约为 6.0 mm 的焊点，如图 2（a）所示。同时，根据文献【8】，热影响区（Heat Affected Zone — HAZ）可被近似为约 0.5 mm 厚的环。

根据文献【8】的结论，本文假设材料的破坏和分离只会发生在焊核区和热影响区，因此，如图 2（b）所示，在采用混合 FEM-SPG 法做强度分析时，只对以上二区域使用 SPG 离散，而母材区（不会破坏）则由 FEM 近似，从而在保证精度的同时提高计算效率。考虑到材质的差异，焊核区和热影响区的材料本构和键断裂准则是不一样的（参见表 1）。在作为对比的完全 FEM 模型中，对以上二区域施加不同的破坏准则以删除单元，从而模拟材料的破坏与分离。

另外，为了研究数值方法的收敛性，本文采取了三种几何离散方案，方案中潜在失效区（焊核和 HAZ）的最小点距分别是 0.167 mm（粗尺度，共 28629 节点+124800 单元或 150656 单元）、0.125 mm（中尺度，共 60913 节点+280640 单元或 336880 单元）和 0.100 mm（细尺度，共 109425 节点+521664 单元或 624096 单元）。

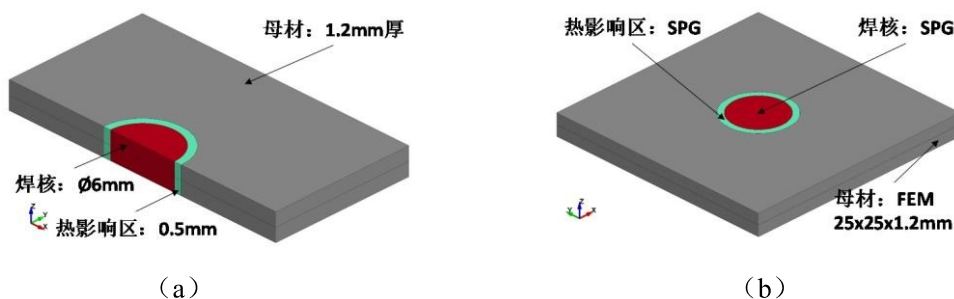
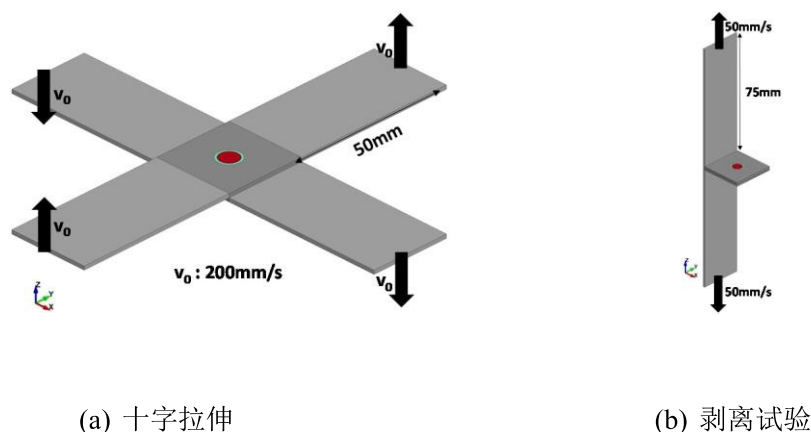


图 2 电阻点焊接头 (a) 几何尺寸 (剖面图); (b) 几何离散

焊点强度试验通常都是准静态（加载速度大约在 10 mm/min），但是显式计算难以完成模拟时间是秒或分级的分析，因此，针对不同试验（即十字拉伸和剥离试验）采用了不同的加载速度（大约仍为准静态），详见图 3。



(a) 十字拉伸

(b) 剥离试验

图 3 点焊接头强度分析模型

按文献【8】记载，根据区内所达到最高温度的不同，HAZ 又可细分为 SCHAZ（650℃），ICHAZ（760℃）和 UCHAZ（又包含 FGHAZ（950℃）和 CGHAZ（1250℃））。在这些区域中，ICHAZ 的屈服强度最低，因此，本文将整个 0.5 mm 厚的 HAZ 环都假设为 ICHAZ。由于缺乏系统的数据，HAZ 的材料参数取自于文献【8】，而母材和焊核区的材料参数则取自于文献【9】，详见表 1。所使用的材料本构为 J₂多线性弹塑性模型。

根据文献【8】和【9】所提供的数据，焊点的破坏大约会发生在等效塑性应变为 0.10~0.15 时。十字拉伸和剥离试验的主要破坏模式是拉伸，因此，设定等效塑性应变 0.10 为焊核区的破坏（键断裂或单元删除）准则，0.15 为 HAZ 的破坏准则。为研究数值结果对破坏准则的敏感性，本文也研究了对前述准则分别上、下浮动 40%时的结构响应。另外，如前所述，由于焊点强度试验通常都是准静态实验，本文在材料本构中没有考虑应变率效应。

表 1 DP980 钢材料参数

	屈服强度 (MPa)	终极强度 (MPa)	破坏准则 (等效塑性应变)
母材	710	1056	+∞
HAZ	584	1085	0.15
焊核	800	1102	0.10

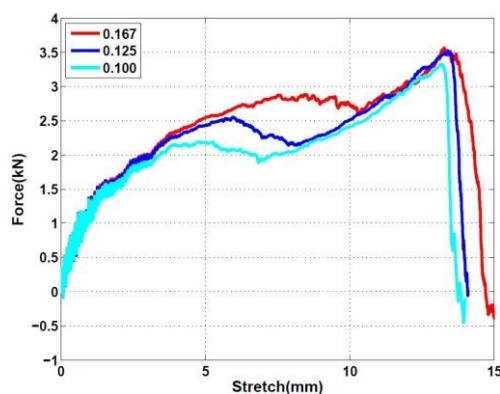
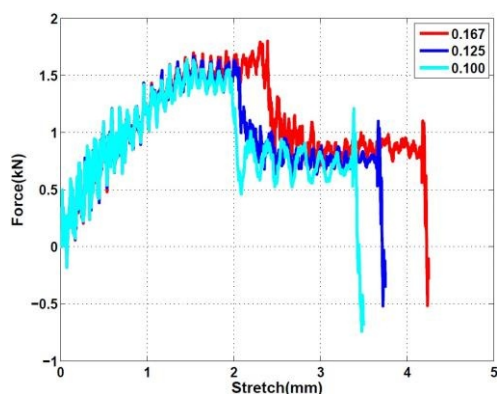
3.2 结果与讨论

本文所有计算结果都使用最新 LS-DYNA®【10】双精度显式求解器求解。

3.2.1 数值收敛性

为研究数值方法的收敛性，本节对比了采用粗、中、细尺度离散的 FEM 和混合 FEM-SPG 仿真结果。图片展示了模拟所得各实验的位移载荷曲线，其横坐标（Stretch）为施力端的位移，纵坐标为所施外力，图例为所用离散中最短点距，单位为 mm。计算中所用材料破坏准则见表 1，比如 HAZ，无论 FEM 还是 SPG 都用临界等效塑性应变 0.15。

图 4 所示为剥离试验仿真结果。由图可见，数值响应随着离散的细化而趋同，表明数值方法收敛。单纯从模拟所获得的剥离强度（最大外力）来看，几何离散对结果（尤其是 SPG）的影响不大，虽然 FEM 和混合 FEM-SPG 结果之间有较大差别（注意最大值及对应位移）。需要指出的是，有限元模拟中因单元不断删除会造成较大外力波动，而 SPG 法因不涉及物质和能量的删除，所得外力的波动相对较小。

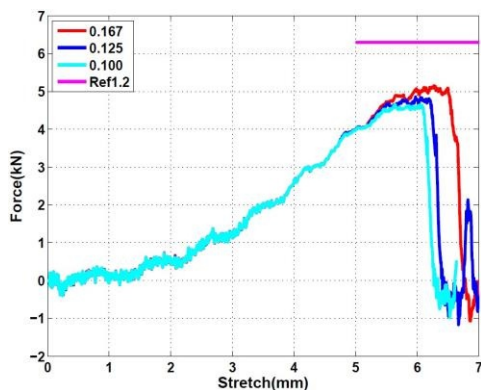


(a) FEM

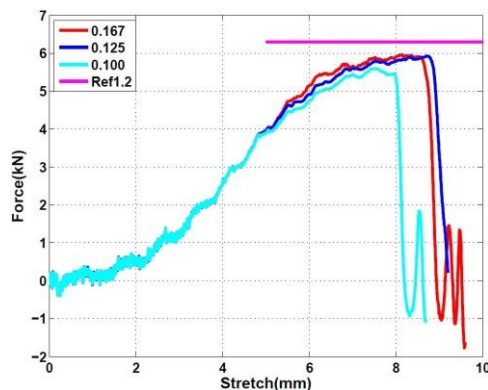
(b) SPG

图 4 剥离试验模拟：收敛性

十字拉伸试验模拟的结果如图 5 所示，图例中 Ref1.2 为文献【11】和【12】所提供的类似焊点（1.2 mm 厚 DP980 钢板、直径 6 mm 焊核）的十字拉伸强度。图中曲线显示，数值结果随离散的变化不大，也即对几何离散敏感度不高或者说数值方法收敛。但是，FEM 所模拟的强度（最大外力）与参考值有大约 25% 的误差，而 SPG 的预测与参考值相差在 10% 左右。



(a) FEM



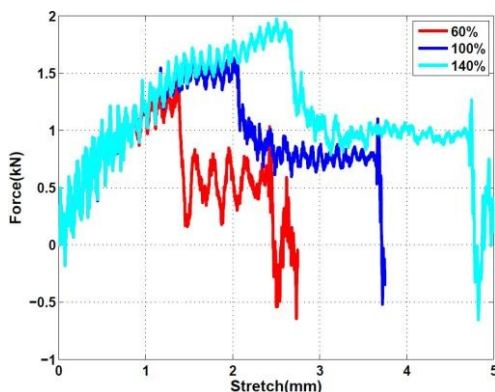
(b) SPG

图 5 十字拉伸模拟：收敛性

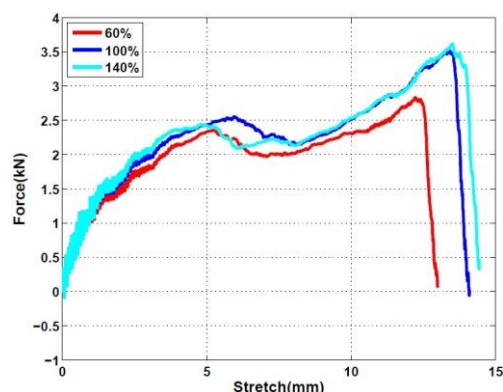
3.2.2. 破坏准则敏感性

本节采用点距为 0.125 mm 的中尺度离散，用 FEM 和混合 FEM-SPG 分别模拟了不同破坏准则下十字拉伸和剥离试验的数值响应。图片所示为仿真所得位移载荷曲线，横轴为施力端位移，纵轴为所施外力；图例为表 1 中对应材料破坏准则的百分比，以 HAZ 的等效塑性应变为例，60%是指 0.09，100%是 0.15，140%是 0.21。

剥离试验对不同破坏准则的数值响应见图 6 所示。从图中可以观察到，无论是 FEM 还是混合 FEM-SPG，剥离试验响应及剥离强度（最大外力）都对破坏准则有一定的敏感性，所以，破坏准则的设定会对剥离响应的预测有重要影响。相对来看，有限元模拟结果对破坏准则的敏感性要高于混合有限元-无网格法的结果。



(a) FEM



(b) SPG

图 6 剥离试验模拟：破坏准则

图 7 显示了不同破坏准则下十字拉伸过程的仿真结果。由图可见，有限元解对破坏准则的敏感性较高，其模拟强度（最大外力）及焊点断裂前的能量吸收能力都随着破坏准则的提高而显著增加，这对仿真中材料参数的设定提出了很高的要求。另一方面，混合 FEM-SPG 解对破坏准则的敏感性相对较低，而且，当破坏准则在一定范围内时（比如 90%~110%），仿真所得强度与实测值相近并且数值响应的差异也不大，因此破坏准则的设定可有一定的灵活性。

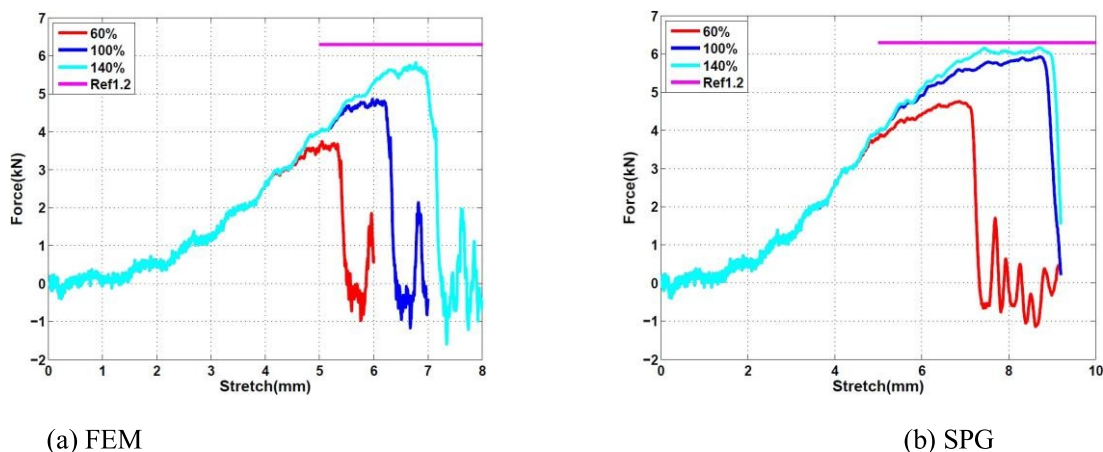
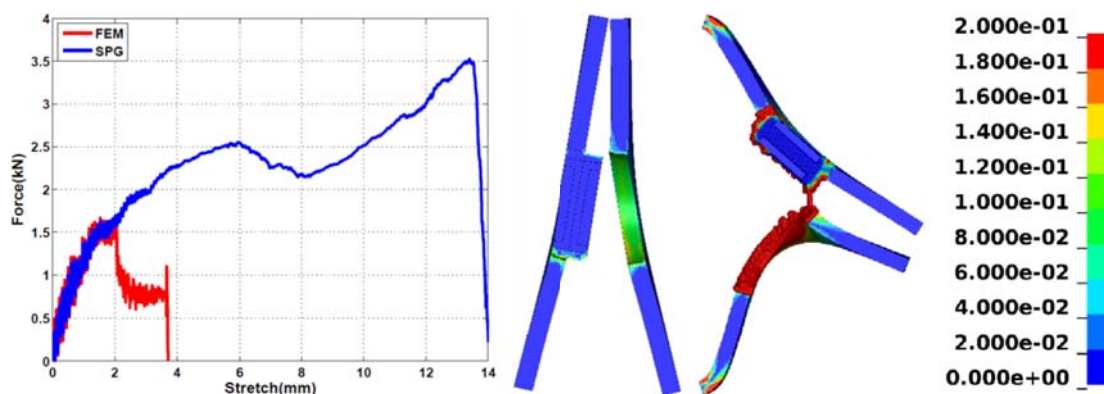


图 7 十字拉伸模拟：破坏准则

3.2.3. 讨论

本节比较 FEM 和混合 FEM-SPG 的数值响应，采用中尺度离散及表 1 所列材料破坏准则。位移载荷曲线图中的图例同前，云图（沿对称面切开）为等效塑性应变，图例在图 8 (d)。

图 8 所示为分别由 FEM 和混合 FEM-SPG 模拟的剥离响应。从图 8 (a) 可见，SPG 所预测的剥离强度远高于 FEM 的预测，同时，SPG 所计算的焊点破坏前的能量吸收能力也远远高于 FEM。这是因为 FEM 使用了单元删除技术以模拟材料破坏，而大量单元的删除导致了物质和能量损失，因此相应的外力响应（强度）及能量吸收能力必会被大大地低估。在整车碰撞安全分析中，连接破坏前的能量吸收可能会大大影响整车结构响应。仿真最终时刻的等效塑性应变分布（见图 8 (b)、(c)）显示，FEM 模拟中几乎整个热影响区环都被删除，而 SPG 模拟中则是热影响区环被撕裂（所以更耗能）。剥离试验的破坏模式都展现为拔出破坏，而不是界面断裂，这与电阻点焊的设计目标相符。



(a) 位移载荷曲线

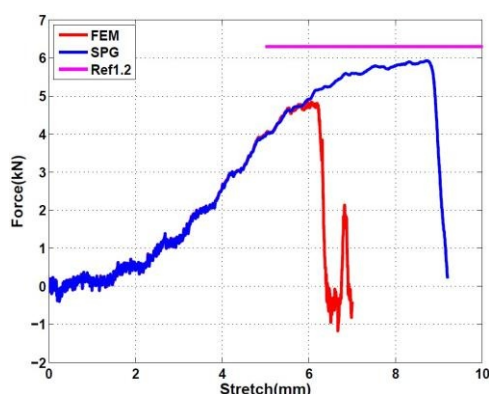
(b) FEM

(c) SPG

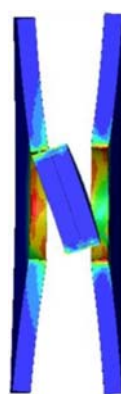
(d) 图例

图 8 剥离试验模拟：FEM vs SPG

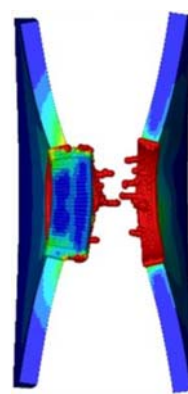
由 FEM 和混合 FEM-SPG 分别模拟的十字拉伸数值响应见图 9。图 9 (a) 的曲线显示，由 SPG 计算所得的十字拉伸强度接近于实验参考值，而 FEM 预测的强度偏低并且点焊结构在破坏之前所吸收的能量也远远低于 SPG 的估算。与剥离试验类似，这也是由于 FEM 仿真过程中有大量的单元删除，导致了物质和能量的损失，从而低估结构的强度及能量吸收能力，而能量吸收对于整车碰撞安全分析中的综合响应至关重要。计算终止时刻的等效塑性应变分布如图 9 (b)、(c) 所示，可见焊点的失效方式是拔出破坏，其中 FEM 几乎“轻松地”删除了整个热影响区环，而 SPG 的结果则是热影响区环被撕裂。同时观察到十字拉伸的破坏模态都是焊点拔出，与点焊过程的设计目标（拔出破坏而不是界面断裂）相符。



(a) 位移载荷曲线



(b) FEM



(c) SPG

图 9 十字拉伸模拟：FEM vs SPG

4. 结论

本文使用有限元法（FEM）和光滑粒子伽辽金法（SPG）对点焊接头的剥离和十字拉伸强度进行了数值分析。数值方法的收敛性通过数值模拟得到了验证。因强度分析中牵涉到材料的失效与破坏，文章也研究了数值结果对破坏准则的敏感性。综合而言，有限元（FEM）仿真结果对破坏准则的敏感性高于光滑粒子伽辽金法（SPG）。从数值结果对破坏准则的敏感性也可以推断：材料参数的设定对结构响应的预测有重要影响。

数值结果也显示，有限元法（FEM）结合单元删除技术来模拟材料的失效与破坏，导致了物质和能量的损失，从而可能会严重低估结构的外力响应（强度）以及能量吸收能力；而光滑粒子伽辽金法（SPG）则用键断裂技术来处理材料的失效与破坏，能够保证物质与能量守恒，从而能够更准确地模拟结构的强度与能量吸收。因此，SPG 是模拟结构破坏的更有效方法。需要指出的是，无论 FEM 还是 SPG，仿真精度都与材料本构的选择和材料参数的设定有很大的关系。基于 SPG 的强度分析技术未来可以通过浸入式算法与整体结构做同步分析，以获得更准确的结构响应（如整车碰撞安全分析）。

参考文献

1. Wu CT, Koishi M, Hu W. A displacement smoothing induced strain gradient stabilization for the meshfree Galerkin nodal integration method. *Comput. Mech.* 56, 19-37, 2015.
2. Wu CT, Chi SW, Koishi M, Wu Y. Strain gradient stabilization with dual stress points for the meshfree nodal integration method in inelastic analysis. *Int. J. Numer. Methods Engrg.* 107, 3-30, 2016.
3. Wu CT, Wu Y, Koishi M. A strain-morphed nonlocal meshfree method for the regularized particle simulation of elastic-damage induced strain localization problems. *Comput. Mech.* 56, 1039-1054, 2015.
4. Wu CT, Ma N, Takada K, Okada H. A Meshfree Continuous-Discontinuous Approach for the Ductile Fracture Modeling in Explicit Dynamics Analysis. *Comput. Mech.* 58, 391-409, 2016.
5. Wu CT, Bui TQ, Wu Y, Luo TL, Wang M, Liao CC, Chen PY, Lai YS. Numerical and experimental validation of a particle Galerkin method for metal grinding simulation. *Comput. Mech.* 61, 365-383, 2018.
6. Wu CT, Wu Y, Crawford JE, Magallanes JM. Three-dimensional concrete impact and penetration simulations using the smoothed particle Galerkin method. *Int. J. Impact Engrg.* 106, 1-17, 2017.
7. Wu Y, Wu CT. Simulation of Impact Penetration and Perforation of Metal Targets Using the Smoothed Particle Galerkin Method. *J. Engrg. Mech.* 144(8), 04018057, 2018.
8. Rezayat H, Ghassemi-Armaki H, Bhat SP, Sriram S, Babu SS. Constitutive properties and plastic instabilities in the heat-affected zones of advanced high-strength steel spot welds. *J. Mater. Sci.* 54 : 5825-5843, 2019.
9. Park N, Park M, Kwon J, Huh H. Material properties of the nugget zone in resistance spot-welded DP980 steel joint at various strain rates. *Sci. Technol. Weld Join.* 23:7-12, 2018.
10. Hallquist JO. LS-DYNA® Keyword User's Manual, Livermore Software Technology Corporation, Livermore, California, 2019
11. Ghassemi-Armaki H, Bhat S, Kelley S, Sadagopan S. Quasi-static spot weld strength of advanced high-strength sheet steels. *Welding Journal* 96:104-112, 2017.
12. Radakovic J, Tumuluru M. An evaluation of the cross-tension test of resistance spot welds in highstrength dual-phase steels. *Welding Journal* 91:8-14, 2012

Strength Analysis of DP980 Steel Spot Welds

Youcai Wu, C.T. Wu, Wei Hu, Xiaofei Pan

Livermore Software Technology Corporation, 7374 Las Positas Road, Livermore, CA 94551, USA

Abstract: This paper studies the cross-tension and coach peel strengths of DP980 steel spot welds. To deal with the material failure and separation occurred in strength analysis, the paper briefly introduced the fundamentals and functions of the Smoothed Particle Galerkin (SPG) method and the bond-based failure mechanism. To find an effective approach for strength prediction of spot welds, SPG and FEM (finite element method) results are compared and they are compared with limited test data as well. Furthermore, the numerical convergence and the sensitivity to failure criteria are also investigated through numerical analyses.

Key words: Spot Welds; SPG; FEM; Cross Tension; Coach Peel; Failure Criteria