



MF GenYld + CrachFEM

材料失效模型软件



迅仿科技（上海）有限公司

运营总部：上海市闵行华中路6号七宝德必易园A501室
服务分部：上海奉贤 | 南京 | 武汉 | 丽水 | 北京 | 佛山 | 苏州
联系电话：+86-21-61260759 联系邮箱：info@sharefea.com

MATFEM Ingenieurgesellschaft mbg
ShareFEA Engineering Technology

➔ 2023版

CRACHFEM INTRODUCE

CrachFEM 介绍

MF GenYld + CrachFEM (以下简称CrachFEM) 是一款用户自定义材料本构模型, 能够与主流显式求解器, 如LS-Dyna, PAM-Crash, Abaqus, Radioss等联合使用。作为一款全面的材料塑性和失效模型, CrachFEM不仅能够表征材料弹塑性变形, 也可以描述材料在不同加载条件(应力状态)下的断裂失效, 满足一个材料本构模型支持几乎所有类型材料的碰撞断裂失效模拟, 如高强度钢、热成形钢、软钢、挤压铝、冲压铝、铸铝、镁合金等金属材料以及聚合物塑料、玻纤增强塑料、碳纤维复合材料、玻璃等非金属材料, 也能够结合精细化建模模拟同种/异种连接的碰撞失效行为, 具备高精度的材料级、部件级、子系统级和整车级的正向断裂失效预测能力。



正向预测能力 Predictive

简单的单轴拉伸试验并不能准确表征材料的塑性和失效力学行为, 使得实际仿真过程中要开展材料参数修正迭代, 且有一定的适用范畴。MF GenYld + CrachFEM使用一组经过精心设计和验证的系统化力学试验矩阵对材料模型及其参数进行表征, 旨在预测任意载荷条件的材料行为, 支持碰撞仿真的正向预测能力。



模块化定义 Modular

使用模块化方式定义MF GenYld + CrachFEM材料塑性和失效模型, 每个模块定义一个物理属性, 且保持模块之间相互独立, 用户也可以根据材料力学特性灵活组合多个模块进行参数表征。



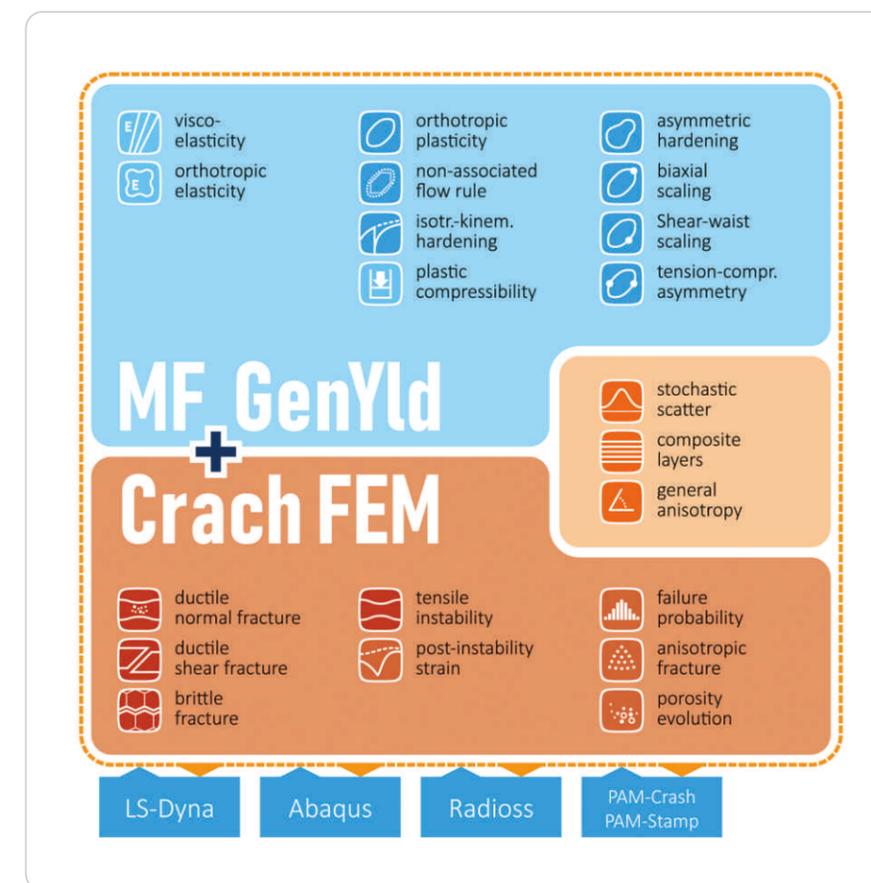
通用性 Universal

MF GenYld + CrachFEM能与各类显式求解器联合使用, 材料输入卡片格式与各种求解器完全兼容, 可以允许用户在求解器间自由切换, 保证仿真材料参数一致性。



MF GenYld 材料模型描述材料的弹塑性变形, 能够模拟大多数材料的塑性行为。

CrachFEM失效模型使用弹塑性计算获得的应力和应变信息分析各种韧性失效或脆性失效行为, 能够通过后处理云图或单元瞬间删除评估断裂失效。



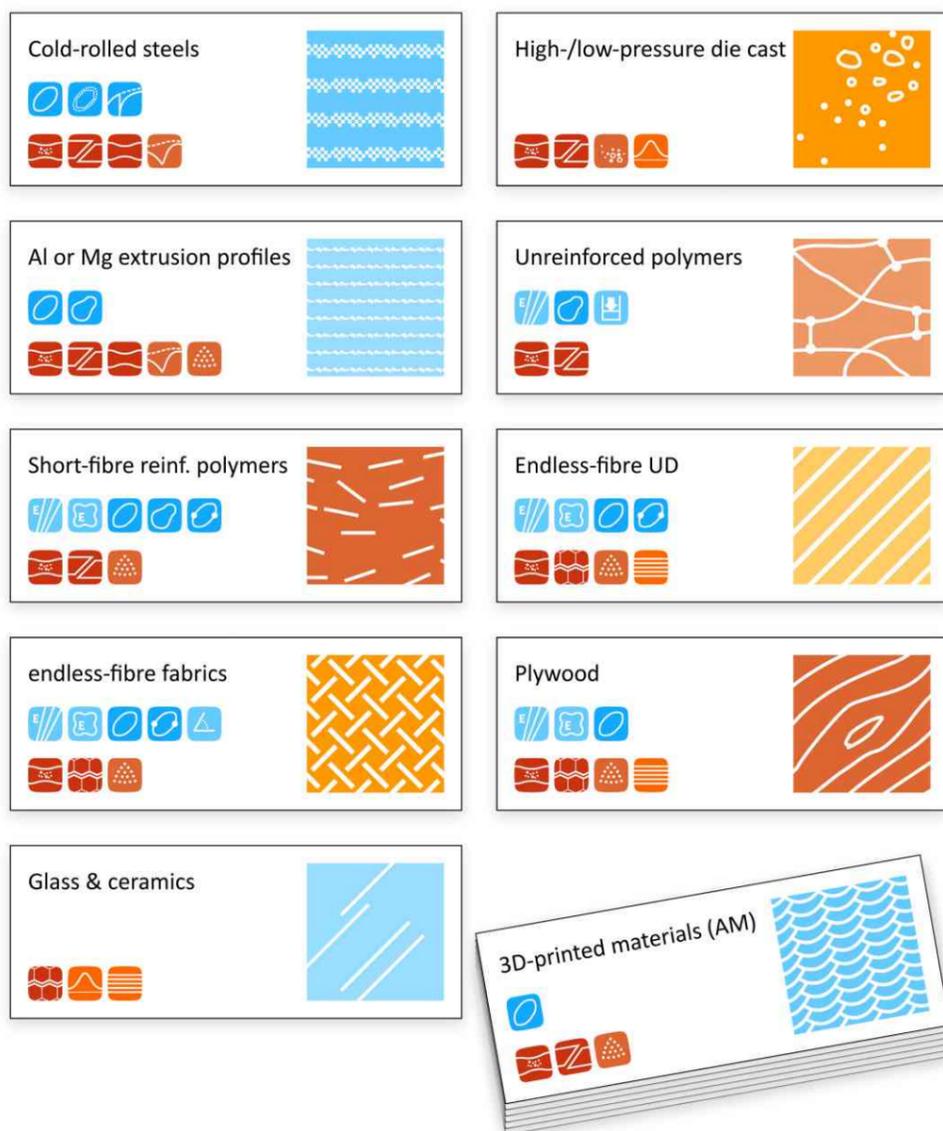
典型用户

Volvo, Ford, BMW, JLR, Mercedes-Benz, Autoliv, Novelis, Kirchhoff, Gestamp, Brose, Benteler, Mubea, Faurecia, Hyundai Mobis, Lear, Plastic Omnium, Alcan, Arcelor Mittal, ThyssenKrupp Steel, TATA Steel, Airbus等。

吉利, 比亚迪, 长城, 奇瑞, 东风日产, 长安汽车, 广汽研究院, 上汽通用五菱, 江淮汽车, 理想汽车, 集度, 小米, 滴滴, 零跑, 宁德时代, 蜂巢动力, 延锋国际, 海斯坦普等。

一个模型适合几乎所有材料

现代结构和汽车由多材料组成，从成本、性能、环保等角度出发遵循合适的材料用在合适的部位。MF GenYld+CrachFEM可以实现一个模型适用于几乎所有材料，通过模块化定义可以结合材料属性进行灵活组合，应用相关广泛的材料类型有冷轧钢（软钢、高强钢、热成形钢）、高压或低压铸铝、挤压铝或挤压镁合金、聚合物塑料、纤维增强塑料、连续纤维铺层复材、编织纤维复材、胶合板、玻璃、陶瓷、3D打印金属材料等。



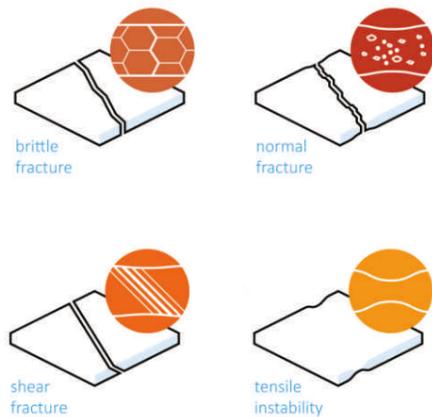
MF GenYld 材料塑性模型

高精度的断裂失效预测离不开准确的弹塑性模型，MF GenYld模型提供了多种塑性硬化准则，包括Swift, Ghosh, Hockett-Sherby等，支持多种各向同性和各向异性屈服准则，von Mises, Hill48, Hill90, Barlat89, Barlat2000, Dell2006, Vegter等。Anisotropic Hardening各向异性强化模型能够对屈服轨迹进行再修正，包括拉压不对称性修正、剪切弱化修正和等轴强化修正等，更加准确表征铸铝、挤压铝、聚合物塑料等材料的弹塑性力学行为。

		Strain hardening model							
		isotropic hardening	kinematic hardening	T/C asymmetry of orthotropy	non-associative flow rule	anisotropic hardening			
						T/C asymm.	shear waist	biaxial scaling	damage
Yield Locus	von Mises	core	opt.	shells					
	Hill 1948	core	opt.	shells					
	Hill 1990	core	opt.	shells					
	Barlat 1996	core	opt.	shells					
	Barlat, Lian	core	opt.	shells					
	Barlat 2000	core	opt.	shells					
	Barlat, Lege, Brem	core	opt.	shells					
	Dell 2006	core	opt.	shells					
	Vegter	core	opt.	shells					

- 支持弹性模量的各向异性描述，适用于纤维增强材料和复合材料等
- 支持塑性泊松比定义，更加准确描述塑料材料升温变形行为
- 具有种类齐全的各向同性和各向异性屈服准则
- 支持高应变率下绝热升温过程模拟
- 支持弹性模量的应变率效应描述，适用于非金属材料
- 塑性硬化模型能够考虑等向硬化、随动硬化以及包辛格效应
- 支持塑性硬化的各向异性定义或修正，适用于铸铝、聚合物塑料等
- 支持塑性硬化的应变率行为
- 支持温度相关性定义

CrachFEM材料失效模型



根据材料失效机理的差异，CrachFEM失效模型分为FLC颈缩失稳准则、正向断裂和剪切断裂准则、脆性应力失效准则四种类型。颈缩失稳主要用于壳单元，正向和剪切断裂支持壳单元和实体单元模拟。CrachFEM失效准则通过引入参数 β （适用于正向断裂）和 θ （适用于剪切断裂）描述不同应力状态下的失效应变，参数 β 与应力三轴度 η 和主应力比相关，参数 θ 与应力三轴度和剪应力比相关。在此基础上，用户通过少量典型应力状态的材料试验可以拟合和标定CrachFEM失效准则的变量参数，获得三维应力状态的断裂失效极限曲面，适用于壳单元和实体单元模拟。我们通常使用平面应力状态的断裂失效极限曲线，方便理解和交流。

Normal fracture $\epsilon^{**}(\beta)$

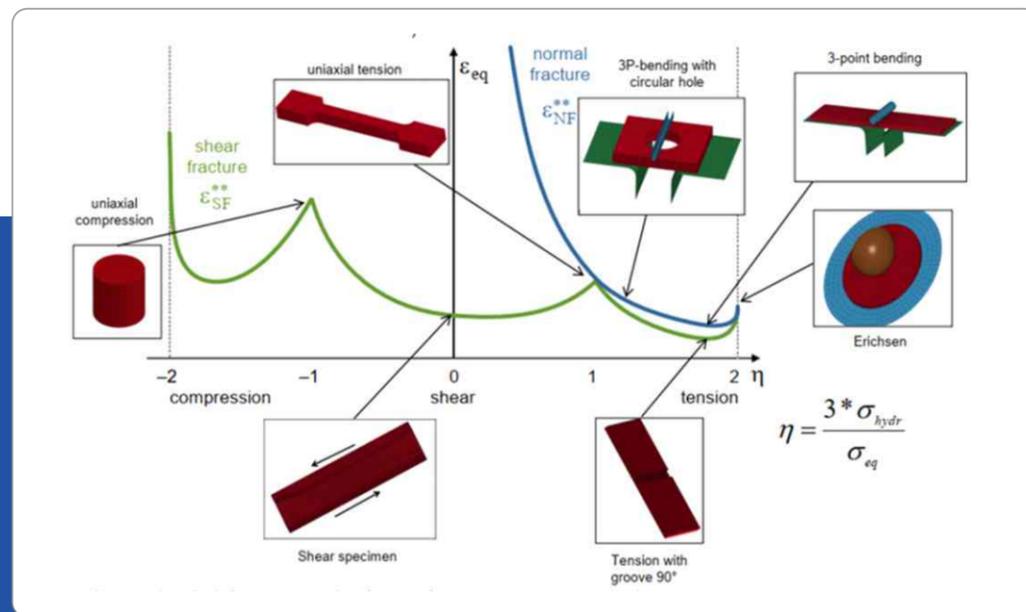
$$\epsilon_{eq}^{**} = d \cdot e^{q \cdot \beta}$$

$$\beta = \frac{1 - s_{NF} \cdot \eta}{v} \quad v = \frac{\sigma_1}{\sigma_M}$$

Shear fracture $\epsilon^{**}(\theta)$

$$\epsilon_{eq}^{**} = \frac{\epsilon_{SF}^{+} \sinh(f(\theta - \theta^-)) + \epsilon_{SF}^{-} \sinh(f(\theta^+ - \theta))}{\sinh(f(\theta^+ - \theta^-))}$$

$$\theta = \frac{1 - k_{SF} \cdot \eta}{w} \quad w = \frac{\tau_{max}}{\sigma_M}$$

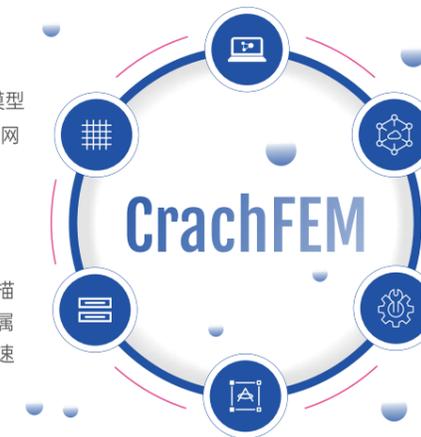


CrachFEM失效模型是一套经过工程验证的断裂失效准则，通过准确的材料模型和精细化建模保障碰撞仿真精度，不仅改善弹塑性变形模拟精度，也可以大幅提升材料断裂失效的预测置信度。CrachFEM失效模型覆盖了主流求解器的主要失效模型的所有功能，且使用了更加先进的算法功能提升失效预测精度，如Crach失稳计算、张量损伤累积、失效准则的各向异性 and 应变率相关性等等。CrachFEM失效准则以应变失效为主，近年来也新增了应力失效准则，根据复杂载荷应力状态判断材料失效，适用对象进一步扩展到玻璃等脆性材料和碳纤维复合材料的力学性能表征。

失效准则能够考虑正交各向异性，适用于挤压铝和玻纤增强复合材料，其断裂失效与材料方向直接相关

通过Crach算法的PIS后颈缩模型消除网格尺寸敏感性，不需要网格正则化修正

失效准则支持应变率效应描述，适用于铝合金和非金属材料，其断裂应变跟加载速率强相关

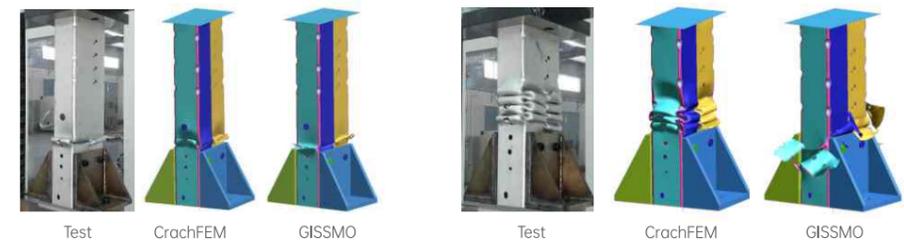
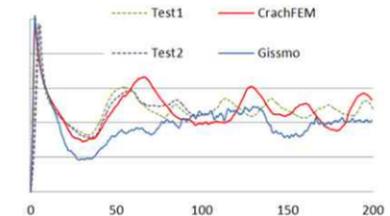


应变失效准则分类为正向失效曲面、剪切失效曲面、基于Crach算法的颈缩失稳

新增应力失效准则，扩大应用范畴

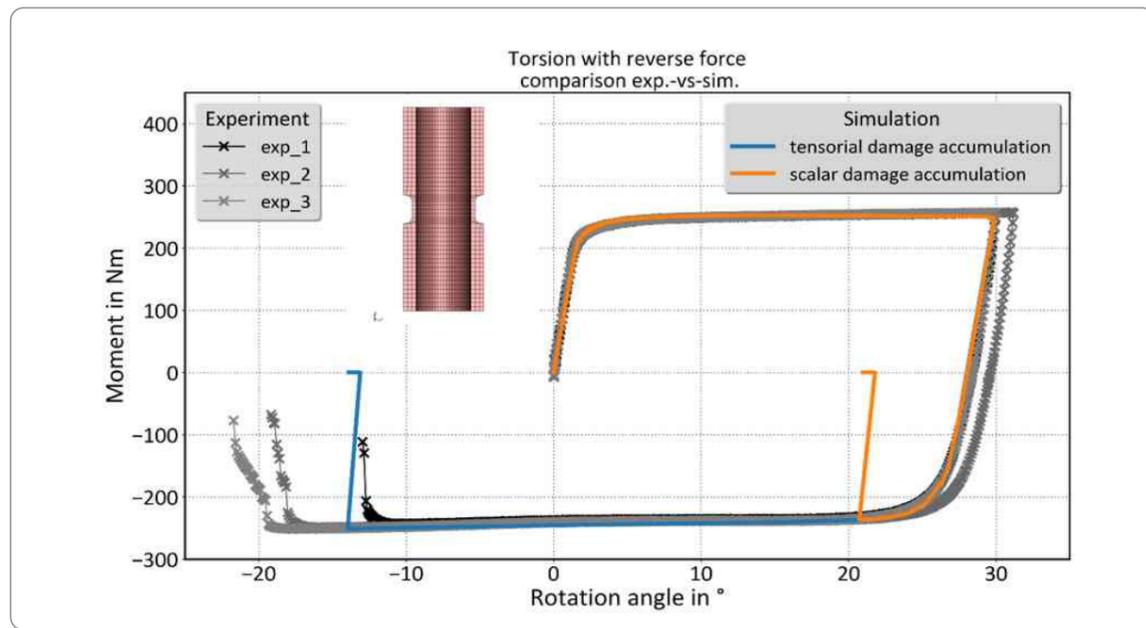
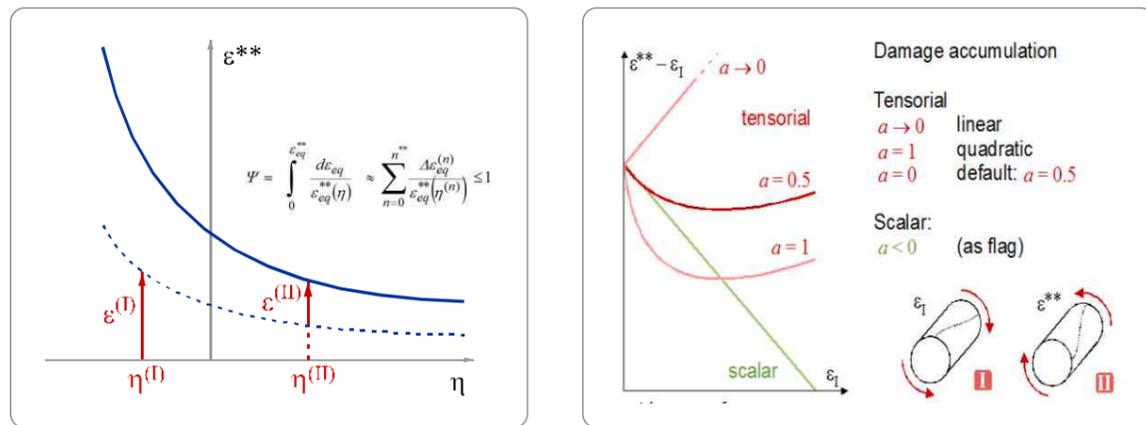
使用张量法计算损伤（塑性应变）累积，比传统标量法更加精确可靠

CrachFEM失效模型的一系列优势功能，使得材料在强非线性应变路径下的断裂失效预测可信度极高，钢板和挤压铝等金属材料发生断裂失效的预测可信度超过85%，铸铝和聚合物塑料及复合材料的失效预测可信度超过75%。



基于张量法的损伤累积计算

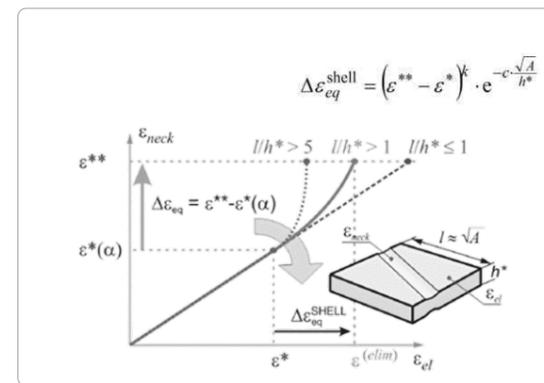
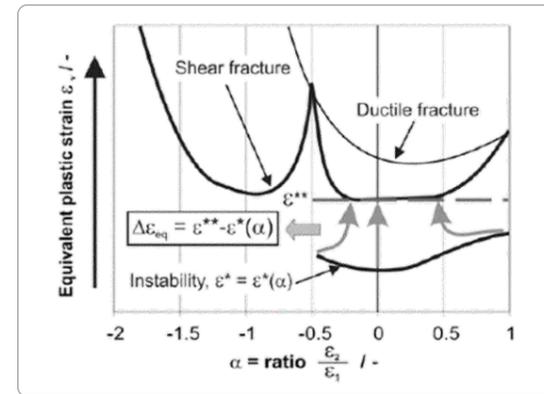
几乎所有求解器使用标量法计算损伤累积，在线性应变路径下该损伤累积方法是正确的，但在非线性应变路径下的断裂失效预测就会与实际试验不符（总体呈现出比试验更加容易发生断裂失效）。CrachFEM失效模型是唯一使用张量法计算损伤累积，能够考虑随动硬化和包辛格效应对材料性能的影响，更精准计算非线性应变路径加载下单元的损伤累积，90%碰撞载荷工况下材料失效仿真预测与试验吻合。所谓的非线性应变路径指单元受到外部载荷矢量方向变化（复杂加载条件）引起单元应力状态发生改变的情况。



Crach算法消除网格依赖性

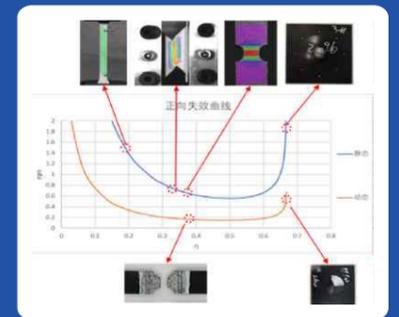
Crach算法使用了随动硬化准则，能够准确预测壳单元在非线性应变路径下的局部颈缩，考虑应变率效应的瞬态FLC更加合理模拟碰撞载荷的材料颈缩失稳。

CrachFEM失效模型使用PIS后颈缩模型预测单元发生颈缩失稳到断裂过程的失效计算，其应变增长原则与单元的面积（或网格尺寸）和厚度有关，也就是我们常说基于CrachFEM算法消除单元网格尺寸与断裂失效的依赖性，不要进行网格正则化修正。当然大多数失效是由于局部应力集中引起的，考虑碰撞断裂失效仿真情况下网格尺寸建议在1-4mm，过大网格会使单元应力平均化，比实际应力值偏小，相应的应变和塑性损伤累积计算也比实际低，从而无法合理预测单元失效。

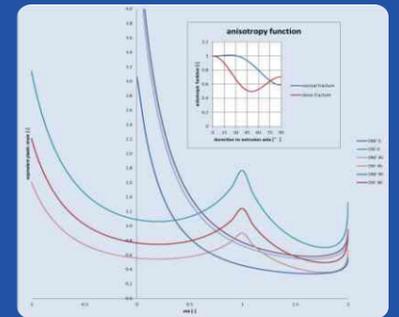


失效行为与应变率的相关性定义

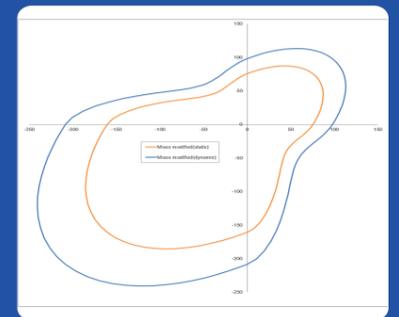
材料在不同应力状态下的断裂失效与应变率并不是呈等比例关系的，CrachFEM可以直接定义不同应变率下的失效极限曲面，损伤计算和失效预测能够直接兼顾应变率效应。同时也可以直接定义各向异性的失效准则，更好表征挤压铝和玻纤增强塑料等断裂行为。新增的应力失效准则也直接支持应变率相关性定义，进一步保障脆性材料断裂预测精度。



考虑应变率的失效定义



考虑各向异性的失效定义



考虑应变率的应力失效准则

Example: Generic input format

```

#
#User-Material
MF GenYld V-4.3: Advanced high strength steel (AHSS)
# ID DENSITY
1 7.8e-09
# FRELIM DTMIN NF VELSC RSTRAT RTEMP ENCRYPT INI
1.0e+6 50 0.01
# EL_YOUNG EL_POISS EL_BULKM EL_SHEAR EL_ORTHO EL_SHRCP TH_EXPAN ADIABAT
210000.0 0.3 172500. 79615.4 0.8333
# PL_HARDE PL_ORTHO PL_ISKIN PL_ASYMM PL_WAIST PL_BIAXF PL_COMPR PL_DAMAG
900110 900120
# NF_CURVE NF_PARAM NF_PCRT SF_CURVE SF_PARAM SF_PCRT NF_ORTHO SF_ORTHO
900130 900140
# CR_HARDE CR_ORTHO CR_ISKIN CR_PCRT CR_PARAM CR_CHECK GL_PARAM USERINIT
900150 900155 900156 900158 900157 900160
#
    
```

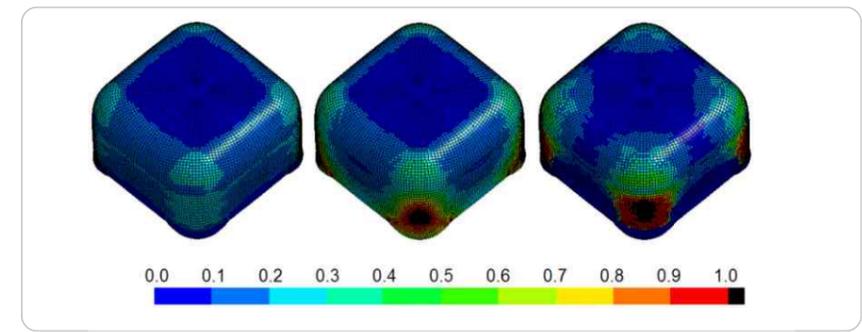
$$VELSC = \frac{V_{phys}}{V_{sim}}$$

	general properties	
	elastic properties	
	plasticity modules	
	fracture modules	
	instability modules	

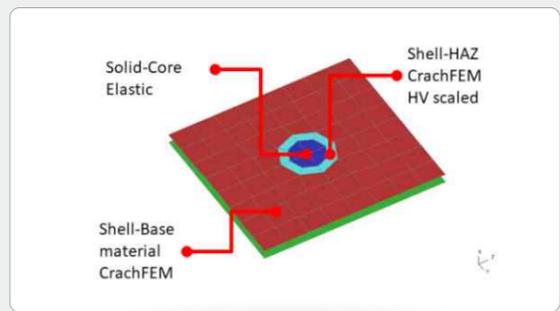
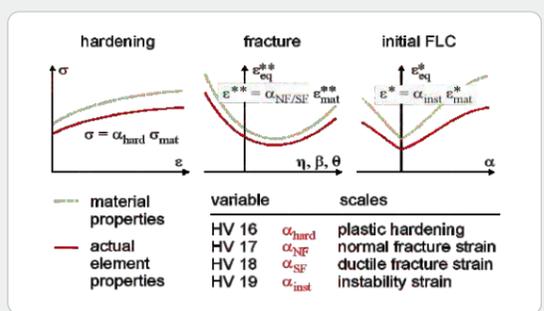
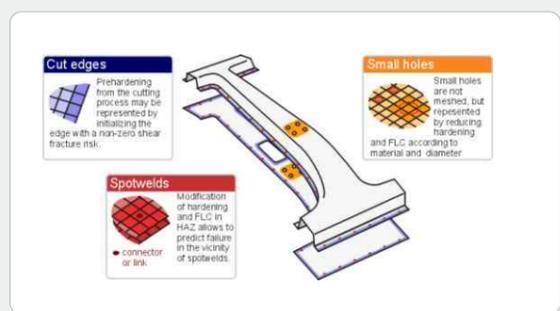
Curve 900111: Swift hardening law	Curve 910111: Sampled curve
1 -1	0 104.207
2 400	0.1 252.986
3 0.0012	0.15 274.139
4 0.2	0.2 290.259

MF GenYld + CrachFEM属于用户自定义材料本构模型，材料模型参数包括基本属性、弹性属性、塑性属性、正向/剪切失效属性、颈缩失稳属性，通过常数值、曲线和函数参数化进行定义。VELSC参数是一个非常实用的功能，通过设定试验和仿真速度的缩放系数，自动修正材料的应变率效应，适用于准静态和低速碰撞工况。这些工况由于试验加载速度很慢，通常仿真会提高加载速度，会人为引入应变率效应对仿真的影响。

CrachFEM失效模型软件为用户自定义本构模型，对工程师非常友好，无特殊使用门槛要求，工程师只需要在前处理定义时选择相应材料ID即可，当然也需要设置一些关键字以匹配计算速度、结果输出等。*DATABASE_EXTENT_BINARY是典型必要关键字，通过定义NEIPH和NEIPS设置实体和壳单元的额外历史变量信息输出，结果将存储在D3Plot结果文件。



- | | |
|----------------------------------|---------------------------------------|
| #1 : equivalent plastic strain | #7 : maximum instability risk |
| #2 : maximum failure risk | #8 : stress state for normal fracture |
| #3 : ductile normal failure risk | #9 : stress state for shear fracture |
| #4 : ductile shear fracture risk | #10 : normalized thickening rate |
| #5 : accurate instability risk | #11 : angle of principal strain |
| #6 : maximum instability risk | #12 : equivalent strain rate |



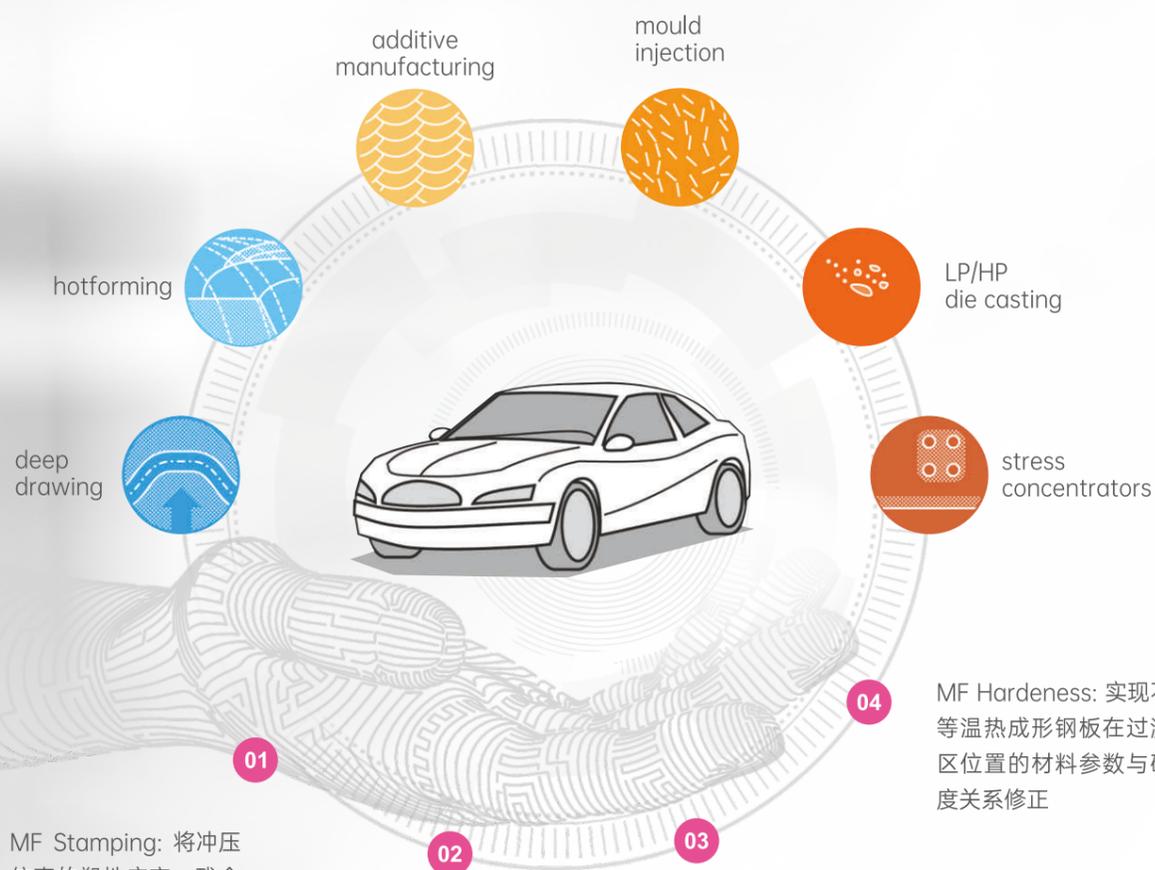
钣金材料加工过程会引起局部区域材料力学性能发生变化，如焊点热影响区、切边和开孔边缘等。CrachFEM用户可以在*Initial_Stress_Shell设置HV16-19的缩放系数，在钣金CrachFEM参数基础上对材料塑性硬化、正向失效、剪切失效和颈缩失稳进行修正定义。

MFView工具允许用户对材料CrachFEM卡片进行预编译，检查材料卡片准确性，尽早发现参数错误和兼容性，支持用户更加直接理解材料卡片参数的物理意义。

- 材料参数可视化
- 不同求解器材料卡片格式转换
- 材料ID和曲线ID重新编号
- 材料参数单位制转换MPa/GPa

考虑制造工艺的结果映射与模拟实现

随着CAE工程应用的深入，我们逐渐形成一个共识：如何在CAE仿真考虑制造工艺引起的材料或结构力学性能变化。MATFEM公司（CrachFEM失效模型软件开发者）结合工程实践也为CrachFEM用户提供了多种工艺映射和材料参数自动标定工具，针对年租64核以上用户可以免费使用。工艺映射和等效主要通过插值或缩放方式实现。

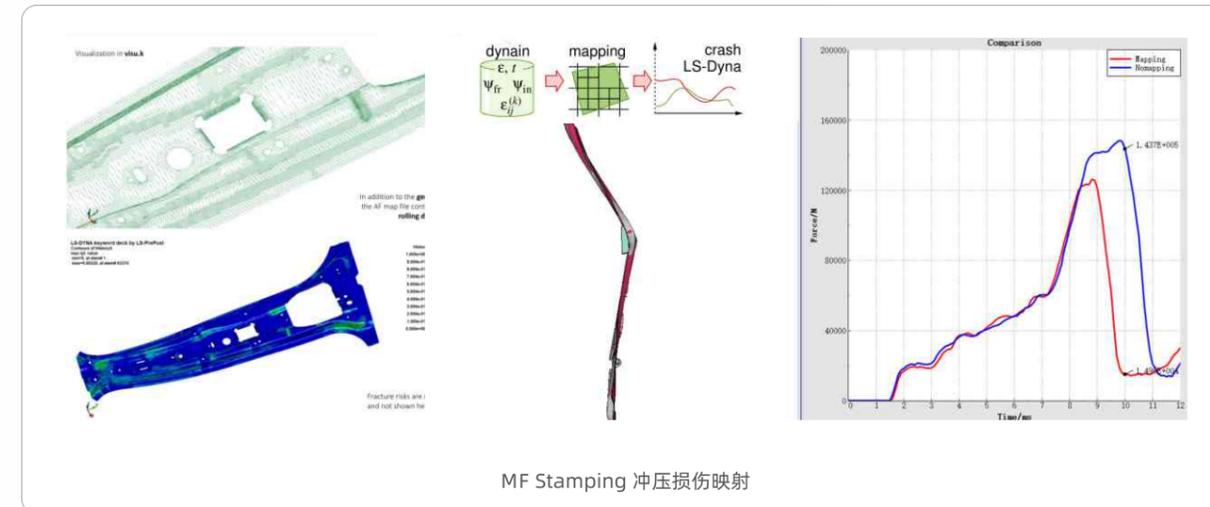


01 MF Stamping: 将冲压仿真的塑性应变、残余应力、厚度变化以及初始损伤值映射到碰撞模型，在传统冲压塑性硬化映射基础上重点实现了损伤值映射

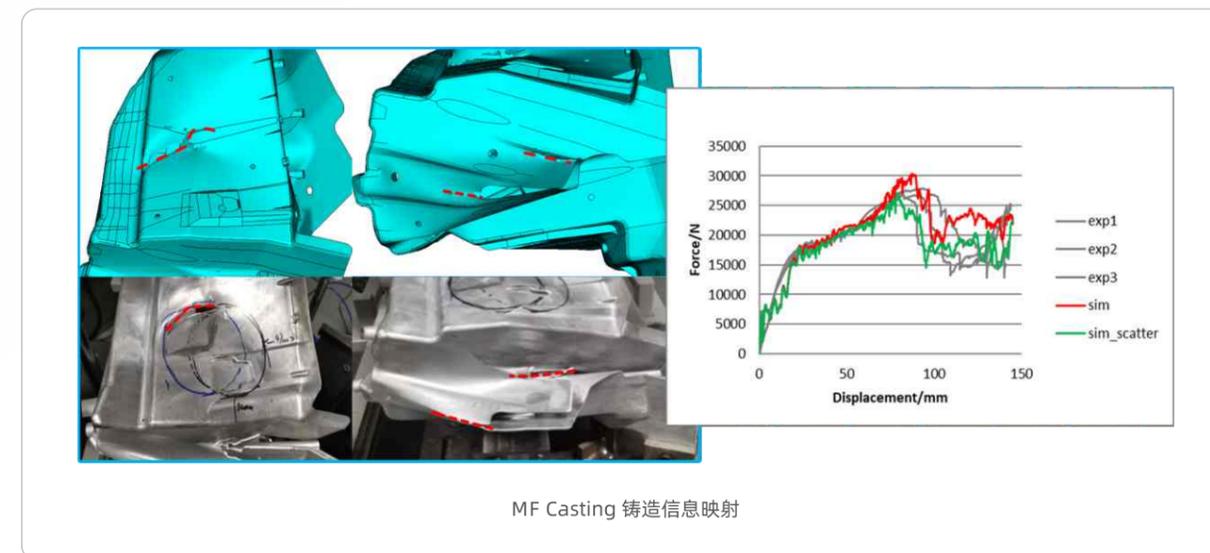
02 MF Casting: 将铸造缩孔缺陷以及铸造工艺（流动长度、凝固时间）引起材料性能不同的现象在碰撞模型进行自动修正和表征，特别适用于大型薄壁铸铝结构

03 MF Orient: 将注塑工艺参数映射到碰撞模型，实现各向异性弹塑性和断裂失效的模拟，如玻纤取向映射、熔接线映射等

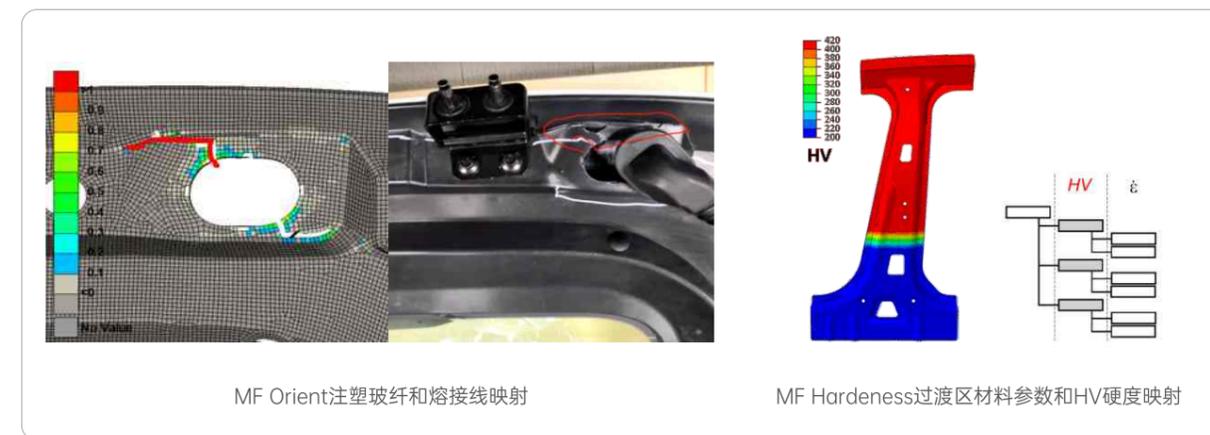
04 MF Hardness: 实现不等温热成形钢板在过渡区位置的材料参数与硬度关系修正



MF Stamping 冲压损伤映射



MF Casting 铸造信息映射



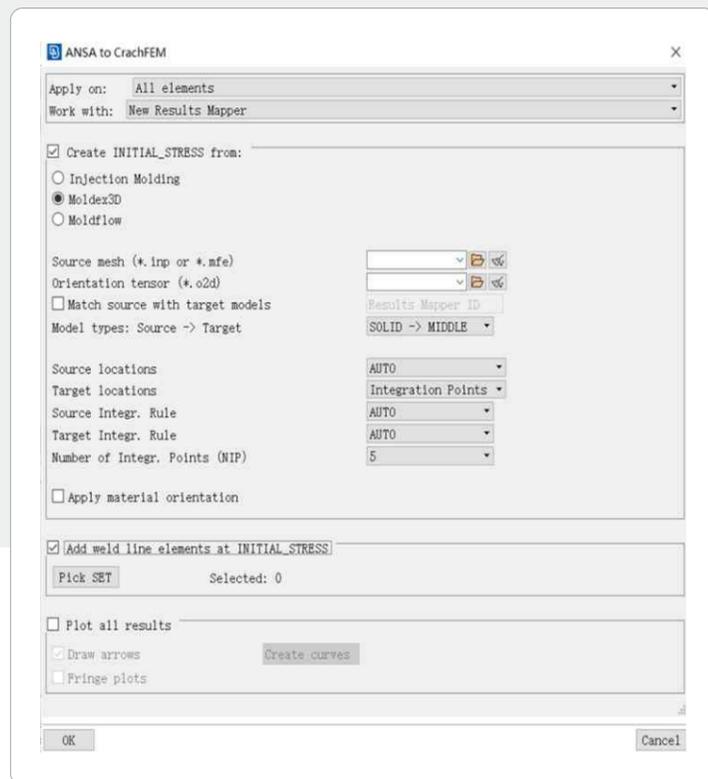
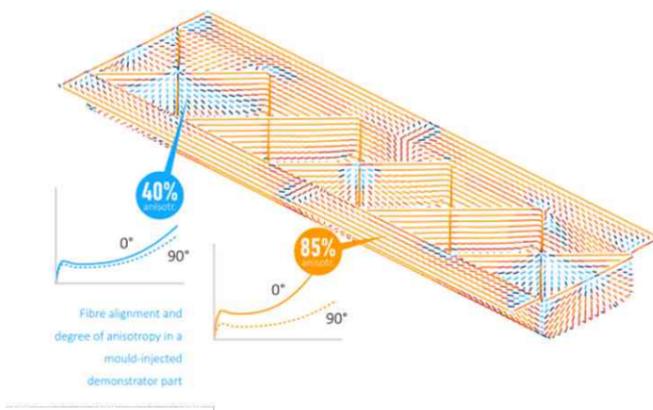
MF Orient 注塑玻纤和熔接线映射

MF Hardness 过渡区材料参数和HV硬度映射

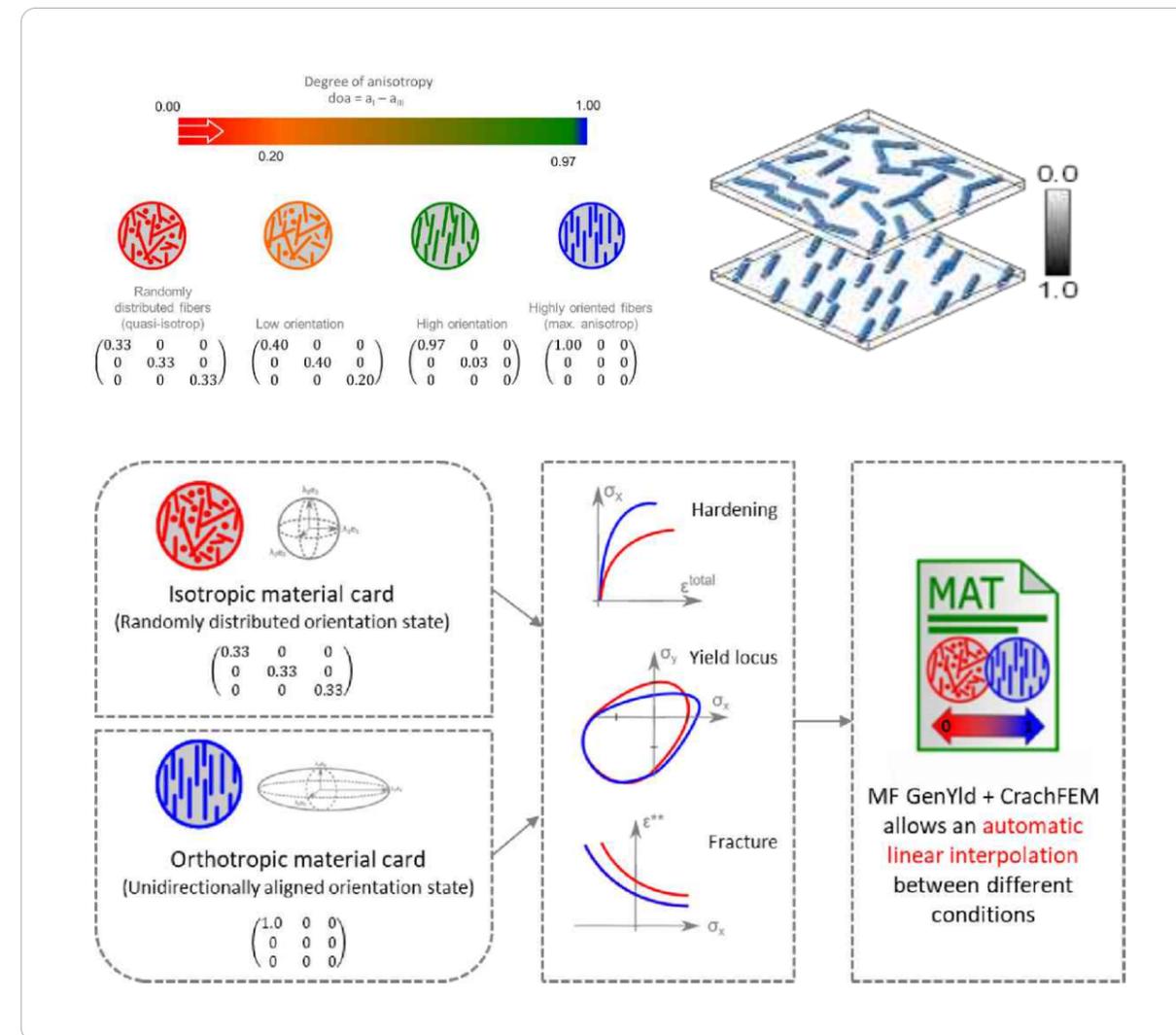
考虑注塑工艺映射的纤维增强材料失效模拟

玻纤增强热塑性材料广泛用于汽车前保和车辆内饰，在行人保护和乘员保护方面起着很重要的作用。注塑成型过程中，由于纤维取向受注塑工艺、纤维长度、模具形状等影响并非均匀分布或完全随机分布，注塑零件的材料力学性能呈现明显的各向异性。

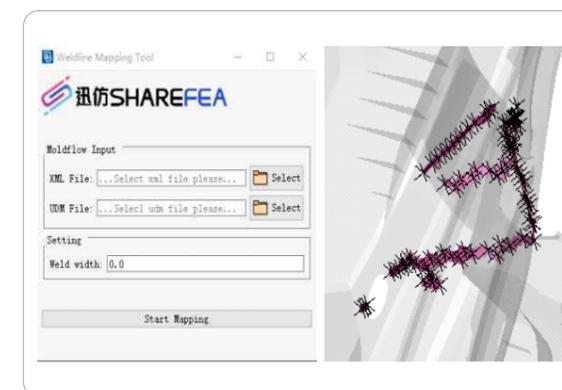
当纤维取向基本一致（85%）时，局部区域表现为正交各向异性；当纤维曲线偏向于随机分布（40%）时，局部区域呈现各向同性行为，从而不同区域的材料硬化和失效行为有明显差异。



我们引入各向异性系数描述注塑纤维零件不同区域的各向异性程度，通过插值实现玻纤取向与材料弹塑性和失效性能表征并利用MF-Orient映射到碰撞仿真模型。用户也可以使用ANSA软件自带模块实现玻纤映射功能（Plugins-Molding-ANSA to CrachFEM），主要支持Moldex3D和Moldflow结果。



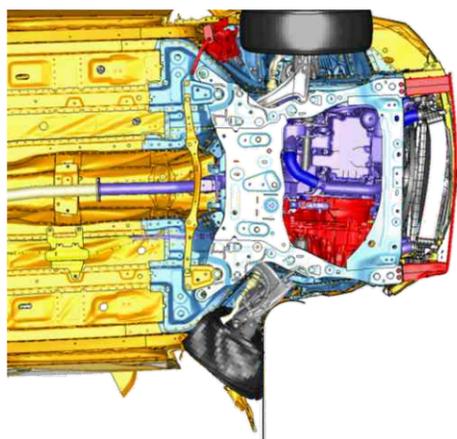
除了玻纤取向映射外，注塑结构的熔接线强度和韧性也会有30-50%下降，工艺映射也需要兼顾熔接线表征，现有商业软件在模流熔接线识别和壳单元映射方面有一定不足。迅仿也自主开发了一套熔接线自动映射工具（Weldline Mapping Tool），将注塑模流仿真生成的熔接线信息完全准确的转换到以壳单元模拟的碰撞模型中，避免人工操作的转换偏差，提高映射效率，支持仿真预测精度提升，已在多家企业用户通过测试认可。（发明专利：一种有限元分析中长玻纤增强材料的熔接线映射方法，在审专利号：2023100753429）



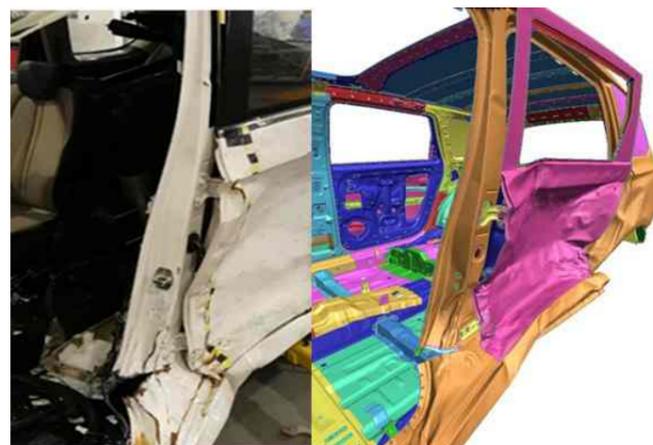
工程应用领域

CrachFEM失效模型软件适用于汽车、汽车零部件、材料、3C产品、家电、航空航天等行业用户，开展断裂失效预测，通过高精度仿真驱动数字化研发，减少物理试验数量和研发成本，缩短产品研发周期。随着C-NCAP和C-IASI等碰撞测评标准的升级，整车安全开发面临解决各类结构和连接的断裂失效风险，大量热成形钢以及轻质新材料和工艺的应用使得整车碰撞频繁发生断裂破坏问题，需要加强碰撞仿真，尤其是断裂失效预测精度，以应对逐渐压缩的研发周期和车型开发成本。典型应用方向有：

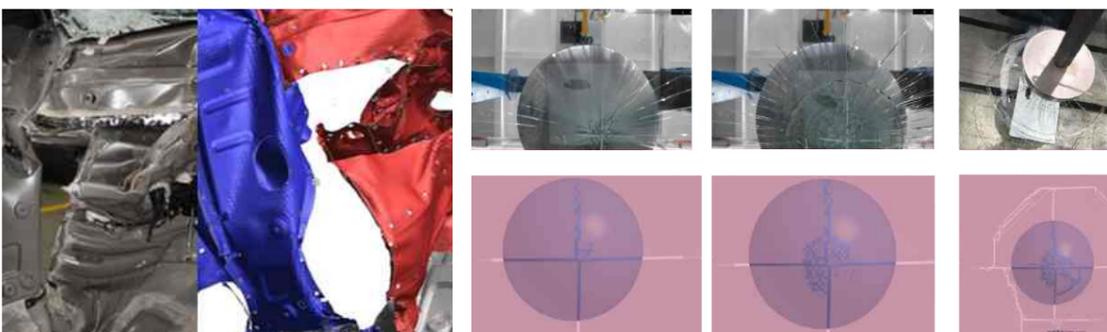
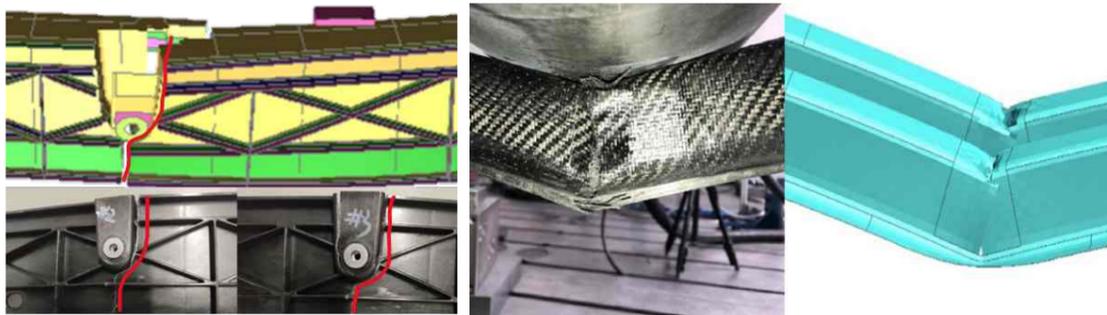
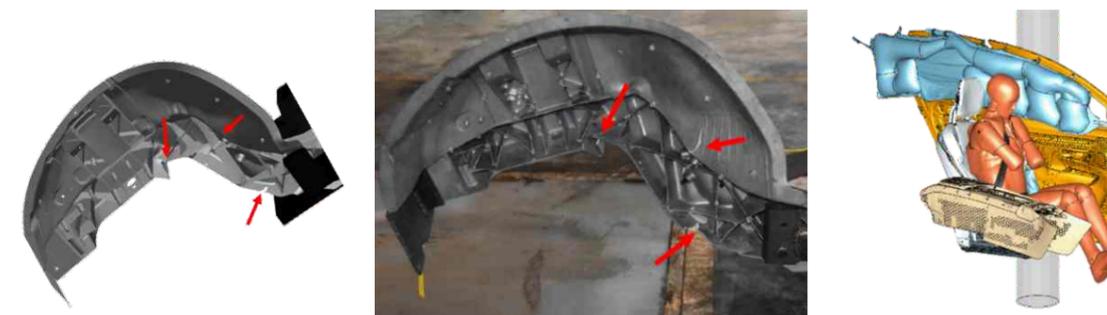
- 以热成形钢为主的车身结构和焊点失效预测，尤其是小偏置碰撞、侧面碰撞和侧面柱撞等严苛工况
- 挤压铝、高强钢和塑料总成的结构和连接失效模拟
- 一体式薄壁铸铝的碰撞失效预测，兼顾铸造工艺对不同区域材料力学性能影响
- 小偏置碰撞底盘结构和连接的断裂失效预测，如转向节、控制臂、车轮等
- 低速碰撞外饰结构总成（塑料为主）的失效模拟
- 以安全气囊虚拟标定为目标的中低速碰撞工况高精度材料和建模
- 整车高速碰撞对标以支持约束系统开发（对标获得高精度碰撞模型）
- 支持虚拟测评的内饰塑料和连接的碰撞失效预测
- 以行人保护和车顶压溃为目标的玻璃建模和失效模拟
- 玻纤增强塑料和碳纤维复合材料的建模和失效模拟
- 焊点、SPR、FDS、焊缝等连接的精细化建模和碰撞失效模拟



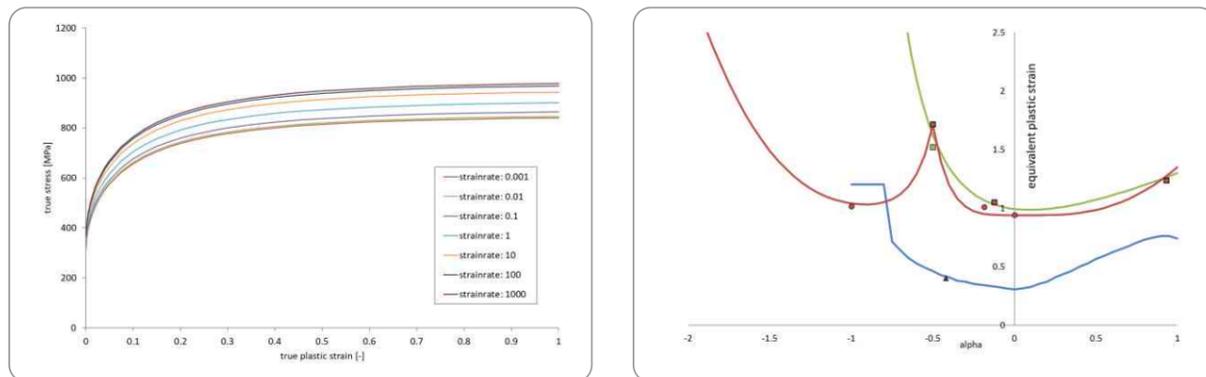
小偏置碰撞底盘失效模拟



热成形钢及焊点失效预测



CrachFEM材料失效数据库



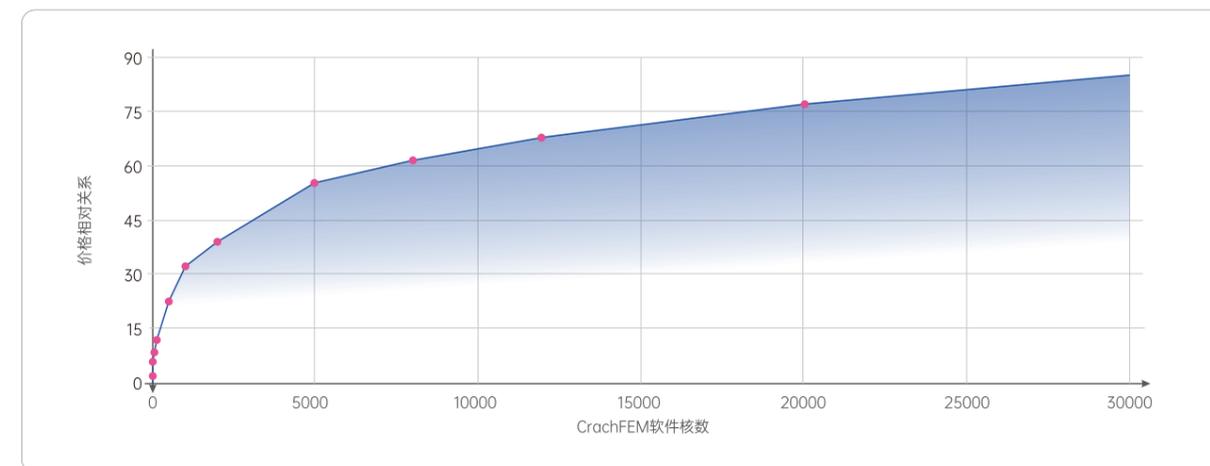
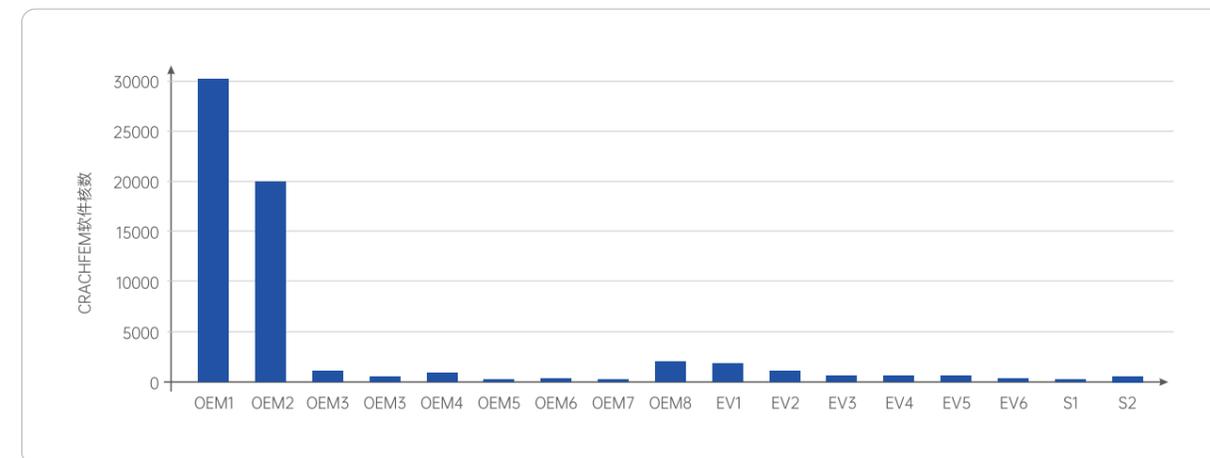
为节省CrachFEM失效模型软件用户在材料仿真卡片数据库建设的长期持续投入。迅仿每年坚持研发投入，建设满足行业用户应用需求的CrachFEM材料失效数据库，包括钢板、热成形钢、挤压铝、铸铝、铸铁、免热处理铝合金、聚合物塑料、玻纤增强塑料、碳纤维、玻璃以及来自用户项目应用需求的新材料等，支持用户低成本进行碰撞失效模拟。迅仿有规范化的材料卡片开发流程和验证标准，保障材料仿真卡片的可信度，也会在此基础上协助用户开展精细化建模指导，通过准确的材料模型和精细化建模促进高精度碰撞断裂失效预测。截止目前，材料仿真数据库有近百个材料卡片，同时每年约10个增幅扩充完善。

Usibor1500, Ductibor1000, PHS1500, PHS1800, DP590, DP780, DP980, DP1180, QP980, QP1180, CP980, CP780, 420L, 510L, 610L, 45#, 40Cr, HT250, QT450, QSTE500, HC420LA, HC550LA, SAPH440, B340LA, B210P1, DC03, DC06...

Aa5182, AA5754, AA6111, AA6016, AA6061, AA6063, AA6082, AA7003, 锻铝AA6082, A356, A380, ADC12, ADC03, ZL111, AlSi10MnMg, C611, 多种免热处理铝合金...

PP, PP-TD10, PP-TD20, PP-TD30, PP-TD40, PMMA, SMC, PP+EPDM-TD20, POM, ABS, PC, PC/ABS, PP+LGF40, PP+LGF30, PP+GF30, PA6, PA6+GF30, PA66, PA66+GF30...

CrachFEM失效模型软件主要支持Linux MPP并行计算，完全支持显式动力学求解，仅部分支持隐式计算功能。随着CPU核数的增加，软件价格涨幅依次减少，以500核为基准，核数每增加一倍，价格涨幅约20-30%，比如3000核年租价格是500核的1.8倍，即核数扩大了6倍，价格仅涨幅80%，有利于用户以较低成本开展大规模应用CrachFEM失效模型软件。



选择CrachFEM失效模型软件有效提升碰撞断裂失效预测精度和能力，工程开发阶段发现设计缺陷并尽早给予改善，减少无止境的优化方案迭代工作，降低仿真工程师的工作强度，特别是针对小偏置碰撞和侧面大壁障碰撞等恶劣工况的结构耐撞性开发，进而显著改善碰撞安全开发的执行效率，团队人员有更多精力投入仿真建模合理性分析、设计方案优化、新材料新工艺应用、创新结构开发、成本评估、项目沟通与管理协调等一系列与车型研发有关的工作，强化企业数字化研发设计水平。

高精度碰撞断裂失效模拟能力也可以促进前期设计方案的可靠性，确保碰撞试验验证的高通过率，减少碰撞试验次数和试验样车准备数量（预估减少1/3试验或更多），更好地去应对车型开发周期压缩所带来的挑战，对于多款车型同步研发的企业，直接经济效益更加明显。