

团 体 标 准

T/CIC 433—2025

电动乘用车动力电池系统机械滥用有限元 仿真通用方法

Finite element analysis method for mechanical abuse of electric vehicles traction
battery systems

2025 - 12 - 25 发布

2025 - 12 - 25 实施

中国工业合作协会 发布

目 次

前言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
3.1	1
3.2	1
4 仿真流程	1
5 建模内容	1
5.1 仿真目标确定	2
5.2 实施方案制定	2
5.3 仿真工具选择	2
5.4 仿真实施	2
6 结果评估	6
6.1 评估方法	6
6.2 评估过程	6
7 结果输出	7
7.1 数据输出选择	7
8 报告撰写	7
附录 A（资料性附录） 电动乘用车动力电池系统机械滥用仿真流程、参数参考及案例	8

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国工业合作协会仿真技术产业分会提出。

本文件由中国工业合作协会归口。

本文件起草单位：中国汽车工程研究院股份有限公司、重庆大学、欣旺达动力科技股份有限公司、浙江凌骐能源科技有限公司、武汉科技大学、江铃汽车股份有限公司、三一重工股份有限公司、中汽院新能源科技有限公司、应急管理部天津消防研究所、重庆麓泱时代科技有限公司、重庆理工大学、重庆弗迪电池研究院有限公司、重庆交通大学、河北工业大学、北京华汽工程技术研究院。

本文件主要起草人：鲍欢欢、邓昕晨、刘冰河、马英、郗永军、邱志军、肖辉辉、刘玥、汪朝晖、刘豪、龚皓晖、赵志伟、王明博、苏晓佳、郑正鼎、张新华、谭坚、张志红、杨晓晖、张良、刘琦、林春景、雷松、詹振飞、周思达、庞艳辉、刘彦青、冯硕朋、刘敏。

电动乘用车动力电池系统机械滥用有限元仿真通用方法

1 范围

本文件规定了电动乘用车的动力电池系统在挤压、底部撞击、刮底等机械滥用工况下的仿真通用方法，包括几何处理、网格控制、边界条件处理、后处理等技术处理内容。

本文件适用于电动乘用车的动力电池系统，其他类型和工况参照执行。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改版）适用于本文件。

GB/T 19596-2017 电动汽车术语

GB 38031-2025 电动汽车用动力蓄电池安全要求

GB/T 33582-2017 机械产品结构有限元力学分析通用规则

T/CSAE 244-2021 纯电动乘用车底部抗碰撞能力要求及试验方法

3 术语和定义

GB/T 19596-2017和GB/T 33582-2017界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

机械滥用 mechanical abuse

动力电池系统在受到外部机械载荷（如底部撞击和挤压等）作用时，可能引发的结构变形或失效问题。

3.2

有限元建模 finite element modeling

构建有限元模型的过程，包括几何模型构建和（或）处理、材料属性定义、网格划分、边界条件施加等步骤。

[来源：GB/T 33582—2017, 3.1]

4 仿真流程

电动乘用车动力电池系统机械滥用仿真主要包括仿真目标确定、实施方案制定、仿真工具选择、仿真实施（几何模型处理、网格划分、边界条件处理、工程特性检查、计算）、结果评估、结果输出、报告撰写等内容，具体参见附录A。

5 建模内容

5.1 仿真目标确定

本标准推荐目标为电动乘用车动力电池系统在机械滥用工况下的有限元仿真,涉及的工况主要包括但不限于挤压、底部撞击、刮底等工况。针对其他类型和工况,可参照本标准执行。

5.2 实施方案制定

依据仿真目标制定仿真技术方案,包括仿真工具选择、几何模型处理、网格划分、网格质量检查、材料属性设置、边界条件处理、工程特性检查、计算等内容。

5.3 仿真工具选择

依据实施方案,选择适宜的仿真软件与工具。选择时应综合考虑以下因素:

- a) 硬件配置。仿真所需硬件配置推荐采用至少2颗高性能多核处理器,核心总数不少于64物理核心,内存不低于512GB,存储容量不低于1TB。
- b) 求解器能力。软件求解器应能有效支持显式动力学分析(用于底部撞击等瞬态工况)和隐式分析(用于准静态挤压等工况),并具备处理大变形、材料失效和接触非线性问题的能力。
- c) 材料模型库。软件应提供丰富、准确的材料模型库,尤其应包含适用于金属、塑料、弹性体、泡沫等电池系统常见材料的弹塑性、断裂、应变率相关等本构模型。
- d) 前处理功能。软件应具备强大的几何清理、简化及中面抽取功能,支持各类单元类型(梁、壳、实体)的网格划分,并提供高效的网格质量检查与控制工具。可选择功能强大的独立前处理软件,处理完毕后导入其他仿真软件中进行后续流程。
- e) 接触定义能力。应能够便捷、准确地定义和管理模型中各种部件之间复杂的接触关系,包括但不限于自接触、面面接触等,以确保在巨大变形下计算的稳定性。
- f) 后处理与可视化。软件应能有效输出和可视化各类数据,包括但不限于变形、应力/应变分布、能量转化、力-位移曲线等,并支持动画生成。
- g) 计算效率与稳定性。在保证计算精度的前提下,宜优先选择计算效率高、算法稳定性好的软件,以应对大规模模型的求解需求。

5.4 仿真实施

5.4.1 几何模型处理

电动乘用车动力电池系统的基本结构包括:电池单体、电池模组、电池包、电池管理系统、热管理系统、电气连接件、结构件、安全防护装置和通信与监控系统等。

5.4.1.1 构建原则

几何模型应简洁准确地表达动力电池系统的结构设计信息,在满足要求的情况下,尽量使模型简化。

- a) 电池单体。推荐采用局部精细化模型,即电池单体承载的一侧建立各组分子模型,另一侧采用均质化模型。细致模型在混合模型中的占比可根据仿真需求合理变化,关注电池单体中组分的失效时,细致模型的占比应至少能覆盖单体电池的形变量,不关注组分失效则可直接采用均质化模型。
- b) 电池模组。处于加载区域的模组,推荐对所有电池单体进行局部精细化建模,而非加载区域的模组的电池单体简化为电池壳和均质化电芯。
- c) 电池包及电池系统。在确保关注部位有限元分析精度的前提下,推荐简化电池包及电池系统结构的棱角、小凸台、小凹槽等几何模型细节特征。
- d) 零部件。如电气部件、铜排、防爆阀等,可根据需要进行细化。
- e) 胶粘、焊缝。如需关注粘胶、焊缝的机械失效行为,其位置应按照实际几何尺寸、连接关系与空间位置进行建模。其建模方式与推荐如下:

胶粘连接建模。方式一（推荐）：采用实体单元对胶层进行精细化建模，并赋予其具备失效参数的弹塑性或内聚力模型材料属性。此法可较准确地模拟胶层的应力分布、塑性行为及剥离失效过程。方式二（简化）：当胶层较薄或非重点关注区域时，可采用粘性接触来模拟胶接行为，通过定义接触面的法向和切向失效准则来替代实体胶层。选择原则：当需分析胶体自身的失效及其对连接性能的影响时，宜采用方式一；当主要关注被连接件的力学行为时，可采用方式二。

焊缝连接建模。方式一（精细化）：建立焊缝实体几何模型并划分六面体或四面体网格，材料属性需定义与母材和热影响区相匹配的弹塑性及失效参数。此法精度高，但建模和计算成本大。方式二（高效）：采用梁单元或刚性单元连接被焊部件。此法适用于主要传递载荷、且焊缝本身不是预期失效点的场景，计算效率高。方式三（通用）：采用ACM（Area Contact Method）或Spot Weld 等专用连接单元。此类单元基于焊缝尺寸和材料属性，可高效模拟焊缝的力学行为及其失效。选择原则：在底部撞击、挤压等可能导致焊缝撕裂的滥用工况下，宜优先采用方式一或方式三；在总体刚度分析或焊缝非风险点时，可采用方式二。

5.4.1.2 建模方式

几何模型的构建，应符合以下要求：

- a) 几何模型的命名应采用软件可识别的字符，并保持唯一性。
- b) 几何模型宜按1:1的比例关系建立。
- c) 细长比大于8的结构，宜选取中间轴线构建。
- d) 典型结构尺寸与壁厚比值大于10的结构，宜选取中面构建，例如电池壳等。
- e) 不适合采用线、面构建的结构以及结构的关键部位，应采用实体构建。

5.4.2 网格处理

5.4.2.1 单元类型选择

单元类型的选择应能反映不同部件的结构形式，有限元单元类型包括零维单元（如质量单元）、一维单元（如刚性单元、杆单元、梁单元）、二维单元（如壳单元）、三维单元（如体单元）。建模时应根据结构的几何特点及需求，合理选择单元类型。

5.4.2.2 单元阶次选择

a) 结构形状不规则、变形和应力分布复杂时宜选用高阶单元，即使用二次或更高次函数描述边界的单元。

b) 计算精度要求高的区域宜选用高阶单元，精度要求低的可选用低阶单元，即使用一次函数描述边界的单元。

c) 不同阶次单元的连接位置应使用过渡单元或多点约束等。

5.4.2.3 网格疏密控制

a) 结构变化大、曲面曲率变化大、载荷变化大或不同材料连接的部位应进行细化。

b) 粗细网格之间应有足够的单元进行过渡，避免相邻单元的质量和刚度差别太大。

c) 应力响应关注区域的网格密度应大于位移响应关注区域的网格密度。

d) 主承力方向的单元尺寸应较小，垂直于该方向的单元在满足质量要求时可以将尺寸稍作放大。

5.4.2.4 网格划分

a) 应保留主要的几何轮廓线，网格应与几何轮廓保持基本一致。

b) 对于实体单元网格，避免单排单元网格出现，在结构厚度方向上应确保三层以上。

c) 对称结构宜采用对称网格。

5.4.2.5 网格检查

划分网格时，应对网格单元进行检查，具体检查内容及要求如下：

a) 模型中不应存在畸变网格，网格检查的主要参数包括单元方向、长宽比、翘曲度、偏斜度、内角等方面。网格划分时，上述参数推荐的量化数值要求参见附录 A.2。

b) 保证结构重点关注区域的单元高质量，非重点关注区域的单元质量可适当降低。

5.4.3 材料属性设置

a) 材料属性单位应与几何模型单位一致。

b) 材料属性输入信息应准确完整，能准确表达结构的刚度、质量和阻尼特性。

c) 经过试验验证的材料属性信息宜作为数据积累，为材料属性设置作参考。

d) 非金属与连接材料设置推荐。

胶粘材料。宜采用弹塑性模型或内聚力模型进行模拟。材料参数除弹性模量、泊松比外，应重点关注拉伸强度、剪切强度、模式混合下的断裂韧性等失效参数。

焊缝材料。宜根据母材属性并考虑热影响区的影响进行设置，关键参数包括屈服强度、硬化参数和失效应变。失效准则可参考母材但需根据焊接工艺进行修正。

5.4.4 边界条件处理

5.4.4.1 约束

a) 动力电池系统有限元模型约束施加应符合动力电池系统在整车中的实际约束状态，以确保模型能够真实反映在整车情景下电池系统在实际应用中的受力状态。

b) 根据约束类型选择施加方式。

注：固支应选择全部自由度约束；铰支应选择平动自由度约束；对称结构应选择对称或反对称约束。

c) 约束区域应能准确反映实际约束情况。应避免单点约束，以防止应力集中；若实际约束区域小于一个单元时，应约束四个以上节点或细化网格。

5.4.4.2 载荷

a) 挤压工况。根据GB 38031-2025的要求，挤压板的形状、尺寸有两种：如图1所示的半径 75 mm 的半圆柱体，其长度 L 大于动力电池系统高度，但不超过 1 m；或者如图2所示尺寸为 600 mm×600 mm（长×宽）或更小，三个半圆柱体半径为 75 mm，半圆柱体间距 30 mm。挤压方向包括 x 方向和 y 方向（汽车行驶方向为 x 轴方向，另一垂直于行驶方向的水平方向为 y 轴方向）挤压速度不大于 2 mm/s，挤压力达到 100 kN或者挤压变形量达到挤压方向的整体尺寸的30%时停止挤压。

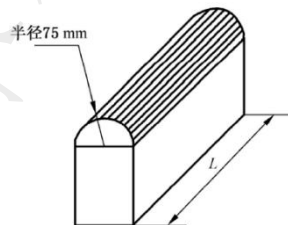


图1 挤压板形式一示意图

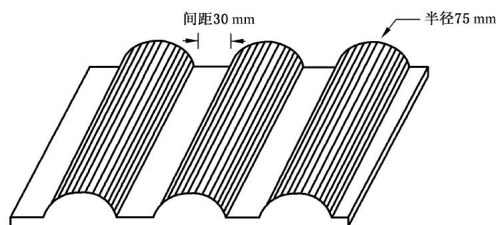


图2 挤压板形式二示意图

b) 底部撞击工况。如图3所示，冲击球直径为 30 mm，材质为#45钢，冲击方向沿 z 方向垂直向上，以动力电池包整车安装点的几何中心为原点、在半径 240 mm水平区域以内，根据主机厂提供的电池包或系统布置示意图选定一点进行撞击，冲击能量不低于 150 J。

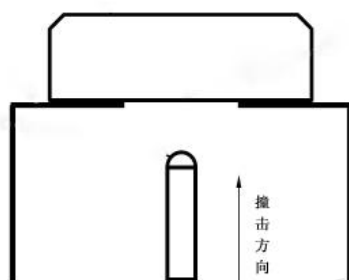


图3 底部撞击示意图

c) 刮底工况。刮底工装形式如图4所示，撞击面为直径 150 mm 的实心半球，材质为#45钢；以动力电池包整车安装点的几何中心为原点、在半径 240 mm 水平区域以内选定一点，选择该点沿 x 方向进行刮底测试，根据主机厂提供的电池包或系统布置示意图选择一点作为刮底初始对准碰撞位置；赋予刮底工装初始速度 30 km/h。

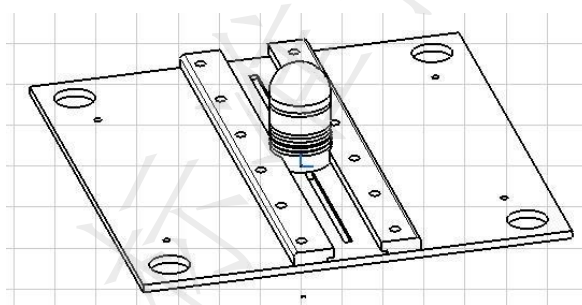


图4 刮底工装

5.4.5 工程特性检查

模型建立完成后，应对有限元模型进行工程特性检查，具体检查内容及要求如下：

- a) 材料参数检查。依据动力电池系统结构设计时的材料特性，对各部件的材料参数进行复核，检查材料参数是否与设计一致。
- b) 单元类型检查。依据动力电池系统的几何特点、分析需求和装配方式，对单元类型进行检查，检查单元类型的选择是否与结构形式和连接方式一致。
- c) 约束检查。依据动力电池系统各部件的连接方式，对约束进行检查，检查约束是否与安装条件一致。
- d) 载荷检查。依据动力电池系统结构工作载荷条件，对载荷进行检查，检查载荷类型、载荷作用对象等是否与工作载荷条件一致。

5.4.6 计算

5.4.6.1 求解器设置

挤压工况涉及大变形、接触非线性和可能的材料失效，底部碰撞和刮底工况涉及动态、高速冲击过程，因此三种工况均推荐选择显式动力学求解器。

5.4.6.2 时间步长

时间步长 (Δt) 由模型最小单元尺寸 L_{\min} 和材料波速 c (声速) 决定：

$$\Delta t \leq \frac{L_{\min}}{c}, c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

其中， E 是杨氏模量， ρ 是密度。

典型时间步长推荐值：

- a) 对于底部撞击和刮底工况的时间步长，通常为 $1 \times 10^{-8} \text{ s}$ 至 $1 \times 10^{-6} \text{ s}$ 。
- b) 对于挤压工况，准静态分析的时间步长可适当增大，通常为 $1 \times 10^{-3} \text{ s}$ 至 $1 \times 10^{-2} \text{ s}$ ；动态的时间步长与底部撞击工况类似，通常为 $1 \times 10^{-8} \text{ s}$ 至 $1 \times 10^{-6} \text{ s}$ 。

6 结果评估

6.1 评估方法

6.1.1 表象评估法

通过结果表象进行定性评估，具体原则如下：

- a) 检查模型的收敛性。
- b) 分析应力集中位置的合理性。
- c) 模型有效性验证。在开展仿真结果分析前，需对仿真模型的动态响应进行系统性验证，重点关注以下方面：

结构变形合理性。检查动力电池系统在碰撞过程中的变形模式，确保电池模组、壳体及内部组件的受力与变形处于预期范围内。若出现非物理性变形（如局部穿透、过度扭曲等），则表明模型参数或边界条件存在异常。

能量平衡验证。仿真过程中需严格遵循能量守恒定律，具体表现为系统内能随冲击进程单调递增，动能随变形耗散逐步衰减，总能量（内能+动能+其他耗散）曲线平滑且无突变。

沙漏能量控制。沙漏能量占比应满足一般工况下不超过总能量的5%~10%，高精度要求或复杂模型可进一步降低至5%以下。若沙漏能量超标，需排查网格质量、单元类型（如优先采用减缩积分单元）或接触算法设置是否合理。

异常诊断。若上述指标超出限值，可能存在的原因有网格尺寸与变形梯度不匹配，材料本构模型或失效准则参数失准，接触定义不完善（如穿透、未激活等）。

- d) 确认模型有效性后，电池包在机械滥用下的安全性评估为关键部件材料的失效行为，失效行为定义具体参见附录A.3。

6.1.2 数值评估法

通过多次试算，系统地调整有限元模型的位移边界、接触定义、网格密度及材料模型参数等，并对关键输出量（如最大等效应力、侵入量、内能等）进行数值评估，以判定分析结果的可靠性。

评估结果可靠的收敛性判据推荐为：当连续三次或以上试算的关键输出量之间的相对误差稳定在可接受的工程容差范围内（例如，不大于5%），可认为计算结果已趋于稳定，模型可靠。否则，应继续优化模型并重新计算。

6.1.3 物理样机法

进行物理样机试验，对比有限元分析结果和试验结果，如偏差较大，以试验结果为依据修正有限元分析模型重新计算后评估。

6.2 评估过程

在动力电池系统机械滥用的有限元分析中，应采用表象和数值两种评估方法对分析结果进行评价，必要时也可以采用物理样机法进行评估。评估后，如果分析结果与结构实际状态存在偏差，需要根据情况对有限元模型的单元类型、阶次、网格尺寸、材料属性及边界条件进行修正，并重新计算和评估，直到结果满足评估要求。

7 结果输出

7.1 数据选择

为验证仿真模型的有效性和保证结果的可追溯性，应输出并保存以下关键过程与结果数据：

- a) 模型信息：包括最终的有限元网格模型文件、材料属性列表、单元类型与数量统计。
- b) 边界条件信息：包括施加的约束、载荷（力、速度、能量）的详细定义。
- c) 求解信息：包括求解器类型、时间步长、总计算时间、能量平衡（沙漏能、内能、动能等）数据。
- d) 结果数据：包括整体结构变形云图与动画，应力、应变云图，关键测点的力-位移、力-时间、位移-时间曲线，电池包内部短路风险区域标识（如根据单元变形量或应变阈值判断）。若包含失效分析，应输出失效单元分布及失效过程。

所有输出数据应完整、准确，并能够支持规定的评估方法。

8 报告撰写

仿真分析完成后，应撰写正式的仿真分析报告。报告应结构完整、数据翔实、结论明确。报告内容至少应包括以下要素：

- a) 报告摘要：概述仿真目标、主要分析过程和关键结论。
- b) 项目背景与仿真目标：明确本次分析需解决的问题和验证的指标。
- c) 仿真模型描述：几何模型简化说明；网格划分策略与质量检查结果；材料模型与参数，特别说明关键连接件（胶粘、焊缝）和电池组分的建模方式与参数来源；边界条件与载荷工况的详细描述。
- d) 仿真结果：基于输出要求，以图表等形式清晰展示关键结果。
- e) 结果评估与讨论：说明所采用的评估方法（表象评估法、数值评估法、物理样机法）；结合6.1中的方法对结果可靠性进行论述（如网格收敛性分析）；对电动乘用车动力电池系统的安全性能进行分析，指出潜在的风险区域和失效模式。
- f) 结论：明确给出是否满足仿真目标要求的结论，并就电动乘用车的动力电池系统结构优化或风险控制提出建议。

附录 A
(资料性附录)

电动乘用车动力电池系统机械滥用仿真流程、参数参考及案例

A.1 仿真流程图

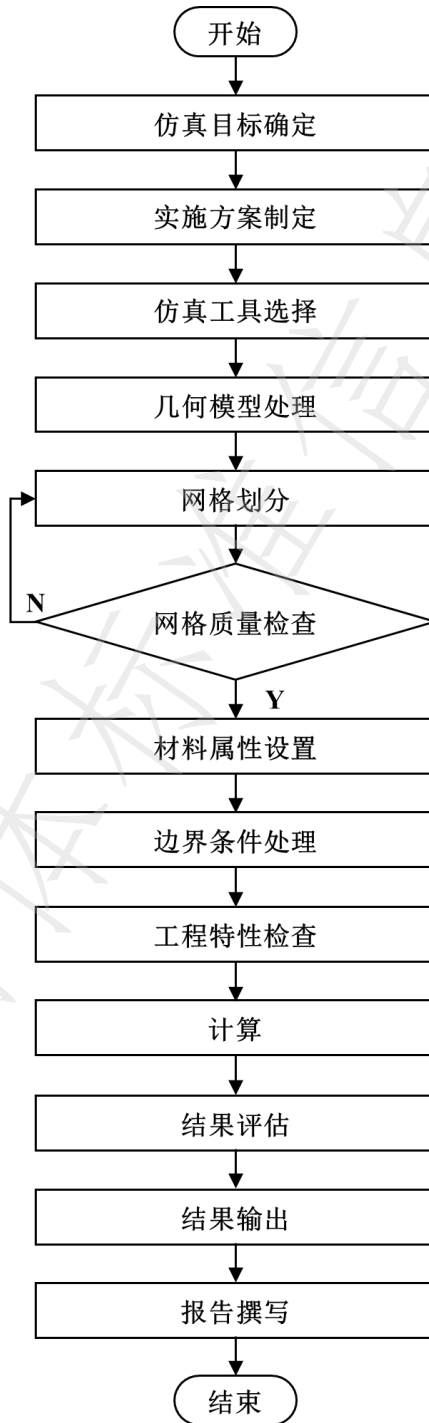


图 A.1 电动乘用车动力电池系统机械滥用仿真流程图

A.2 单元质量检查控制参数表

表 A.1 单元质量检查控制参数表

类别	四边形单元	三角形单元	六面体单元	楔形单元	四面体单元
长宽比	≤ 5.0	≤ 5.0	≤ 5.0	≤ 5.0	≤ 5.0
翘曲度	$\leq 16^\circ$	—	$\leq 18^\circ$	$\leq 18^\circ$	—
偏斜度	$\leq 60^\circ$	$\leq 60^\circ$	$\leq 60^\circ$	$\leq 60^\circ$	$\leq 60^\circ$
内角	$40^\circ \sim 135^\circ$	$20^\circ \sim 120^\circ$	$40^\circ \sim 135^\circ$	$20^\circ \sim 120^\circ$	$20^\circ \sim 120^\circ$

A.3 机械失效行为定义

动力电池系统在机械滥用条件下的机械失效行为评估需统一失效准则，如电池包壳体破裂、连接件断裂等。

对于准静态力学分析：

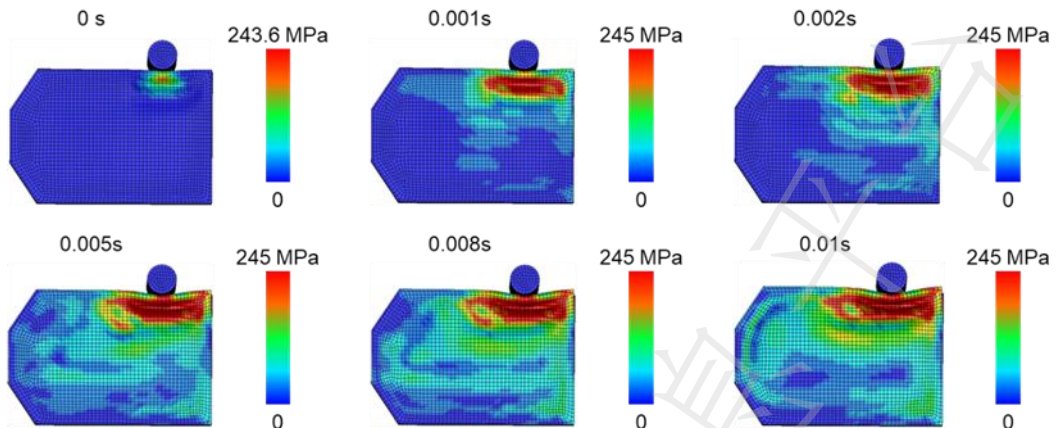
- a) 金属件失效定义为：材料最大应力 \leq 屈服强度，超出即视为失效；
- b) 塑料件失效定义为：材料最大应力 \leq 安全系数*抗拉强度，超出即视为失效；
- c) 胶体失效定义：超出断裂韧性即视为失效。

对于动态力学分析：

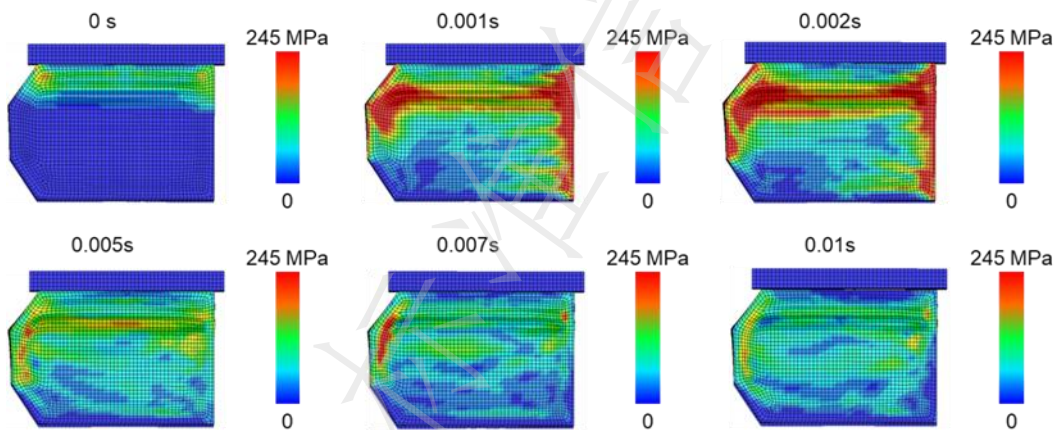
- a) 金属件失效定义为：材料最大应变 $<$ 断裂应变，超出即视为失效；
- b) 塑料件失效定义为：材料最大应变 $<$ 断裂应变，超出即视为失效；
- c) 胶体失效定义：超出断裂韧性即视为失效。

安全系数应根据应用场景设定，确保设计可靠性。

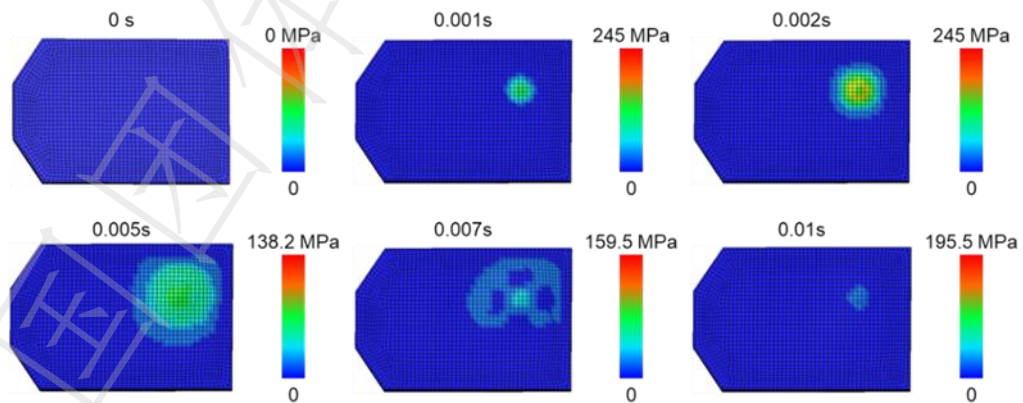
A.4 电动乘用车动力电池系统机械滥用仿真案例



图A.2 侧柱碰撞工况电池包Von Mises应力云图-10 m/s



图A.3 侧面碰撞工况电池包Von Mises应力云图-10 m/s



图A.4 底部碰撞工况电池包Von Mises应力云图-10 m/s