基于 CAE 的 CFRP 方程式赛车车身碰撞性能研究

江苏大学机械工程学院　田聪聪　李富柱　李伟　郭玉琴

为了研究碳纤维复合材料（CFRP）汽车构件的碰撞性能，论文以方程式赛车车身为研究对象，基于 CATIA 和 Abaqus 软件，完成了 CFRP 方程式赛车车身的 CAD 三维建模和 CAE 碰撞仿真分析，研究了五种不同铺层方案下，CFRP 方程式赛车车身在相同碰撞条件下的变形及破坏行为、应力分布情况，着重分析了不同铺层方式对最大主应力值、CFRP 构件破坏模式及位置、抗冲击承载能力和碰撞吸能性的影响，确定了综合碰撞性能较好的铺层设计方案，对提高车辆的安全性和经济性、缩短生产周期具有重要意义。

一、前言

碳纤维复合材料（Carbon Fiber Reinforcement Polymers，CFRP）因为具有高比强度、高比模量、耐高温、耐腐蚀、抗蠕变、震动衰减性高、导电、传热和热膨胀系数小等一系列优异性能，而成为汽车轻量化材料的首选。以现代 F1 赛车为例，其底盘、变速箱、悬架和刹车等都可以采用碳纤维复合材料制造，分别占整车体积的 85% 和整车质量的 30%。几乎全部采用 CFRP 制成的 SLR 迈凯伦超级跑

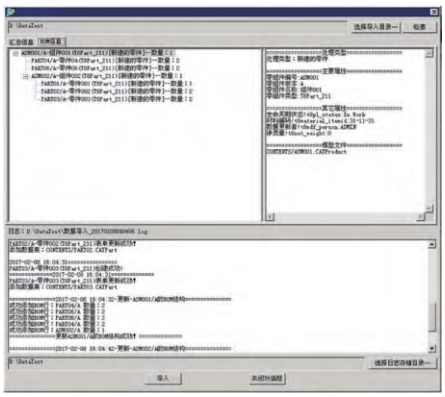


图 6 数据包导入界面

图 7 数据导入 PDM 系统

某设计与工艺部门的 PDM 系统间进行接口开发，实现设计数据在不同部门间的数据交换与管理。

当产品设计数据在设计部门受控后，根据双方 PDM 系统接口定义要求，由设计部门的 PDM 系统自动将发送的数据以数据包的格式导出，数据包包括 XML、物理文件等，其中 XML 为包含设计数据属性、数量、BOM 等信息，如图 5 所示（限于篇幅，只截取局部文档）。工艺部门在接收到数据包后，以自动或手工的方式将数据包解析后导入工艺部门的 PDM 系统，手工导入界面如图 6 所示，数据导入 PDM 系统后如图 7 所示。

五、结语

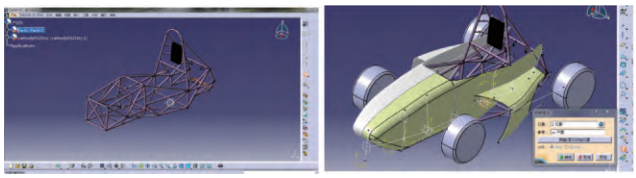
本文研究的面向异构 PDM 平台的数据交换技术，解决了型号研制过程中设计数据在不同 PDM 间的数据交换问题，实现多部门、跨地域的产品协同研制，实现航天产品设计制造的数字化、网络化和协同化，为航天产品由传统研制方式向异地数字化协同设计制造模式的转变提供技术支持。

投稿邮箱 | cadcam@idnovo.com.cn
IMCHINA@idnovo.com.cn

车，其碰撞性能性比也钢材或铝材高出 4 ～ 5 倍。CFRP 汽车构件的开发流程涉及到的工作量巨大、生产周期长且成本高，难以适应对全球化市场快速响应的要求，因而对 CAD/CAE/CAM 提出了迫切需求。CATIA 作为汽车设计的核心工具，在 3D 实体造型、曲面造型和线框造型等方面更具有独特的优势，另一方面 Abaqus 作为通用的 CAE 仿真分析软件，具有专门用于复合材料设计的 Plyup 模块，可方便地对复合材料进行铺层设计，包括材料参数、铺设角度、厚度设定，分析 CFRP 产品的结构性能、预测其强度、刚度、稳定性、碰撞吸能性及疲劳寿命等，可为新产品研发提供指导，为解决实际工程问题提供依据，是实现数字化设计制造的关键技术之一。本文以方程式赛车车身为研究对象，采用 CATIA V5 完成其三维模型的建立，用 Abaqus 对不同铺层设计的车身构件进行碰撞性能仿真分析，根据仿真分析结果确定了合理的铺层方式，为有效提高 CFRP 汽车构件的安全性提供重要的方法指导。

二、车身 CAD 模型的建立

将已有车架模型导入 CATIA 软件中，如图 1（a）所示，然后根据车架构造车身主要曲面，再经曲面拉伸、填充、桥接和接合等操作完成赛车车身左半边的三维建模，最后经过镜像成完整车身建模，如图 1（b）所示。

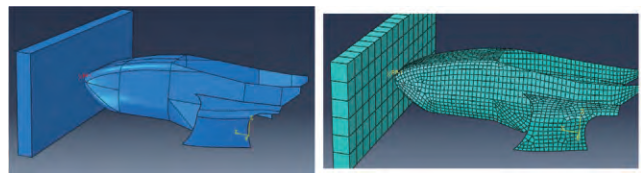


(a)　　(b)

图 1 方程式赛车车身建模

三、方程式赛车车身碰撞仿真模型建立

先利用 Abaqus 软件自带的建模模块建立墙体（长方体）模型，再将第 2 节中建立的车身模型导入 ABAQUS 软件并完成装配，如图 2（a）所示；在属性界面中分别定义车身和墙体的材料参数，如表 1 所示；接着在属性下的编辑复合层中设计如表 2 所示的五种铺层；分别对采用六面体网格和壳体网格对墙体和车身部件划分网格如图 2（b）所示；选择动力显式法建立分析步，设定墙体为刚性约束，创建相互作用属性，定义车身在前环位置和车鼻中部位置为固定约束，碰撞速度设为 V_1=−350m/s。



(a)　　(b)

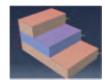
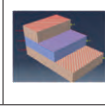
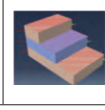
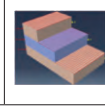
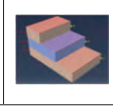
图 2 仿真模型

表 1　材料参数

密度 g/cm³		弹性模量 GPa	泊松比	剪切弹性模量 GPa
车身（CFRP）	1.75	E1 E2 E3	Nu12 Nu13 Nu23	G12 G13 G14
		39 8.4 5.2	0.28 0.3 0.27	4.2 3.6 2.4
墙体（钢）	7.8	206	0.31	

注：E1、E2、E3 为 CFRP 材料在三个材料主方向上的弹性模量，Nu1、Nu2、Nu3 为其泊松比，G1、G2、G3 为三个平面内的剪切弹性模量。

表 2 CFRP 材料的铺层设计

	I	II	III	IV	V
1	0°	-45°	45°	90°	90°
2	0°	0°	0°	0°	90°
3	0°	45°	45°	90°	90°
					

四、仿真结果分析

第 3 节中所建立的仿真模型经提交运算后，所得仿真结果应力云图见图 3 所示，最大主应力及应变能曲线分别见图 4（a）、4（b）所示。

观察图 3 可发现：（1）五种铺层方式在所设定条件是碰撞后，最大应力皆发生在车鼻前端两侧圆角处（如图 3 各红色圈中所示），且均超过了 CFRP 材料的断裂强度 3400MPa。（2）在相同的碰撞条件下，第 I 种铺层方案（0° /0° /0° ）最大主应力达到 12135.6MPa，破坏最严重；第Ⅱ（−45° /0° /45° ）、Ⅲ（45° /0° /45° ）种铺层方案下最大主应力分别达到 8164.08MPa 和 8164.1MPa，破坏程度次之；第Ⅳ（90° /0° /90° ）、V（90° /90° /90° ）种铺层方案下最大主应力分别达到 5360.14MPa 和 5360.14MPa，破坏程度最轻。（3）铺层间夹角相同，但铺层方向不同时，最大应力值变化不大，分

别为 8164.08MPa 和 8164.1MPa，但最大应力值发生的位置显著不同，如图 3（b）、3（c）所示。

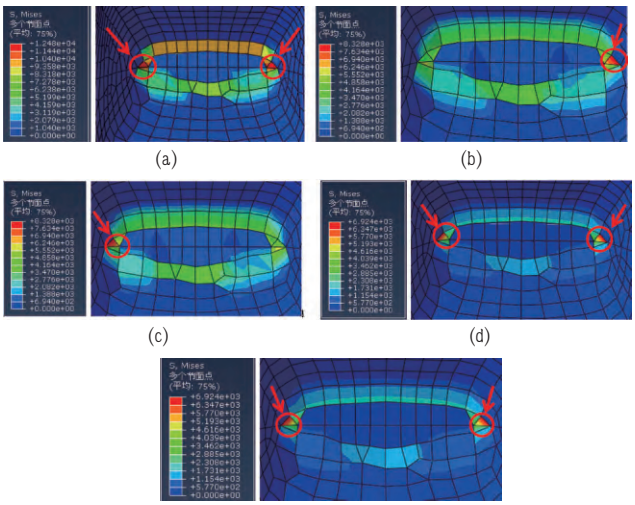


图 3 不同铺层方案下 CFRP 方程式赛车车身碰撞时的应力分布云图：(a) (0° /0° /0°)，(b) (-45° /0° /45°)，(c) (45° /0° /45°)，(d) (90° /0° /90°)，(e) (90° /90° /90°)

从 4（a）、（b）可以看出：（1）CFRP 方程式赛车车身在碰撞过程呈现出典型的线弹性变形及破坏行为；（2）由图 4 (a) 可知碰撞结束时的最大主应力值由大到小排列为：方案Ⅰ（0° /0° /0° ）＞方案Ⅱ（−45° /0° /45° ）/ 方案Ⅲ（45° /0° /45° ）＞方案Ⅳ（90° /0° /90° ）/ Ⅴ（90° /90° /90° ），这也是上述几种铺层方案下 CFRP 方程式赛车车身抗冲击承载能力由劣到好的顺序；（3）由图 4（b）可知碰撞结束时的应变能由小到大排列为Ⅴ（90° /90° /90° ）＜方案Ⅳ（90° /0° /90° ）＜方案Ⅱ（−45° /0° /45° ）＜方案Ⅲ（45° /0° /45° ）＜方案Ⅰ（0° /0° /0° ），这反映了几种不同铺层方案下 CFRP 方程式赛车车身碰撞吸能性由劣到好的顺序。综上所述，综合考虑抗冲击承载能力和碰撞吸能性两方面的要求，方案Ⅱ（−45° /0° /45° ）和方案Ⅲ（45° /0° /45° ）能获得比较好的综合碰撞性。

五、结语

基于 CATIA 和 Abaqus 软件，完成了 CFRP 方程式赛车车身的 CAD 三维建模和 CAE 碰撞仿真分析，研究了五种不同铺层方案下，CFRP 方程式赛车车身在相同碰撞

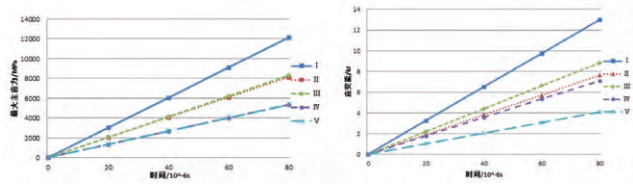


图 4 不同铺层方案下 CFRP 方程式赛车车身碰撞时的最大主应力 (a) 及应变能（b) 曲线

条件下的变形及破坏行为、应力分布情况，得出如下结论：（1）碰撞结束后最大主应力发生在车鼻前端两侧圆角处；（2）铺层方式对最大主应力值、破坏模式及位置有显著影响；（3）（−45° /0° /45° ）、（45° /0° /45° ）两种铺层方式下，CFRP 方程式赛车车身能获得比较好的综合碰撞性；（4）铺层方式对 CFRP 方程式赛车车身的碰撞性能有显著影响，且某一种铺层方案很难同时获得优异的抗冲击承载能力和碰撞吸能性。因此借助 CAD/CAE 仿真分析手段，对 CFRP 方程式赛车车身进行铺层方案优选和结构设计，对提高车辆的安全性、经济性和轻量化水平，缩短生产周期，降低制造成本具有重要的现实意义。

投稿邮箱 | cadcam@idnovo.com.cn
IMCHINA@idnovo.com.cn