

DIGIMAT

多尺度非线性复合材料建模平台

在过去几十年里复合材料以其高比强度、高比模量、耐腐蚀、抗疲劳以及高度的可设计性等优越性能越来越多的被应用在航天、航空、汽车、兵器、电子等行业。随着材料应用的普及，基于复合材料的结构设计和材料研究也越来越多的被关注。相比金属材料，复合材料无论从材料及工艺的研发还是从结构的设计都更为复杂，因此对复合材料开发人员和结构设计人员都提出了更高的挑战。

随着计算机辅助技术的兴起，将计算机辅助技术用于复合材料的研发和复合材料结构的设计优化成为主流趋势和必然方向，出现了很多基于层合板理论的复合材料力学分析程序和商用软件包。但随着研究的深入和应用的普及，这种方法的精度越来越难以满足工程上的需要。而且，由于在过去几十年里复合材料发展出越来越多的种类，其中的很多都超出了经典复合材料力学的应用范围，基于微观尺度的，更普适的复合材料性能预测方法和结构分析方法成为了新的研究热点。DIGIMAT正是基于这些研究的商用软件包。

DIGIMAT是比利时e-Xstream工程公司于2003年推出的专注于多尺度复合材料非线性材料本构预测和材料建模的商用软件包。DIGIMAT能够帮助材料开发人员预测多相材料的等效性能，可以预测的材料范围涉及包含连续纤维、长纤维、短纤维、二维纤维织物、晶须、颗粒、片层等所有增强相和包括树脂基、金属基和陶瓷基在内的所有基体材料。广泛的软件接口可以为几乎所有的主流有限元程序提供材料模型或进行多尺度的耦合分析。多尺度的分析结果使得对材料和结构的失效预测更加准确。

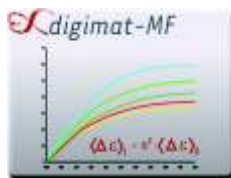
2012年9月，eXstream工程公司成为MSC软件公司的一员。DIGIMAT的加入极大地丰富和完善了MSC的复合材料解决方案，使用户能够从更深的层次了解复合材料，并通过耦合分析更准确的获得复合材料结构的力学性能和失效情况。

模块与功能特点

DIGIMAT针对材料开发人员和结构分析人员提供了六个主要模块，涵盖多相材料的性能预报、材料微观结构建模与分析、材料数据管理、材料模型的实验数据校对、工艺分析结果的读取与映射、工艺仿真软件和结构有限元软件的接口，以及蜂窝或泡沫夹芯结构的虚拟设计和虚拟实验等。

DIGIMAT-MF

DIGIMAT-MF是基于Eshelby夹杂理论，采用Mean Field均匀化方法的多相材料非线性材料本构预测工具。作为一种半分析方法，DIGIMAT-MF可以对所有增强相为椭圆形拓扑的多相材料进行快速准确的性能预测，获得刚度矩阵和工程常数，并可通过定义失效准则和虚拟实验的加载条件，给出虚拟实验曲线。



在DIGIMAT-MF中，只需要输入每一相材料的材料本构，通过定义复合材料的微结构信息，如增强材料的形

状、增强材料的体积含量、增强材料的方向分布、铺层信息等就可以快速获得均化后的材料本构。

DIGIMAT-MF中的均化算法：

- ◆ Mori-Tanaka法
- ◆ 双夹杂法
- ◆ 第一阶和第二阶均化
- ◆ 多层多步均化

DIGIMAT-MF支持的单相材料本构模型：

力学/热力学本构

线弹性、热线弹性

各向同性、横观各向同性、

正交各向异性、各向异性

线粘弹性

弹塑性、热弹塑性

J2塑性模型

+各向同性硬化

-Power/Exponential/ Exponential linear模型

+动力硬化

- cyclic elastoplasticity模型

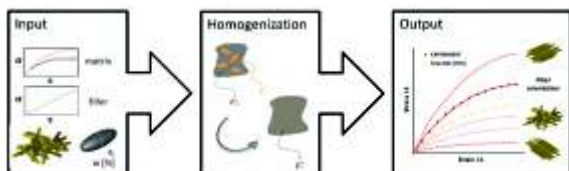
Drucker-Prager塑性模型

+ 与压力相关的弹塑性模型

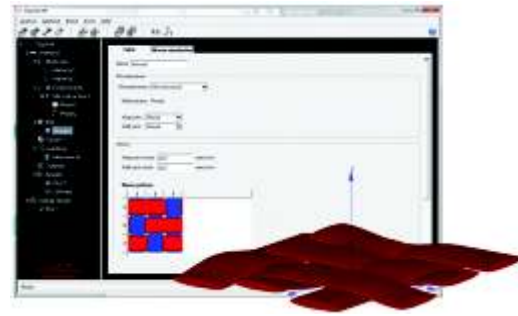
考虑Lemaitre-Chaboche损伤的弹塑性

弹粘塑性、热弹粘塑性

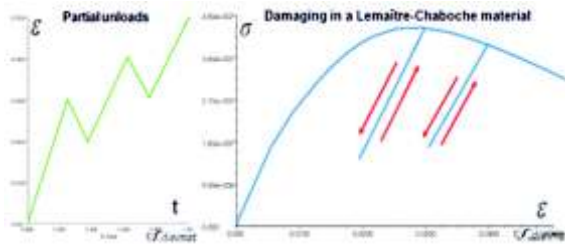
Norton / Power / Prandtl模型



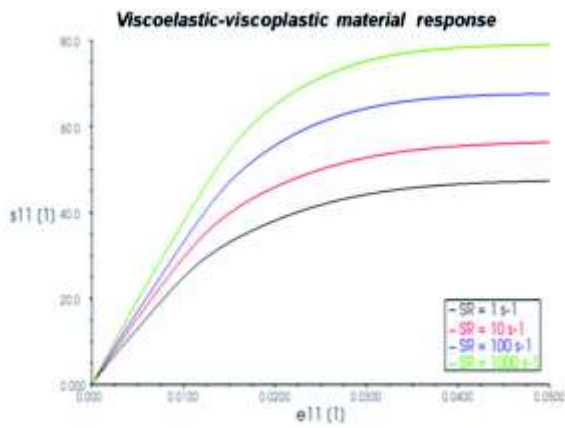
- 粘弹粘塑性
- 超弹性（有限应变）
 - Neo-Hookean / Mooney-Rivlin / Ogden / Swanson/
 - Storakers (可压缩泡沫)模型
- 弹粘塑性（有限应变）：Leonov-EGP模型
- 热学模型：
 - 傅立叶定律
- 电学模型：
 - 欧姆定律



2D织物的建模



考虑Lemaitre-Chaboche损伤的弹塑性模型



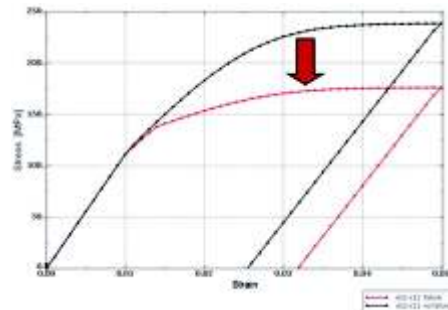
粘弹粘塑性本构

DIGIMAT-FE支持的虚拟实验加载：

- ◆ 单调加载、循环加载、自定义历程加载
- ◆ 多向应力应变载荷
- ◆ 力学载荷、热力学载荷
- ◆ 预测热传导和导电性能
- ◆ 加载有限元软件分析结果

DIGIMAT-FE支持的失效模式：

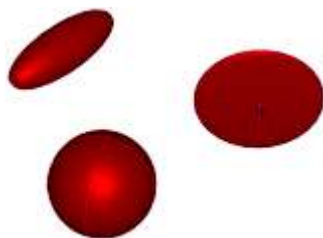
- ◆ FPGF 模型 (First Pseudo-Grain Failure 模型)，用于短纤维增强材料的渐进失效
- ◆ 失效准则可建立在宏观和单相（纤维、基体等）等不同尺度上
- ◆ 失效模型包含：最大应力、最大应变、Tsai-Hill 2D & 3D、Azzi-Tsai-Hill 2D、Tsai-Wu 2D & 3D、Hashin-Rotem 2D、Hashin 2D & 3D等
- ◆ 与应变率相关的失效准则
- ◆ Leonov-EGP或超弹材料的失效准则



弹塑性本构是否考虑渐进失效的对比

DIGIMAT-FE支持的微观结构：

- ◆ 多增强相夹杂
- ◆ 层合板
- ◆ 椭球拓扑增强相(球状、片层状、短纤维、连续纤维)
- ◆ 增强相长径比分布概率定义
- ◆ 增强相方向定义(统一方向、随机方向、二阶分布矢量)
- ◆ 空洞夹杂
- ◆ 界面相定义
- ◆ 刚体、准刚体、变形体增强相



椭球拓扑增强相

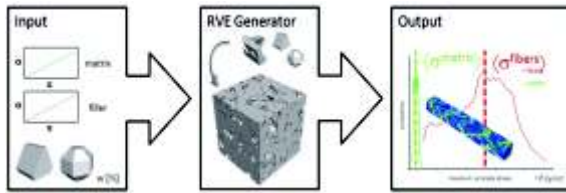
作为DIGIMAT的核心模块，DIGIMAT-MF可以帮助用户快速建立非线性的复合材料模型，预报不同材料、不同微结构特征下的材料性能变化，DIGIMAT-MF所建立的材料模型可用于材料数据库的输入/保存/管理以及在与有限元软件耦合计算中的调用。

DIGIMAT-FE

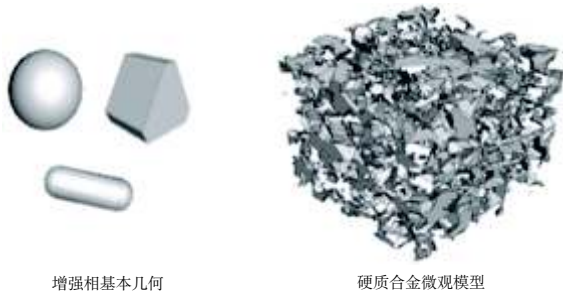
DIGIMAT是通过建立反应材料微观结构特征的代表性体积单元 (RVE)，并通过有限元分析获取材料均化性能和微观尺度上局部应力应变情况的模块。通过定义单相材料材料本构模型，微结构的几何特征即可采用相应的随机算法生成材料微观结构



特征单元的随机几何模型, 并通过调用商用有限元程序计算材料微观结构上的应力应变分布情况, 并可在后处理中分析应力应变的分布概率以及材料的等效均化本构模型。

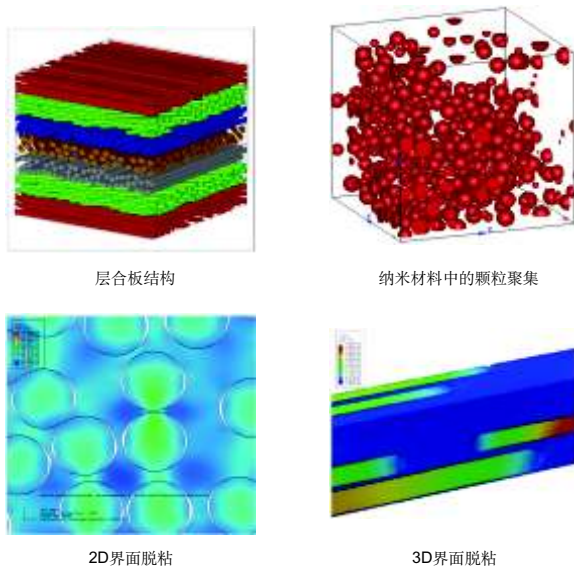


相比MF方法, DIGIMAT-FE能够模拟的增强相几何形状更为广泛, 软件提供了多种用于描述增强相的基本几何拓扑, 并可通过几何的重叠干涉获得更为复杂的增强相几何, 此外还可以导入自定义的增强相几何文件。

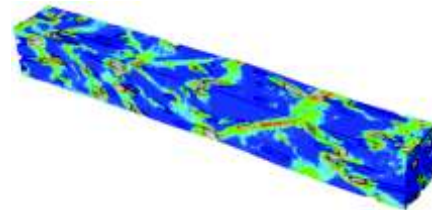


DIGIMAT-FE支持的微结构:

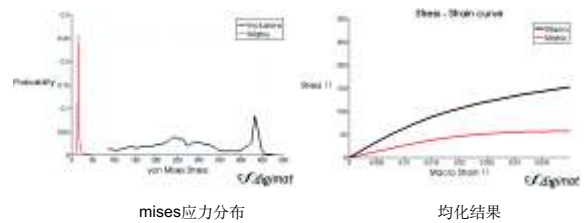
- ◆ 微结构几何定义
 - 纤维体积含量
 - 纤维形状
 - 增强相方向定义(统一方向、随机方向、二阶分布矢量)
- ◆ 增强相尺寸分布概率定义
- ◆ 涂层或界面定义
- ◆ 增强相的聚集定义
- ◆ 纤维树脂之间的脱粘
- ◆ 铺层结构



微观结构分析的后处理主要分为两部分。首先是商用有限元程序中的后处理结果, 在FEA软件的后处理中可以得到纤维和树脂上的应力应变分布, 相应失效因子的分布, 以及界面脱粘情况。另外还可以用过DIGIMAT-FE的后处理对纤维和树脂上的应力应变分布进行统计, 获得分布概率和平均结果。

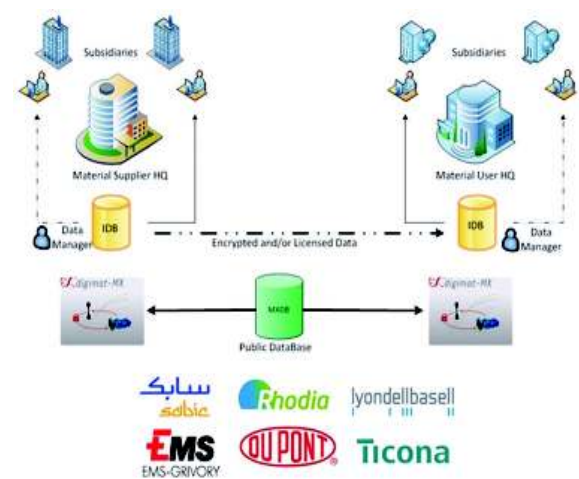


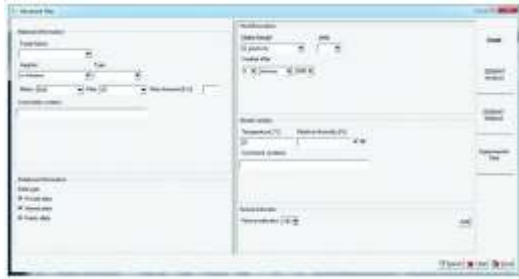
微观结构上的应力应变分布



DIGIMAT-MX

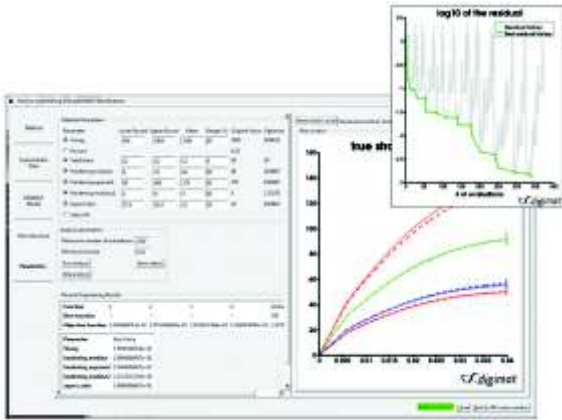
DIGIMAT-MX是 DIGIMAT的材料数据库, 用于存储、管理材料试验数据和DIGIMAT材料模型。很多著名的复合材料厂商为DIGIMAT-MX提供了公开的材料数据。通过DIGIMAT-MX, 材料供应商和材料使用部门之前的材料性能数据链被联系起来, 通过加密处理, 材料数据供应商可以定向的将数据发布给特定的使用者, 而不会被使用者获取材料模型的细节, 从而有效的保护供应商的知识产权。





先进的材料查询工具

逆向工程是MX的另一个重要功能。复杂本构模型的单相材料（如树脂、界面相、杂质相）的力学性能往往是很难获得的，需要大量的实验。逆向工程可以帮助用户利用少量的宏观实验曲线，通过逆向回归迭代，得到需要修正的单相材料的材料本构。由于复合材料往往由于材料缺陷和工艺缺陷，呈现实际材料的应力应变曲线与理论模型存在偏差的现象，使用逆向工程可以将这些缺陷造成的非线性特征考虑在材料模型中，从而使材料模型更加贴近实际情况。



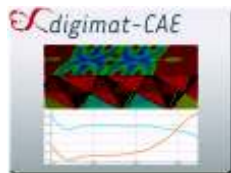
逆向工程

逆向工程支持的回归数据：

- ◆ 材料本构
 - (热) 线弹性
 - 粘弹性
 - (热) 弹塑性
 - (热) 弹粘塑性
- ◆ 其他可回归的特征数据：
 - 纤维长径比
 - 失效模型中的材料强度
 - 材料性能与温度的相关性

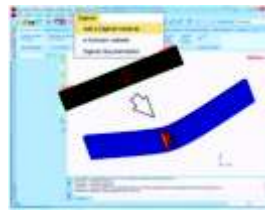
DIGIMAT-CAE

DIGIMAT-CAE是DIGIMAT与其他有限元程序的接口，通过DIGIMAT-CAE，工艺仿真软件、DIGIMAT-MF和结构仿真软件被连接起来，从而实现考虑工艺影响的，多尺度耦合的结构有限元仿真。

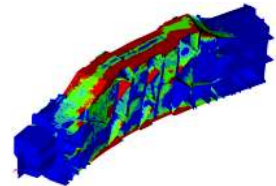


DIGIMAT-CAE支持的FEA软件：

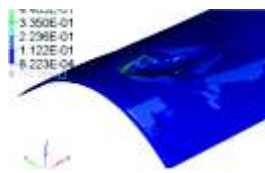
- MSC Nastran S400
- Marc
- Abaqus/CAE, Standard & Explicit
- ANSYS Mechanical
- LS-DYNA, Implicit & Explicit
- Optistruct
- PAM-CRASH
- RADIOSS
- SAMCEF-Mecano



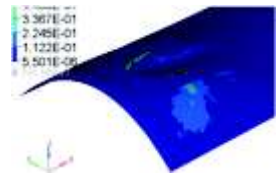
Mentat植入界面



应变能分析结果



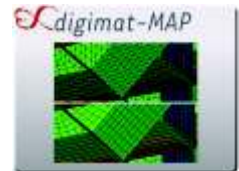
树脂上的失效



纤维上的失效

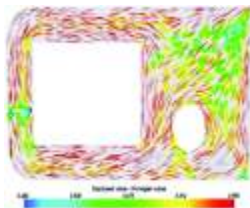
DIGIMAT-MAP

复合材料的结构性能往往受到工艺的显著影响，因此在复合材料结构分析时，考虑其工艺影响是十分必要的。然而由于算法的差异，工艺仿真所使用的网格往往与结构分析所使用的网格无论从尺寸上还是从类型上都是截然不同的。DIGIMAT-MAP是一款功能强大的映射工具，可以将工艺分析得到的结果映射到结构分析的网格上。DIGIMAT支持的映射数据包括：纤维方向分布、温度、残余应力、熔接线等。

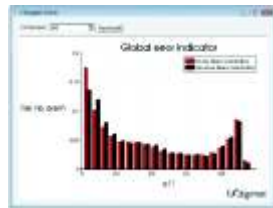




纤维方向的映射



纤维方向分布



映射结果统计对比

DIGIMAT-MAP支持的网格格式:

- Patran
- Abaqus
- ANSYS
- Ideas
- LS-DYNA
- PAM-CRASH
- RADIOSS
- REM3D
- SAMCEF
- 3D Timon

DIGIMAT-MAP支持的映射数据格式:

- DIGIMAT
- Moldex3D
- Moldflow Mid-Plane
- Moldflow 3D
- REM3D
- SigmaSoft
- 3D Timon

Micross

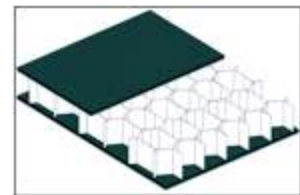
夹层结构（蜂窝或泡沫）以轻质，高结构稳定性等特点被越来越多的应用在航空航天工业。然而由于实际的试样试验中无法避免夹具产生的应力集中，在这样的应力集



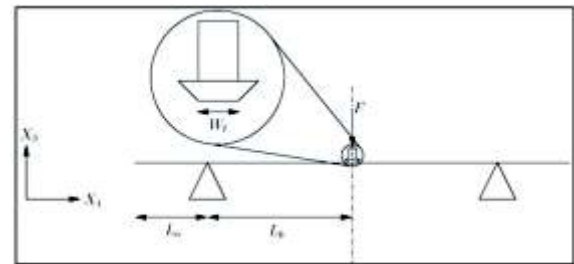
中下，蜂窝结构极易被压扁，因此很难采用实际实验准确获得蜂窝夹层板的力学性能。Micross是一个蜂窝夹层结构的虚拟实验平台。在Micross中，用户通过定义蜂窝的基本几何形状和材料本构，定义蒙皮材料，通过调用自带的有限元求解程序即可以实现对蜂窝夹层板三点弯曲、四点弯曲、面内剪切等典型实验结果的预测，并自动生成分析报告。



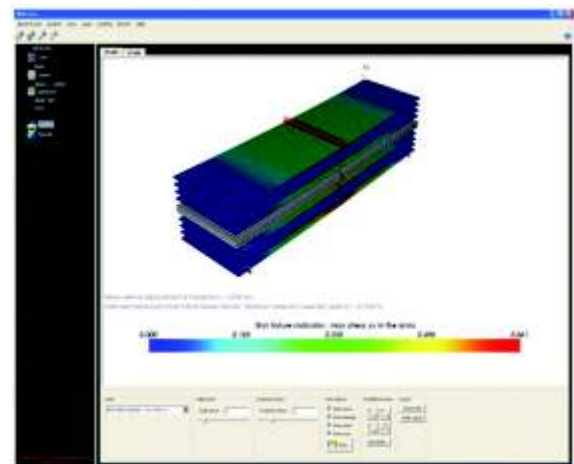
蜂窝定义



蜂窝夹层结构



三点弯曲定义



虚拟实验结果

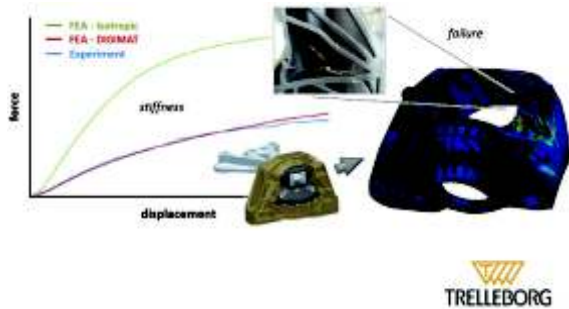
Micross支持的失效模式

- ◆ 芯材
 - 最大应力
- ◆ 蒙皮
 - 最大应力
 - Tsai-Wu
 - Tsai-Hill
 - Azzi-Tsai-Hill

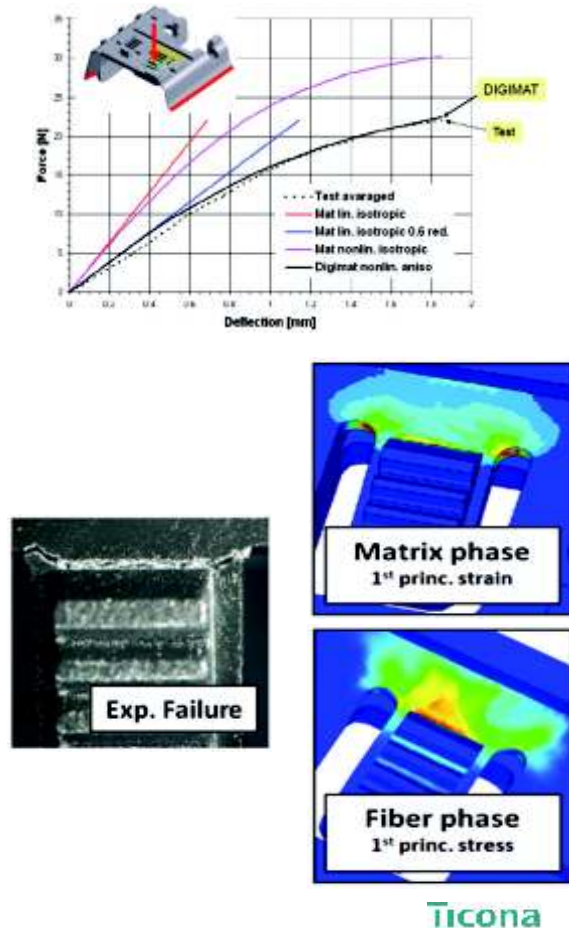
典型案例

汽车行业

使用复合材料替代金属材料是汽车轻量化主要方向之一。TRELLEBORG使用DIGIMAT与商用有限元程序耦合，成功准确预测了采用短切玻璃纤维增强树脂制造的发动机底座的静强度和疲劳性能，为他们采用复合材料替代铝合金材料提供了依据。

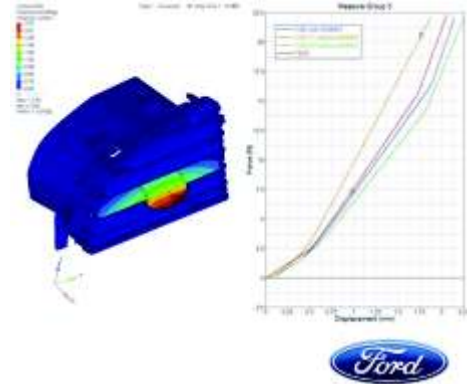


使用DIGIMAT结合有限元软件，TICONA成功分析了汽车天窗上的纤维增强塑料件的力学性能，仿真预测的失效位置和失效方式与实验结果十分吻合。



汽车天窗构件的性能分析与失效判断

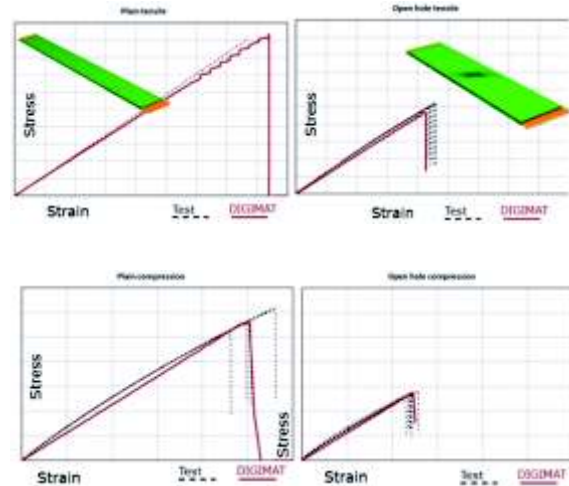
福特汽车采用DIGIMAT与自己构建的材料数据库以及其他有限元软件耦合，建立了针对车用纤维增强塑料结构的设计预报平台，通过该平台，福特能够更准确的了解增强塑料结构的极限强度，从而使他们的设计更加轻质优化。福特汽车认为，采用该平台有望突破乘用车复合材料用量不超过10%的瓶颈。



汽车空调构件

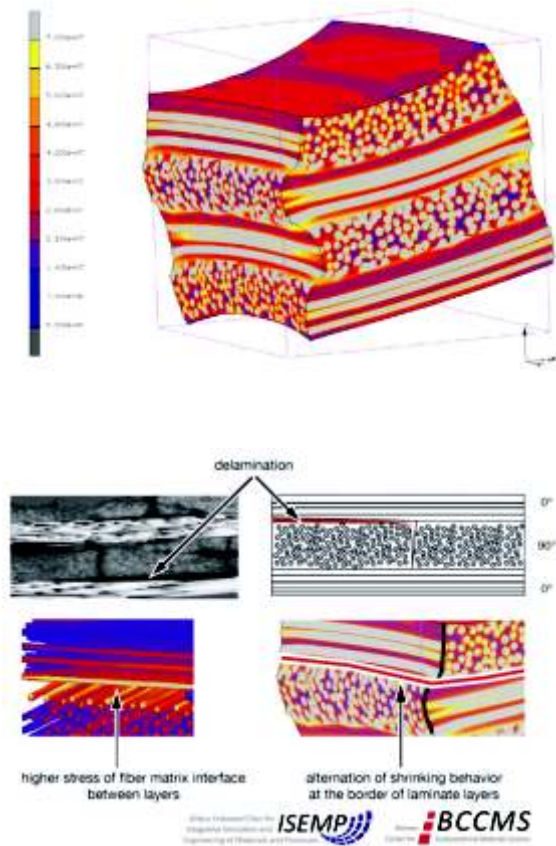
航空航天行业

在飞机的复合材料设计工作中需要对不同铺层、不同形式的试样做大量的实验，往往需要消耗大量的时间和金钱。空客公司利用DIGIMAT和商用有限元程序耦合，在通过少量的试样试验（平板试样拉压实验）校对材料模型后，采用虚拟实验的形式替代大量的试样试验（例如孔板拉压实验），节约了大量的时间和费用。

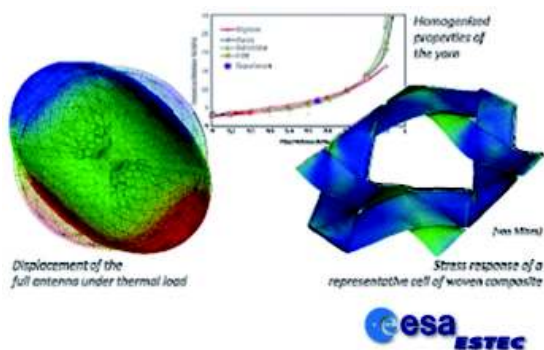


仿真结果与实验结果对比

复合材料的固化过程往往会导致材料内部的残余应力，甚至产生分层或断裂。ISEMP利用DIGIMAT-FE建立了层合板的微观结构，经过计算发现，层合板在固化过程中，层间的剪切应力水平很高，容易导致分层。纤维与树脂界面处也表现出较高的应力水平，这些高应力区域有时会形成材料横向断裂的裂纹扩展路径。

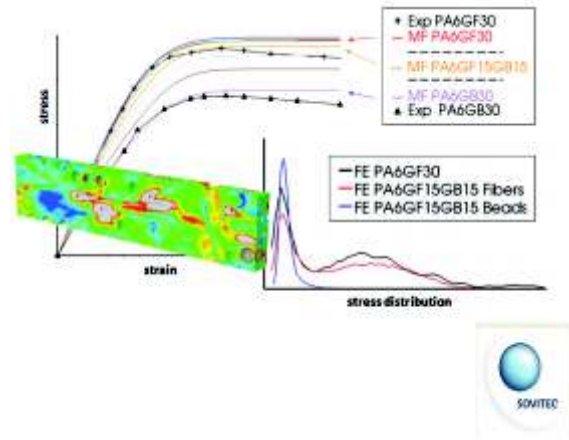


复合材料的力学性能受温度影响显著，对于航天领域使用的复合材料，往往要面临巨大温差变化的考验。ESA在超轻卫星天线的设计中使用DIGIMAT建立了与温度相关的非线性性的材料本构模型，通过不同尺度的分析，研究了天线在温差载荷下的变形情况。



其他行业

复合材料的性能很大程度上取决于增强相，SOVITEC公司使用DIGIMAT-FE研究了不同形式的增强相对材料性能的影响规律，从而在新材料的开发过程中节约了大量的时间和成本。



DIGIMAT作为一款专注于复合材料多尺度非线性建模的软件，几乎可以用于所有类型的复合材料性能预测。丰富的软件接口使DIGIMAT可以实现与绝大多数主流有限元软件耦合，分析复合材料结构的静强度、动强度、疲劳、蠕变、热力学及电学等性能。使用DIGIMAT能够帮助材料开发人员快速预测材料性能，帮助结构分析人员更精确的分析复合材料结构的力学响应，对失效情况作出准确判断。

