

# 航空发动机材料数据库的构建与应用

## Construction and Application of Aero Engine Materials Database

■ 王越 孙瑞侠 刘芳宁 / 中国航发航材院

材料的各种基本性能和使用性能既是材料研究的主要指标，又是发动机结构设计、强度计算、寿命预测和结构安全评定的前提条件，而材料数据库及相关信息技术则是更有效利用这些数据的关键。对材料数据资源归口管理，建立高水平的材料数据库，实现材料数据的资源共享，将助力提高航空发动机的研发效率。

材料性能数据库早在20世纪90年代末就已经在航空、航天、汽车等多个领域得到应用。比较有影响的商用材料数据库有英国格兰塔设计(Granta Design)公司开发的企业级材料智能管理系统(Granta MI)、美国MSC软件(MSC Software)公司的材料中心软件(Material Center)、瑞士金属指南(Key To Metals)公司建立的全球工业材料性能数据库(Total Materia)等。航空发动机制造厂商，如英国罗罗公司、法国赛峰集团等，依据企业自身需求建立了材料数据库，这些数据库是支撑航空发动机设计与结构完整性评估的基础。面

向行业需求，中国航发航材院自主研发和构建了航空发动机材料数据库系统，实现了材料性能数据的管理、查询、分析和应用，目标是面向航空发动机材料数据资源管理和应用的需求，建设数据内容全面的材料数据库系统，多来源收集行业的材料数据，开发数据导航、数据比较、曲线绘制、数据分析、数据统计、数据管理以及数据导入等实用的软件功能，实现材料数据从实测数据到设计用性能数据的全面有效管理和应用。

### 数据内容与系统构建

从材料类别来看，系统中的材料类

别包括金属材料和非金属材料，具体类别有铸造高温合金、变形高温合金、粉末高温合金、钛合金、铝合金、结构钢、金属间化合物、树脂基复合材料、胶黏剂、涂料、橡胶和密封剂等。

从数据项目来看，航空发动机研制要求大量力学性能数据作为结构强度和寿命估算的基础，以金属材料为主。表1给出了数据库系统中金属材料的主要数据项目说明。

从数据来源看，系统设计为可管理不同来源、不同工程项目的材料性能数据，如存储发动机设计手册和多家发动机设计所工程项目的数据。

中国航发航材院的材料数据中

表1 航空发动机材料数据库中金属材料的主要数据项目说明

数据大类	数据项目说明
材料概述	概况说明、技术标准、品种规格、化学成分、相近牌号、热处理制度、供应状态、冶炼和铸造工艺、应用概况及特殊要求…
理化性能	密度、熔化温度范围、热导率、比热容、线膨胀系数、电阻率…
力学性能	光滑拉伸、缺口拉伸、压缩、冲击、剪切、扭转、硬度、泊松比、承载、高周疲劳、低周疲劳、热机械疲劳、疲劳—蠕变交互作用、裂纹扩展、断裂韧度、持久、蠕变…
性能曲线	拉伸应力—应变曲线、高周疲劳中值S-N曲线、P-S-N曲线、疲劳等寿命曲线、疲劳等效应力方程、低周疲劳中值 $\epsilon$ -N曲线、P- $\epsilon$ -N曲线、 $\epsilon_p$ - $\Delta\sigma$ 曲线、 $\epsilon_t$ - $\Delta\sigma$ 曲线、裂纹扩展Paris曲线、Walker曲线、持久应力—寿命曲线、蠕变曲线、蠕变应力—寿命曲线、热强参数综合曲线、热导率—温度曲线、比热容—温度曲线、线膨胀系数—温度曲线、电导率—温度曲线、抗拉强度—温度曲线、杨氏模量—温度曲线…

心团队借鉴国内外主流商用材料数据库的设计,采用浏览器/服务器(B/S)架构,应用微软成熟的.Net技术实现了航空发动机材料数据库系统。在网络中部署后,用户只需要通过IE浏览器即可访问。

系统应用“高内聚、低耦合”的软件设计原则进行软件模块设计。软件模块设计采用主流的3层架构:数据访问层(DAL)、业务逻辑层(BLL)和用户界面层(UI)<sup>[1]</sup>。

数据访问层封装了数据访问的相关类,该层负责对数据库及其他数据源的访问(如数据的增添、删除、修改、查找等),为业务逻辑层或用户界面层提供数据服务。在数据访问层的开发中应用了ADO和.Net等数据访问技术。

业务逻辑层封装了业务逻辑代码,主要负责对数据层的操作,封装业务相关的内容,如业务规则的制定、业务流程的实现等与业务有关的系统设计。业务逻辑层应用了Aspose组件技术实现基于Excel模板的数据导入功能,Aspose组件提供了操作Office组件丰富的应用程序编程接口(API),在项目中用于实现对Excel文档的编程控制。

用户界面层中系统主界面的搭建采用了EasyUI界面框架,EasyUI是基于Jquery的当前主流的Web前端UI框架,用于辅助实现主页面的布局和控制。界面层的大量功能元素应用了Dxperience组件技术,Dxperience组件包是优秀的.Net第三方组件包,提供了功能丰富的界面控件,辅助Web端界面的开发。

## 功能与应用

系统面向发动机设计对材料数据的实

际应用需求,设计了丰富的软件功能,包括材料导航、曲线比较、曲线插值、材料对比、样条插值、数据统计、材料卡片以及数据导入等功能。

### 材料导航

系统设计时考虑材料数据项的内在逻辑关系并结合用户习惯,开发了简捷易用的材料数据库应用界面,构建完成的系统软件界面布局如图1所示。

主界面左侧为材料导航面板和工具箱面板。材料导航面板根据库中的数据内容按牌号-品种-规格的层次给出动态的材料导航树,选择材料导航树中的具体查询节点,右侧内容区显示相应的内容。如在材料导航树中选择一种材料品种规格后,右侧内容区上方给出该材料各种力学性能的级联菜单,选择具体菜单后可查询相关数据;工具箱面板则给出材料比较、曲线比较、数据插值等功能菜单。

### 曲线比较

系统中用户可方便地对不同材

料、不同条件下的多种常规性能曲线进行同图对比。以疲劳应力-循环数(S-N)中值曲线的比较为例,图2为用户在完成多条疲劳曲线筛选后系统给出的疲劳S-N曲线比较结果界面。通过界面右侧上方的曲线定制功能面板,用户可对曲线图进行定制,即设置曲线图大小、图题、曲线标志等信息,并将动态绘制的曲线图输出。通过界面右侧下方的插值面板,用户还可对曲线进行插值计算。

### 疲劳等寿命曲线

航空发动机材料数据库中实现了20余种设计用性能曲线的动态绘制,具体性能曲线种类如表1所示,下面以疲劳等寿命曲线为例进行应用说明。

疲劳等寿命曲线(Goodman)图是疲劳设计和寿命计算的依据,图中将 $\sigma_{max}$ 、 $\sigma_{min}$ 、 $\sigma_a$ 、 $\sigma_m$ 和应力比R共5个参数之间的关系在一张图上表示出来,可清楚全面地表达材料的疲劳性能。系统动态绘制出的疲



图1 航空发动机材料数据库软件界面布局

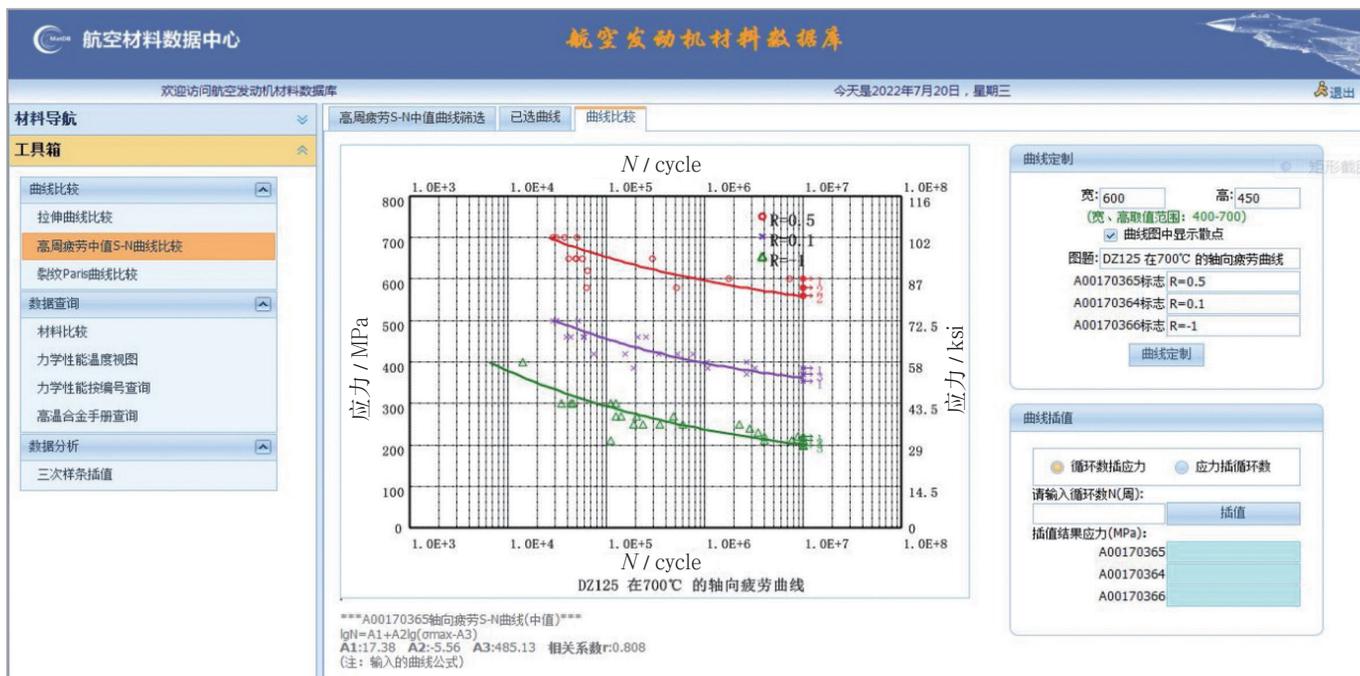


图2 疲劳S-N曲线比较界面

疲劳寿命曲线如图3所示，当鼠标悬浮在曲线图上时，系统自动计算并在鼠标位置显示出  $\sigma_{max}$ 、 $\sigma_{min}$ 、 $\sigma_a$ 、 $\sigma_m$  的参数值，从而使设计人员对材料的疲劳性能数据一目了然。

疲劳等寿命曲线图由于其复杂

性，动态绘制是软件开发的难点之一，系统中类似疲劳等寿命曲线图的一些复杂曲线采用常见的商业绘图控件难以实现，为此，开发团队自主开发实现了底层的曲线绘制模块，解决了疲劳等寿命曲线图的动

态绘制，此类曲线的动态呈现在国内外的其他材料数据库软件界面中尚未见到。

### 疲劳等效应力方程

疲劳等效应力方程是设计人员常用的疲劳模型<sup>[2]</sup>，通常由3条以上不同应力比的S-N曲线计算得到。利用等效应力模型可以推测出其他应力比条件下的S-N曲线，这给广泛使用S-N曲线带来了方便。系统中的疲劳等效应力方程界面如图4所示，给出了方程公式参数、曲线和原始试验数据的链接，用户在界面右侧的曲线插值面板可通过输入应力比，点插值按钮，系统即自动计算出此应力比下的疲劳性能的循环数-应力数值表，从而辅助设计人员在工程应用中通过模型内插获得未曾试验应力比下的疲劳性能。

### 材料卡片

系统实现了从数据库读取材料数据，并输出为ABAQUS、ANSYS

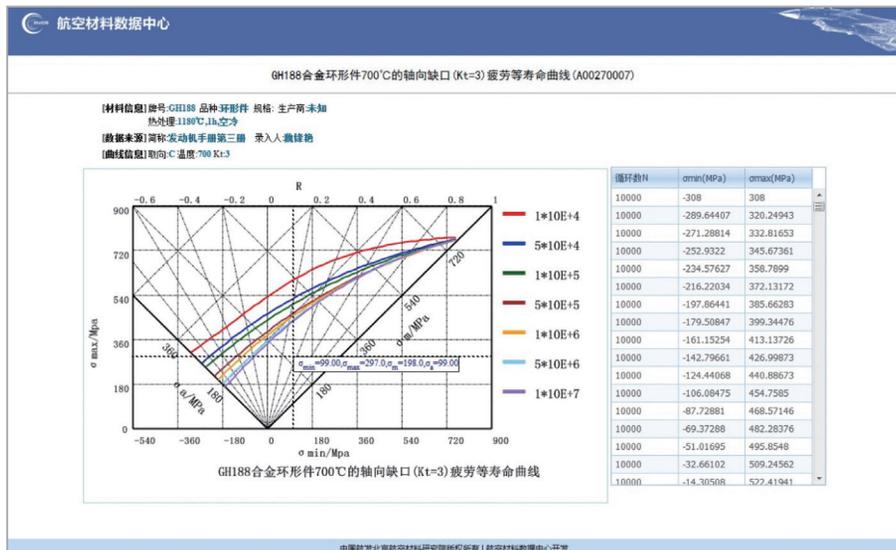


图3 在疲劳等寿命曲线图中计算出的  $\sigma_{max}$ 、 $\sigma_{min}$ 、 $\sigma_a$  和  $\sigma_m$  参数值

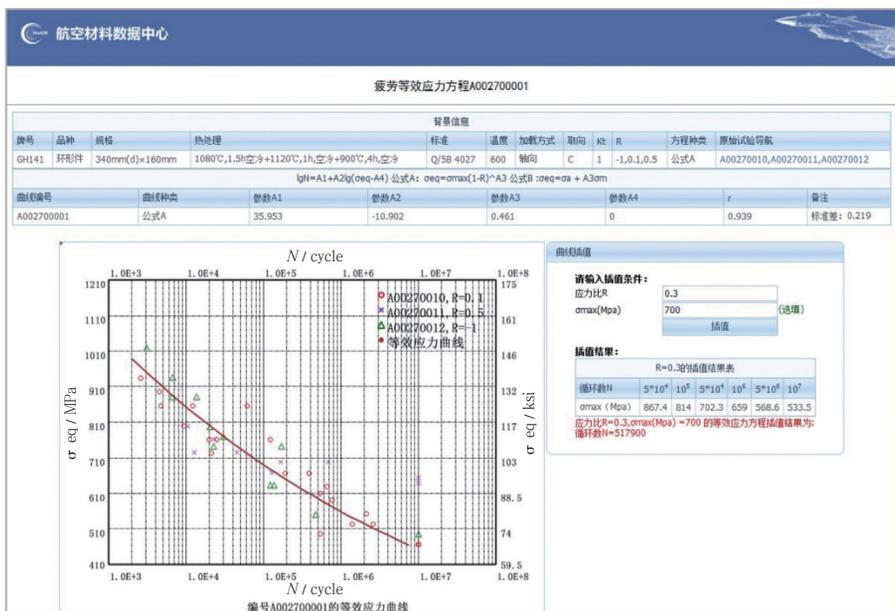


图4 疲劳等效应力方程内插获得未曾试验应力比的疲劳性能

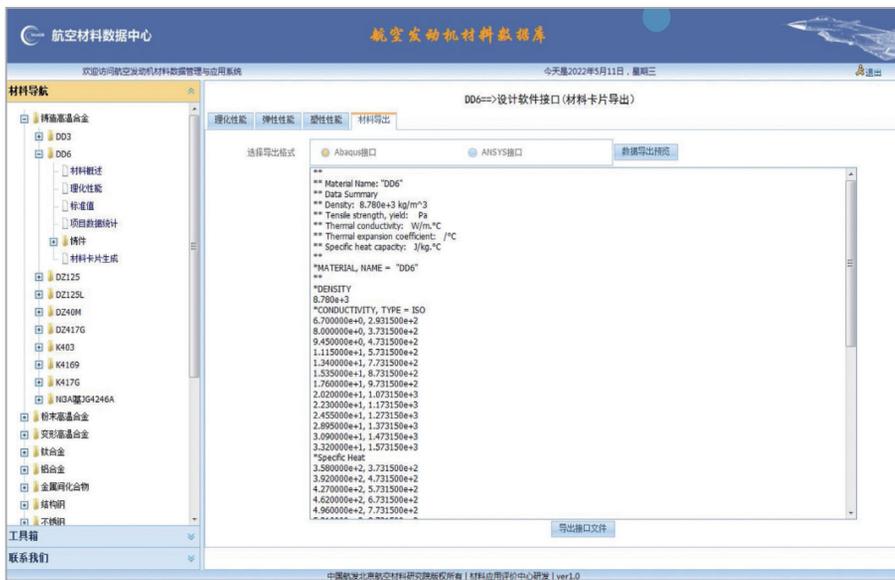


图5 导出设计软件使用的材料卡片

等设计软件可识别的格式，即材料卡片功能。如图5所示，材料卡片界面中按理化性能、弹性性能、塑性性能等对材料性能信息划分为多个选项卡。当用户选择理化性能选项卡，界面会查询到该材料在数据库中的各种理化性能，包括密度、热

导率、比热容、线膨胀系数、电阻率等。当用户选择弹性性能选项卡，界面会查询到该材料在数据库中的弹性性能，包括弹性模量、泊松比等。用户通过界面勾选性能数据后，在材料导出选项卡中点击导出接口文件，系统生成性能数据的材料卡片

文件并下载到客户端，方便设计人员使用。

### 数据导入

系统开发了方便实用的材料数据导入功能。材料数据库中的数据内容和项目繁多，数据库设计了各类数据表近200个，数据关系比较复杂，材料数据的采集入库是材料数据库开发的难点之一。为实现方便的材料数据采集，设计了一套基于Excel的材料数据采集模板。在多家行业相关单位试用并经多次版本更迭后，数据采集模板的版本已经稳定。通过系统的数据导入功能，系统可方便地将基于Excel模板填写的几十种性能数据和曲线数据导入。

### 结束语

航空发动机材料数据库系统实现了航空发动机材料数据资源的管理和应用。数据库中收集了行业内多家单位不同项目的发动机材料数据，内容全面，可追溯；系统的软件界面功能丰富，运行良好。目前，系统已经在行业内部署和提供应用服务。未来系统还将不断充实数据，完善软件功能，为航空发动机选材、强度设计和寿命评估提供支撑，此外，系统还可在有材料数据管理与应用需求的单位推广使用。

**航空动力**  
(王越，中国航发航材院，高级工程师，主要从事材料数据库系统的设计与开发)

### 参考文献

- [1] 段升杰. 浅谈软件三层架构开发[J]. 信息与电脑(理论版), 2010(10):44.
- [2] 韩希鹏, 许超, 段作祥, 等. 高周疲劳曲线的等效应力法[J]. 航空材料学报, 2003(3):53-57.