

Abaqus用户手册大系

Abaqus

分析用户手册

材料卷

Abaqus Analysis User's Guide: Materials Volume

王鹰宇 编著

- ◆ Abaqus原版用户手册的中文版
- ◆ 包含Abaqus材料库各种材料属性、本构方程
- ◆ 获得合理材料模型的必备工具



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

Abaqus 用户手册大系

Abaqus 分析用户手册

——材料卷

王鹰宇 编著



机械工业出版社

本书是“Abaqus 用户手册大系”中的一册,共分 6 章,详细介绍了材料的不同性能及组合应用:第 1 章概述了 Abaqus 中的材料库、材料的数据定义、组合材料行为等内容。第 2 章介绍材料的弹性力学属性,包括线弹性、多孔弹性、次弹性、超弹性、弹性体中的应力软化、线性黏弹性、非线性黏弹性、率敏感的弹性泡沫。第 3 章阐述了材料的非弹性力学属性,包括金属塑性和其他塑性模型、织物材料、节理材料、混凝土和橡胶型材料中的永久变形。第 4 章对材料的渐进性损伤和失效进行了阐述,包括韧性金属的损伤和失效、纤维增强复合材料的损伤和失效,以及低周疲劳分析中韧性材料的损伤和失效。第 5 章介绍材料的水动力属性,详细说明了其状态方程。第 6 章介绍了其他 7 种材料属性,分别是力学属性、热传导属性、声学属性、质量扩展属性、电磁属性、孔隙流体流动属性及用户材料。

本书内容对于 CAE 用户熟悉材料属性及本构方程,正确定义数值计算模型中的材料,从而得到合理的计算结果是必不可少的。

本书可作为航空航天、机械制造、石油化工、精密仪器、汽车交通、国防军工、土木工程、水利水电、生物医学、电子工程、能源、造船以及日用家电等领域的工程技术人员的参考用书,也可以作为高等院校相关专业高年级本科生、研究生的学习用书。对于使用 Abaqus 的工程技术人员,此书是必备的工具书,对于使用其他工程分析软件的人员,此书也极具参考作用。

图书在版编目(CIP)数据

Abaqus 分析用户手册.材料卷/王鹰宇编著.—北京:机械工业出版社,2018.6

(Abaqus 用户手册大系)

ISBN 978-7-111-59535-9

I. ①A… II. ①王… III. ①有限元分析-应用软件-手册②工程材料-有限元分析-应用软件-手册 IV. ①O241.82-39②TB3-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 062147 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:孔劲 责任编辑:孔劲 王海霞

责任校对:张征 封面设计:张静

责任印制:常天培

北京铭成印刷有限公司印刷

2018 年 6 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·29.5 印张·2 插页·719 千字

0001—3000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-59535-9

定价:139.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线:010-88361066

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-68326294

机工官博:weibo.com/cmp1952

010-88379203

金书网:www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

教育服务网:www.cmpedu.com

作者简介



王鹰宇，男，江苏南通人。毕业于四川大学机械制造学院机械设计及理论方向，硕士研究生学历。毕业后进入上海飞机设计研究所（中国航空研究院 640 所），从事飞机结构与优化计算工作，参加了 ARJ21 新支线喷气客机研制。后在 3M 中国有限责任公司从事固体力学、计算流体力学、NVH 仿真、设计优化和自动化设备设计工作至今。期间有一年时间（2016.7~2017.7）在中国航发商发（AECC CAE）从事航空发动机短舱结构研制工作。

序 言

Abaqus 软件被认为是功能强大的有限元分析软件，在非线性静力/动力、接触、断裂破坏、各种非线性材料，以及各种复杂的组合高度非线性问题的求解方面都具有良好的解决方案。Abaqus 软件以其强大的非线性分析功能及解决复杂和深入的科学问题的能力，在工程领域获得了广泛认可。除普通工业用户外，也在以高等院校、科研院所等为代表的高端用户中得到了广泛赞誉。研究水平的提高引发了用户对高水平分析工具需求的加强，作为满足这种高端需求的有力工具，Abaqus 软件在各行业的重要性也越来越突出。

Abaqus 除以优良的前后处理和强大的求解器著称外，其全面、清晰的用户手册也被业界所称道。Abaqus 进入中国市场已有二十载，因为语言问题延缓了中国的 Abaqus 爱好者对 Abaqus 强大功能的探索。多年来一直有 Abaqus 的使用者向我询问是否有 Abaqus 用户手册的系统译著，但由于 Abaqus 用户手册的内容非常丰富，即便是一个分册，也是上千页的文档，因此到目前还没有形成系统的译著。

我和王鹰宇先生已有 10 多年的朋友，一直很欣赏他的严谨。有一天他拿着三四千页的《Abaqus 分析用户手册》的初稿找我，我才知道他竟然完全利用业余时间花费了两年多的时间完成了这些工作，我彻底被他的精神所折服。在成书过程中，作者也多次修改其稿，尽量让文字准确，历经 2~3 年时间的不断完善，直到今天该书才面市。

众所周知，材料是有限元分析的重要内容，《Abaqus 分析用户手册——材料卷》详尽介绍了材料的通用属性（材料阻尼、密度、热膨胀）、弹性力学属性、非弹性力学属性、温度属性、声学属性、静流体属性、状态方程、质量扩散属性、电磁属性、孔隙流属性和用户自定义材料属性等。本书可以作为 Abaqus 用户重要的参考书，也可以作为高等院校本科生和研究生的学习用书，即便是对于从事有限元分析工作的非 Abaqus 用户也具有很高的参考价值。

高绍武 博士

达索 SIMULIA 高级技术经理

前 言

本书是《Abaqus 分析用户手册》所包含的五部手册中介绍材料本构的部分，其中，对原版英文手册中使用的连续章节号做如下调整，并在本书及另外四部中文版中进行相互引用：

1. 原英文书“Analysis User’s Guide Volume I : Introduction, Spatial Modeling, Execution & Output”所包含的 1~5 章，调整为《Abaqus 分析用户手册——介绍、空间建模、执行与输出卷》的 1~5 章。

2. 原英文书“Analysis User’s Guide Volume II : Analysis”所包含的 6~20 章，调整为《Abaqus 分析用户手册——分析卷》的 1~15 章。

3. 原英文书“Analysis User’s Guide Volume III : Materials”所包含的 21~26 章，调整为《Abaqus 分析用户手册——材料卷》的 1~6 章。

4. 原英文书“Analysis User’s Guide Volume IV : Elements”所包含的 27~33 章，调整为《Abaqus 分析用户手册——单元卷》的 1~7 章。

5. 原英文书“Analysis User’s Guide Volume V : Prescribed Conditions, Constraints & Interactions”所包含的 34~41 章，调整为《Abaqus 分析用户手册——指定条件、约束与相互作用卷》的 1~8 章。

本书阐述 Abaqus 中所包含的丰富多彩的材料本构特性及其使用方法和注意事项，涉及固体、流体、织物、复合材料等材料的弹性、非弹性、损伤失效、疲劳损伤、流动、阻尼、热、电磁、膨胀特性的描述及模型方程的数学阐述。这些内容对于建立计算模型时，正确描述计算过程是特别重要的。

本书内容特别适用于从事计算力学、热方案设计、工艺过程仿真的技术人员，对于技术人员深刻理解材料的性能及材料对载荷的响应具有积极的帮助，有助于对实际问题进行合理的假设和模拟。

本书的出版得到了各方面的鼓励和支持。感谢 SIMULIA 中国区总经理白锐先生、用户支持经理高祎临女士和 SIMULIA 中国南方区资深经理及技术销售高绍武博士在本书翻译过程中给予笔者的鼓励和支持，以及在书稿出版工作中给予的支持和帮助。

非常感谢我的良师益友金舟博士在我的工作与学习中给予的帮助与支持。

非常感谢陈菊女士（3M 中国有限公司技术专家）及我的孩子给予我的支持和帮助！

非常感谢 3M 全球的田正非（Fay Salmon）女士，乔流总监给予我的鼓励！

非常感谢 3M 中国的熊海锴给予我及我家人的巨大帮助！

虽然笔者尽最大努力，力求行文流畅并忠实于原版手册，但由于语言能力和技术能力所限，书中难免存在不当之处。对于书中的问题，希望读者和同仁不吝赐教，共同努力，以使本书更加完善。意见和建议可以发送至邮箱 wayiyu110@sohu.com。

王鹰宇

目 录

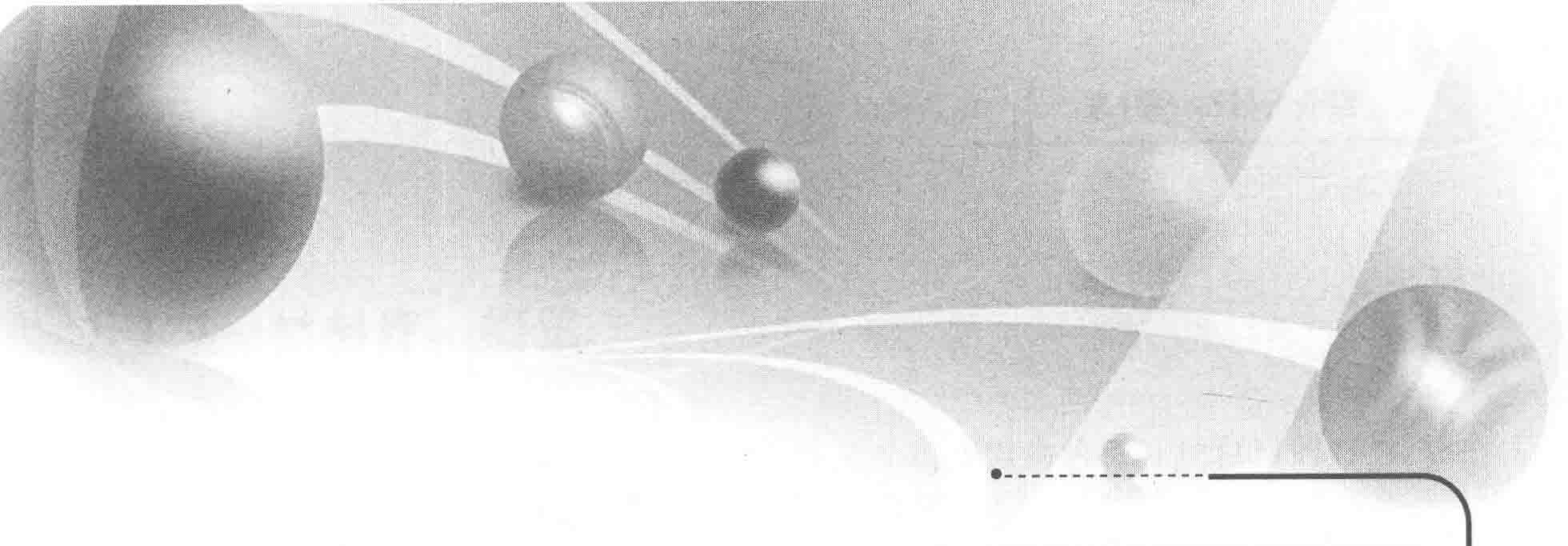
序言

前言

第 1 章 材料：介绍	1
1.1 介绍	2
1.1.1 材料库：概览	3
1.1.2 材料数据定义	4
1.1.3 组合材料行为	10
1.2 通用属性：密度	17
第 2 章 弹性力学属性	20
2.1 弹性行为：概览	21
2.2 线弹性	24
2.2.1 线弹性行为	25
2.2.2 无压缩或者无拉伸	33
2.2.3 平面应力正交异性失效度量	35
2.3 多孔弹性：多孔材料的弹性行为	40
2.4 次弹性	44
2.5 超弹性	47
2.5.1 橡胶型材料的超弹性行为	48
2.5.2 弹性体泡沫中的超弹性行为	68
2.5.3 各向异性超弹性行为	77
2.6 弹性体中的应力软化	86
2.6.1 Mullins 效应	87
2.6.2 弹性体泡沫中的能量耗散	95
2.7 线性黏弹性	101
2.7.1 时域黏弹性	102
2.7.2 频域黏弹性	116
2.8 非线性黏弹性	123
2.8.1 弹性体的迟滞	124
2.8.2 并联流变框架	126

2.9 率敏感的弹性泡沫：低密度泡沫	132
第3章 非弹性力学属性	138
3.1 非弹性行为：概览	139
3.2 金属塑性	146
3.2.1 经典的金属塑性	147
3.2.2 承受循环载荷的金属模型	154
3.2.3 率相关的屈服	165
3.2.4 率相关的塑性：蠕变和膨胀	167
3.2.5 退火或者熔化	177
3.2.6 各向异性屈服/蠕变	179
3.2.7 Johnson-Cook 塑性模型	185
3.2.8 动态失效模型	191
3.2.9 多孔金属塑性	196
3.2.10 铸铁塑性	201
3.2.11 双层黏塑性	204
3.2.12 ORNL-Oak Ridge 国家实验室本构模型	208
3.2.13 变形塑性	211
3.3 其他塑性模型	214
3.3.1 扩展的 Drucker-Prager 模型	215
3.3.2 改进的 Drucker-Prager/Cap 模型	235
3.3.3 Mohr-Coulomb 塑性模型	245
3.3.4 临界状态（黏土）塑性模型	251
3.3.5 可压碎泡沫塑性模型	256
3.4 织物材料	266
3.5 节理材料	281
3.6 混凝土	286
3.6.1 混凝土弥散开裂	287
3.6.2 混凝土的开裂模型	296
3.6.3 混凝土损伤塑性	303
3.7 橡胶型材料中的永久变形	318
第4章 渐进性损伤和失效	322
4.1 渐进性损伤和失效：概览	323
4.2 韧性金属的损伤和失效	326
4.2.1 韧性金属的损伤和失效：概览	327
4.2.2 韧性金属的损伤初始化	329
4.2.3 韧性金属的损伤演化和单元删除	341
4.3 纤维增强复合材料的损伤和失效	349
4.3.1 纤维增强复合材料的损伤和失效：概览	350
4.3.2 纤维增强复合材料的损伤初始化	351

4.3.3	纤维增强复合材料的损伤演化和单元删除	354
4.4	低周疲劳分析中韧性材料的损伤和失效	360
4.4.1	低周疲劳分析中韧性材料的损伤和失效: 概览	361
4.4.2	低周疲劳分析中韧性材料的损伤初始化	362
4.4.3	低周疲劳分析中韧性材料的损伤演化	363
第5章	水动力属性	366
5.1	水动力行为: 概览	367
5.2	状态方程	369
第6章	其他材料属性	388
6.1	力学属性	389
6.1.1	材料阻尼	390
6.1.2	热膨胀	395
6.1.3	场膨胀	400
6.1.4	黏性	405
6.2	热传导属性	409
6.2.1	热传导属性: 概览	410
6.2.2	传导	410
6.2.3	比热容	411
6.2.4	潜热	413
6.3	声学属性	415
6.4	质量扩散属性	423
6.4.1	扩散	424
6.4.2	溶解性	427
6.5	电磁属性	429
6.5.1	导电性	430
6.5.2	压电行为	431
6.5.3	磁导率	435
6.6	孔隙流体流动属性	440
6.6.1	孔隙流体流动属性: 概览	441
6.6.2	渗透性	441
6.6.3	多孔体模量	446
6.6.4	吸附性	447
6.6.5	凝胶溶胀	450
6.6.6	吸湿溶胀	451
6.7	用户材料	454
6.7.1	用户定义的力学材料行为	455
6.7.2	用户定义的热材料行为	460



第 1 章 材料：介绍

1.1 介绍.....	2
1.2 通用属性：密度	17

1.1 介绍

- “材料库：概览”，1.1.1 节
- “材料数据定义”，1.1.2 节
- “组合材料行为”，1.1.3 节

1.1.1 材料库：概览

本节描述如何在 Abaqus 中定义材料，并简要介绍所提供的每一种材料的行为。在《Abaqus 理论手册》中对材料的更多高级行为进行了详细描述。

定义材料

- 选择材料行为并定义它们（“材料数据定义”，1.1.2 节）。
- 组合互补的材料行为，例如弹性和塑性（“组合材料行为”，1.1.3 节）。

材料计算可以使用局部坐标系（“方向”，《Abaqus 分析用户手册——介绍、空间建模、执行与输出卷》的 2.2.5 节）。任何各向异性属性必须在局部坐标系中给出。

可用的材料行为

Abaqus 中的材料库覆盖了线性和非线性、各向同性和各向异性的材料行为。在单元中使用数值积分，包括壳和梁截面的数值积分，为分析最复杂的复合结构提供了灵活性。

材料行为分为以下几种：

- 一般属性（材料阻尼、密度、热膨胀性）。
- 弹性材料属性。
- 非弹性材料属性。
- 热属性。
- 声学属性。
- 流体静压属性。
- 状态方程。
- 质量扩散属性。
- 电属性。
- 孔隙流体流动属性。

材料库提供的一些力学行为是相互排斥的：这些行为不能在单一材料的定义中同时出现。有些行为要与其他行为同时使用，比如塑性与线弹性。此要求将在每种材料行为描述的结尾，以及在“组合材料行为”（1.1.3 节）中讨论。

与不同单元类型一起使用的材料行为

与实体、壳、梁和管单元一起使用的具体材料并没有一般的限制，允许进行任何合理的组合。确实存在的某些限制将在后续对特殊行为的描述中加以阐述。在描述每一种材料行为的结尾处将介绍与该材料行为相对应的可用单元。

使用完整的材料定义

材料定义可以包含对使用此材料的单元或者分析来说并没有意义的行为。将忽略这些行为。例如，一种材料在定义时包含热传导属性（热导率、比热容）以及应力应变属性（弹性模量、屈服应力等）。当此材料与非耦合应力/位移单元一起使用时，Abaqus 将忽略热传导属性；当它与热传导单元一起使用时，则忽略力学强度属性。这一功能有助于用户建立完整的材料定义并在任何分析中使用它们。

Abaqus/Standard 中用分布函数定义均质实体单元在空间变化的材料行为

在 Abaqus/Standard 中，可以使用分布函数（“分布函数定义”，《Abaqus 分析用户手册——介绍、空间建模、执行与输出卷》的 2.8.1 节）为均质实体单元定义空间变化的质量密度（“通用属性：密度”，1.2 节）、线弹性行为（“线弹性行为”，2.2.1 节）和热膨胀（“热膨胀”，6.1.2 节）。在材料行为变化非常大的模型中使用分布函数，能够极大地简化前处理和后处理，并且在分析中通过允许单一材料定义空间变化的材料行为来提高性能。如果没有分布函数，建立这样的模型可能需要许多材料定义和许多相关联的截面属性。

1.1.2 材料数据定义

产品：Abaqus/Standard Abaqus/Explicit Abaqus/CFD Abaqus/CAE

参考

- “材料库：概览”，1.1.1 节
- “组合材料行为”，1.1.3 节
- * MATERIAL
- “创建材料”，《Abaqus/CAE 用户手册》的 12.4.1 节

概览

Abaqus 中的材料定义：

- 指定材料行为，并提供所有相关的属性数据。
- 可以包含多重材料行为。
- 被赋予一个名字，可用来指向模型中使用此材料制成的零件。
- 可以具有温度和/或场变量相关性。
- 在 Abaqus/Standard 中可以与所求解的变量相关。
- 如材料不是各向同性的，则能够在局部坐标系中指定（“方向”，《Abaqus 分析用户手

册——介绍、空间建模、执行与输出卷》的 2.2.5 节)。

材料定义

在一个分析中可以定义任何数量的材料。每一种材料的定义，可以根据需要包含任何数量的材料行为，从而指定完整的材料行为。比如，在线性静力分析中可能仅需要弹性材料行为，但是在更加复杂的分析中，可能需要几种材料行为。

在定义每一种材料时都必须给该材料赋予名称。将材料赋予模型区域的截面定义可以使用此名称来引用此材料。

输入文件用法：* MATERIAL, NAME = 名称

在数据块中指定每一种材料定义，此数据块通过 * MATERIAL 选项初始化。材料定义是连续的，直到引入一种非材料行为（比如另外一个 * MATERIAL 选项）的选项，在此处默认完成材料定义。材料行为选项的次序不重要。数据块中的所有材料行为选项默认为定义同一种材料。

Abaqus/CAE 用法：Property module: material editor: 名称

使用 Material Options 列表下的菜单栏添加一个材料的行为。

大应变注意事项

当给定有限应变计算的材料属性时，“应力”为“真”（柯西）应力（现时构形上的应力），并且“应变”为对数应变。例如，除非另有说明，对于单轴行为

$$\varepsilon = \int \frac{dl}{l} = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right)$$

将材料数据指定为温度和独立场变量的函数

通常将材料数据指定为独立变量（如温度）的函数。通过在不同温度下指定材料属性，使其与温度相关。

在某些情况下，材料属性可以定义为 Abaqus 计算所得变量的函数。例如，为了定义一条加工硬化曲线，应力必须作为等效塑性应变的函数来给出。

材料属性也能与“场变量”相关（该场变量作为时间的函数，由用户定义，能够代表任何独立量，并定义在节点上）。例如，材料模量能够成为复合材料中织物密度的函数，或者合金中相分数的函数。详细内容见“指定场变量相关性”。场变量的初值通过初始条件给定（见“Abaqus/Standard 和 Abaqus/Explicit 初始条件”，《Abaqus 分析用户手册——指定条件、约束与相互作用卷》的 1.2.1 节），且在分析中能作为时间的函数而改变（见“预定义的场”，《Abaqus 分析用户手册——指定条件、约束与相互作用卷》的 1.6.1 节）。此功能是实用的，比如，在辐射或一些其他预先计算得到的环境因素的影响下，材料属性将随时间而改变。

在 Abaqus/Standard 中使用分布函数定义的任何材料属性（如质量密度、线弹性行为和/

或热膨胀性) 都不能与温度和/或场相关性一起定义。然而, 具有温度和/或场相关性的其他材料行为的定义可以使用分布函数定义的材料行为。见“通用属性: 密度”(1.2节), “线弹性行为”(2.2.1节) 和“热膨胀”(6.1.2节)。

材料数据的内插

在最简单的属性不变的情况下, 只输入常量即可。当材料数据仅是一个变量的函数时, 数据必须以独立变量的升序给出。Abaqus 为给定数据之间的值进行线性插值, 并假定给定独立变量范围之外的属性为常数(除了织物材料, 使用最后指定数据点处的斜率进行指定范围以外的线性外推)。这样, 便能够为材料模型给出必要的尽可能多或尽可能少的输入值。如果材料数据以强非线性方式与独立变量相关, 则必须设置足够多的数据点, 这样线性插值才能够准确地反映材料的非线性行为。

如果材料属性与几个变量相关, 当材料属性随第一个变量的变化而变化时, 必须保证其他变量为固定值, 第二个变量则是升序, 然后是第三个变量, 依此类推。数据必须总是有序的, 以保证独立变量以升序给出。此过程可保证基于独立变量的材料属性值在任何独立变量下是完全的且唯一的。进一步的解释和例题见“输入语法规则”, 《Abaqus 分析用户手册——介绍、空间建模、执行与输出卷》的1.2.1节。

【例 1】 与温度相关的线弹性各向同性材料。

图 1-1 所示为一种简单的线弹性各向同性材料的弹性模量 E 和泊松比 ν 与温度 θ 的函数关系。

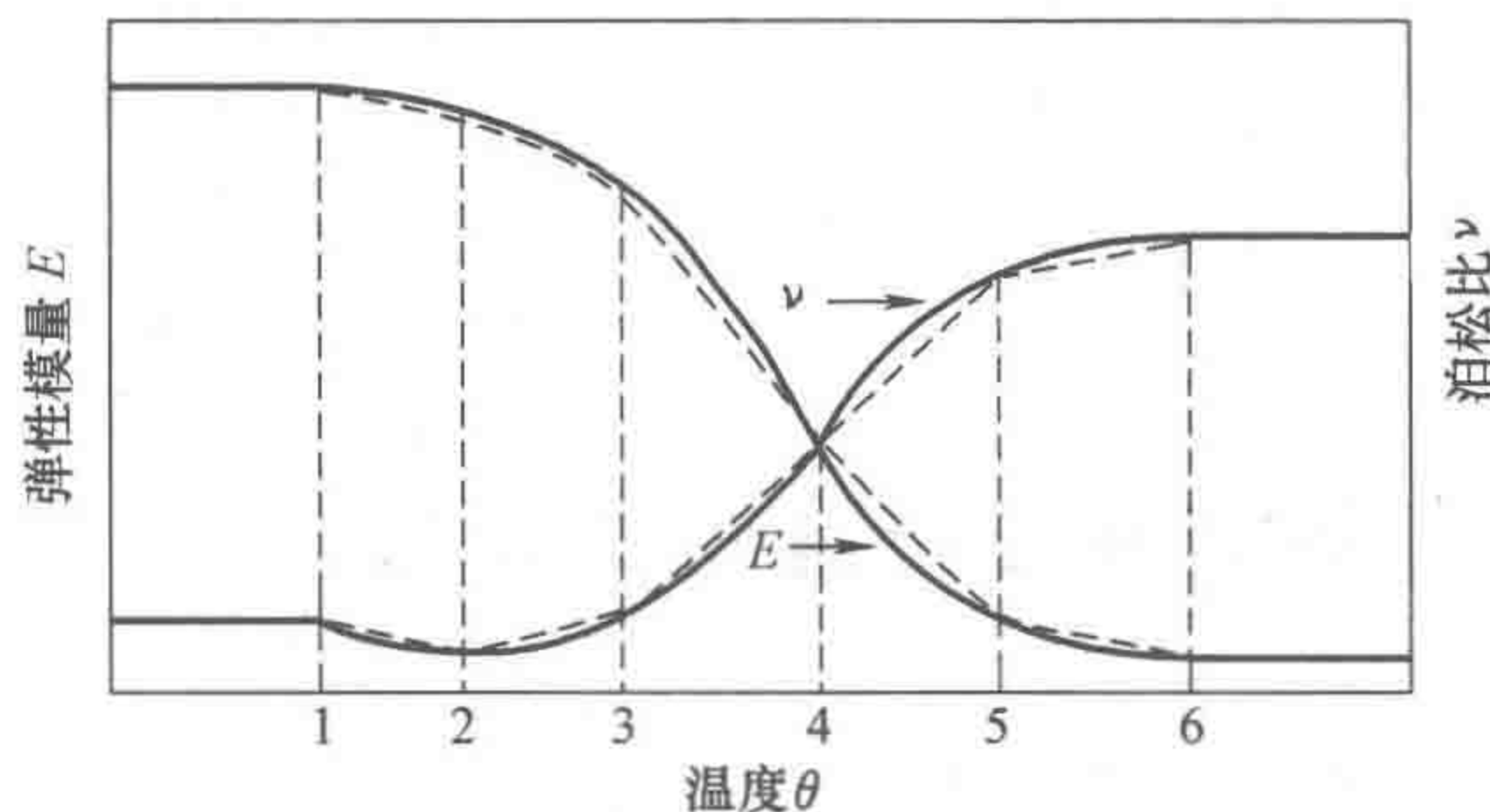


图 1-1 材料定义举例

例 1 中指定了 6 组值来描述材料, 见表 1-1。

表 1-1 描述材料的 6 组值

弹性模量	泊松比	温度
E_1	ν_1	θ_1
E_2	ν_2	θ_2
E_3	ν_3	θ_3
E_4	ν_4	θ_4
E_5	ν_5	θ_5
E_6	ν_6	θ_6

对于 $\theta_1 \sim \theta_6$ 所定义范围之外的温度，Abaqus 默认 E 和 ν 为常数。图中虚线为直线，代表将用于此材料模型的直线近似。在此例中，只给出了一个热膨胀系数值 α_1 ，并且它是独立于温度的。

【例 2】 弹塑性材料。

图 1-2 所示为一种屈服应力与等效塑性应变和温度相关的弹塑性材料。

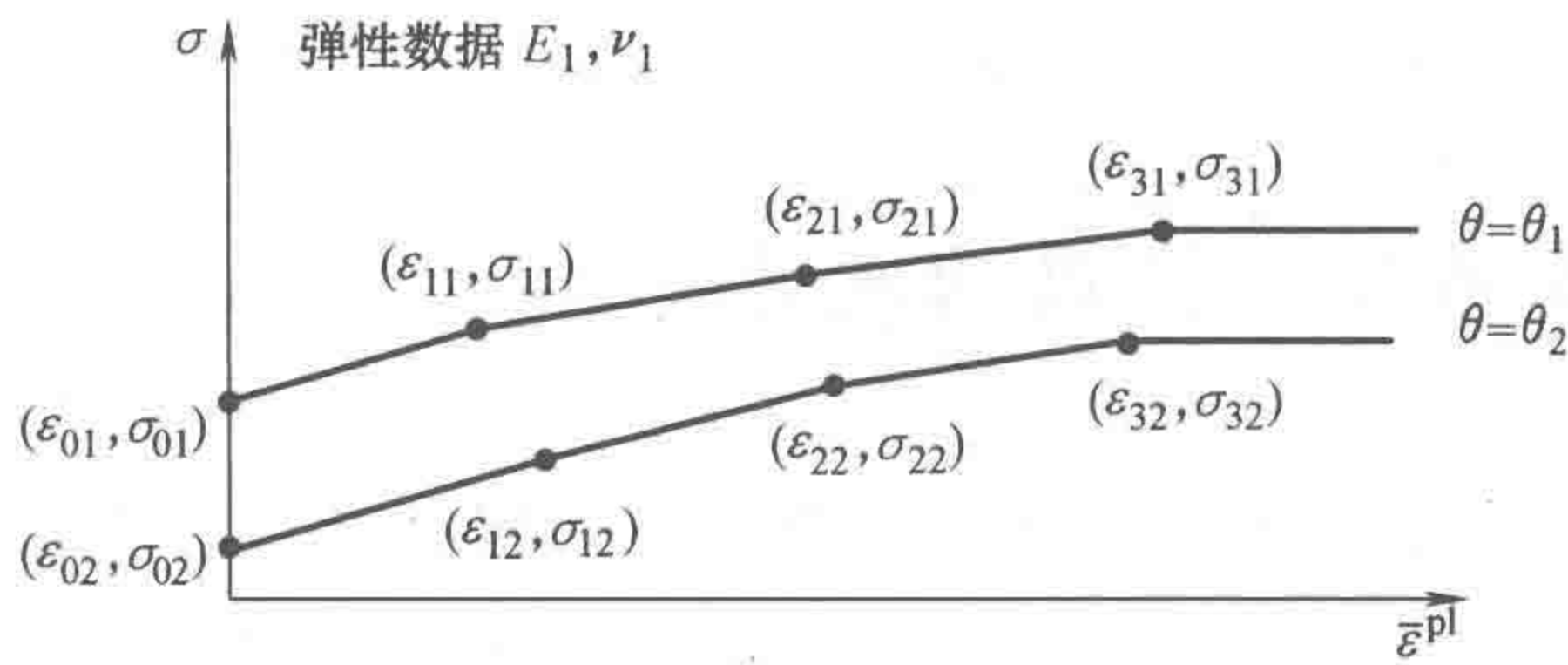


图 1-2 与两个独立变量相关的材料定义示例

在此例中，第二个独立变量温度必须保持为常数，而屈服应力是第一个独立变量等效塑性应变的函数。接着，选择更高的温度并在此温度下给出了屈服应力与等效塑性应变的关系。然后根据需要重复地详细描述属性变量，见表 1-2。

表 1-2 重复地详细描述属性变量

屈服应力	等效塑性应变	温度
σ_{01}	ϵ_{01}	θ_1
σ_{11}	ϵ_{11}	θ_1
σ_{21}	ϵ_{21}	θ_1
σ_{31}	ϵ_{31}	θ_1
σ_{02}	ϵ_{01}	θ_2
σ_{12}	ϵ_{12}	θ_2
σ_{22}	ϵ_{22}	θ_2
σ_{32}	ϵ_{32}	θ_2

指定相关的场变量

可以指定用户定义的相关场变量的数量，以满足多重材料行为的需要（见“预定义场”，《Abaqus 分析用户手册——指定条件、约束与相互作用卷》的 1.6.1 节）。如果不为一种材料行为指定一些可以使用的相关的场变量，则默认材料数据与场变量无关。

输入文件用法：* MATERIAL BEHAVIOR OPTION, DEPENDENCIES = n

* MATERIAL BEHAVIOR OPTION 是指可指定相关场变量的任何材料属性选项。每个数据行能容纳 8 个数据项。如果一行不足以容纳相关变量，则可以增加更多的行。例如，一个线弹性各向同性的材料可以定义为温度和 7 个场变量 (fv) 的函数：

* ELASTIC, TYPE = ISOTROPIC, DEPENDENCIES = 7