



中国汽车工程学会

汽车工程图书出版专家委员会

推荐出版

轻量化手册 5

HANDBUCH LEICHTBAU

轻量化 部件和结构的评价

[德]弗兰克·亨宁 (Frank Henning) 主编
[德]埃尔韦拉·穆勒 (Elvira Moeller)
北京永利信息技术有限公司 译
陈瑶 审



中国汽车工程学会

汽车工程图书出版专家委员会 推荐出版

轻量化手册 5

HANDBUCH LEICHTBAU

轻量化部件和结构的评价

[德] 弗兰克·亨宁 (Frank Henning)

[德] 埃尔韦拉·穆勒 (Elvira Moeller)

北京永利信息技术有限公司

陈瑶

主编

译

审

 北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

版权专有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

轻量化部件和结构的评价 / (德) 亨宁 (Henning, F.), (德) 穆勒 (Moeller, E.)
主编; 北京永利信息技术有限公司译. —北京: 北京理工大学出版社, 2015. 5
(轻量化手册; 5)
ISBN 978-7-5682-0596-2

I. ①轻… II. ①亨… ②穆… ③北… III. ①汽车轻量化-研究 IV. ①U462.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 093846 号

北京市版权局著作权合同登记号 图字: 01-2014-0361 号

Copyright © 2011 Carl Hanser Verlag, Munich/FRG

All rights reserved.

Authorized translation from the original German language edition

published by Carl Hanser Verlag, Munich/FRG

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010)68914775(总编室)

82562903(教材售后服务热线)

68948351(其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 保定市中华美凯印刷有限公司

开 本 / 787 毫米×1092 毫米 1/16

印 张 / 12.25

彩 插 / 12

字 数 / 274 千字

版 次 / 2015 年 5 月第 1 版 2015 年 5 月第 1 次印刷

定 价 / 96.00 元

责任编辑 / 张慧峰

文案编辑 / 杜春英

责任校对 / 孟祥敬

责任印制 / 王美丽

图书出现印装质量问题, 请拨打售后服务热线, 本社负责调换

前言

可通过数字模拟的方式描述部件的生产过程和性能。应在确保部件安全性的前提下借助有限元法实现优化重量的目的。例如，为了确保轿车客舱的安全性，还要将断裂过程纳入碰撞模拟中。

有关运行安全性的章节内容涉及因振动断裂或危险振动裂纹引起的部件失效。从已知的负荷/时间函数出发，可根据具体情况组合材料、成型和加工工艺以优化相关设计。对于新研发来说，决定性的因素是尽可能以非破坏性的方式对实现的改进成果进行试验。经验证的非破坏性试验方法不可简单地移植到新材料上。另外，在试验技术方面也需要进行创新。

尤其对于民用航空业的飞机运营来说，希望能对故障进行可靠探测。在结构健康监测（Structural Health Monitoring）这个主题下，应描述部分已实现的结构健康监测传感器方面的经验，这些经验对未来而言具有深远的意义。

由于涉及具有高集成度的复杂结构，因此纤维增强塑料结构的维修可能性尤为重要。本书第5章描述了来自航空业不同领域的各种方法，这些方法可以通过其他形式转移到其他纤维增强塑料结构的维修问题上。

回收利用的主要问题是耐用性方面。必须根据使用情况和材料来制订回收利用方案。如果可以一起回收利用不同的材料流，则可实现回收利用的经济性，且有大量的技术解决方案可用于回收利用。

目 录

1 用于过程和部件模拟的材料模型

Hermann Riedel / 1

1.1 对塑性模型的描述 / 2

1.1.1 概述 / 2

1.1.2 冯·米塞斯模型 / 3

1.1.3 非线性随动强化模型 (Chaboche 模型) / 3

1.1.4 Chaboche 模型在回弹方面的应用 / 4

1.1.5 各向异性的唯象模型 / 5

1.1.6 纹理模型 / 7

1.1.7 在轻量化材料上应用纹理模型 / 8

1.2 损伤与失效模型的说明 / 11

1.2.1 断裂机制 / 11

1.2.2 延性断裂的断裂标准 / 12

1.2.3 延性断裂的损伤机制 / 13

1.2.4 轧制时 Gologanu 模型在边缘形成的裂纹上的应用 / 14

1.2.5 Gologanu 模型在成型极限图中的应用 / 16

1.2.6 纤维增强塑料 / 16

1.2.7 断裂力学 / 19

1.2.8 与 1.1 和 1.2 相关的详细信息 / 20

1.3 金属材料及其连接的碰撞性能 / 24

1.3.1 用于碰撞模拟的材料和失效模型 / 25

1.3.2 铝材和镁材的碰撞模拟 / 27

1.3.3 TRIP 钢从变形到碰撞的连续模拟 / 28

1.3.4 连接的碰撞模拟 / 30

1.3.5 与 1.3 相关的详细信息 / 34

1.4 聚合材料的碰撞性能 / 36

1.4.1 非强化热塑性塑料的机械特性 / 36

1.4.2 碰撞负荷下对纤维强化塑料的数字模拟 / 40

1.4.3 与 1.4 相关的详细信息 / 41

2 轻量化结构使用强度的重要性

Andreas Büter, Holger Hanselka / 43

2.1 引言 / 43

2.2 作为部件设计基础的工作强度 / 47

- 2.2.1 设计任务书的内容 / 48
- 2.2.2 失效形式 / 50
- 2.2.3 材料的选择 / 53
- 2.2.4 例1: 发动机舱内高负荷塑料部件的工作强度设计 / 53

2.3 工作负荷的数值和试验模拟 / 62

- 2.3.1 材料特性 / 62
- 2.3.2 多轴性 / 63
- 2.3.3 试样和部件的强度比较 / 64
- 2.3.4 损伤累积 / 64

2.4 研发过程中工作强度的可能性 / 67

- 2.4.1 例2: 研发革新性高效轮组——设计和评估金属部件的特殊情况 / 67
- 2.4.2 例3: 在主要部件和次要部件中使用纤维强化塑料——塑料轮的研发 / 74

2.5 总结 / 84

2.6 与本章相关的详细信息 / 84

3 材料和部件的无损检验

Gerd Dobmann / 89

- 3.1 用于轻量化结构的标准化无损试验 / 90
- 3.2 用于原材料检验的无损试验的发展情况 / 93
 - 3.2.1 薄钢板的生产检验——材料参数的集成微磁性 / 93
 - 3.2.2 同时进行高强度车身钢材材料研发的无损检验——对塑性变形特性的微磁性描述 / 101
 - 3.2.3 纤维复合材料的无损检验 / 106
- 3.3 半成品和材料复合无损检验的发展情况 / 111
 - 3.3.1 生产过程中对激光拼焊板的检验 / 111
 - 3.3.2 激光焊接的生产检验 / 115
 - 3.3.3 机械连接的生产检验 / 117
 - 3.3.4 搅拌摩擦焊时集成在工艺中的质量监控和优化 / 117
- 3.4 总结 / 130
- 3.5 与本章相关的详细信息 / 131

4 结构健康监测——损伤检测

Hans-Jürgen Schmidt, Bianka Schmidt-Brandecker / 135

- 4.1 引言 / 135
- 4.2 结构健康监测法 / 136
- 4.3 通过 SHM 测定工作负荷 / 138
 - 4.3.1 用于测定工作负荷的系统 / 138
 - 4.3.2 硬着陆负荷 (hard landing detection) 极值的确定 / 139
 - 4.3.3 匹配检查要求 / 139
 - 4.3.4 安全系数 / 140
- 4.4 SHM 的结构优化 / 141
 - 4.4.1 压力机身上应用 SHM 的基本知识 / 142
 - 4.4.2 典型机身蒙皮降低重量的示例 / 144
 - 4.4.3 其他纵向加强条监控方法 / 146
 - 4.4.4 结论 / 146
- 4.5 轻量化结构的检查 / 147
 - 4.5.1 减少或替代传统检查 / 148
 - 4.5.2 减少或替代改动 / 148
 - 4.5.3 延长使用寿命 / 149
 - 4.5.4 根据状态进行维护 / 149
- 4.6 前景 / 150
- 4.7 与本章相关的详细信息 / 150

5 纤维强化塑料结构的可维修性和维修方案

Georg Wachinger, Christian Thum, Peter Scheid / 152

- 5.1 引言 / 152
- 5.2 纤维强化塑料结构的损伤和维修 / 152
 - 5.2.1 损伤原因 / 152
 - 5.2.2 损伤形式 / 153
 - 5.2.3 损伤区域 / 153
 - 5.2.4 维修类别 / 154
- 5.3 整体复合材料的维修方法 / 154
 - 5.3.1 用维修胶带进行临时性表面保护 / 154
 - 5.3.2 打磨 / 155
 - 5.3.3 采用注塑工艺对脱层进行维修 / 155
 - 5.3.4 使用铆钉维修脱层 / 156
 - 5.3.5 借助附加层进行维修 / 156

- 5.3.6 嵌接维修法 / 158
- 5.3.7 叠压法 / 166
- 5.4 夹层结构的维修 / 169
 - 5.4.1 蜂窝和面层之间的连接缺陷 / 170
 - 5.4.2 允许损伤尺寸的表面密封 / 170
 - 5.4.3 面层和型芯结构的损坏 / 172
 - 5.4.4 维修贯穿性损伤 / 176
- 5.5 总结 / 176
- 5.6 与本章相关的详细信息 / 177
- 6 轻量化的可回收利用性和产品寿命结束方案
Jörg Woidasky / 179
 - 6.1 资源效率作为指导原则 / 179
 - 6.2 产品寿命结束方案 / 181
 - 6.3 轻量化材料回收利用示例 / 182
 - 6.3.1 材料识别是关键步骤：用于航空材料的金属 / 182
 - 6.3.2 机械加工是关键步骤：玻璃纤维增强塑料的材料回收再利用 / 185
 - 6.3.3 热处理是关键步骤：回收碳纤维的热解过程 / 187
 - 6.3.4 与原材料生产相结合是关键步骤：水泥厂中玻璃纤维增强塑料的回收利用 / 188
 - 6.4 结论 / 188
 - 6.5 与本章相关的详细信息 / 189

用于过程和部件模拟的材料模型

Hermann Riedel

近年来，制造工艺和部件性能的数字模拟变得越来越重要。其中，最重要的数字化工具是有限元法（FEM）。许多行业都会对部件特性进行弹性分析，其不仅表现在重量优化方面（第1册第6章），而且在使用强度方面进行可靠部件设计（第5册第2章）时也是不可或缺的工具。此外，碰撞模拟已成为有限元法重要的且成功的应用领域，目前模拟已可替代大部分成本巨大的碰撞试验。长期以来，相对简单的弹性—塑性材料法则对于碰撞模拟来说已足够，但是现在开始越来越多地在轻量化结构中使用高强度材料，因此在碰撞模拟时还需要考虑断裂过程。

在铸造技术中，过程模拟是一种传统方法（第3册第1.1节）。目前，在成型技术中，模具制造商和部件研发机构通常会应用模拟软件。工艺链的模拟变得越来越重要，例如对成型—碰撞链条的模拟（第5册第1.3节）。在这里可将成型模拟的结果（如板材厚度、硬化、损坏，可能还有其他变量）移植到碰撞模拟上，并在碰撞模拟时加以考虑。

由于通常无法用传统的材料法则来描述新型轻量化材料，因此这些材料（诸如镁合金、高强度钢或纤维增强塑料）对工艺模拟和部件模拟提出了特殊的挑战。相关的示例请参见下文。

有限元法基于连续介质力学的宏观尺度。这种方法使用大多自然呈现的材料法则，而模型更多地涉及较小的尺度。这涉及织构模型（基于晶粒尺度）或者损伤模型（基于夹杂物颗粒的尺度和在这种颗粒上产生的气孔）。

本章首先描述了塑性和损伤材料模型，分别给出了这些模型在成型技术方面的应用示例；其次介绍了碰撞模拟的应用。

1.1 对塑性模型的描述

1.1.1 概述

一般情况下，材料的机械特性可通过在拉力试验中测定应力—应变曲线进行描述（图 1.1）。应在屈服极限 σ_0 范围内分析线性弹性特性，在这个范围内，去负荷时变形是可逆的。从屈服极限起，材料会发生塑性变形。屈服应力随应变率增大而增大的现象被称为硬化。加工硬化曲线 $\sigma_y(\varepsilon)$ 在各种不同的成型工艺中都很常用。在作为材料损伤结果的应力下降和断裂出现之前，图 1.1 通过示例说明了 Ramberg 和 Osgood 幂次定律 ($\sigma_y \propto \varepsilon^N$) 和硬化指数 N 。对于许多材料来说，硬化指数的数值在 0.1~0.3 之间，其中从趋势上来看高强度材料具有更小的硬化指数。

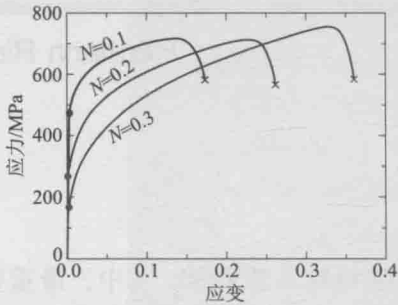


图 1.1 金属和合金的典型应力—应变曲线
（点表示屈服极限 σ_0 ，叉形符号表示断裂）（见彩插）

一般情况下，材料的负荷是多轴的，也就是说，负荷并不像拉力试验那样只沿着一个方向。冯·米塞斯（von Mises）模型是在连续介质力学的层面上描述金属塑性的传统模型。

20 世纪初，虽然冯·米塞斯在不了解任何物理变形机制的情况下提出了以其名字命名的模型，但是该模型却出人意料地很好地描述了真实材料的特性。然而，由于许多应用领域需要更高的精确度，因此建议将其进行大量的改进，下面就其中的几点进行说明。

对于大多数金属材料来说，屈服应力随着负荷速度的升高而升高，并随温度的升高而降低。例如，碰撞模拟中在许多情况下都必须对此加以考虑。在第 5 册第 1.3 节中，给出了应变率和温度关系的常用公式，例如可参见（Johnson 1985）。

为了说明负荷反向时的特性（一般指改变负荷方向时），需要其他的模型扩展。冯·米塞斯模型另一种表达的前提是，在应力值相同（在负荷反向前达到相同的值）的情况下负荷反向时，流变开始。但是，多数材料在负荷反向时明显更早地发生塑性流变，这种现象被称为包辛格效应。我们将在下面说明一种经常使用的、除了考虑包辛格效应之外还考虑应变率相关塑性（Chaboche 2008）的模型。对于预测板材变形时的回弹来说，包辛格效应起着决定性的作用。

一般来说，轧制的板材是各向异性的，也就是说板材沿轧制方向、横向和法线方向具有不同的弹塑性特性。在此，最重要的原因是结晶织构，即组成材料晶体的非随机取向。材料在具有较高变形程度的变形过程中会形成织构。本册第 1.1.5 节说明了各向异性特性的唯象模型，并在第 1.1.6 节中使用纹理模型，从而可以描述

像镁合金这样的轻量化材料的复杂特性。纹理模型基于晶体层面，即基于微米尺度，并可据此推导出多晶体技术材料的特性。

负责塑性变形的位错（周期性晶格的线性黏附缺陷）基于一个更小的尺度。目前，从位错的原子特性直至连续介质力学说明的连续性可塑性多尺度模拟都是不可行的。即便如此，目前已说明了原子位错模型可塑性的重要方面（Mrovec 2004, Vitek 2008），相互位错运动的模拟也已取得了显著的进展（Weygand 2005）。

1.1.2 冯·米塞斯模型

冯·米塞斯模型假设塑性变形不会发生体积变化。该模型假设，对于塑性流变来说，只有所谓的冯·米塞斯等效应力 σ_e 是重要的。这一模型是根据形变偏量的分量 s_{ij} 得出的：

$$\sigma_e = \left(\frac{3}{2} s_{ij} s_{ij} \right)^{1/2} \quad (1)$$

根据爱因斯坦求和约定，将两次出现的笛卡尔指数（在此为 i 和 j ）相加，应力张量根据 $s_{ij} = \sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma_m$ ，借助流体静力分应力 $\sigma_m = \sigma_{kk}/3$ 和克罗内克符号 δ_{ij} 得出偏量。用类似于等效应力的方法确定等效塑性应变，但是用系数 $2/3$ 代替 $3/2$ 。进一步的说明请参阅连续介质力学方面的书籍，例如（Beer 1992）。

如果等效应力 σ_e 等于材料特定的流变压力 σ_y ，则材料会在冯·米塞斯模型的框架内发生塑性流变。通常可借助流变潜力 Φ 来说明这种流变条件，针对冯·米塞斯塑性来说，其形式为：

$$\Phi = (\sigma_e / \sigma_y)^2 - 1 \quad (2)$$

当 $\Phi = 0$ ，即 $\sigma_e = \sigma_y$ 时，材料发生塑性流变；当 $\Phi < 0$ ，即 $\sigma_e < \sigma_y$ 时，材料发生弹性流变。此外，通常也使用流变潜力以确定塑性变形的方向，多数情况下根据流变定律、通过流变潜力计算应变率张量：

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \lambda \partial \Phi / \partial \sigma_{ij} \quad (3)$$

该公式带有一个比例因数 λ ，其被称为关联流变系数。根据公式（2）和公式（3）计算冯·米塞斯塑性，使得材料沿应力偏量的方向流变，即 $\dot{\epsilon}_{ij} \propto s_{ij}$ 。冯·米塞斯模型可与连续介质力学（平衡和兼容）的其他公式一起用在所有常见的固体力学的有限元程序中。

1.1.3 非线性随动强化模型（Chaboche 模型）

比冯·米塞斯模型更高效和灵活的模型是用内部变量公式描述硬化的模型。这种模型的一个代表是非线性随动强化模型，即 Chaboche 模型。这种模型存在大量的变形（Chaboche 2008），但基本结构始终不变，可通过下列公式计算黏塑性应变率：

$$\dot{\epsilon}_{ij}^{vp} = \frac{3}{2} \dot{\epsilon}_e^{vp} \frac{S_{ij}}{S_e} \quad (4)$$

其中, 等效应变率为

$$\dot{\varepsilon}_e^{vp} = \left\langle \frac{S_e - R - \sigma_0}{K} \right\rangle^n \quad (5)$$

$$S_e = \left(\frac{3}{2} S_{ij} S_{ij} \right)^{1/2} \quad (6)$$

其中, σ_0 是屈服极限; K 和 n 是模型参数; 如果自变量为负, 则尖括号为零; R 是描述各向同性硬化的变量; S_{ij} 是有效应力, $S_{ij} = s_{ij} - \alpha_{ij}$, 其由应力偏量 s_{ij} 和内部反向应力 α_{ij} 组成。该内部变量 α_{ij} 描述了运动硬化, 从而也描述了包辛格效应。

硬化变量应遵从发展方程:

$$\dot{R} = b(Q - R) \dot{\varepsilon}_e^{vp} \quad (7)$$

$$\dot{\alpha}_{ij} = h \dot{\varepsilon}_{ij}^{vp} - r_{\text{动态}} \dot{\varepsilon}_e^{vp} \alpha_{ij} - r_{\text{静态}} \alpha_{ij} \quad (8)$$

其中, Q 是各向同性硬化变量的饱和值, b 表示升高, h 表示运动硬化 (h 是英语 hardening (硬化) 的首字母), $r_{\text{动态}}$ 和 $r_{\text{静态}}$ 分别是动态和静态回复的参数 (r 是英语 recovery (恢复) 的首字母), 其中使用累积应变率 $\dot{\varepsilon}_e^{vp}$ 得出动态回复参数, 并由此说明了循环硬化或软化:

$$r_{\text{动态}} = r_{ss} + (1 - r_{ss}) \exp(-c \varepsilon_e^{vp}) \quad (9)$$

其中, r_{ss} 和 c 为模型参数。

为了准确复制磁滞曲线, 通常需将两个 (或多个) 运动硬化变量相加, 即 $\alpha = \alpha^{(1)} + \alpha^{(2)}$, 这些变量应各自遵循发展方程 (8), 但是应相应使用各自的参数。在方程 (7) 和方程 (8) 中, Chaboche (2008) 规定了可变温度的附加项。除了黏塑性部分之外, 总应变率还包括弹性分量和热学分量。以这种形式或类似的形式, 在某些有限元程序中实现 Chaboche 模型。

1.1.4 Chaboche 模型在回弹方面的应用

20 世纪 90 年代, 人们发现深冲后计算出的回弹量与使用的塑性法则有很大关系 (Mattiasson 1995)。在深冲时, 通常首先将板材沿着一个方向弯曲, 然后沿着反方向并不时再次沿着初始方向弯曲。在这种交变增塑作用中, 包辛格效应对于板材中的应力起作用, 因此也对从模具中取出成型板件的回弹量起作用。在轻量化结构中使用的高强度材料比传统的深冲钢回弹更为强烈。诸如 C 型钢之类的开口型材尤其敏感, 在这种型材上多次表现出效应的重要性, 并说明了其实现的过程, 例如 (Krasovskyy 2006, Kubli 2008, Sester 2009)。

图 1.2 给出了两个例子 (Koch 2010)。较高强度的双相钢 HCT780X (屈服极限为 483 MPa) 表现出比强度稍低的钢材 HX340LAD (屈服极限为 270 MPa) 明显更强烈的回弹。图 1.2 也给出了测量到的和计算的回弹的对比, 并且说明了材料模型对于得出正确回弹结论的重要性。纯各向同性硬化的模拟甚至预测了 HCT780X 沿错误方向的回弹, 而 Chaboche 模型用各向同性和运动硬化很好地再现了测量的回弹量。

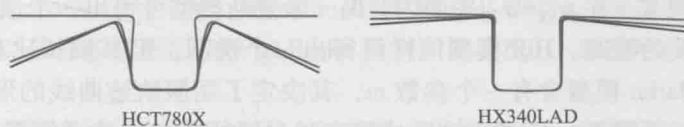


图 1.2 C 型钢的回弹（黑色：试验；蓝色：借助各向同性硬化进行的模拟；红色：借助各向同性运动硬化进行的模拟。通过压模确定的标准几何形状具有垂直的壁和水平的侧翼）（见彩插）

为了测量模型参数，专门开发了一种在薄板试样上进行拉伸—挤压试验的试验技术（Krasovskyy 2006）。其中，在卸除负荷并再次施加负荷时，切线模数要比初次施加负荷时的弹性模数明显更小，这是一种早已广为人知的效应（Yoshida 2002, Doege 2002）。无论是否以物理的方式解释这种结果，对可变切线模量的分析都改善了预测回弹的准确度（Krasovskyy 2006）。对成型模拟来说，比较重要的还包括对各向同性的考虑，这将在后文予以说明。这种或者其他模型的改进（如在（Chaboche 2008）中讨论的一样），已在成型模拟商业软件中部分实现（Kubli 2008, Sester 2009）。

1.1.5 各向异性的唯象模型

轧制板材的各向异性在板材成型过程中也是非常重要的，例如，板材沿不同方向的各种收缩会导致裙带花边（一种深冲缺陷）的形成（图 1.3）。由于切割掉边缘会造成材料损失，因此不希望出现诸如此类的裙带花边现象，在设计复杂的挤压工具时，必须考虑收缩不一致的问题。

文献（Hill 1948, 1990; Barlat 1989, 2007）中给出了大量塑性各向异性的传统唯象模型，且这些模型已在板材成型模拟的多数有限元程序中实现（参阅第 5 册第 1.3 节），因此此处不再重复该公式。多数情况下，通过对板材试样沿轧制方向、横向和 45° 方向的拉伸试验中的 r 值进行测量

（Lankford 参数），可确定模型参数。 r 值被定义为应变率的比率：

$$r = \dot{\epsilon}_{22} / \dot{\epsilon}_{33} \quad (10)$$

其中，2 表示分量位于垂直于拉伸方向的板平面内；3 表示分量垂直于板平面。

图 1.4 所示为屈服轨迹曲线， $\Phi=0$ ，在 $\sigma_{11}-\sigma_{22}$ 平面内， σ_{11} 为沿轧制方向的应力， σ_{22} 为沿横向的应力。应比较不同模型的预测结果（Krasovskyy 2005, 2006）。在沿轧制方向进行单轴拉伸时，所有的模型都穿过一个相同的点，因为在这个点对可

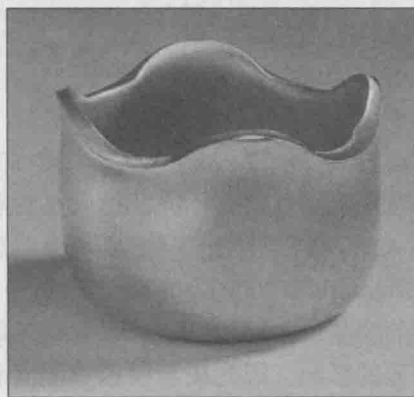


图 1.3 由于铝合金热轧制板材的各向同性对称杯造成轴形件边缘上形成的裙带花边（Engler 2007）（见彩插）

各种模型进行调节。在 $\sigma_{11}-\sigma_{22}$ 平面内，冯·米塞斯模型可得出一个倾斜 45° 的，并与各向异性相关的椭圆。Hill 模型同样可得出一个椭圆，但其轴长比和斜度都与各向异性相关。Barlat 模型含有一个参数 m ，其决定了屈服轨迹曲线的形状， $m=2$ 时会形成椭圆形，而随着 m 的增大会形成越来越尖锐的尖角。建议使用 6（用于立方体体心的金属）或 8（用于立方体面心的金属）这两个数值，本例使用的是 $m=8$ 。

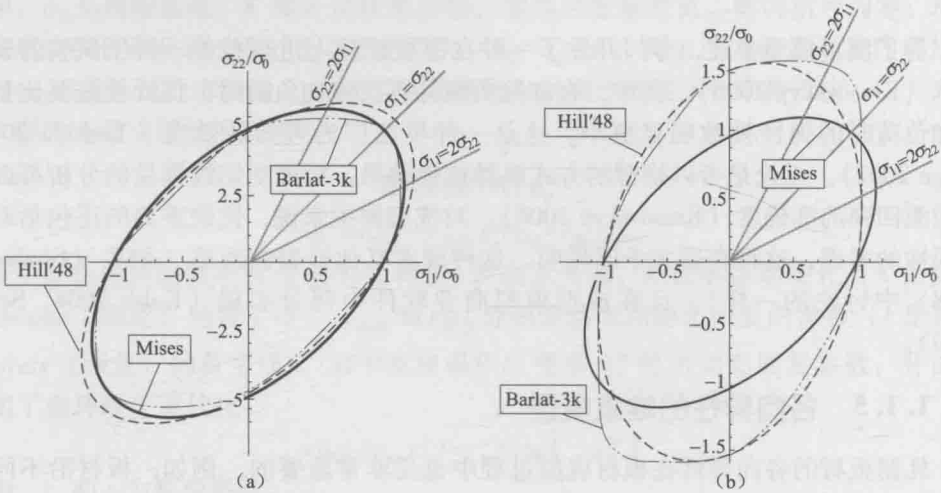


图 1.4 钢材 DX53 和铝合金 Al 2090-T3 的屈服轨迹曲线 (Krasovskyy 2005) (见彩插)
 (a) 钢材 DX53 的屈服轨迹; (b) 铝合金 Al 2090-T3 的屈服轨迹

图 1.4 (a) 所示为计算出的钢材 DX53 的屈服轨迹，这个轨迹是根据 $r_{0^\circ} = 1.54$ ， $r_{90^\circ} = 1.31$ 和 $r_{45^\circ} = 1.72$ 计算出来的。用不同模型预测的屈服轨迹曲线与冯·米塞斯椭圆仅略有不同，也就是说材料在板材平面上仅具有较小的各向异性。铝合金 Al 2090-T3 的各向异性则更为明显 [图 1.4 (b)]，在此， r 值为 $r_{0^\circ} = 0.21$ ， $r_{90^\circ} = 0.69$ (Yoon 2000)。需要注意的是，各向异性模型在横向（即沿着 σ_{22} 方向）上得到的流变压力要比冯·米塞斯模型高 50%。由于这些参数对板材成型的模拟结果有明显的影响，因此成型模拟有限元程序的开发者非常重视对各向异性的控制。如果需在预测回弹时考虑各向异性，则最简单的方法是组合使用 Chaboche 模型和 Hill 模型。为此应替换掉 Chaboche 模型中公式 (4)、公式 (6) 和公式 (8) 中的硬化项，可通过 Hill 模型的常用参数表示各向异性张量的分量 M_{ijkl} (Krasovskyy 2005)。

$$\dot{\epsilon}_{ij}^{vp} = \frac{3}{2} \dot{\epsilon}_e^{vp} \frac{M_{ijkl} S_{kl}}{S_e}, S_e = (S_{ij} M_{ijkl} S_{kl})^{1/2} \tag{11}$$

$$h \dot{\epsilon}_{ij}^{vp} \rightarrow \frac{3}{2} h \dot{\epsilon}_e^{vp} S_{ij} / S_e$$

然而，许多材料，如镁合金和钛合金会表现出各向异性的特性，且通过传统的模型无法对这些特性进行描述。关于借助唯象模型处理该特性的建议可参见

(Kowalsky 1999, Krasovskyy 2006, Banabic 2008 和 Dell 2008)。在这些模型中, 屈服轨迹曲线也可以具有非椭圆形状 (如 Barlat 模型中的情况), 这种形状会在变形时发生变化。

作为越来越复杂的唯象模型的另一个方案, 我们将在下面探讨纹理模型。复杂的唯象模型与纹理模型的比较可参见 (Krasovskyy 2005, 2006)。

1.1.6 纹理模型

多数金属材料是多晶体的, 也就是说它们含有大量的晶粒 (微晶), 其中每个晶粒都具有一个周期性的原子晶格结构, 因此表现为一个小的单晶体。单晶体是塑性各向异性的, 因为位错滑动和孪晶的形成都与滑移系或孪晶系统相关。

在宏观多晶体变形时, 各向异性晶粒必须随其晶轴旋转, 以确保晶粒结合在一起。这相应地会导致在变形过程中出现典型的晶轴定向分布, 例如, 在从立方体体心金属中拉拔金属丝时晶体偏向于指向晶格的平面对角, 也就是 $\{110\}$ -方向 (平行于钢丝轴)。定向分布函数是纹理的定量尺寸, 传统的 Taylor 模型基于以下假设, 即每个晶粒承受相同的且宏观的应变率。对于立方体金属和其他具有大量滑移系的材料来说, Taylor 模型可预测纹理并据此得出准确度大多可接受的各向异性的塑性特性。但是, 对于六角形金属和具有相对较少滑移系的材料来说, Taylor 模型是无效的。

借助 (Lebensohn 1993) 黏性塑性—自牢固模型可获得更佳的预测, 此时应借助单晶体可塑性的连续介质力学模型 (Asaro 1983) 描述晶粒的特性。单晶体塑性应变率由所有活性滑移系的数值组成, 其中通过施密德剪切应力可得出任意滑移系的剪切率:

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^{pl} = \dot{\gamma}_0 \sum_{\alpha=1}^S m_{ij}^{\alpha} \left(\frac{m_{kl}^{\alpha} s_{kl}}{g^{\alpha}} \right)^n \quad (12)$$

在此, 指数 α 表示 $1 \sim S$ 的滑移系编号; i, j, k, l 代表笛卡尔指数; $m_{ij} = b_i n_j$ 是 Schmid 张量, 根据滑动方向的单位矢量 (b_i) 和滑动层法线 (n_j) 可得出该张量; s_{kl} 是应力偏量; $\dot{\gamma}_0$ 是基准滑动率 (例如 $1/s$); 应力指数 n 是模型参数。硬化函数 g^{α} 遵守发展公式:

$$\dot{g}^{\alpha} = \frac{dg^{\alpha}}{d\Gamma} \sum_{\beta} h_{\alpha\beta} \dot{\gamma}^{\beta} \quad (13)$$

其中
$$\hat{g}^{\alpha} = \tau_0^{\alpha} + (\tau_1^{\alpha} + \theta_1^{\alpha} \Gamma) \left[1 - \exp\left(-\frac{\theta_0^{\alpha} \Gamma}{\tau_1^{\alpha}}\right) \right] \quad (14)$$

在此, Γ 是所有滑移系上按数量累加的剪切应力; $h_{\alpha\beta}$ 是硬化矩阵, 其对角线项描述通过滑动到该系统上进行滑移系的硬化, 其非对角线项说明通过滑动到其他系统上进行硬化。通常将所有的单元设为 $h_{\alpha\beta} = 1$ 。 τ_0, τ_1, θ_0 和 θ_1 是所有滑移系的特定参数。同样可通过公式 (12) 和附加条件 (由于结晶的原因, 孪晶的形成仅可单向进行, 但滑动时可以双向) 描述孪晶形成引起的变形。

黏塑性一致 (VPSC) 模型将典型的单晶晶粒看作基体 (具有所有晶体平均的

各向异性特性)中包含椭圆柱体形状的情况。通过公式(12)的线性化将问题大致追溯到弹性基体中包含椭圆这一传统问题上,从而得出答案(Eshelby 1957)。随后要满足浓度条件,所有晶粒应变率的加权平均值必须等于宏观应变率。根据晶粒的应变率计算晶格所需的旋转并由此计算定向分布函数。根据定向分布函数和晶粒的特性得出宏观硬化曲线和应力空间中的屈服点。

用VPSC模型模拟理想化的滚轧成型的典型计算时间在数秒到数分钟的范围。尤其是对于滑移系相对较少的材料来说,其结果明显比Taylor模型更切合实际。两种模型的缺点是计算出的纹理大多比测量到的纹理棱角更分明,这是进行各种后续研发的动力(Raabe 2004, Engler 2005),在此不做详细说明。

可获得更切合实际的结果,然而如果使用有限元对实际或理想化的晶粒结构进行建模,则计算成本将明显提高。开始时,根据初始纹理,每个晶粒都分配有一个方向,可通过公式(12)描述其特性。图1.5所示为一种铝合金在滚轧成型后的一个此类模型(起始状态是一个立方体块)。其典型的计算时间为一天,快速傅里叶变换法是一种被证实的非常有效的方法,这种方法大约可以在1小时内解决同样的问题(Prakash和Lebensohn 2009)。

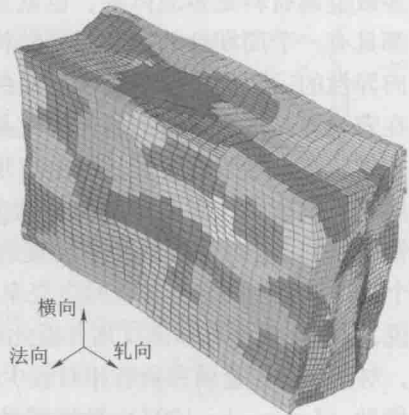


图1.5 理想化滚轧成型后变形的有限元网格(见彩插)

1.1.7 在轻量化材料上应用纹理模型

1. 铝合金

近年来,对铝合金织构和其他组织特征的发展进行了全面研究。Engler等人(Hirsch 2006, Engler 2007)对从卷曲直至冷轧的多级热轧工艺链进行了建模,其中不仅描述了变形纹理的发展情况,也说明了颗粒沉淀和再结晶以及其对纹理的影响。

借助这些模拟谨慎调整工艺步骤可进一步平衡组织热轧和冷轧对织构的影响效果,从而生产出接近各向同性的钢板。相对于热轧状态(图1.3),优化工艺链后可显著减少不希望形成的裙带花边(图1.6)。铝合金的详细信息请参见第2册第3章。

2. 镁合金

有关镁合金的一般性信息请参见第2册第4章。下面将具体说明有关轧制板材内在织构方面的问题。

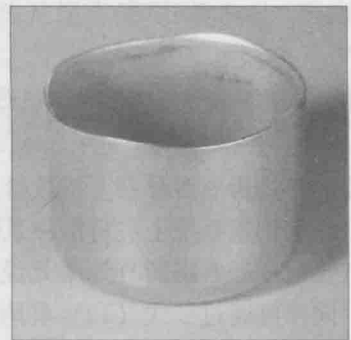


图1.6 优化工艺链后大大减少裙带花边(Engler 2007)

镁及其合金具有一种六边形的晶格，其在室温下仅提供活性较低的滑移系。从图 1.7 所示的滑移系可以看出，在室温下只有基面系统和棱柱形系统可激活。在这两种情况下，滑动矢量 $\langle 11.0 \rangle$ 处于基面层，因此无法垂直于基面滑动。实际上，这会使带随机定向晶粒的多晶体无法发生变形。但是孪晶的形成提供了从基面层剪切的可能性，并且确实在镁合金中激活了孪晶，从而在室温下也可承受一定的可成型性。

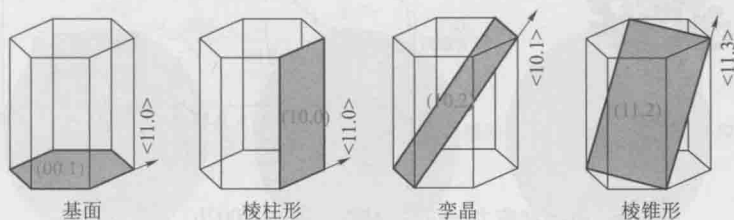


图 1.7 六边形金属中的滑移系和孪晶系统
(黄色：滑移面的法向量；蓝色：滑移方向) (见彩插)

在较高的温度下还要热激活棱锥形滑移，随后就不再要求形成孪晶。如图 1.8 所示，由此，晶粒尺度上的变形变得更为均匀，并且在晶界上会产生小得多的应力，随后材料可良好成型。因此，应在约 280℃ 的温度下轧制镁合金。

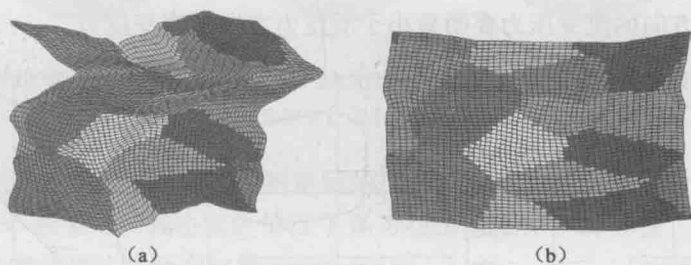


图 1.8 理想化轧制成型 (沿轧制方向看，颜色代表起始的晶粒取向 (Prakash 2009)) (见彩插)
(a) 不存在棱锥滑移的情况下，厚度降低 27% 后的不均匀成型；
(b) 激活棱锥滑移的情况下，厚度降低 40% 后的均匀成型

在轧制的镁板材中会产生一个突出的基面结构，也就是说晶粒的六角轴更倾向于垂直于板材面的方向。通过 VPSC 模型可精确地再现这一情况 (Walde 2007a)，这种情况适合用极图说明 [图 1.9 (a)]。

这种结构会导致极度的拉压不对称性 [图 1.9 (b)]，原因是在压力下可能会沿轧制方向产生孪晶，而在拉力负荷下不存在孪晶定向 (在定向中晶格可能会反转) 情况。因此，在压力试验中首先通过孪晶的形成使材料略成型，在后续的过程中，孪晶形成的可能性越来越小，材料强烈硬化。相反，在未激活孪晶的拉力试验中则呈现出一种常规的特性。图 1.9 也说明如果相应地选择滑移系的硬化参数，则