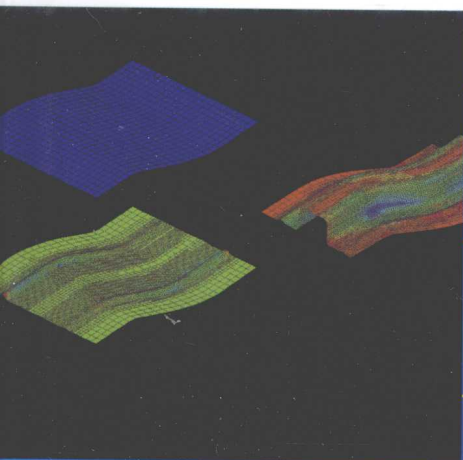


金属塑性成形导论

Einführung in die Umformtechnik



[德]Reiner Kopp Herbert Wiegels 著

康永林 洪慧平 译

鹿守理 审校



高等教育出版社

金属塑性成形导论

Einführung in die Umformtechnik

[德]Reiner Kopp Herbert Wiegels 著

康永林 洪慧平 译

鹿守理 审校



高等教育出版社 · 北京
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

图字：01 - 2009 - 5519 号

Einführung in die Umformtechnik

© 1999 Reiner Kopp und Herbert Wiegels

Verlag Mainz, Aachen 1999

图书在版编目(CIP)数据

金属塑性成形导论/(德)科普(Kopp,R.), (德)威格斯(Wiegels,H.)著;康永林,洪慧平译. —北京:高等教育出版社, 2010.3

ISBN 978 - 7 - 04 - 028136 - 1

I. 金… II. ①科…②威…③康…④洪… III. 金属压力加工 - 塑性变形 - 教材 IV. TG3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 183250 号

策划编辑 刘剑波 责任编辑 项 杨 封面设计 刘晓翔
版式设计 张 岚 责任校对 金 辉 责任印制 尤 静

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010 - 58581118
社 址	北京市西城区德外大街 4 号	咨询电话	400 - 810 - 0598
邮政编码	100120	网 址	http://www.hep.edu.cn
总 机	010 - 58581000		http://www.hep.com.cn
经 销	蓝色畅想图书发行有限公司	网上订购	http://www.landaco.com
印 刷	北京铭成印刷有限公司		http://www.landaco.com.cn
		畅想教育	http://www.widedu.com
开 本	787 × 1092 1/16	版 次	2010 年 3 月第 1 版
印 张	17.5	印 次	2010 年 3 月第 1 次印刷
字 数	320 000	定 价	45.00 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 28136 - 00

译者序

本书是德国亚琛工业大学塑性成形研究所 (IBF) 所长 Reiner Kopp 教授和 Herbert Wiegels 博士根据其在金属塑性成形技术领域多年丰富的科研及教学经验编写而成的。

本书在高度概括和分析了当前金属塑性成形技术的重要任务和目的的基础上, 系统完整并且言简意赅地阐述了金属塑性成形的基础理论和重要塑性加工问题的解析方法。其学术价值包括将塑性成形过程的目标量按总体量、局部量和微观量进行系统划分, 根据应力状态进行塑性加工成形方法的分类, 科学系统地建立了塑性成形技术的结构体系。

本书与国内外已出版的同类书籍比较, 在内容组成和系统上独具特色。塑性成形基本理论以塑性成形过程的局部量(分布量)为基础, 将流变应力作为核心的材料特征量, 详细介绍了各类重要边界条件、屈服条件、流动法则以及过程控制量的计算方法、误差分析及使用条件等情况。在典型塑性加工问题解法的介绍中既有经典的初等解析法和滑移线法等, 也有现代有限元数值模拟技术、相似理论和物理模拟技术等内容, 概念定义准确明了, 方法经典而且先进。

本书将塑性成形基本原理和现代金属塑性成形技术及其发展有机结合并且融入大量作者在该领域长期的研究成果, 内容丰富翔实且图文并茂, 具有非常高的学术价值和实际应用价值。该书原稿近年已成为德国高校和金属塑性加工领域相关研究者的经典教材和参考书。本译著的出版无疑会对我国材料加工学科的教学、人才培养、科学研究以及生产应用起到进一步的推动作用。

本书可供材料加工专业本科高年级学生、硕士生、博士生、教师和相关研究人员以及工程技术人员使用。

全书由康永林教授、洪慧平副教授翻译完成。鹿守理教授审阅了文稿, 在此表示谢意!

译者

2009 年 5 月于北京科技大学

作者为中文版写的序

本书由德文版的《金属塑性成形导论》翻译而成。原版书是我在亚琛工业大学讲学时的理论基础部分。通过北京科技大学材料加工与控制工程系，特别是系主任康永林教授、洪慧平副教授以及已退休教授鹿守理的巨大努力使翻译工作顺利完成。自1980年起，北京科技大学和亚琛工业大学之间就有着紧密的联系，这一点从合作协议及大量共同的活动和项目便可看出。我想以我的名义，也以 Wiegels 博士的名义对两个大学间多年的友好关系表示祝贺，并对各位教授的翻译工作表示衷心的感谢。现在德国与中国生产企业之间以及德国与中国的大学之间已经有了广泛的联系，我希望这本德文书的翻译能为中国与德国间在塑性成形生产技术领域中关系的进一步加深作出贡献。

愿本书能够促进中国与德国专业技术人员之间的交流，并鼓励他们在新塑性成形技术和新产品研发方面共同努力。这一合作将是在全球化过程中提高双方利益的一个重要基础。

Reiner Kopp

2009年8月于德国亚琛

作者序

本书是根据作者多年在金属塑性成形领域的教学工作经验写成的教材。本书首先适用于冶金专业、材料专业和制造专业，特别适用于金属塑性成形专业；另外也适用于对金属塑性成形基础理论有兴趣的读者。尽管在金属塑性成形领域已有一些相关德文专业书籍，但是大多数价格不菲，许多大学生只能去图书馆借阅，而且因其大多涵盖专业领域的广泛内容，大学生为其学习还要从中选择所需的内容。因此，这里有意识地舍弃了其他相关内容，例如塑性成形金属学（这在其他课程和书籍中有详细讲解），金属塑性成形工艺方面的内容也只是略微提及。在论述塑性力学基础理论时，采用最少量的数学知识，以便对数学理论了解不深的读者也能够入门。

本书在对金属塑性成形技术概述之后，分别介绍了塑性力学的基本量、影响塑性成形的边界条件、塑性力学的基本公式和塑性成形的工艺目标量。特别注意了将流变应力作为最重要的材料特征量。在求解方法介绍中，初等塑性理论所占篇幅最多。采用初等塑性理论能够根据过程参数建立以物理过程为基础的目标量的计算公式。初等塑性理论一直是确定许多重要工艺目标量计算公式的基础，例如锻造、轧制、挤压和拉拔等，尽管与有限元法比较，其重要性有所丧失。有限元法当然是非常好的金属塑性成形研究工具，但是基于初等塑性理论的关系，对于工程师来讲仍是解释和讨论通过有限元法得出的结果所必不可缺的。关于滑移线法、上界法和下界法、视塑性法、有限元法和相似理论的介绍相对较少。若想进一步深入学习，这里建议参考有关合适的专业文献，对此，已将若干重要的经典著作列于附录中。本书编写了详细的德英技术术语的对照索引，这将使查阅和强化基础知识变得越加容易。

许多同事对本书的内容提出了建设性的意见和建议，在此表示感谢！同时感谢在文字录入和图形编辑上付出辛劳的各位同事！

Reiner Kopp, Herbert Wiegels

1998年2月于德国亚琛工业大学

目 录

1 引言	1
1.1 金属塑性成形技术的任务和目的	1
1.2 金属塑性变形的原因	3
1.3 金属塑性成形方法分类	3
1.3.1 根据应力状态进行区分	3
1.3.2 根据加工温度进行区分	3
1.3.3 根据产品类型进行区分	3
2 金属塑性成形基础	5
2.1 基本量、局部目标量	5
2.1.1 应力	5
2.1.1.1 应力张量的对称性	6
2.1.1.2 圆柱坐标	7
2.1.1.3 主轴系	8
2.1.1.4 坐标变换	8
2.1.1.5 静水压应力分量和偏应力分量	11
2.1.1.6 特殊的应力状态	11
2.1.2 应变	12
2.1.2.1 正应变增量	13
2.1.2.2 剪应变增量	13
2.1.2.3 局部总应变	15
2.1.2.4 总体总应变	15
2.1.2.5 应变状态	20
2.1.3 应变速率	21
2.1.3.1 圆柱坐标系	23
2.1.3.2 体积不变	23
2.1.3.3 变形速率	28
2.1.3.4 平均变形速率	29
2.1.4 应变功/应变功率	30

2.1.5 流变应力、流变曲线	32
2.1.5.1 测定方法	33
2.1.5.2 流变应力的影响因素	43
2.1.5.3 测得的流变曲线的不确定性	45
2.1.5.4 流变曲线的描述	46
2.1.5.5 热塑性成形过程中的材料行为	48
2.1.5.6 变形热	51
2.1.5.7 流变曲线测定时的温度变化	53
2.1.5.8 单位变形功	53
2.1.5.9 平均流变应力	54
2.1.5.10 剪切屈服应力	55
2.2 边界条件	55
2.2.1 连续性方程	55
2.2.2 摩擦	57
2.2.2.1 依赖于运动状态的摩擦(粘着摩擦、动摩擦)	57
2.2.2.2 摩擦状态	58
2.2.2.3 摩擦的特征参数	60
2.2.2.4 动摩擦的摩擦定律	60
2.2.2.5 摩擦热	64
2.2.3 热传递	64
2.2.4 材料参数和边界参数的测定	68
2.2.4.1 发射率和传热系数	70
2.2.4.2 流变应力	70
2.2.4.3 摩擦系数和摩擦因子	70
2.3 基本方程	74
2.3.1 平衡条件	74
2.3.1.1 圆柱坐标系	76
2.3.1.2 特殊情况	76
2.3.2 屈服条件、屈服准则	79
2.3.2.1 塑性力学数学推导(形变能假说)	79
2.3.2.2 剪应力假说	80
2.3.2.3 等效应力	81
2.3.2.4 屈服轨迹(屈服面、屈服柱面)	83
2.3.2.5 各向异性的材料行为	86
2.3.3 流动法则、流动定律	87

2.3.4 等效量	91
2.3.4.1 等效应变速率	91
2.3.4.2 等效变形速率	92
2.3.4.3 等效应变	93
2.3.4.4 等效变形程度	93
2.4 工艺目标量	95
2.4.1 变形功和变形功率	95
2.4.1.1 理想量部分	96
2.4.1.2 摩擦部分	97
2.4.1.3 剪切部分	97
2.4.1.4 有效变形功、有效变形功率	99
2.4.2 变形力	99
2.4.2.1 带直接压力作用的方法(例如镦粗和轧制)	100
2.4.2.2 带间接压力作用的方法	101
2.4.3 变形抗力	102
2.4.3.1 带直接压力作用的方法	102
2.4.3.2 带间接压力作用的方法	103
2.4.4 变形效率	103
2.4.5 温度	105
2.4.6 应变能力	106
2.4.7 极限变形程度 φ_{VG}	109
2.4.8 材料性能和构件性能	109
3 塑性力学的解法	111
3.1 用于塑性成形基本方法的初等塑性理论	112
3.1.1 镦粗理论(切片模型)	114
3.1.1.1 变形运动学	115
3.1.1.2 应变速率	116
3.1.1.3 应变	117
3.1.1.4 应力状态	119
3.1.1.5 变形抗力	123
3.1.1.6 镦粗力	126
3.1.1.7 镦粗功	126
3.1.1.8 变形效率	127
3.1.1.9 温度	127

3.1.2 拔长理论(切片模型)	128
3.1.2.1 变形几何参数	128
3.1.2.2 变形运动学	129
3.1.2.3 应变速率	129
3.1.2.4 应变	130
3.1.2.5 应力状态	131
3.1.2.6 拔长力	131
3.1.2.7 变形抗力	133
3.1.2.8 拔长变形功	133
3.1.2.9 变形效率	133
3.1.2.10 温度	133
3.1.3 平轧件纵轧理论(切片模型)	134
3.1.3.1 变形几何参数	134
3.1.3.2 变形运动学	142
3.1.3.3 应变速率	146
3.1.3.4 应变	148
3.1.3.5 应力状态	150
3.1.3.6 变形抗力	156
3.1.3.7 变形效率	157
3.1.3.8 轧制力	158
3.1.3.9 轧制力矩(对称轧制)	161
3.1.3.10 轧制功率	165
3.1.3.11 温度	166
3.1.3.12 轧机的弹性行为	166
3.1.4 拉拔理论(圆片模型)	169
3.1.4.1 变形几何参数	170
3.1.4.2 变形运动学	171
3.1.4.3 应变速率	171
3.1.4.4 应变	174
3.1.4.5 应力状态	178
3.1.4.6 拉拔力	184
3.1.4.7 变形功	184
3.1.4.8 变形功率	185
3.1.4.9 变形抗力	185
3.1.4.10 变形效率	186

3.1.4.11	温度	186
3.1.4.12	拉拔孔倾角优化	188
3.1.4.13	拉紧度	189
3.1.4.14	有反拉力的拉拔	190
3.1.5	挤压理论(圆片模型)	192
3.1.5.1	变形区的几何参数	195
3.1.5.2	变形运动学	198
3.1.5.3	应变速率	199
3.1.5.4	应变	201
3.1.5.5	应力状态	203
3.1.5.6	变形功、总功	206
3.1.5.7	变形功率、总功率	210
3.1.5.8	变形抗力	211
3.1.5.9	变形效率	212
3.1.5.10	挤压力	212
3.1.5.11	温度	216
3.2	滑移线理论	217
3.2.1	前提和假设	217
3.2.2	原理	217
3.2.3	应用范围和局限	223
3.3	上、下界法	224
3.3.1	前提和假设	224
3.3.2	原理	225
3.3.2.1	下界	225
3.3.2.2	上界	225
3.3.3	应用范围和局限	227
3.4	视塑性法	228
3.4.1	前提和假设	229
3.4.2	实验技术	230
3.4.3	原理	231
3.4.3.1	速度场	231
3.4.3.2	应变速率	231
3.4.3.3	应变	232
3.4.3.4	偏应力	232
3.4.3.5	应力	233

3.4.3.6 总体目标量	233
3.4.4 应用范围和局限	234
4 有限元法	235
4.1 原理	236
4.2 有限元法求解步骤	237
4.3 隐式求解法和显式求解法	237
4.4 热力耦合方法	238
4.5 应用范围和局限	238
5 相似理论	243
5.1 原理	244
5.1.1 相似常数	244
5.1.2 模型定律和相似准数	244
5.2 应用范围和局限	253
参考文献	256
名词索引	258

1.1 金属塑性成形技术的任务和目的

金属材料在固态时受外力作用会发生塑性变形，即永久变形。

按照德国工业标准 DIN 8580，塑性成形是指有目的地改变工件的形状并控制其几何尺寸。在塑性成形过程中，材料的质量和整体的结合得到保留。与此相比，几何尺寸未得到控制而产生的不希望有的塑性变化称为变形。

塑性成形技术的起源可追溯到大约 3 000 年以前，其具有两个主要任务。其一是用于产品的成形，属于制造技术。按照 DIN 8580，制造技术还包括铸造成形技术(例如浇注)、切割技术(例如铣)、连接技术(例如焊接)、涂层技术(例如电镀)以及材料改性技术(例如热处理)等领域。其二，塑性成形技术(特别是与热处理方法相结合)能够可重现和可控地改变局部性能，例如强度、韧性、内应力。

从上述意义上说，塑性成形技术是现代制造技术和材料技术的

综合，其要求塑性成形工作者掌握多种学科的知识，特别是弹性理论和塑性理论、材料学、摩擦学、测控技术、计算机技术、信息技术、环保技术及安全技术。根据节约材料的制造原则（在塑性成形中投入的材料质量保持不变），塑性加工方法的应用越来越广泛。涉及塑性成形技术的机械装备和产品几乎遍及国民经济的所有领域，从半成品制造工业（例如生产带材和型材的钢铁厂）到机械装备制造厂（例如生产用于冶金工业的轧机或者用于汽车工业生产和加工车体覆盖件的冲压机），直到大批量地加工各种产品的塑性成形企业（提供用于汽车、航空、航天、甚至家庭用具的零部件）。

当前塑性成形技术工作者的任务不仅包括塑性成形装备的规划、制造和运行，而且还包括研发环境友好的绿色制造流程和产品，同时要深入考虑产品的寿命周期。欲达此目的，必须对成形工艺过程参数、工艺过程变化状态和产品性能的相互关系有根本的认识。在不同层面（工业化生产层面或者实验室层面）会对不同的目标量感兴趣，这从图 1.1 可清楚看出。

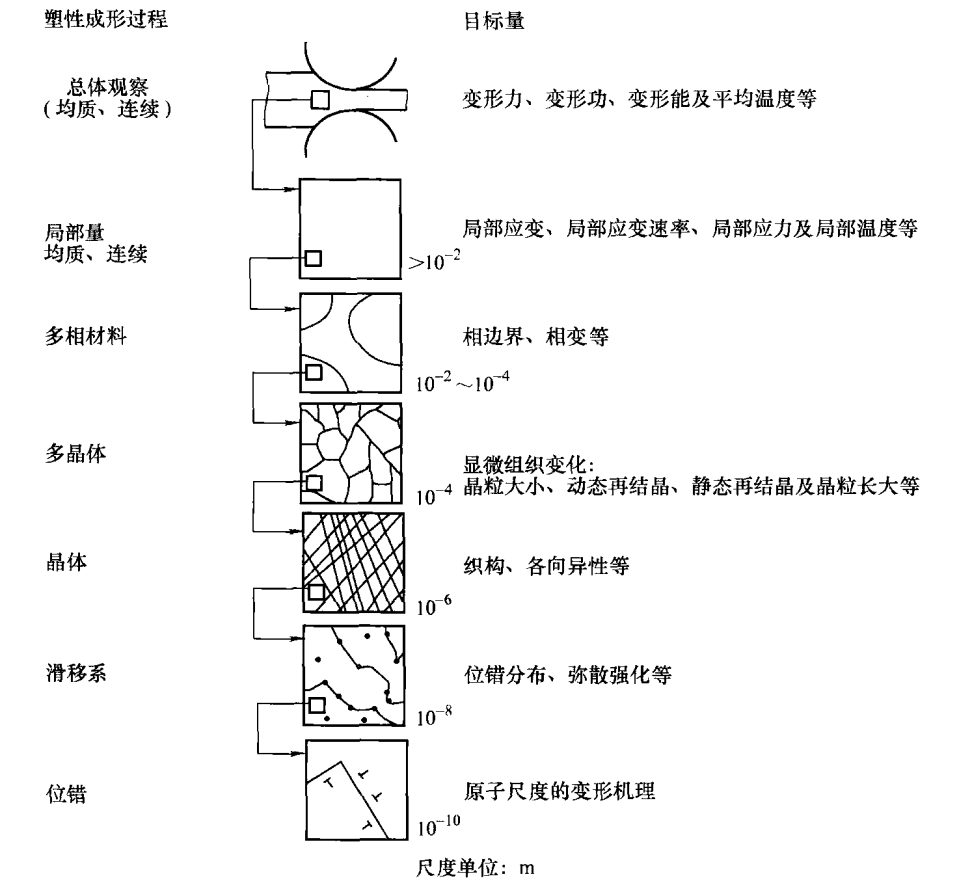


图 1.1 塑性成形不同观察尺度及对应的目标量

1.2 金属塑性变形的原因

在无缺陷金属晶体内部，原子分布于周期性的晶格点阵上。晶格平面在剪应力作用下相互滑移从而发生塑性变形。在此过程中晶格结构保持不变，只是在边界上产生滑移台阶，最终产生形状的变化。传统工艺和方法制备的金属含有大量晶格缺陷(空位、晶格间隙原子、位错、晶界、孪晶界、相界面)。例如，位错的存在使得发生塑性变形所需的应力(从而也使得变形力和变形能)要比理想的无晶格缺陷的晶体小2~3个数量级。另一方面，随着塑性应变增加，位错密度增加，它们可能互相阻碍，这样塑性应变增加就导致强度提高。其他类型的晶格缺陷也阻碍位错运动并提高强度，例外情况是在称为蠕变(一种缓慢的塑性应变)中的晶界。

1.3 金属塑性成形方法分类

1.3.1 根据应力状态进行区分

根据 DIN 8582，塑性成形的加工方法分类如图 1.2 所示。

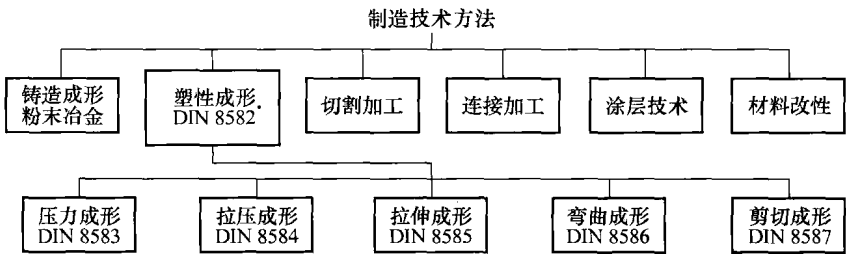


图 1.2 塑性成形的加工方法分类

1.3.2 根据加工温度进行区分

根据工件(变形体)在塑性成形过程前是否加热分为热塑性成形过程和冷塑性成形过程。在这里不考虑塑性变形过程中变形功转换为热量使得工件产生温升。将金属加热到低于再结晶温度下进行的塑性变形称为温塑性成形。

1.3.3 根据产品类型进行区分

用于将金属板料加工为成形件的塑性成形方法称为板成形方法，以区别于块体成形方法。最为重要的金属塑性成形方法如图 1.3 所示。

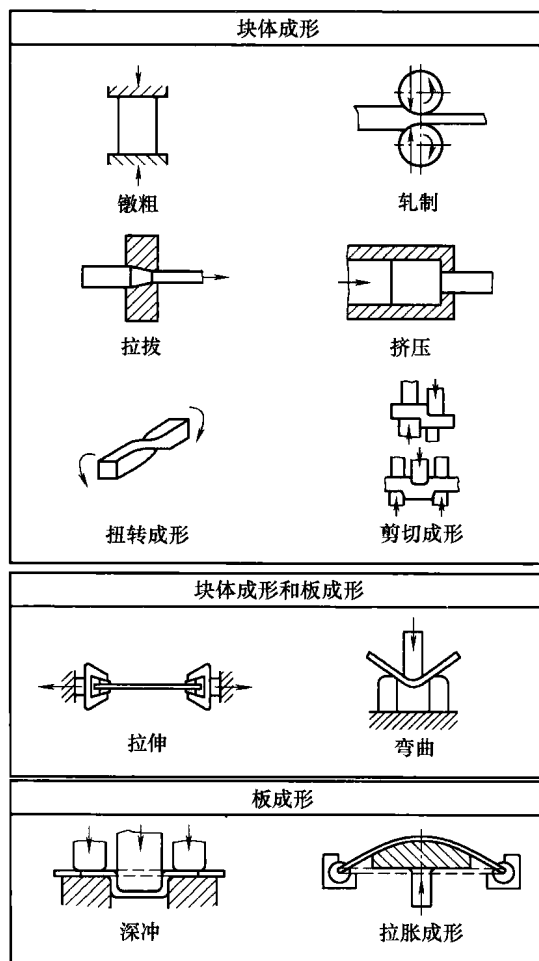


图 1.3 各类金属塑性成形方法

最后，还要区分非稳态塑性成形过程和稳态塑性成形过程，这主要是根据变形区内的速度场是否随时间变化进行区分。

2

金属塑性成形基础

2.1 基本量、局部目标量

2.1.1 应力

要使金属工件产生塑性变形, 需要施加作用力, 该作用力一般是由外部载荷产生并导致出现外部和内部应力。应力定义为在一个面单元 $\vec{\Delta A}_i$ 上的作用力 $\vec{\Delta F}_j$ 。面单元和力均为矢量, 即由大小和方向确定。如果面单元 $\vec{\Delta A}_i$ 法线方向和力矢量 $\vec{\Delta F}_j$ 的方向不相同, 则面单元和力能够分别在一个选定的直角坐标系 (x, y, z) 中分解为三个分量 ΔA_x 、 ΔA_y 、 ΔA_z 及 ΔF_x 、 ΔF_y 、 ΔF_z , 如图 2.1 所示。

一点的应力是当面单元 $\vec{\Delta A}_i \rightarrow 0$ 时, 力矢量 $\vec{\Delta F}_j$ 与面单元矢量 $\vec{\Delta A}_i$ 比值的极限, 即

$$\sigma_{ij} = \lim_{\Delta A_i \rightarrow 0} \frac{\Delta F_j}{\Delta A_i} \quad (2.1)$$