

工业金属 塑性加工原理

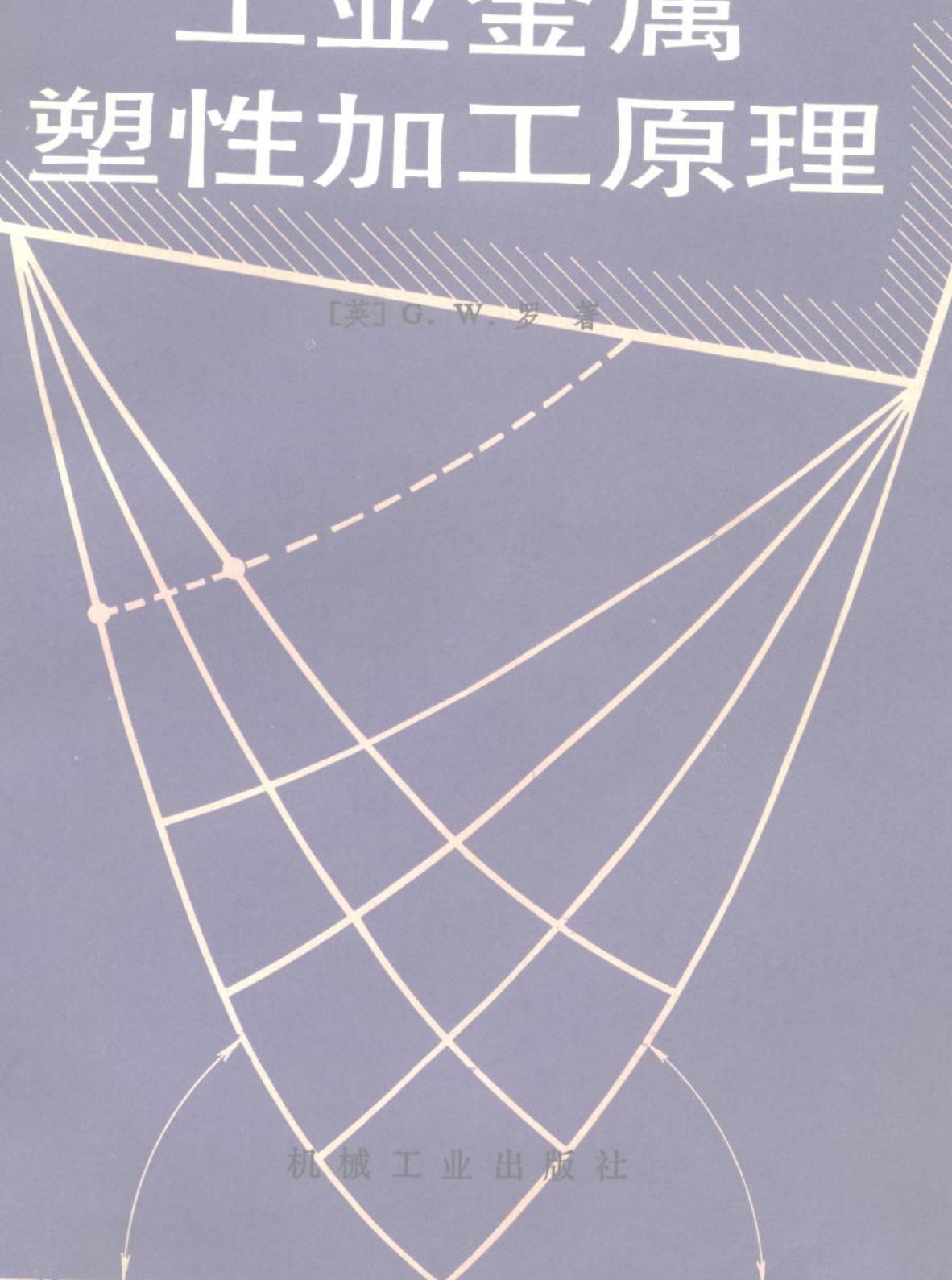
[英] G. W. 罗 著

工业金属塑性加工原理

机械工

77
252

机械工业出版社



77
952

工业金属塑性加工原理

[英] G. W. 罗 著
张子公 陈金德 陈楚杰 等译
庄懋年 校



机械工业出版社

8510063

DS98/26

**Principles of Industrial
Metalworking Processes**

G. W. Rowe

First published 1965 as An Introduction to
the Principles of Metalworking

by Edward Arnold (Publishers) Ltd
London, W1X 8LL

Reprinted 1968

Reprinted with corrections and added values
in SI units, 1971

This edition published 1977

* * *

工业金属塑性加工原理

[英]G. W. 罗著

张子公 陈金德 陈楚杰 等译

庄懋年 校

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

重庆印制一厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 ·印张20³/₄ ·字数487千字

1984年3月重庆第一版·1984年3月重庆第一次印刷

印数 0,001—7,800 定价 2.80 元

*

统一书号: 15033·5447

8800188

前 言

《工业金属塑性加工原理》一书是英国伯明翰大学G. W. 罗教授在他的《金属塑性加工原理引论》(An Introduction to the Principle of Metalworking, 1968)一书基础上修订扩大后的版本。此书综合介绍了西方在塑性加工理论和实践方面的现状和发展,内容很全面,而且具有鲜明的特点。

在理论方面,作者叙述了各种常用解法(例如主应力法、滑移线场法、上限法等)的基本概念,它们在锻、冲、轧、挤、拉等工艺中的应用以及计算机在这些方法中的作用,同时还概括性地介绍了新近发展起来的数字方法,如视塑性法、有限元法、矩阵法、加权残值法等。另外还结合具体工艺对各种解法作了比较和评价。尽管在本书中变形力计算仍然占有较大的篇幅,但作者很强调如何用理论来分析金属流动和产生缺陷的原因。

本书的作者力图深入浅出,加强物理概念的解释,尽量减少深奥的数学论证。除了第13章(数字方法)外,只用了最基本的微积分知识。此外,对于金属塑性加工过程的物理及物理化学特性,如塑性变形机理、摩擦与润滑机理等也作了比较详细的论述。每一章都有较多的例题,有助于读者加深理解。

本书比较重视实践和发展,对生产中的某些实际问题,如粘模、润滑、冶金质量等等都作了适当的介绍;同时对每种工艺及其理论的最新发展和趋向都作了综述和评价。另外还扼要地介绍了高分子聚合物的成形理论和技术。

因此,本书对我国机械和冶金等方面从事塑性加工研究和生产的大专院校师生和工程技术人员是一本有价值的参考书。

本书在理论和实践上的涉及面很广,但又尽可能地精简了较系统的力学基础,因此在叙述中有些地方不免跳跃稍大一些。我们在翻译时,除了加一些必要的夹注和脚注之外,少数地方还在忠实原文的基础上增补了个别词句。对于原文中一些明显的错写印刷等方面的疏漏,除了必须加注说明的外,一般都直接改正,不再加注。

参加本书翻译的有西安交通大学锻压教研室张子公(第2、3、6、10、12章并统阅全文)、陈金德(第4、5、7、9、11章)、陈楚杰(第13章)、于德弘(第8章)、第1章则由陈金德、陈楚杰和张子公合译。庄懋年教授对译稿作了细致的审校。责任编辑张蕩玲。

对于本书的翻译工作,我校庄礼庭教授和锻压教研室的其他同志都给予了热情的支持和指导,谨此表示感谢。

由于我们的水平有限,而本书的内容又极为广博,所以翻译中的缺点错误在所难免,祈请读者批评指正。

译 者

1982.4.

序 言

在本书初版以来的十年中，世界总形势和金属加工[⊖]的状况都发生了重大的变化。和以前一样，生产效率问题始终是工业上的中心课题。但是，除了其严格的经济意义之外，还有日益增加的社会和环境方面的因素应加以考虑，这些因素对金属加工生产会产生相当大的影响。例如，锻锤所产生的噪音现在已经是不能接受的了。在一定程度上减小锻锤噪音的发生，并将其传播减至最小是可能的。但是，人们还是考虑在可能的场合用本性比较安静的工艺来代替锤锻。在其他一些工艺中，有必要对润滑和冷却系统作大的改革，以避免因接触或吸入润滑剂和冷却剂而造成对健康的潜在危险，并且减少清理的问题。

除了上述问题以外，还需要考虑节省能源和材料资源。更有效地利用直接和间接的能源已成为一个根本性的问题。某些原料的暂时和长期短缺，要求工厂在生产中有更大的适应性，同时需要寻求代用材料。

为了能对这些问题的解决作一些贡献，我们力求加强本书的基础。新增加的有关材料的一章主要讨论金属，但对高分子材料也作了简要的介绍。有关润滑的一章已经扩大，以便把较专门的资料包括进去。在每一章中都增加了新工艺、新方法的发展情况的简要说明。

这十年中，理论上的主要进展在于广泛使用数字计算机。由于认识到分析模型中必须包括材料性能，所以新写了一章，对求解金属加工问题的数字方法作了概括性的介绍，对它们的优点及适用性作了评价。

工程和冶金学界的许多同事对本书作了有益的讨论，提出了许多宝贵意见，本人深表感谢。其中尤其是W. Johnson 教授、J. A. Newnham博士、P. L. B. Oxley教授、A. A. Hendrickson教授、M. C. Shaw教授、T. F. Li先生、A. N. Bramley博士、K. Lange教授及T. Wanheim教授。最后要感谢我妻子及家人在手稿准备期间的支持。

G. W. 罗

[⊖] 本书主要讲述锻、轧、拉、挤等工艺，仅偶尔提及切削加工，因此书中所指的“金属加工”实际上是指金属塑性加工——译者。

初版序言

除铸件外，所有金属制品在其制造过程中的某一时刻至少需要经受一次金属加工工序。有些制品往往还需经几次不同的工序。例如，制作简单的办公椅的钢管就要经过锻造、若干次热轧、冷轧成带料、纵切、冷成形管坯、焊接、机加工焊缝等，有时还要冷拉，这里还未考虑所有的辅助工序。金属加工理论有助于最有效地利用加工设备和提高生产能力。

本书的主要目的在于阐明金属加工理论的基本原理，这些原理是能够为金属加工界直接参与生产改进问题的工程师和冶金师所理解和应用的。本书也适用于工科大学和学院的学生。书中包括了为达到上述目的所必需的全部塑性理论，但并不是对一般塑性理论的数学论述，书中没有超过中学六年级水平的数学。另一方面，本书也不是一本描述所有现代工艺复杂细节的工艺手册。

塑性理论目前的发展水平，还不能对金属加工中的所有问题作出精确的回答，但是，如果对实际工艺进行简化，并使用理想化的材料，那么还是有足够的求解方法可供使用的。这些方法使我们有可能深入理解各种工艺因素（例如工具形状、速度、变形程度以及润滑等）对工序能量消耗、热效应、金属的流动及其最终性能等所产生的影响。

书中给出的数字例题是本书不可分割的组成部分，它们可以推动读者亲自去运用各种解题方法，并使读者认识到这些方法不仅在学术研究上、而且在生产实践中也是有意义的。最后一章介绍了借助不太昂贵的小型模拟计算机，如何方便地应用金属加工理论迅速求得最佳工艺程序。

非常感谢工业界、工科学院和大学中过去和现在的同事们，特别是A. P. Green先生、P. R. Lancaster 博士、A. T. Male博士、D. R. Milner先生、J. A. Rogers博士和E. C. Rollason教授的意见，使手稿得到了改进。A. J. Collins先生和 Electronic Associates 公司的诸位先生对第12章的编写给了很大的帮助。各种团体、组织，包括W. H. A. Robertson公司、Tube Investments公司、Henry Wiggin公司、Acheson Industries 公司中的许多位先生，以及航空部和科学研究部也给予了帮助。感谢上列各组织和个人同意复制图表。感激我妻子的合作，包括打字和校正手稿。

G. W. 罗

符号和缩写汇总表

(前面标有 * 的是多种用途的符号)

尺寸:

- h 高度或厚度
- l 长度
- L 长度
- A 面积
- $*V$ 体积
- b 压板(砧座)或工具的宽度
- w 板带宽度
- D 直径
- R 半径
- r 半径
- h_0 压缩时的初始高度
- D_b, h_b 轧制或拉拔时的进口直径或高度
- D_a, h_a 轧制或拉拔时的出口直径或高度
($h_b > h_a$)
- l_0 初始长度
- l_1 拉拔后的长度
- A_0 初始面积
- A_1 最终面积

材料的拉伸性能:

- d_u 最大拉伸强度(M. T. S.)时的直径
- L_p 比例极限
- L_e 弹性极限
- E 杨氏模数(低碳钢的典型值为 200 kN/mm^2 ($30 \times 10^6 \text{ lb/in}^2$) 铜为 120 kN/mm^2 ($18 \times 10^6 \text{ lb/in}^2$))
- G 刚性模数, 或剪切模数
- ν 泊松比
- m 应变硬化指数
- n 应变速率指数
- $*s$ 名义应力
- e_u 最大拉伸强度(M. T. S.)时的应变
- e_t 拉应变(正)
- e_c 压应变(负)
- $el\%$ 标距的百分比伸长率

U. T. S. 或 M. T. S. 强度极限或最大拉伸强度

Y. S. 屈服点的应力, 等于 Y'

R. A. % 断裂时的断面收缩率

材料的加工性能:

- σ 真实应力(应注意: $\sigma \neq S$)
- $*\bar{\sigma}$ 平均应力
- $*\bar{\sigma}$ 广义应力(或等效应力——译者)
- ϵ 自然应变或对数应变($\int (dl/l)$)

$$\epsilon_t = \ln(1 + e_t), \quad \epsilon_c = \ln\left(\frac{1}{1 - e_c}\right)$$

- $*z$ 广义应变(等效应变——译者)
- $*\bar{\epsilon}$ 平均应变
- $\dot{\epsilon}$ 应变速率
- γ 剪应变(通常用 $\gamma/2$)
- $\dot{\gamma}$ 剪应变速率

$*B$ 屈服应力公式中的常数

k 纯剪屈服应力, $k = S/2 = Y/\sqrt{3}$

Y 单向拉伸屈服应力

S 平面应变屈服应力, $S = 1.155Y$

$*HB$ 布氏硬度数(B. H. N.), 用 kg/mm^2 表示

r 在一道工序中以分数表示的断面减缩率

$R\%$ 在一道工序中以百分数表示的断面减缩率

$*c$ 比热

ρ 密度

金属加工分析:

\log, \ln 分别表示以10为底及以 e 为底的对数

$*p$ 单位压入力或单位挤压力 kN/mm^2

$*P$ 加工力或载荷, 一般为 kN

$*F$ 力, 在拉拔等工艺中使用, 一般为 kN

Y 平均屈服应力, 假定为常数

$$Y = \frac{1}{\epsilon_2 - \epsilon_1} \int_{\epsilon_1}^{\epsilon_2} \sigma d\epsilon$$

S 平面应变时的平均屈服应力

- * t 时间
- * W 功
- $\dot{E}_b, \dot{E}_d, \dot{E}_f, \dot{E}_T$ 边界、变形、摩擦及总的能量耗散速率
- F_s 剪切力
- t_1 切削深度 (未形成的切屑厚度)
- t_2 切屑厚度
- T 温度
- V_s 剪切平面上的速度
- * α 切削刀具前角
- Δb 一个单元变形区的宽度
- χ 轧辊载荷因子
- * ϕ 剪切平面的倾角
- σ_i 第 i 个单元变形区的流动应力

应力分析

- σ_x, σ_y 分别为垂直于 X 轴及 Y 轴的平面上的正应力
- τ_{xy} 作用在垂直于 X 轴的平面上、其方向平行于 OY 的剪应力
- $\sigma_\theta, \tau_\theta$ 作用在斜切平面上的正应力和剪应力, 该面与某参考坐标轴 (例如 OY) 的夹角为 θ
- $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 最大、中间、最小主应力
- θ 一任意平面与某参考坐标轴的夹角
- 滑移线切线的倾斜角
- θ^* 一个主平面和某一参考坐标轴的夹角
- θ^{**} 一个最大剪应力平面和某一参考坐标轴的夹角

- $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$
- 和
- $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$

对数应变

- μ 摩擦系数
- * 2α 工具或模具的夹角
- B 等于 $\mu \operatorname{ctg} \alpha$, 可以是常数或变数
- l, m, n 方向余弦
- r_m 最大断面减缩率

滑移线场理论

- * p 金属塑性区内一点的静水压力
- k 纯剪屈服应力
- α 线 } 两族相互垂直的滑移线, 其判定方法是: 代数值最大的主应力位于 α 线- β 线坐标平面的第一象限
- β 线 }
- * a, β 沿滑移线的距离

- ϕ 一条滑移线的倾角
- u, v 分别为沿 α 线和 β 线的速度
- * V 金属质点沿流线的速度
- * s 沿滑移线的距离, 或者上限解速度间断线上的距离
- t_s 由滑移线场法导得的拉拔应力 (t'_s 则包含摩擦)
- t_H 加工硬化金属的拉拔应力
- q 模面应力 (q' 则包含摩擦)
- $f\left(\frac{c}{d}\right)$ 和 $*\phi\left(\frac{c}{d}\right)$ } 由几何参数决定的多余功因子
- * ϕ 一条滑移线逆时针方向的转角
- * R 挤压比

轧制理论

- * R, R' 未经 (弹性) 变形的及变形后的轧辊半径
- L 接触弧的投影长度, $L = \sqrt{R\Delta h}$
- Δh 压下量或板带厚度的减少量
- * c Hillcock 方程中的一个弹性常数
- * s 回弹量
- g 辊缝高度
- * H Bland 及 Ford 解中的函数
- $H = 2\sqrt{\frac{R'}{h_a}} \operatorname{tg}^{-1} \sqrt{\frac{R'}{h_a}} \cdot a$
- w 宽度
- P 轧辊载荷 (kN)
- T 轧辊扭矩 (Nm)
- t_b, t_o 后张力和前张力
- k_b, k_c 由于弯曲和剪切引起的轧辊挠度常数
- a 从出口算起的一般角位置
- a_N 中性点的角位置
- a_b^* 咬入角, 等于 $\operatorname{tg}^{-1} \mu$
- p_r 轧辊径向 (单位) 压力
- * p 垂直于板带的轧辊压力分量
- p^+, p^- 分别为中性点的出口一边和进口一边的轧辊面压力
- λ 杠杆臂
- λ' 轧辊变形后的杠杆臂
- Q Sims' 方程中的一个系数

摩擦理论:

- A_s 粗糙表面上的实际接触面积

XV II

- A_0 表视接触面积
- * S 焊合处的平均剪切强度, 与 k 有关
- \bar{p} 焊合处的平均屈服应力, 与硬度和 k 有关
- * F 摩擦力
- * W 摩擦试验中的载荷
- s_i 一个接触界面的剪切强度

冶金质量

- A_1 亚共析钢的下临界点
- A_3 上临界点
- b 柏氏矢量
- d 晶粒直径
- D 扩散系数
- E 激活能
- f_1, f_2 可加工性因子
- F, G, H 对材料三个相互垂直的取向进行拉伸试验所得到的常数 (式12.7)
- I 面积的惯量矩
- k Petch 公式中的系数
- L, M, N 对材料三个取向进行剪切试验所得的常数 (式12.5)
- R 气体常数 (8.315J/mol·k)
- * T 温度(K)
- * T 松弛时间
- T_m 熔点(K)
- W 可加工性
- α 一种相的名称 (在平衡相图左下方)
- α 铁 铁素体
- γ 相 钢内的一种相, 奥氏体
- η 粘滞系数
- * θ 衍射角
- * θ 温度
- λ X射线波长
- σ 滑移阻力
- σ_y 屈服应力($=Y$)
- σ_r 残余应力

数字方法:

- a, b 上限解中的高度和宽度
- a_{ii}, b_{ii}, c_{ii} 矩阵的系数
- A_i 权参数
- [A] 节点位置坐标矩阵
- [B] 位移矩阵
- C_{ijh} 本构方程中的常数

- [D] 弹性常数矩阵
- $D[]$ 微分算子
- $E(x)$ 残差函数
- f^* 离散坐标的假设函数
- F 体力
- F_i 和位移 u_i 相应的力
- [K], [K_c], [K_G] 刚度矩阵; 材料的和几何的刚度矩阵
- n_i 等等 常数矩阵的系数
- $N(u)$ u 的空间导数的函数
- $R(u^*)$ 残值; $R(u^*)=N(u^*)-\partial u^*/\partial t$
- s_{ij} 有限元素上的初始应力张量 (和 t_{ij} 不同)
- S 表面积
- t_{ij} 变形后系统中的应力增量的张量
- T 面力 (切向表面的力)
- T_i 与位移 u_i 相应的面力
- * u, v 位移分量 (有限元法用)
- * u, v 速度分量 (视塑性, 上限法和滑移线场法用)
- u^* 离散位移的试探性解
- u_i 离散位移函数
- * V 体积
- * V_i, V_0, V_f 速度; 初始速度, 最终速度
- W_H, W_F, W_K, W_T 均匀变形功, 摩擦功, 多余功和总功
- * W_i, W_s 内部功和表面功
- * W_T, W_F, W_i 面力, 体力及不均变形功
- W 作功的速率 (功率)
- α_{ii} 权函数
- * β 压板接触长度的分数
- * γ 一个滑移线场的角度
- δ 位移
- δ_{ii} 克氏符号(Kronecker delta)
- $\delta(\Delta u_i)$ Δu_i 的虚变化
- ΔE_{ij} 应变增量张量的分量
- $\Delta \epsilon_{ij}, \Delta \eta_{ij}$ 线性和非线性应变增量
- Δf 体力的积分:
- $$\Delta f_i = \int_V \frac{\Delta F_i}{V_0} \alpha_{ii} dV$$
- $\Delta F_i, \Delta T_i$ 与 Δu_i 的虚变化相应的体力和面力增量
- Δt 面力的积分:

$$\Delta t_i = \int_S \frac{\Delta T_j}{S_0} a_{ij} dS$$

- Δu_i 位移增量
- $\epsilon_{ii}, \epsilon_{ij}$ 应变张量的正应变和剪应变分量
- * ϕ 应力函数
- * Φ 积分表达式 (式13.119)
- * Φ 流动函数
- χ 应力函数

- d λ Levy-Mises 方程中的常数
- λ 滑移线场中的角度
- ψ 标量流动函数
- σ_m 球应力或平均应力
- σ 偏应力
- * σ_{ii}, σ_{ij} 应力张量的正应力和剪应力分量
- σ_{ij} 增量变形后的应力 (不同于 S_{ij})

常用英制和公制单位的近似换算表

(在金属加工理论中, 要求把计算精度提高到1%以上的情况是极少的。)

长度:

1in. = 25.4mm \approx 25mm; 10mm \approx 0.4in.

$\frac{1}{8}$ in. \approx 3.2mm

$\frac{1}{16}$ in. \approx 1.6mm

10^{-3} in. (= 1thou.) \approx 0.025mm;

10 μ m \approx 0.4thou.

1ft = 305mm \approx 0.3m

面积:

1in². = 645mm²

质量:

1lb = 0.454kg; 1kg \approx 2.2lb

1ton (= 1.016tonnes) \approx 1tonne = 1000kg

力:

1lbf \approx 4.45N

1tonf (= 9964N) \approx 10000N

应力或压强 (单位压力):

1000lb/in². (也即1000lbf/in².)

= 6.89N/mm² \approx 7N/mm²

1ton/in². (也即1tonf/in².)

= 15.44 \times 10⁶N/mm² \approx 15.4N/mm²

速度:

100ft/min = 0.51m/s \approx 0.5m/s

10rev/min = 1.05rad/s \approx 1rad/s

杨氏模数 (用于粗略估算)

钢 $E \approx 30 \times 10^6$ lbf/in².; $E \approx 200$ kN/mm²

铜 $E \approx 18 \times 10^6$ lbf/in².; $E \approx 100$ kN/mm²

铝 $E \approx 12 \times 10^6$ lbf/in².; $E \approx 70$ kN/mm²

符号译名

in.	英寸	mm	毫米
thou.	千分之一英寸	m	米
ft	英尺	kg	公斤
in ² .	平方英寸	tonne	(公)吨
lb	磅	N	牛顿
ton	英吨	min	分(钟)
lbf	磅力	s	秒
tonf	英吨力	rev	转(数)
		rad	弧度

目 录

符号和缩写汇总表

常用英制和公制单位的近似换算表

第一部分 基本方法

第 1 章 金属加工理论的性质和目的	1
1.1 引言	1
1.2 屈服及应力状态的简化	2
1.3 莫尔(Mohr)圆和屈服准则	3
1.4 根据屈服应力简单地估算加工载荷	4
1.5 考虑摩擦影响的应力算法	4
1.6 滑移线场理论(计及多余功)	5
1.7 载荷限界法(Load-bounding technique)	7
1.8 1965年的状况	7
1.9 1965年以来的发展	8
第 2 章 应力-应变曲线	11
2.1 拉伸试验	11
2.1.1 典型的载荷-伸长曲线和应力-应变曲线	11
2.1.2 退火低碳钢的应力-应变曲线	12
2.1.3 应力-应变曲线上的塑性区	13
2.1.4 拉伸试验的特性及结果	13
2.2 真实应力和自然应变(对数应变)	15
2.2.1 真实应力	15
2.2.2 自然应变	15
2.2.3 名义应变与自然应变之间的关系	15
2.3 真实应力-应变曲线	16
2.3.1 拉伸	16
2.3.2 压缩	17
2.4 应力-应变曲线的简化形式	17
2.4.1 绘制流动-应力曲线的简便方法	18
2.5 冷、热加工时应力-应变曲线的选择	19
2.6 用压缩试验确定屈服应力	20
2.6.1 轴对称压缩	20
2.6.2 平面应变压缩(Ford 试验)	20
2.7 扭转试验	22
2.8 高应变速率下屈服应力的确定	22
2.8.1 平面应变压缩	22
2.8.2 用拧紧的圆棒加载的扭转试验(Twisted-bar test)	23
2.8.3 用切削加工测试高应变速率下的性能	23
2.9 硬度试验	24

例题	24
第 3 章 主应力和屈服	29
3.1 引言	29
3.2 两向应力状态下的主应力	29
3.3 最大剪应力	31
3.4 三向应力状态下的主应力	32
3.5 用莫尔圆表示应力状态	33
3.5.1 两向应力的莫尔圆	33
3.5.2 采用主轴坐标时的两向应力莫尔圆	35
3.5.3 三向应力莫尔圆	36
3.6 屈服准则	38
3.6.1 屈斯加 (Tresca) 最大剪应力准则	38
3.6.2 冯·密席斯 (von Mises) 最大剪应变能准则	38
3.6.3 拉伸屈服应力 Y 和剪切屈服应力 k 之间的关系	39
3.6.4 平面应变状态时的屈服	40
例题	40
第 4 章 按功及应力分布确定加工载荷	45
4.1 引言	45
4.2 均匀变形时产生屈服所需的载荷	45
4.3 均匀变形时的变形功公式	47
4.3.1 线材拉拔的变形功公式	48
4.3.2 拉拔变形功公式的应用实例: 确定每道工序中最大可能的断面减缩率	48
4.3.3 棒料挤压	49
4.3.4 锻造和轧制	49
4.4 用局部应力计算法考虑外摩擦的影响	49
4.4.1 无硬化宽板通过楔形模的拉拔	50
4.4.2 拉拔应力方程式应用实例: 确定有外摩擦时每道工序的最大断面减缩率	52
4.5 对于拉拔过程, 变形功法与应力计算法的比较	53
4.6 在应力计算法中考虑加工硬化	53
4.7 应力计算法的有效性	53
例题	54
第 5 章 按金属流动确定加工载荷	59
5.1 引言	59
5.2 简单压缩时的变形	60
5.3 应用滑移线计算应力	60
5.4 由滑移线的转角确定静水压力。汉基 (Hencky) 方程	62
5.5 塑性体边界上的应力和滑移线	64
5.5.1 自由表面	64
5.5.2 无摩擦接触面	64
5.5.3 具有库仑摩擦的接触面 ($\mu = \text{常数}$)	64
5.5.4 完全粗糙的接触面	65
5.6 滑移线场法用于静态系统。无摩擦平面冲头的平面应变压入	65

5.6.1	毛坯厚度等于冲头宽度 ($h=b$)	66
5.6.2	冲头宽度为毛坯厚度的整数倍 ($b/h=2, 3, 4$ 等)	66
5.6.3	冲头宽度比毛坯厚度大, 但 b/h 非整数	66
5.6.4	毛坯厚度比冲头宽度大 ($1 < h/b < 10$)	66
5.6.5	简单冲头压入半无限体 ($h/b \approx \infty$)	67
	(a) 滑移线场的建立	67
	(b) 由滑移线场确定应力	67
5.6.6	布氏硬度试验	68
5.7	滑移线场中计算速度问题的意义	69
5.7.1	盖林格 (Geiringer) 速度方程的推导	69
5.8	滑移线场法用于稳态运动: 变形程度为50%的平面应变反挤压, 使用无润滑的180°平角模	70
5.8.1	滑移线场的建立	70
5.8.2	按速度边界条件校核	70
5.8.3	由滑移线场计算应力	72
5.8.4	轴对称变形的滑移线场	73
5.8.5	在滑移线场理论中考虑加工硬化	74
5.8.6	应变速率和温度的影响	75
5.9	速度图或速端图	76
5.10	载荷估算的上限法和下限法	77
5.10.1	下限法	77
5.10.2	上限法	77
5.10.3	平面应变时的上限原理	77
5.10.4	上限原理用于平面应变压入	78
5.10.5	上限法用于轴对称问题	79
5.10.6	塑性铰链	80
	例题	81

第二部分 工艺分析

第6章	圆棒料和平带料的拉拔	86
6.1	引言	86
6.2	拉拔力的初步计算: 均匀变形力	88
6.3	用局部应力计算法求平面应变时的拉拔力	88
6.3.1	用楔形模拉拔宽平带料 (B, S 均为常数)	88
6.3.2	用楔形模拉拔应变硬化的带料	89
6.3.3	用圆柱面模拉拔应变硬化的带料	91
6.4	用局部应力计算法确定圆棒料拉拔力	92
6.4.1	用锥孔模拉拔圆棒料 (α, μ, Y 都是常数)	92
6.4.2	圆棒料无摩擦拉拔 (Y 为常数)	94
6.4.3	圆棒料拉拔时应变硬化的考虑	94
6.4.4	圆棒料拉拔时每道的最大断面减缩率	94
6.5	楔形模 (α 为常数) 平面应变无摩擦拉拔时的滑移线场解	95
6.5.1	带料无摩擦拉拔时的简单滑移线场解 [$r=2\sin\alpha/(1+2\sin\alpha)$]	96
6.5.2	断面减缩率小于 $2\sin\alpha/(1+2\sin\alpha)$ 时的滑移线场。从中心扇形出发扩展滑移线场的方法	99

6.5.3	断面减缩率小于 $2\sin\alpha/(1+2\sin\alpha)$ 时的滑移线场。绘制速端图	100
6.5.4	断面减缩率小于 $2\sin\alpha/(1+2\sin\alpha)$ 时的滑移线场。由滑移线场决定应力	101
6.5.5	利用几何参数确定多余功因子	103
6.6	考虑摩擦、多余功和应变硬化时,平面应变拉拔应力的确定	104
6.6.1	有摩擦时的滑移线场解	104
6.6.2	考虑应变硬化,零摩擦	106
6.6.3	同时考虑摩擦、多余功和应变硬化	106
6.7	考虑摩擦、多余功和应变硬化时,圆棒料拉拔应力的确定	107
6.8	鼓凸的形成	109
6.9	最佳模角	109
6.10	连拉	110
6.11	带料和棒料拉拔时的流线和变形	111
6.11.1	平面应变拉拔时金属流动的流线	111
6.11.2	圆棒拉拔时金属流动的流线	111
6.11.3	已拉线材的塑性	111
6.12	线材拉拔生产中的润滑	112
6.12.1	钢丝	112
6.12.2	铝线	113
6.12.3	铜和铜合金	113
6.12.4	其它合金	113
6.13	线材制造中的新发展	114
6.13.1	理论的贡献	114
6.13.2	常规工艺的改进	114
6.13.3	新工艺	115
	例题	115
第7章 制管与深拉延		122
7.1	引言	122
7.2	用应力计算法确定薄壁管闭式孔型拉拔时的载荷	123
7.2.1	具有固定芯棒的闭式锥孔拉模的拉拔	123
7.2.2	具有活动心轴的闭式锥形拉模的拉拔	125
7.2.3	具有固定芯棒的圆弧廓线拉模的拉拔	125
7.2.4	管子拉拔时的最大断面减缩率	126
7.3	在活动心轴上进行串列式拔管	127
7.4	无芯棒减径拔管	128
7.5	管子拉拔中的多余功	128
7.6	深拉延和压形	129
7.7	用轧制和挤压方法生产管子	129
7.7.1	周期式轧管(Pilgering)和冷轧管	129
7.7.2	轧辊和芯棒的轮廓	130
7.7.3	管子挤压	131
7.8	实际制管中的润滑	131
7.8.1	钢管拉拔	132
7.8.2	其它合金	132

7.9 深拉伸和压形的润滑	132
7.9.1 钢板成形	133
7.9.2 铜合金	134
7.9.3 其它合金	134
7.10 制管方面的新发展	134
7.10.1 理论的贡献	134
7.10.2 常规工艺的改进	134
7.10.3 新工艺	135
例题	135
第8章 挤压	141
8.1 引言	141
8.2 圆棒料和板条挤压中的应力计算法	142
8.2.1 锥孔模圆棒料挤压	142
8.2.2 挤压筒筒壁摩擦的影响	143
8.2.3 恒定模角的板条挤压	144
8.2.4 圆柱面模板条挤压	144
8.2.5 挤压时应力计算法的局限性	144
8.3 楔形模板条挤压的滑移线场解	145
8.3.1 $r=2\sin\alpha/(1+2\sin\alpha)$ 的无摩擦挤压	145
8.3.2 $r<2\sin\alpha/(1+2\sin\alpha)$ 的无摩擦挤压	146
8.3.3 $r>2\sin\alpha/(1+2\sin\alpha)$ 的无摩擦挤压	146
8.3.4 模具和挤压筒上有摩擦的挤压	147
8.4 矩形模挤压的滑移线场	147
8.5 不对称模和多孔模挤压	148
8.6 挤压中金属流动的流线	149
8.7 平面应变挤压的上限解	149
8.7.1 楔形模板条挤压的上限解。无摩擦	151
8.7.2 楔形模板条挤压的上限解。模具上存在粘着摩擦	152
8.7.3 用矩形模挤压板条的上限解	152
8.7.4 用上限法确定金属流动的流线	152
8.7.5 用上限法确定温度分布	153
8.7.6 复杂挤压问题的上限解	153
8.8 轴对称挤压	154
8.8.1 上限法在轴对称问题中的应用	154
8.8.2 以平面应变滑移线场解为基础的半经验公式	154
8.8.3 模具型面	155
8.9 特种挤压	155
8.9.1 桥式模	155
8.9.2 冲击挤压	155
8.10 热挤压生产中的润滑	156
8.10.1 钢的热挤压	157
8.10.2 铜合金	157
8.10.3 铝合金	158

8.10.4 其它合金	158
8.11 冷挤压生产中的润滑	158
8.11.1 钢的冷挤压	158
8.11.2 铜合金	159
8.11.3 铝合金	159
8.11.4 其它合金	159
8.12 挤压的新发展	159
8.12.1 理论的作用	159
8.12.2 常规工艺的改进和新工艺	160
例题	160
第9章 板材和带材的轧制	167
9.1 引言	167
9.1.1 热轧	167
9.1.2 冷轧	167
9.2 轧辊载荷的初步估算	168
9.2.1 均匀变形	168
9.2.2 功的计算	169
9.3 按局部应力计算法确定轧辊的压力	170
9.3.1 微分方程的推导和一般解	170
9.3.2 无外张力的轧制	173
9.3.3 有前后张力的轧制	174
9.4 应力计算法的假设和适用范围	174
9.4.1 关于假设的讨论	174
9.4.2 应力计算方程的适用性	177
9.5 冷轧时载荷、扭矩和轧机功率的计算	177
9.5.1 轧辊载荷	177
9.5.2 轧辊扭矩	178
9.5.3 轧机功率	178
9.6 高摩擦轧制时的应力计算	179
9.6.1 应力分布的测试	179
9.6.2 具有局部粘着摩擦的应力计算法	180
9.7 冷轧时弹性变形的影响	181
9.7.1 轧制时的最小厚度	181
9.7.2 轧辊的弯曲: 辊身凸度	182
9.7.3 轧辊的弯曲, 支承辊	183
9.7.4 轧机的弹性变形	183
9.7.5 厚度控制	185
9.7.6 板材的弹性变形, 平整	185
9.8 确定轧辊载荷的其它方法	185
A 冷轧	185
9.8.1 Cook和Parker法	186
9.8.2 Bland和Ford的图解法	186
9.8.3 Ekelund方程	186

9.8.4 C. E. Davies 法	186
B 热轧	187
9.8.5 Ekelund 方程	187
9.8.6 Sims法	188
9.8.7 Alexander的滑移线场	188
9.9 特殊轧机	188
9.9.1 Sendzimir多辊式轧机	188
9.9.2 行星轧机	189
9.9.3 Saxl摆动式轧机	190
9.9.4 连续旋转浇铸和轧制生产线	191
9.10 热轧生产中的润滑	191
9.10.1 钢和其它合金的热轧	191
9.11 冷轧生产中的润滑	192
9.11.1 钢的冷轧	192
9.11.2 铝	193
9.11.3 其它合金	193
9.12 轧制的新发展	193
9.12.1 理论的贡献	193
9.12.2 常规工艺和新工艺	194
例题	194
第 10 章 锻造,冲孔和深冲	201
10.1 引言	201
10.2 用局部应力计算法确定平面应变的墩粗力	201
10.2.1 小摩擦,薄板带	201
10.2.2 大摩擦,薄板带	202
10.2.3 斜砧,薄板带	204
10.3 用应力计算法确定平圆盘锻造时的变形力	205
10.4 平砧无摩擦平面应变压缩时的滑移线场解	206
10.5 具有粘着摩擦的平砧间平面应变压缩时的滑移线场	207
10.5.1 滑移线场的建立, $b/h=3.6$	207
10.5.2 绘制速端图	208
10.5.3 由滑移线场确定应力, $b/h=3.6$	209
10.5.4 粘着摩擦时平砧墩粗的一般解 ($b>h$)	210
10.6 中等摩擦下的墩粗	210
10.7 平面应变压入或冲孔时的滑移线场解	211
10.7.1 平冲头压入, $h>b$	211
10.7.2 平冲头压入深槽	211
10.7.3 尖楔压入半无限体	211
10.7.4 尖楔压入有限板带	212
10.8 深冲	212
10.9 光滑平砧压缩时的上限解	213
10.10 计算挤压-锻造变形力的半经验方法	214
10.11 理论分析在自动锻造中的应用	215