

冷压原理

蕭夫曼著

机械工业出版社

冷 压 原 理

—蕭 夫 曼 著

梁炳文譯 唐榮錫校



机械工业出版社

1957

出版者的話

本書共分四篇。第一篇簡要地說明了金屬塑性變形體基本原理，以後三篇分別就冷壓變形的三種主要方式——鍛粗、壓延和彎曲進行了分析。其中關於壓延的理論和實際，乃是根據蘇聯在這方面的廣泛成就及作者本人的深入試驗研究所得的結果而加以總結的，內容頗為豐富、詳盡。

本書是從事金屬壓力加工的工程技術人員、研究人員以及高等工業學校學生們的一本很好的參考書。

蘇聯 Л. А. Шофман 著 ‘Элементы теории холодной штамповки’ (Оборонгиз 1952 年第一版)

*

*

*

NO. 1257

1957 年 5 月第一版 1957 年 5 月第一版第一次印刷

850×1168 $\frac{1}{32}$ 字數 255 千字 印張 $10^2 \frac{1}{16}$ 0,001—7,000 冊

機械工業出版社(北京東交民巷 27 號)出版

機械工業出版社印刷廠印刷 新華書店發行

北京市書刊出版業營業許可証出字第 008 號 定價(10) 1.90 元

目 次

原序	7
主要符号	10

第一篇 塑性变形体基本原理

第一章 应力及变形状态的基本概念	11
1 变形	11
2 变形状态图	13
3 变形速度	14
4 应力	15
5 应力状态图	16
第二章 多晶体塑性变形的基有力学定律	19
1 体积不变定律	19
2 相似定律	20
3 最小阻力定律	21
4 塑性变形体的弹性卸荷定律	22
5 变形能量与变形状态图无关的定律	23
第三章 研究应力及应变的试验方法	24
第四章 作压制工艺过程试验研究用的设备及仪器	31
第五章 应变刚曲线	38
1 室温及低速变形的应变刚曲线	42
2 温度对变形抵抗力的影响	61
3 速度对变形抵抗力的影响	70
4 一般性应变刚曲线	73
第六章 塑性变形时的外摩擦及润滑	76
1 冷作变形时的摩擦系数	76
2 热作变形时的摩擦系数	83

第二篇 锻造 精压与挤压

第七章 鐵粗	85
1 变形运动学	85
2 單位压力	105
3 变形功	107
4 多層材料的鐵粗	110
第八章 平面精压	114
1 冷作精压	115
2 热作及不完全热作的精压	119
3 精压力計算举例	120
第九章 陀螺形工件的鐵粗	121
1 变形运动学	121
2 單位压力	130
第十章 空心件的冷挤	130
1 变形运动学	133
2 單位压力	134
3 冷作挤压用的潤滑剂	137
4 挤压模	139

第三篇 板料的深压延

第十一章 工艺过程的分类	140
第十二章 筒形件用压边圈的第一次压延	145
1 压延过程的基本理論	145
2 实验研究	161
3 相似定律及模型使用原理	188
4 計算举例	190
第十三章 筒形件不用压边圈的第一次压延	191
1 压延时皺紋的形成	191
2 不用压边圈压延时的單位压力	199
3 薄壁空心件不用压边圈的新压延法	204
第十四章 筒形件压延一次以后的压延工序	207
1 压延过程的基本理論	207

2 試驗研究	214
3 反压延法	222
第十五章 形状复杂的空心件的压延	225
1 宽凸缘筒形件的压延	225
2 阶梯形旋轉空心件的压延	227
3 錐形及球形旋轉空心件的压延	228
4 匣形空心件的压延	233
第十六章 板料的热作压延	242
1 鋼的热作压延	242
2 鎂合金的热作压延	243
3 計算举例	245
第十七章 液体及橡皮压延	246
1 液体压延	246
2 用橡皮的深压延法	257
第十八章 变薄压延	260
1 通过一个凹模的压延过程的分析	262
2 通过两个凹模的压延过程的分析	271
3 通过一个凹模的变薄压延的試驗研究	274
4 同时通过两个或三个凹模压延的試驗研究	280
5 計算变薄压延力的簡化公式	283
6 压延彈壳时毛料尺寸的决定	284
第十九章 深压延用的潤滑剂	285
1 对潤滑剂的基本要求	285
2 对压延鋁合金所用潤滑剂的試驗	288
3 对压延鋼板所用潤滑剂的試驗	290
4 压延紫銅及黃銅用的潤滑剂	294
5 压延鎂合金用的潤滑剂	294
第二十章 提高深压延生产的途徑	295
1 用复合模的压延法	295
2 用卷料的多工序連續压延法	296
3 新的压延方法	307

第四篇 弯曲

第二十一章 弯曲过程的分析	305
1 弯矩	305
2 弯曲力	312
3 弯曲后的弹性回跳	314
第二十二章 弯曲过程的试验研究	315
1 冷作弯曲	315
2 高温弯曲	317
3 弯曲力计算举例	319
参考文献	321
中俄名词对照表	323

原 序

冷压工作是金屬加工中生产率最高的一种方法。近年来所达到的冷压工艺方面的長足进步，乃是在我們的工業中运用了全世界最先进的苏联科学及技术的最新成果，並在我們工厂的压制車間里大量增加了技术装备的結果。

在压制車間工作的工程师，必須解决很多繁复的技术問題，如使現有压制工艺过程合理化，拟訂新的、更完善的、生产率更高的工艺过程，正确地选择完成所定工艺过程的压床，減少廢料並提高压制件的品質。

在这方面最重要的問題包括：决定压力，变形功，最合适的变形方式等。

由於在我国机器制造业中各种压制件的广泛应用和我国鍛压设备的發展，急需根据严格的科学理論对工艺过程定出可靠的分析及計算方法。

苏联的学者及研究家在發展金屬压力加工原理方面获得了很大的成就。苏联科学在这方面的成就的明証是：近年来刊行了關於塑性及强度理論的重要著作〔伊留申(А. А. Ильшин)，索柯洛夫斯基(В. В. Соколовский)，达維金柯夫(Н. Н. Давиденков)，庫茲聶佐夫(В. Я. Кузнецов)，弗里得曼(Я. Б. Фридман)等〕，關於金屬压力加工原理的著作〔古布金(С. И. Губкин)〕，關於輾压理論的著作〔采里柯夫(А. И. Целиков)，巴甫洛夫(И. М. Павлов)〕，關於鍛造过程及模压过程的理論〔翁克索夫(Е. П. Унков)，柯尔聶也夫(Н. И. Корнеев)，司米尔諾夫-阿里亞也夫(Г. А. Смирнов-Аляев)等〕。

但在这方面还有許多很重要的实际問題，迄今仍未在理論上得到准确的解决。因此，在实际工作中常繼續利用近似的經驗法

則和計算系数，這是不能反映很多決定加工規範的可變因素的影响的。

在金屬壓力加工方面所作的深入試驗研究的總結資料，提供了對進一步發展壓制理論很有價值的材料，並可發現一些近似的規律，利用這些規律，在目前已經能夠對一些極重要的問題作出在實用上足夠準確的解答了。

作者在本書內試圖說明蘇聯科學在冷壓工藝方面的成就，並根據近年來在這方面累積的理論及試驗資料，敘明解決某些問題的簡單而實用的辦法。

本書並不打算對冷壓工藝作詳細的闡釋。書中只是根據以往在這方面所發表的論著，以及作者近年來在中央工藝與機器製造科學研究院（ЦНИИТМАШ）的研究結果，對某些能夠提出新解答的冷壓工藝問題加以討論罷了。

理論計算式的求得，常須用這樣或那樣的假定來簡化，故需要試驗的證明。只有經過試驗確定了應用範圍的理論公式，才有實用的價值。由於這一原故，本書中特別注意用理論的計算結果來和試驗數據對照，以証實計算式的適用性。

任何計算式，如果對於具體變形情況不能說明其所含參數的數值為何，那就都沒有實用價值。本書有鑑於此，特從詳說明決定最重要的計算參數及系数（實際變形抵抗力，摩擦系数等）的試驗方法，並列出其在各種情況下的數值。

作者力求提供簡便而實用的計算式形式。為此，在書中廣泛應用了計算用的圖表及圖解法，借以減少數學計算工作。

在第一篇里，簡短地說明了塑性變形理論，這是以後各篇所講的各種壓制過程的本質所必需的。

如果不將金屬在冷作變形里的應變剛作正確的考慮，就不能對與金屬冷壓過程有關的理論及實際問題作出可靠而有依據的解答。因此，在第一篇里特將應變剛曲綫加以分析，並說明用試驗作應變剛曲綫的方法。在同篇里，還敘述了一些現代研究應力及

应变的試驗方法，描述了一些試驗研究冷压工艺过程用的仪器及设备。这些介紹對於压制研究工作者及工程師們是有裨益的。

第二篇研究了鍛粗、校准（或称精压）及冷挤。在这里敘述了分析变形过程的方法，並提出了計算單位压力、变形力及变形功的公式。

在第三篇中研究了薄板的深压延过程。这里敘述了苏联学者在理論及試驗方面的研究結果，这些結果對於从学术上闡明这种極复杂的变形过程，是一种巨大的貢獻。

第四篇分析了弯曲压制过程。

因为热压和冷压之間不能划出一个很明显的界限，故在本書中虽然主要是講冷压过程，但对有預热的变形过程也略予說明。

本書的內容大都是作者在中央工艺与机器制造科学研究所提供的有利条件下得出的研究成果。作者对研究院金屬压力加工部共同作这些研究工作的同志們皆应致深切的謝意，特别是大力帮助作試驗工作的洛柯多施（П. И. Локотш）同志。

作者还应对斯大林獎金获得者技术科学副博士翁克索夫（Е. П. Унксов）审阅原稿时所提的宝贵意見致以最大的謝忱。

作者还应趁此机会对原稿的評閱者技术科学博士柯尔聶也夫（Н. И. Корнеев）、技术科学副博士司多罗热夫（М. В. Сторожев）和本書編輯技术科学副博士波波夫（Е. А. Попов）整理原稿时的指正致以深切的謝意，同时对技术科学副博士普罗佐罗夫（Л. В. Про- зоров）、技术科学副博士柯瓦列夫（И. Г. Ковалев）和技术科学副博士高里曼（Л. Д. Гольман）對本書所提供的材料亦致以深切的感謝。

因为書中所敘的許多問題很复杂，而且研究得不充分，故疏忽之处在所难免。所有一切意見作者將無任欢迎，賜函請寄莫斯科彼得罗夫大街 24 号国防工業出版社（Оборонгиз，Москва，Петровка，24）。

主 要 符 号

A ——变形功。	(实际应力)。
A_{γ} ——單位变形功, 或变形比能。	t° ——温度 ($^{\circ}\text{C}$)。
D ——应变剛模数。	T ——绝对温度 ($^{\circ}\text{K}$)。
D_0 ——毛料直徑。	t_0 ——板料的原来厚度。
d_n ——在 n 次压延后的空心杯形件直徑。	v ——变形速度。
$\epsilon = \ln(1 + \delta)$ ——实际主应变。	V ——变形体的体积。
g ——剪变位。	W ——剖面抵抗模数。
k ——压延系数, 或压延比。	Δ ——压延模的凸模及凹模之間的間隙。
M_x ——弯矩。	ψ ——拉伸时的剖面收缩率。
m ——制动系数。	ψ_p ——拉伸时当細頸剛出現时的剖面收缩率。
P ——变形力。	ψ_k ——断裂时的剖面收缩率。
p ——單位塑流压力。	$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ ——主应力。
s_p ——在拉伸中当細頸剛出現时的实际应力。	μ ——摩擦系数。
Q ——压延毛料时的压边力。	ω ——速度系数。
q_n ——压延毛料时的單位压边力。	τ ——安全系数。
h_0 ——毛料的原来高度 (厚度)。	η_{Φ} ——变形效率。
S_n ——实际变形抵抗力的極限值。	σ_b ——拉伸时的極限强度。
S_k ——断裂时的实际应力。	$\sigma_{0.2}$ ——屈服点 (当变形为 0.2% 时)。
r_n 和 r_k ——压延凸模和凹模的圓角半径。	σ_p ——深压延时的破坏应力。
S ——实际变形抵抗力	δ ——拉伸时的延伸率。
	ϵ ——鍛粗时的压缩率。

第一篇 塑性变形体基本原理

第一章 应力及变形状态的基本概念

1 变形

弹性变形的发生是由于原子间的距离发生了变化，因而改变了物体的体积(密度)。当外力去掉后，原子仍恢复到原来相当于最小势能的稳定平衡状态，而物体就恢复了原来的尺寸。

塑性(不能恢复的或残余的)变形是指变形体形态及尺寸的这样的改变而言，即当引起这些改变的原因去掉后，仍保持其已改变了的状态。在塑性变形理论中说明，凡分佈在圆球表面上的所有的物体质点，在变形后其分佈面成了椭圆体。三条通过这种圆的或椭圆的单元中心的直线，如果在变形中(指性质一致的变形而言)始终保持互相垂直的话，即叫做变形的主轴，单元沿主轴方向的尺寸变化即叫做主应变

使原来尺寸加长(延伸)的变形以正号表示，而使原来尺寸减小(压缩)的变形则以负号表示。三个主应变中的一个与其余两个符号相反的主应变，即叫做最大主应变。

表示主应变的方式有以下三种：

1. 绝对主应变——指变形体单元沿三主轴的任一方向对原始尺寸的正的或负的增量而言，即

$$\Delta l = l - l_0$$

式中 l_0 和 l ——变形体(单元)的原来的及最后的尺寸。

2. 相对主应变——指沿三主轴任一方向的正的或负的 尺寸增量与其相应的原始尺寸之比而言，即

$$\delta = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l-l_0}{l_0} \quad (1)$$

3. 实际主应变——指某一瞬間的無限小的尺寸变化与該瞬間的尺寸之比的积分而言，即

$$\epsilon = \int_{l_0}^l \frac{dl_x}{l_x} = \ln \frac{l}{l_0} = \ln(1+\delta) \quad (2)$$

如將上式的右边展开为級数，則第一項即为相对主应变。故当塑性变形很小时， $\epsilon \approx \delta$ 。

表示变形程度最正确的方式是用三个实际主应变。但在实际上往往只用一个最大主应变(相对的)，即通常所說的变形程度。

变形程度是决定变形过程的主要指数之一。例如变形程度决定变形金屬的应变剛程度、單位塑流压力及变形功。金屬發生破裂时的極限变形程度，可作为在某一給定的变形溫度及速度规范下金屬的塑性指数。

变形程度也可用垂直於最大主应变方向的剖面面积的相对变化表示。因为在实用上根据体积不变的条件可得以下关系：

$$F_0 l_0 = Fl$$

或

$$\frac{l}{l_0} = \frac{F_0}{F}$$

故

$$\delta = \frac{l-l_0}{l_0} = \frac{F_0-F}{F} = \frac{\psi}{1-\psi}$$

式中 F_0 和 F ——試样橫剖面的原始及最后面积；

$\psi = \frac{F_0-F}{F_0}$ ——試样橫剖面的收縮率。

以毛料尺寸变化来表示的实际的和相对的应变，只有在下述情况下可以应用而不致引起大的誤差，即沿毛料長度(高度)的各橫剖面必須为一常数，且沿变形体(性質一致的变形)長度的各橫剖面亦为一常数(均匀变形)。

轉移体积极指变形体由於在其他兩主軸方向的尺寸变化所引起的另一主軸方向的体积变化而言。

体积的轉移量一般可用以下的积分式表示：

$$V_x = \int_h^{h_0} F_x dh_x \quad (3)$$

式中 F_x ——变形体直接受外力作用的表面在垂直於作用力的面上的瞬間投影面积；

h_0 和 h ——变形体在作用力方向的原来的及最后的長度（高度）。

如果变形体的原来的某一瞬間的及最后的横剖面面积沿長度（厚度）是一致的話，則以上积分式可解出如下：

$$V_x = \int_h^{h_0} \frac{V}{h_x} dh_x = V \ln \frac{h_0}{h} = V \ln \frac{1}{1-\varepsilon}, \quad (3a)$$

式中 V ——变形体的体积；

$\varepsilon = \frac{h_0 - h}{h_0}$ ——压缩（鍛粗）程度。

体积轉移率为：

$$V_y = \frac{V_x}{V} = \ln \frac{h_0}{h} = \ln \frac{1}{1-\varepsilon}.$$

由以上可以看出，沿某一主軸方向的体积轉移率，在数值上即等於沿該主軸方向的实际主应变。

布留哈諾夫 (А. Н. Брюханов) 証明[65]，如果沿毛料高度的原来横剖面面积是一致的話，則平均体积轉移量为：

$$V_x = \int_h^{h_0} F_x \ln \frac{F_x}{F_0} dh, \quad (36)$$

式中 F_x ——沿变形体高度某瞬間的横剖面面积；

F_0 ——原始試样的横剖面面积。

如要解出积分式(3)，必須知道在变形过程中各瞬間的横剖面面积的变化規律才行，这只有在有限的一些情况下才能办到。如果用(3a)式不合适时，可以由积分(36)式解出数值上等於平均变形程度的体积轉移量来。

2 变形状态圖

在某一点的变形状态，可用在该点的三个主应变与三个应变

主軸方向決定。

設物體的體積在變形中保持不變，對於一個各邊與應變主軸平行的矩形體，可寫出以下的衡等式：

$$a_0 b_0 l_0 = a b l,$$

式中 a_0 、 b_0 和 l_0 ——各邊原始長度；

a 、 b 和 l ——變形後的各邊最終長度。

上式利用對數可得以下關係，即

$$\ln \frac{l}{l_0} + \ln \frac{b}{b_0} + \ln \frac{a}{a_0} = e_1 + e_2 + e_3 = 0. \quad (4)$$

由以上可知，三個實際主應變之和為零。換句話說，一個實際主應變之值等於另兩個實際主應變之和，而符號相反。

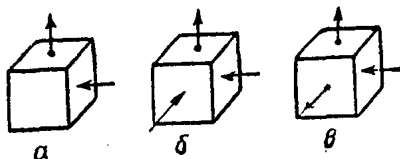


圖1 變形狀態圖：

(圖1)：a) 平面狀態圖；b) 平面狀態圖；c和d—立體狀態圖。

有兩個壓應變的立體狀態圖；B) 有兩個拉應變的立體狀態圖。

3 變形速度

變形速度系指單位時間內的變形而言。物體各點的變形速度或整個毛料的平均變形速度，以三個變形主軸方向的速度表示。但為簡化起見，一般只用最大主應變的速度表示。

假象應變速度以下式表示：

$$v_y = \frac{d\delta}{dt} = \frac{1}{l_0} \times \frac{dl}{dt} \text{ 秒}^{-1}, \quad (5)$$

式中 δ ——變形程度(尺寸變化率)；

t ——變形過程的延續時間。

平均假象應變速度以下式表示：

$$\bar{v}_y = \frac{\delta}{t} = \frac{1}{l_0} \times \frac{\Delta l}{t}. \quad (6)$$

實際應變速度以下式表示：

$$v_n = \frac{dc}{dt} = \frac{1}{l} \times \frac{dl}{dt} = \frac{d[\ln(1+\delta)]}{dt} = \frac{v_y}{1+\delta} \quad (7)$$

平均实际应变速度为:

$$v_n = \frac{\ln(1+\delta)}{t} \quad (8)$$

当变形很小时, 平均假象应变速度和平均实际应变速度对于初步的近似值, 可以说是相同的。因为将(8)式展开为级数后, 得

$$\bar{v}_n = \frac{\ln(1+\delta)}{t} = \frac{\delta}{t} - \frac{1}{2} \times \frac{\delta^2}{t} + \dots$$

当 δ 值很小时,

$$\bar{v}_n = \bar{v}_y \left(1 - \frac{1}{2} \delta \right) \approx \bar{v}_{yc}$$

使物体发生变形的机器运动速度, 可以用假象变形速度或实际变形速度表示之, 即

$$v_n = \frac{dl}{dt} = \frac{d[l_0(1+\delta)]}{dt} = l_0 v_y = l_0 v_n (1 + \delta) \quad (9)$$

由此可知, 若机器的运动速度不变时, 试样的原始尺寸愈大, 其假象及实际应变速度愈小。

机器的运动速度均匀时, 在变形过程中实际应变速度随试样瞬间长度的增长(当拉伸时)而减小, 随此长度的缩短(当压缩时)而增加。如要保持相等的变形速度, 在作拉伸试验时就须随试样的增长而按比例增加机器速度, 在作压缩试验时则按比例减小机器速度。

在不一致的塑性变形中, 变形体各不同部分的主应变速度亦不相同。在这种情形下只能用假象的平均数值来说明整个试样的变形速度。

4 应力

在外力作用下, 变形体的内部也发生了抵抗力。

内力在变形体内各点上的强度叫做应力, 可以下式表示:

$$\sigma = \lim_{\Delta F \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta F}, \quad (10)$$

式中 ΔP ——通过某点的單元面积 ΔF 上的内力合力。

应力的方向与單元面积成一个角度时，可以分解为两个分应力：垂直於面积的正应力 σ_n 和作用在面积内的剪应力（切应力） τ 。

如果三个面垂直於三个互相垂直的軸，在面上只有正应力存在或没有任何应力存在时，这些軸叫做应力主軸。

沿主軸方向的正应力叫做主应力。

最大的剪应力叫做主剪应力，其作用面通过某一主軸，並平分另二主軸所成的角度。

所謂單位塑流压力，一般可用以下比值表示：

$$p = \frac{P}{F}, \quad (11)$$

式中 P ——外力；

F ——接触面投影于与外力方向垂直的面上的面积。

單位塑流压力在分析和計算各种压制过程时，是一个很主要的数值。知道了單位塑流压力后，就可以計算出使物体發生一定变形和完成一定变形功所需作用力为若干。單位塑流压力的数值，与应力状态圖，材料的变形抵抗力，材料与变形工具接触面之間的摩擦力，以及变形的溫度-速度条件等有关。

5 应力状态圖

物体每一点的应力状态系以三个主应力和应力的主軸方向表示之。

变形体的应力状态圖主要分为三种(圖 2)：

a) 立体（三軸向）状态，即当三个主应力皆不等於零的应力状态；

6) 平面（兩軸向）状态，即当一个主应力等於零的应力状态；