

金属塑性加工变形

И. Я. 塔尔诺夫斯基 著

冶金工业出版社

11.3
72.3
713

金屬塑性加工变形

(鍛造及軋制)

И.Я. 塔爾諾夫斯基 著

曹乃光 等譯

王廷溥 校訂

冶金工業出版社

書中研究了金屬壓力加工中鍛造與軋制兩過程變形的問題。在鍛造部分里，闡述了均勻鍛粗、自由的不均勻鍛粗及有剛端存在時不均勻鍛粗的問題。在軋制部分里，敘述了和平軋中軋制時橫變形及縱變形以及在軋輥軋槽中軋制簡單斷面型材變形的問題。

本書可供從事壓力加工的工程技術人員使用，亦可作為金屬壓力加工專業學生學習的參考。

И. Я. ТАРИНОВСКИЙ

ФОРМ ИЗМЕНЕНИЕ ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ МЕТАЛЛОВ
Металлургия (Москва—1954)

金屬塑性加工變形

曹乃光 等譯

編輯：叶建林 設計：趙香苓 責任校對：任少懷、劉頌古

1958年 9 月第一版 1958年 9 月北京第一次印刷 3000 冊

850×1168·1/32·410,000 字·印張 $16\frac{10}{32}$ ·定價 (10) 2.66 元

冶金工業出版社印刷廠印

新華書店發行

書號0848

冶金工業出版社出版 (地址：北京市燈市口甲45號)

北京市書刊出版業營業許可証出字第093號

目 录

緒論	7
第一章 一般原理	9
1. 体积不变条件	9
2. 移动体积的方法	10
3. 塑性方程式	20
4. 最小阻力定理	24
第二章 均匀鍛粗	27
5. 关于均匀鍛粗的概念	27
6. 均匀鍛粗时的变形	23
7. 均匀鍛粗时物体質点位移的速度和軌跡	37
8. 关于均匀鍛粗的实验	46
第三章 不均匀鍛粗	50
9. 有外摩擦时圆柱体的不均匀鍛粗	50
10. 有外摩擦时矩形方面体的不均匀鍛粗	69
11. 有外摩擦及外区(剛端)存在时的不均匀鍛粗	110
12. 在異型錘头間鍛粗时的橫变形及縱变形	137
第四章 在墊环中鍛造时的变形	157
12. 在墊环中鍛造时金屬流动的运动学图示	158
14. 在墊环中鍛粗时力的情况	167
15. 变形和变形过程力的情况之間的关系	173
16. 在具有截錐形孔腔的墊环中的鍛造	185
第五章 在平軋上軋制时的变形	196
17. 簡單軋制情况	196
18. 研究平軋軋制时寬展問題的作用及現狀	196
19. 軋制时軋件的变形图示	199

20. 鍛造与軋制过程的共同性和特点	207
21. 軋制时变形区内临界面的位置	212
22. 变形区每个区域内压下量的計算	217
23. 变形区每个区域水平投影的形狀	221
24. 在平軋上軋制时的工具形狀系数	227
25. 在平軋上軋制时計算横变形的公式	235
26. 寬展与軋軋直径的关系	249
27. 寬展与軋件寬度的关系	253
28. 寬展与外摩擦系数的关系	258
29. 寬展与压下量的关系	264
30. 在推导計算横变形的公式时所采取的假設	273
31. 軋件軋制的三个阶段	275
32. 測定实验寬展的方法	280
第六章 作为横变形函数的寬展指数	296
33. 寬展指数	296
34. 寬展指数的函数的导出	297
35. 寬展指数与軋件寬度的关系	314
36. 寬展指数与压下量及軋件厚度的关系	317
第七章 軋制合金鋼及合金时的寬展	323
37. 寬展取决于鋼的化学成分的原因	323
38. 軋制合金鋼时寬展的实验資料的分析	329
第八章 縱变形	338
39. 后滑与前滑	338
40. 在沒有寬展与粘着区时变形区長度上任一点的縱向滑动	349
第九章 縱变形与横变形之間的关系	354
41. 寬展沿变形区長度的分布	354
42. 在平軋上軋制时确定变形区侧面輪廓的方法	362
43. 寬展沿变形区長度分布的实验研究	365
44. 在軋制力的平衡方程式中考虑到寬展来确定临界面的位置	370

45. 在平軋上軋制時考慮到寬展的前滑	379
46. 按給定的前滑確定臨界角	386
47. 對臨界面位置因寬展而變化的分析	390
48. 根據實驗的前滑及寬展確定外摩擦係數	392
49. 考慮寬展時在變形區長度任一點上的縱向滑動	395
50. 在平軋上軋制並考慮寬展時變形區內金屬質 點移動的運動學圖示	398
第十章 在軋槽中軋制時的變形	412
51. 在軋槽中軋制時變形計算的特點	412
52. 在軋槽中軋制時工具的形狀係數	414
第十一章 在橢圓孔型中軋制方軋件時變形的計算	421
53. 橢圓孔型的幾何關係	421
54. 橢圓軋件橫斷面積的確定	421
55. 高向變形的計算	423
56. 工具形狀係數的確定	438
57. 延伸、寬展及孔型充滿度的計算	442
58. 咬入角的確定	444
59. 延伸、壓下量、孔型形狀及孔型充滿度之間的關係	447
第十二章 在方孔型中軋制橢圓軋件時變形的計算	455
60. 方孔型的幾何關係	455
61. 高向變形的計算	457
62. 工具形狀係數的確定	466
63. 延伸、寬展和孔型充滿度的計算	467
64. 橢圓（或六角）軋件形狀、延伸、孔型充滿度及壓下量 之間的關係	469
第十三章 在六角孔型中軋制方形（或長方形）軋件時變形 的計算	475
65. 六角孔型的幾何關係	475
66. 六角形軋件橫斷面面積的確定	476

67. 高向变形的計算	478
68. 工具形狀系数的确定	479
69. 延伸、寬展及孔型充滿度的計算	485
70. 咬入角的計算	485
71. 延伸、压下量、孔型形狀及孔型充滿度之間的关系	487
第十四章 在菱形孔型中軋制时变形的計算	492
72. 菱形孔型的几何关系	492
73. 菱形軋件橫断面面积的确定	493
74. 变形区的形狀与尺寸	495
75. 高向变形的計算	500
76. 工具形狀系数的确定	503
77. 寬展、延伸及孔型充滿度的計算	503
78. 孔型垂直对角綫及其鈍角的預先選擇	504
79. 延伸、沿对角綫上的相对压下量及孔型構造之間的关系	505
80. 咬入角平均值的确定	505
第十五章 在平軋上超咬入角軋制时寬展計算的特点	510
81. 超咬入角軋制时力的情况	510
82. 超咬入角軋制时变形区的各区域	511
83. 超咬入角軋制时寬展的計算	512
参考文献	521

緒 論

苏联共产党十九次代表大会拟定了在我国建設共产主义的偉大計劃。根据 1951~1955 年苏联發展的第五个五年計劃，在代表大会的決議中規定着除了繼續增長黑色金屬生产以外，还要增广品种和大大增加所缺少的鋼材种类的生产，特别是厚鋼板的生产約增加 80%、小型鋼材及綫材增加 1.1 倍，以及不銹鋼鋼板增加 2.1 倍；也規定着扩大經濟鋼材品种和型鋼的生产。

由于在第五个五年計劃中苏联的机器制造業大規模地增長，就要求大大扩充鍛造生产。按照第五个五年計劃，代表大会的決議規定着重型鍛压机械的生产增長 7 倍。这些数据說明苏联冶金工業及机器制造業中的金屬压力加工过程在全面增長中的作用。

金屬的塑性加工在苏联冶金工業及机器制造工業中广泛地采用，給許多苏联科学研究部門的工作者、首先是給金屬及合金的塑性加工科学的工作者提出了一些新任务，这些任务的解决，能促使技术提高及工艺过程的进展，能促使劳动生产率和产品质量的提高。

金屬压力加工原理是一門比較年輕但發展迅速的科学。在五年計劃的年代中，冶金及机器制造工業的發展，連續式鋼坯軋机、型鋼及鋼板軋机的安裝，机器制造工厂鍛造車間中冲压生产的广泛發展，周期断面型材的軋制；这些都向金屬压力加工原理提出了新而高的要求。最近 20~30 年以来，在苏联学者及工程师的許多工作中，曾解决了許多在金屬压力加工原理及实践方面的重要問題。

由于 И. М. 巴甫洛夫、С. И. 古布金、А. Ф. 高洛文、А. И. 采里柯夫、А. П. 切克馬廖夫、Е. П. 溫克索夫等人的工作，苏联的金屬压力加工原理达到了很大的成就；而 А. А. 伊利尤申、В. В. 索科洛夫斯基、Н. Н. 舍夫欽科等人的研究在金屬压力加

工原理上的应用更使金屬压力加工原理有了繼續發展的广闊远景。

关于应力变形状态的現代学說在金屬压力加工时力的計算上的应用，是金屬压力加工原理在發展过程中的里程碑。但是，在金屬塑性加工的重要过程中，这种学說仍不能应用到实际的变形計算中去，例如：軋軋的孔型設計中就不能应用。所以拟制的工程計算方法，虽然是近似的，但也是絕對必要的。

第一章 一般原理

1. 体积不变条件

許多实验証明塑性加工时金屬的密度很少变化，或者是不变的。冷加工时，因和它同时产生金屬的加工硬化（наклеп），金屬的密度有些减少；这和加工硬化的性質及金屬内部形成大量細微裂縫有关。但是，各种金屬和合金冷加工时密度通常只减少 $0.1 \sim 0.2\%$ [1] ①。此外，当进行中間退火和終了退火时，由于再結晶的关系，密度將增加到接近原来的数值。所以考虑到退火时可以肯定地說，在冷塑性加工的情况下，金屬的密度及体积是不变的。

既然金屬的热压力加工是加工硬化及再結晶这两个同时或者依次产生的过程，那么变形金屬的密度及体积在这种加工的情况下可以說是不变的。这对于用預先压过的金屬——坯料——进行变形的所有場合都是正确的。假如是用鑄錠来加工，那么應該考虑到鑄錠中气孔、疏松及其他空隙的存在。例如 И. М. 巴甫洛夫 [1] 認为沸騰鋼鋼錠的單位重量，在軋制几道后由 6.9 吨/公尺^3 变为 7.85 吨/公尺^3 。因之，在这种場合中，按綫尺寸所决定的軋件体积，大約减少 12% 。

从以上的叙述可以看出：不論冷加工或者热加工时，变形金屬的密度和体积的改变总是很小的，以致在坯料的軋制或鍛造的場合中，实际上可以忽略这些变化而認为变形前后金屬的体积是保持不变的。

对于所有的变形計算而言，体积不变条件有很大的实际意

① 方括弧内的数字，代表書后参考書目录的序号。

义。其实若塑性加工时沿着所有三个方向（座标的三个轴）上的尺寸都改变了，那么要按照已知的原始尺寸来确定物体的終了尺寸，就必须有三个方程式。通常变形中的一个（例如压下量）是已知的，因而只要决定其它两个終了尺寸；为此就必须有两个方程式；体积不变条件就是这些方程式中之一。

在许多金属压力加工过程中，沿着两个轴上的变形是相同的，这早已为人们所熟知；例如通过模孔的拉伸（волочение）和压出（выдавливание），圆柱体在平行的平锤头間鍛粗（осадка）等等，就是如此的。在这些场合中，当一个方向中的变形已知时，只要利用体积不变条件便可算出物体的終了尺寸。下面将要叙述体积不变条件在鍛造及軋制过程中的运用。

2. 移动体积的方法

不能正确地在数量上来估定变形的大小便不能成功地拟訂出計算变形数值的方法。但是至今还没有确定变形大小的通用公式。

最常用 $\frac{\Delta h}{h_0}$ 的型式把压缩率表示成百分数，而很少用 $\frac{\Delta h}{h_1}$ 的型式来表示。

式中 h_0 ——物体原来的高度；

h_1 ——物体的終了高度；

Δh ——物体高度的绝对变化。

这些用以估定高度方向变形数值的式子，是从弹性原理中搬过来的；在弹性原理中通常只讨论很小的变形。假设拉伸原始长度为 l_0 的试棒时，得到增量 Δl ，而这 Δl 和 l_0 比较起来是很小的话，那么相对延伸率的计算结果，实际上与我们把增量 Δl 和原始长度 l_0 相比还是和終了长度 $l_0 + \Delta l = l_1$ 相比是无关的。假如说试棒长度上得到很大的增量，那么试棒相对延伸率的定量结果，在颇大程度上要看绝对增量与那一个尺寸（原始的或者終了了的）相比而定。只有当变形很小时这种差别实际上才没有。同

理，鍛粗時相對變形大小和軋制時壓下量大小等等的決定也是如此。

所以說用 $\frac{\Delta h}{h_0}$ 或 $\frac{\Delta h}{h_1}$ 來表示變形的大小只是粗略近似的。有誤差的原因在於只把一個過程的個別時期來作為整個過程的所有時期來討論。當用 $\frac{\Delta h}{h_0}$ 來表示相對壓下量時，只是考慮到過程開始時期的情況，或者只是考慮了開始時期的高度，而使高度達到 h_1 的方式 (способ) 在式中沒有任何表示。至於 $\frac{\Delta h}{h_1}$ 的式子也是相同的，它只考慮了終了高度（過程的終了時期）而達到這個高度的方式，從一個高度變到另一個高度的經過，式中同樣也沒有考慮。

為了正確地在數量上估定變形的大小，就必須把物體尺寸的相對變化取微分形式，並在適當極限內積分後得出真實的變形。例如若將原始長度為 l_0 的試棒拉伸到終了長度 l_1 ，那麼真實的相對延伸率可用下述方法得出：假設在過程內任何一個瞬間試棒的長度為 l ，而在經過無窮小的單位時間後得到了長度增量 dl ；那麼，在這個單位時間後相對延伸率表示為：

$$\frac{dl}{l}。$$

在 l 由 l_0 至 l_1 的變化範圍內將上式積分，就可得出整個拉伸過程以後的總相對延伸率：

$$\int_{l_0}^{l_1} \frac{dl}{l} = \ln \frac{l_1}{l_0}。$$

因之，長度方向的真實變形等於物體長度倍数變化（即變形後長度與原始長度之比值——譯者注）的自然對數。

但是，在一定方向尺寸倍数變化的對數，同樣也不能詳盡無遺地在數量上估定變形的大小。А.Ф. 高洛文(Головин) [2] 指出，耗於塑性加工的功與移動體積的大小成比例。注意到變形功與變形大小有不可分割的聯繫時，就可得出結論說：在任何方向中變形的大小，由在同一方向中移動的體積來決定。

A.Φ. 高洛文在他对金属压力加工过程的研究中，广泛地采用了移动体积的方法。

在任何方向中的移动体积应了解为在物体整个说来不动的情况下而变形时，同一方向内由物体的表面所造成的体积。

这个定义，只在金属的体积是处于工具直接作用下且在变形过程中保持不变的条件下，才是正确的。

现在将移动体积的概念应用于锻造粗矩形六面体。假设这种六面体在两个平行的平板中间受到锻造。引用符号如下：

h_0, h_1, h ——六面体在锻造开始、終了及任何一中间瞬间的高度；

b_0, b_1, b ——同上，对六面体底的宽度（小边）而言；

l_0, l_1, l ——同上，对六面体底的长度（大边）而言；

V ——六面体的体积。

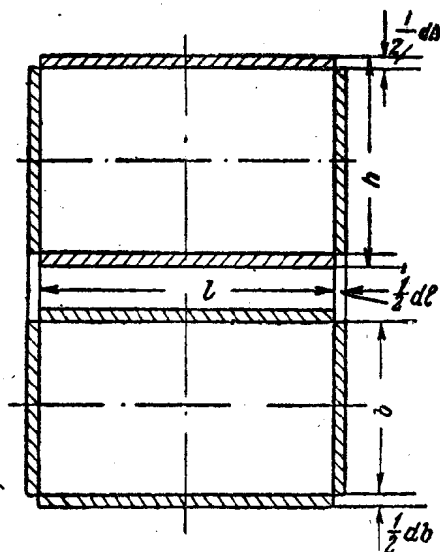


图1 各个方向移动的单位体积图

设锻造的某瞬间六面体的尺寸为 h, b 及 l 。给六面体以无穷小的锻造量 ($-dh$) (取负号是因为锻造时六面体的高度减小)。

此时六面体的底边得到了对应的增量 db 及 dl (图 1)。在六面体高度方向内移动的單位体积是:

$$dV_h = bl (-dh) \quad (1)$$

同样, 在六面体底的寬度方向内:

$$dV_b = lh db \quad (2)$$

同样, 在六面体底的長度方向内:

$$dV_l = bh dl \quad (3)$$

(参看图 1 上对应的划斜綫的区域)。

六面体因其緻粗而發生的歪扭(沿高度形成鼓形, 底边凸出等等), 在这里暫不研究。

各个方向内移动的單位体积图, 决不可理解为沿高度上某些体积是“消失”(удаление)了, 而在底的長度和寬度上此种体积是“增加”(прибавление)了。图 1 上划斜綫的單位移动体积, 定量地表示了在相应方向上金屬質点所有内部的相互移动的总和。

根据被变形六面体体积不变条件, 可以說沿着高度移动的体积等于在底的寬度及長度方向中移动体积的总数:

$$dV_b + dV_l = dV_h \quad (4)$$

將前面方程式中表示單位移动体积的式子代入上式, 得出:

$$lh db + bh dl = bl (-dh) \quad (5)$$

考虑到 $b lh = V = \text{常数}$, 簡單变化以后就得出:

$$V \frac{db}{b} + V \frac{dl}{l} = V \frac{(-dh)}{h}$$

为了确定相应方向中总的移动体积, 我們在六面体各相应直綫尺寸的变化范围内来积分最后这个方程式:

$$V \int_{b_0}^{b_1} \frac{db}{b} + V \int_{l_0}^{l_1} \frac{dl}{l} = V \int_{h_0}^{h_1} \frac{(-dh)}{h};$$

$$V \ln \frac{b_1}{b_0} + V \ln \frac{l_1}{l_0} = V \ln \frac{h_0}{h_1} \quad (5)$$

上式中的每一項，表示相应地沿着六面体寬度、長度及高度上移动的总积。

总之，任何方向內移动的体积，等于物体的体积与該方向中直綫尺寸相对变化的自然对数的乘积。

最后这个方程式可以下列型式表示：

$$V_h + V_l = V_b. \quad (6)$$

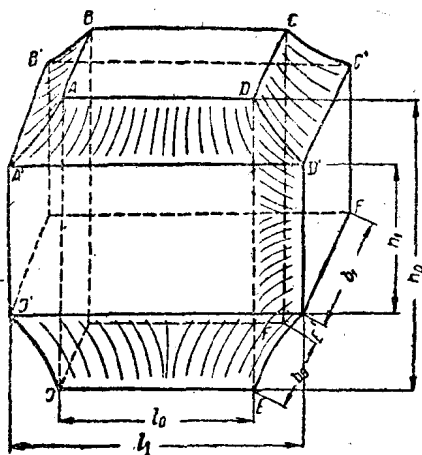


图 2 沿六面体高度、寬度及長度上移动的体积图

图 2 表示沿着各个方向的移动体积。 $ABCD$ 及 $A'B'C'D'$ 兩平行平面所限定的体积是沿高度所移动的体积的一半 $\frac{1}{2}V_h$ (这个体积的另一半示于六面体的下面部分)。 $CDEF$ 及 $C'D'E'F'$ 兩平行平面所限定的体积，是六面体底的長度方向內所移动的体积的一半 $\frac{1}{2}V_l$ (此体积的另一半示于六面体的左面部分中)。 $ADEI$ 及 $A'D'E'I'$ 兩平行平面所限定的体积，是六面体底的寬度方面內所移动的体积的一半 $\frac{1}{2}V_b$ (此体积的另一半位于六面体的后面部分內)。

各个直綫尺寸的相对变化，今后將称为“变形系数”並表示如下：

$$\left. \begin{aligned} \frac{h_1}{h_0} &= \eta; \\ \frac{l_1}{l_0} &= \lambda; \\ \frac{b_1}{b_0} &= \beta. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

將变形系数代入方程式 (5) 以后得出:

$$V \ln \beta + V \ln \lambda = V \ln \frac{1}{\eta}.$$

以 $V \ln \frac{1}{\eta}$ 除此方程式的各项, 得出:

$$\frac{\ln \beta}{\ln \frac{1}{\eta}} + \frac{\ln \lambda}{\ln \frac{1}{\eta}} = 1.$$

因为实际計算中利用常用对数代替自然对数較为方便, 故最后这个方程式可写成下列型式:

$$\frac{\lg \beta}{\lg \frac{1}{\eta}} + \frac{\lg \lambda}{\lg \frac{1}{\eta}} = 1. \quad (8)$$

方程式左边部分的对数比值, 具有簡單的但对变形計算来說是重要的物理意义。

比值 $\frac{\lg \lambda}{\lg \frac{1}{\eta}}$ 表示長度方向內移动的体积是沿着高度方向移动的总体的积的几分之几。

比值 $\frac{\lg \beta}{\lg \frac{1}{\eta}}$ 表示寬度方向內移动的体积是沿着高度方向移动的总体的积的几分之几。因为沿着高度方向移动的体积等于移向寬度及長度中的总体的积, 所以这两部分等于一是很自然的事情。

方程式 (8) 給出了关于 沿着高度移动的体积 分配到物体長度及寬度方向內去的显明而簡單的量的概念。例如, 若已知

$\lg \frac{\beta}{\eta} = 0.6$ ；那么，从方程式 8 可得出 $\frac{\lg \lambda}{\lg \frac{1}{\eta}} = 0.4$ ；这就意味着沿着高度移动的全部体积中，有 40% 移向六面体底的方向内，而 60% 移向宽度方向中。当这样在数量上估定各个方向内的变形时十分明显：由于高度方向变形而来的金属流动，或者沿着高度移动的体积，被分成两股，其中之一使六面体底的宽度增加，而另一股使长度增加。对于锻造及轧制时变形的计算来说，这个概念有重要的意义。

方程式 (8) 可直接从体积不变条件用更为简单的方法求得。其实六面体的体积不变条件可写为：

$$h_0 b_0 l_0 = h_1 b_1 l_1,$$

或者

$$\frac{b_1}{b_0} \times \frac{l_1}{l_0} = \frac{h_0}{h_1},$$

或者

$$\beta \lambda = \frac{1}{\eta}. \quad (9)$$

将最后这个方程式取对数，

$$\lg \beta + \lg \lambda = \lg \frac{1}{\eta}.$$

以 $\lg \frac{1}{\eta}$ 除此方程式，就得出方程式 (8)。

但是这样地推导是完全不允许的，因为此时已完全失去了所研究过程的物理实质。即刻会发生疑问：为何方程式 (9) 要取对数而不进行任何其他数学运算呢？问题不在于各种数学运算而在于过程的物理实质；当作这样的简化处理时，过程的物理实质非但不能阐明反而隐蔽了。

移动体积的方法比其它方法（例如用 $\frac{\Delta h}{h_0}$ 或 $\frac{\Delta h}{h_1}$ 来表示变形的百分数）要深刻得多，并且更能全面地从数量上估定变形。假若说 $\frac{\Delta h}{h_0}$ 或 $\frac{\Delta h}{h_1}$ 式子只能表明沿一定方向上直线尺寸变化的特