金属塑性加工变形

И.Я. 塔尔諾夫斯基 著

冶金工业出版社

金屬塑性加工变形

(鍛造及軋制)

И.Я. 塔尔諾夫斯基 著
曹乃光 等譯
王廷溥 校訂

冶 金 工 業 出 版 社

書中研究了金屬压力加工中鍛造与軋制兩过程变形的問題。在鍛造部分里，闡述了均勻鐓粗、自由的不均勻鐓粗及有剛端存在时不均勻鐓粗的問題。在軋制部分里，叙述了在平輥中軋制时横变形及縱变形以及在軋輥軋槽中軋制簡單断面型材变形的問題。

本書可供从事压力加工的工程技术人員使用，亦可作为金屬压力加工專業学生学習的参考。

И.Я.ТАРНОВСКИЙ
ФОРМОИЗМЕНЕНИЕ ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ МЕТАЛЛОВ
Металлургиздат (Москва—1954)

金屬塑性加工变形　　曹乃光　等譯

編輯：叶建林　設計：赵香荅　責任校对：任少禛、刘頌古

1958年9月第一版　1958年9月北京第一次印刷 3000册

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

冶金工業出版社印刷厂印　新华書店發行　書号0848

冶金工業出版社出版（地址：北京市灯市口甲45号）

北京市書刊出版業營業許可証出字第093号

目　　录

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划。根据1951～1955年苏联發展的第五个五年計划，在代表大会的决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；也規定着扩大經济鋼材品种和型鋼的生产。

由于在第五个五年計划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。按照第五个五年計划，代表大会的决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質量的提高。

金屬压力加工原理是一門比較年輕但發展迅速的科学。在五年計划的年代中，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踐方面的重要問題。

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属压力加工原理有了繼續發展的广濶远景。

关于应力变形狀态的現代学說在金属压力加工时力的計算上的应用，是金属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：軋輥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，但也是絕对必要的。

第一章　一般原理

1. 体积不变条件

許多实驗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），金屬的密度有些減少；这和加工硬化的性質及金屬內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減少0.1～0.2％〔1〕❶。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。所以考慮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兩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，那么应該考慮到鑄錠中气孔、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，大約減少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

---

❶ 方括弧內的数字，代表書后參考書目录的序号。

义。其实若塑性加工时沿着所有三个方向（座标的三个軸）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，就必須有三个方程式。通常变形中的一个（例如压下量）是已知的，因而只要决定其它兩个終了尺寸；为此就必須有兩个方程式；体积不变条件就是这些方程式中之一。

在許多金屬压力加工过程中，沿着兩个軸上的变形是相同的，这早已为人們所熟知；例如通过模孔的拉伸（волочение）和压出（выдавливание），圓柱体在平行的平錘头間鐓粗（осадка）等等，就是如此的。在这些場合中，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。下面將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。但是至今还沒有确定变形大小的通用公式。

最常用$\frac{\Delta h}{h_0}$的型式把压縮率表示成百分数，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——物体高度的絕对变化。

这些用以估定高度方向变形数值的式子，是从彈性原理中搬过来的；在彈性原理中通常只討論很小的变形。假設拉伸原始長度为l_0的試棒时，得到增量Δl，而这Δl和l_0比較起来是很小的話，那么相对延伸率的計算結果，实际上与我們把增量Δl和原始長度l_0相比还是和終了長度$l_0+\Delta l=l$相比是無关的。假如說試棒長度上得到很大的增量，那么試棒相对延伸率的定量結果，在頗大程度上要看絕对增量与那一个尺寸（原始的或者終了的）相比而定。只有当变形很小时这种差别实际上才沒有。同

理，鐓粗时相对变形大小和軋制时压下量大小等等的决定也是如此。

所以說用$\frac{\Delta h}{h_0}$或$\frac{\Delta h}{h_1}$来表示变形的大小只是粗略近似的。有誤差的原因在于只把一个过程的个别时期来作为整个过程的所有时期来討論。当用$\frac{\Delta h}{h_0}$来表示相对压下量时，只是考虑到过程开始时期的情况，或者只是考虑了开始时期的高度，而使高度达到h_1的**方式**（способ）在式中沒有任何表示。至于$\frac{\Delta h}{h_1}$的式子也是相同的，它只考虑了終了高度（过程的終了时期）而达到这个高度的**方式**，从一个高度变到另一个高度的經过，式中同样也沒有考虑。

为了正确地在数量上估定变形的大小，就必須把物体尺寸的相对变化取微分形式，並在适当極限內积分后得出眞实的变形。例如若將原始長度为l_0的試棒拉伸到終了長度l_1，那么眞实的相对延伸率可用下述方法得出：假設在过程內任何一个瞬間試棒的長度为l，而在經过無穷小的單位时間后得到了長度增量dl；那么，在这个單位时間后相对延伸率表示为：

$$\frac{dl}{l}。$$

在l由l_0至l_1的变化范圍內將上式积分，就可得出整个拉伸过程以后的总相对延伸率：

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

因之，長度方向的眞实变形等于物体長度倍数变化（即变形后長度与原始長度之比值——譯者注）的自然对数。

但是，在一定方向尺寸倍数变化的对数，同样也不能詳尽無遺地在数量上估定变形的大小。А.Ф. 高洛文(Головин)〔2〕指出，耗于塑性加工的功与移动体积的大小成比例。注意到变形功与变形大小有不可分割的联系时，就可得出結論說：在任何方向中变形的大小，由在同一方向中移动的体积来决定。

A.Ф. 高洛文在他对金屬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說来不动的情况下而变形时，同一方向內由物体的表面所造成的体积。

这个定义，只在金屬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。

現在將移动体积的概念应用于鐓粗矩形六面体。假設这种六面体在兩个平行的平板中間受到鐓粗。引用符号如下：

h_0，h_1，h——六面体在鐓粗开始、終了及任何一中間瞬間的高度；

b_0，b_1，b——同上，对六面体底的寬度（小边）而言；

l_0，l_1，l——同上，对六面体底的長度（大边）而言；

V——六面体的体积。

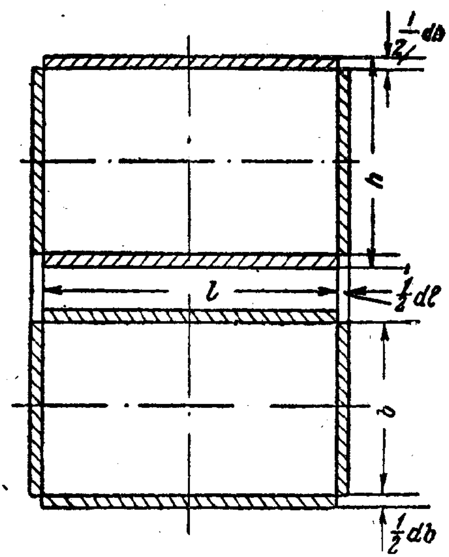

图 1　各个方向移动的單位体积图

設鐓粗的某瞬間六面体的尺寸为 h，b 及 l。給六面体以無穷小的鐓粗量（$-dh$）（取負号是因为鐓粗时六面体的高度減小）。

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：

$$dV_h = bl\ (-dh)。\qquad (1)$$

同样，在六面体底的寬度方向內：

$$dV_b = lh\ db。\qquad (2)$$

同样，在六面体底的長度方向內：

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

（参看图 1 上对应的划斜綫的区域）。

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

各个方向內移动的單位体积图，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內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：

$$dV_b + dV_l = dV_h。\qquad (4)$$

將前面方程式中表示單位移动体积的式子代入上式，得出：

$$lh\ db + bh\ dl = bl\ (-dh)。$$

考虑到 $blh = V =$ 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，我們在方面体各相应直綫尺寸的变化范圍內来积分最后这个方程式：

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

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

上式中的每一项，表示相应地沿着六面体寬度、長度及高度上移动的总体积。

总之，任何方向内移动的体积，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：

$$V_b+V_l=V_h。\qquad (6)$$

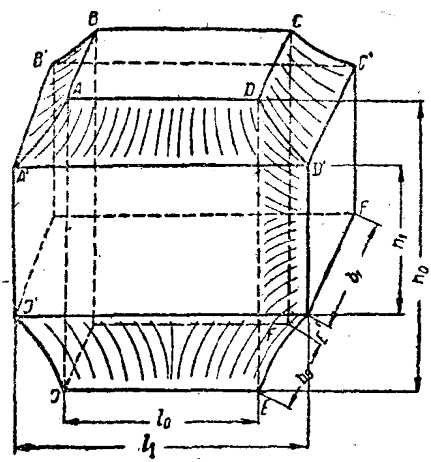

图 2　沿六面体高度、寬度及長度上移动的体积图

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：

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

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$V\ln\frac{1}{\eta}$除此方程式的各項，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：

$$\frac{\lg\beta}{\lg\frac{1}{\eta}}+\frac{\lg\lambda}{\lg\frac{1}{\eta}}=1。\qquad(8)$$

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

比值$\dfrac{\lg\beta}{\lg\frac{1}{\eta}}$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积，所以这兩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

$\dfrac{\lg\beta}{\lg\dfrac{1}{\eta}}=0.6$；那么，从方程式8可得出$\dfrac{\lg\lambda}{\lg\dfrac{1}{\eta}}=0.4$；这就意味着沿着高度移动的全部体积中，有40%移向六面体底的長度方向內，而60%移向寬度方向中。当这样在数量上估定各个方向內的变形时十分明显：由于高度方向变形而来的金屬流动，或者沿着高度移动的体积，被分成兩股，其中之一使六面体底的寬度增加，而另一股使長度增加。对于鍛造及軋制时变形的計算来說，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簡單的方法求得。其实六面体的体积不变条件可写为：

$$h_0b_0l_0=h_1b_1l_1,$$

或者

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

或者

$$\beta\lambda=\frac{1}{\eta}。\qquad(9)$$

將最后这个方程式取对数，

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

以$\lg\dfrac{1}{\eta}$除此方程式，就得出方程式（8）。

但是这样地推导是完全不允許的，因为此时已完全失去了所研究过程的物理实質。即刻会發生疑問：为何方程式（9）要取对数而不进行任何其他的数学运算呢？問題不在于各种数学运算而在于过程的物理实質；当作这样的簡化处理时，过程的物理实質非但不能闡明反而隐蔽了。

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