

哈爾濱工業大學講義

金屬壓力加工原理

鍛壓設備及工藝教研室
霍文燾編譯

1955

前 言

金屬壓力加工原理為培養金屬壓力加工方面專家的主要專業課程之一。

掌握金屬壓力加工原理以後，我們才能正確地分析金屬壓力加工的工藝過程，以便在科學理論的基礎上用全面的觀點並結合具體條件來製定金屬壓力加工工藝過程。

本講義是蘇聯專家、科學技術碩士、副教授 阿·彼·阿特羅森克 (А. П. Атрошенко) 於 1954 年在我校根據本課程教學大綱為『金屬壓力加工及機器』專業高年級學生講課時而寫的講稿並作為該專業之基本教材。

為了更好地培養金屬壓力加工方面的專家，特將阿·彼·阿特羅森克專家的講稿加以整理並譯成中文出版。

本講義內容是根據中國高等工業學校金屬壓力加工原理教學大綱所編寫的，可以做為該課程的基本教材。

本講義內容包括變形力及變形的分析、金屬塑性變形物理特性、單位流動壓力、各種壓力加工工序之變形力及變形功，此外還包括了金屬壓力加工方面的最新成就。

哈爾濱工業大學鍛壓設備及工藝教研室

霍 女 榮

1954, 10,

目 錄

第一章 緒 論

第二章 變形力及變形的分析

§ 1. 外力	4
§ 2. 內力	7
§ 3. 應力	8
§ 4. 彈性變形及塑性變形	8
§ 5. 物體的應力狀態	11
§ 6. 應力曲面及斜面上的主要法線應力	15
§ 7. 應力橢圓	17
§ 8. 最大功線應力	18
§ 9. 八面體應力	21
§ 10. 微分平衡方程式	22
§ 11. 平面問題	25
§ 12. 直線應力狀態	30
§ 13. 主應力圖解及其對金屬塑性及變形抗力的影響	30
§ 14. 變形, 小變形	36
§ 15. 變形分量與位移分量的微分關係 (幾何方程式)	38
§ 16. 主軸及主變形, 最大滑動	40
§ 17. 體積變形及體積不變的條件	43
§ 18. 塑性變形與應力之間的關係	44
§ 19. 主變形圖解及變形力學圖解	45
§ 20. 應力不均匀分佈	46
§ 21. 基本應力與附加應力	47
§ 22. 殘餘應力	49
§ 23. 摩擦及摩擦係數的測定方法	53

第三章 金屬塑性變形

§ 1. 單晶體變形的物理特性	57
§ 2. 變形的脫節原理	60
§ 3. 多晶體變形之物理特性	60
§ 4. 加工硬化曲線	64
§ 5. 恢復及再結晶	65
§ 6. 變形的溫度——速度因素	66
§ 7. 冷變形及熱變形	68
§ 8. 金屬變形對其性能變化的影響	69

第四章 變形抗力

§ 1. 拉伸時的真實應力曲線.....	70
§ 2. 加工硬化曲線方程式.....	75
§ 3. 塑性指數.....	77
§ 4. 加工硬化的近似直線.....	79
§ 5. 溫度對變形抗力的影響.....	83
§ 6. 速度對變形抗力的影響.....	84
§ 7. 塑性變形表面.....	88
§ 8. 主法線應力差的永恒條件.....	89
§ 9. 塑性的能量條件.....	91

第五章 單位流動壓力及變形功

§ 1. 鍛造規範.....	96
§ 2. 單位流動壓力.....	98
§ 3. 顧伯金及翁克索夫確定單位流動壓力的分析方法.....	105
§ 4. 翁克索夫方法計算圓柱坯料鍛粗時的單位壓力及壓床的全壓力.....	105
§ 5. 方形及矩形斷面坯料的鍛粗.....	112
§ 6. 在型槽砧頭內延伸.....	116
§ 7. 開式穿孔.....	118
§ 8. 在墊環中鍛造.....	122
§ 9. 在墊環中鍛造時所需全壓力的計算.....	123
§ 10. 在閉式鍛模中穿孔.....	131
§ 11. 彎曲.....	134
§ 12. 縱向的彈性塑性彎曲及塑性彎曲.....	138
§ 13. 扭轉.....	142
§ 14. 金屬的擠壓.....	145
§ 15. 擠壓時單位壓力及全壓力的計算.....	148
§ 16. 飛邊金屬的變形抗力及飛邊槽溝的寸法.....	152
§ 17. 壓床上鍛粗的變形功.....	154
§ 18. 錘上自由鍛及模鍛的變形功以及錘之落下重量的確定.....	155
參 考 文 獻.....	158

第一章 緒 論

金屬壓力加工是對金屬加以壓力，使其改變形狀及尺寸以得到各種工件的加工方法。金屬壓力加工的主要類別為輾壓、自由鍛、模鍛、冷沖壓，拉絲及擠壓。

利用輾壓的方法可以得到鋼板、鋼樑、方鋼、圓鋼、扁鋼、鋼軌、鋼管及其他形別的鋼材。輾壓過程的實質是使坯料通過兩個旋轉的軋輥，而使坯料的斷面縮小，長度增加。

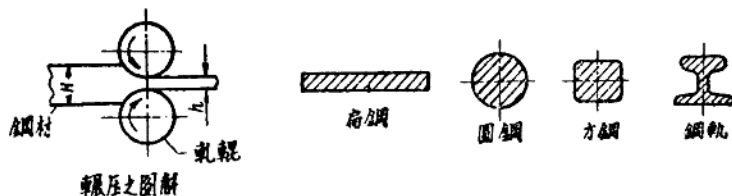


圖 1 各種輾壓鋼材

在國民經濟各個部門中，輾壓生產具有很重要的意義。在蘇聯，冶煉出來的鋼錠有 75% 都要經過輾壓，而其餘部份的鋼材直接用於鑄造、自由鍛及擠壓。

利用自由鍛及熱模鍛的方法可以得到各種機器中不同形狀及大小的零件。自由鍛是在錘上或壓力機上進行，其錘頭之形狀可為平面的或曲面的。

熱模鍛操作是將金屬放在鍛模中獲得變形，鍛模模膛之形狀與模鍛工件之形狀完全一致。在模鍛的過程中金屬不是自由變形，而受模壁的限制。

利用自由鍛方法及熱模鍛方法可以製造各種先進機器中受力最大的零件（如曲軸、連桿、飛機之螺旋槳、高壓鍋爐的圓筒、槍管、炮身、透平的零件、船舶的零件等），所以鍛壓生產對於機械製造業來說具有十分重要的意義。

根據蘇聯的實際經驗，約有三分之一冶煉所得的鋼都要經過鍛壓加工。我們知道，在最先進的機器中（機車、汽車、飛機等）模鍛的工件約佔其重量的 65% 至 85%。

自由鍛及熱模鍛的基本操作方法有鍛粗、延伸、穿孔、在墊環中及鍛模中鍛粗、在開式鍛模中及閉式鍛模中模鍛，如圖 2 所示。

除熱模鍛外，尚有冷沖壓（或叫做薄板沖壓）；利用冷沖壓的方法可以由板料製造出各種不同的工件。這些工件包括飛機和汽車的零件、各種儀錶的零件、鐘錶的零件、各種生活用品（如碗、盃、鍋、匙、勺等）及其他工件。

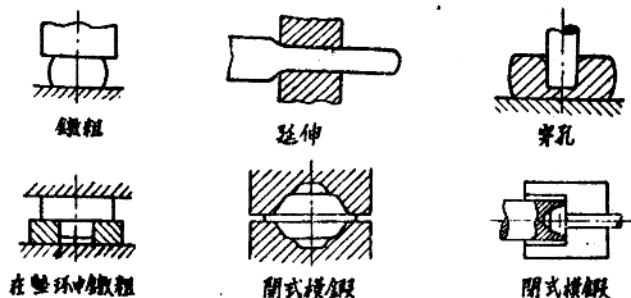


圖 2

冷沖壓生產之基本操作方法有沖裁、引伸、彎曲、成型、動力擠壓等如圖 3 所示。

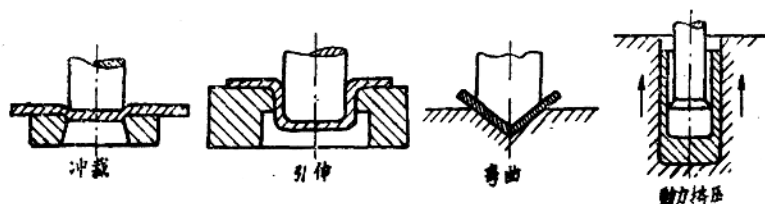


圖 3

拉絲是將坯料通過拉絲模之模孔，使坯料之斷面縮小及長度增加。拉絲生產的產品包括各種大小斷面的線材、棒料及細管，拉絲的方法可以得到幾十分之一公厘的線材及直徑細到 0.3 公厘的注射用針頭的細管等。

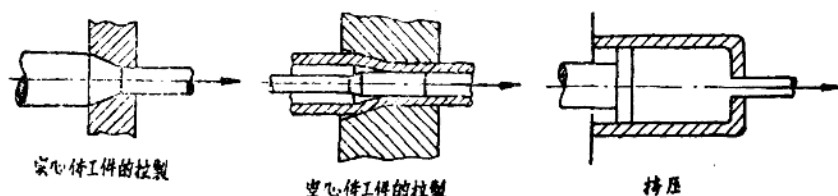


圖 4

擠壓為金屬壓力加工生產之一種，它的特點就是將金屬放在封閉圓筒內加壓力使其由較小的模孔中擠出而得到不同形狀的工件，如棒材、管子及其他形狀的材料。

機械製造工業、國防工業、電器工業、民需工業及其他許多工業部門都是與金屬壓力加工有密切關係的。

我們知道，金屬壓力加工所得到的工件，如鍛件、軋壓工件等之機械性能都比鑄造得到的工件之機械性能高。這樣，我們可得出結論：在國民經濟的發展中金屬壓力加工具有決定性的意義。

金屬壓力加工是以金屬之塑性為基礎的。金屬在受外力時於不破壞的情況下能改變其幾何形狀與大小之特性叫做塑性，此時金屬所處的狀態叫做塑性狀態。

金屬的塑性決定於金屬本身的特性，同時還決定於金屬之變形條件。同一種金屬在一種變形條件下顯示塑性，而在其他情況下就顯示脆性。因之說明最適於金屬塑性變形之條件就成為金屬壓力加工原理的主要任務之一。

在金屬壓力加工過程中，金屬的物理性能也是發生變化的。為了得到質量良好的產品，我們就需要研究金屬塑性變形與其物理化學性能、金相組織、金屬強度等變化相互之間的關係。這一點就成為金屬壓力加工原理的第二個主要任務。

為了使金屬產生塑性變形，必須對金屬作用以外力。此外力之大小決定於變形條件、金屬特性及工件之形狀與大小等，同時在壓力加工時為了設計模具及選擇或設計設備，也必須知道所需外力的大小。研究所需外力之大小乃是金屬壓力加工原理的第三個主要任務。

金屬壓力加工原理的第四個主要任務就是製定鍛壓工藝過程之科學理論基礎。

俄國及蘇聯學者在金屬壓力加工原理方面有非常重要的貢獻。德·克·切爾諾夫 (Д. К. Чернов) 在研究鋼的鍛造時發現了鋼的轉變點，同時還得出滑動線及塑性變形之應力狀態的理論。近年來，蘇聯學者在各方面的研究工作使金屬壓力加工原理大大向前推進，如在金屬物理方面有庫茲涅佐夫 (В. Д. Кузнецов)，在金屬強度及塑性方面有達維金克夫 (Н. Н. Давиденков)、福利德曼 (Я. Б. Фридман) 等，在塑性數學原理方面有依利優申 (А. А. Ильющин)、沙闊洛夫斯基 (В. В. Соколовский)，在金屬塑性方面有顧伯金 (С. И. Губкин)、采里科夫 (А. И. Целиков)、巴甫洛夫 (И. М. Павлов)、翁克索夫 (Е. П. Унксов) 等，都獲得了很大的成就。

我國是世界上歷史悠久的國家之一，是很早就知道用鐵的國家。早在春秋戰國時代，鐵器的用途就己很廣，並且已有鍛鐵業。當時鐵器已廣泛地應用於耕種。並已漸漸用鐵來製造兵器，如干將、莫邪所鍛製的寶劍等。關於我國古代勞動人民在鍛壓生產方面的成就目前研究的還很少，有待於我們去積極鑽研和考查。解放前，我國工業非常落後，因之鍛壓生產也沒有什麼發展，現在我們已開始了偉大的社會主義建設，隨着祖國工業的發展，鍛壓生產也會有飛躍的進步。

第二章 變形力及變形的分析

§ 1. 外 力

變形時所作用之外力可以分爲：1) 主作用力；2) 反作用力；3) 慣性力。

1) 主作用力

主作用力是由於鍛壓設備的動作而產生的。例如，錘、壓床或軋鋼機等，並藉錘頭、鍛模或軋輥之助將主作用力傳至變形的金屬上。本課程的主要任務之一即爲確定主作用力之值，可保證得到所需要的變形。

應該特別注意，我們不能把剛體力學中所得到的定律公式不加考慮地就在塑性變形的情形下加以運用。因爲在剛體力學中作用力的結果與力的作用點無關，而完全決定於力的作用線。

在塑性變形時，作用力或力矩的作用點改變，則作用力或力矩所作用的結果也將改變。

茲舉兩例如下：

由剛體力學的觀點來看，這兩個塑壓圖解作用的結果是一樣的；若從塑性變形的觀點來看，則上述兩個塑壓圖解就不相同了。第一種情形當力作用於試樣的頂端時則整個試樣將發生變形，而在第二種情形下僅有試樣的下部發生變形。

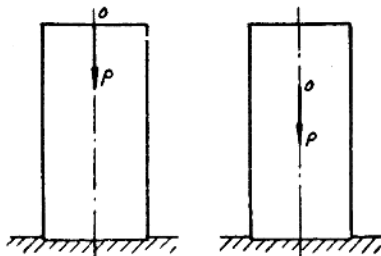


圖 5

左面兩個受扭轉力矩的圖解，由剛體力學的觀點來看則完全相同，但此兩個試樣的變形則不相同。

2) 反作用力

在變形過程中，不僅有主作用力作用於金屬上，而且還有鍛模或錘頭等不動部份的反作用力作用於金屬上；它們形成相互約束以保證變形金屬的流動。對變形物體的反作用力可能是幾個力，這幾個反作用力稱之爲反作用約束。當沒有摩擦力時，反作用力將永遠地垂直於工具的工作表面，作用於變形體的內部。

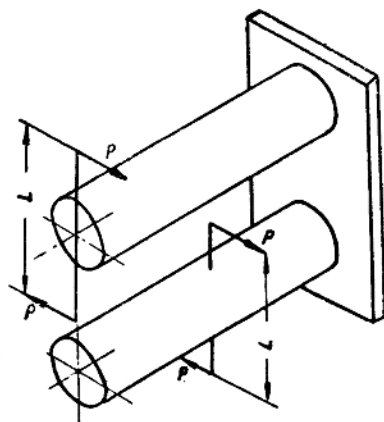


圖 6

P 力爲活動衝頭對金屬所作用的壓力，即主作用力。

N_1 力及 N_2 力爲鍛模模壁及底部對變形金屬所作用的反作用力，並形成約束反作用力。

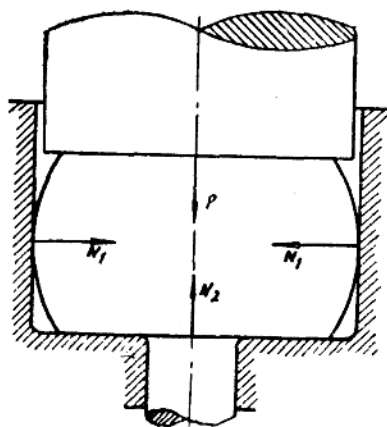


圖 7 沒有摩擦力時，坯料在閉型鍛模中受粗

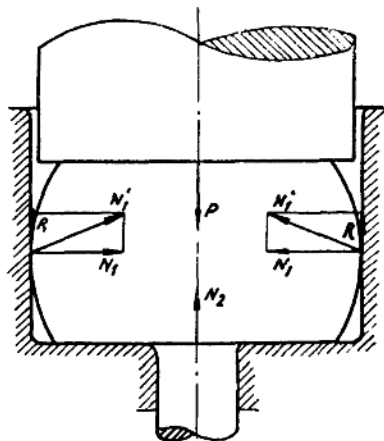


圖 8 坯料在閉型鍛模中受粗，摩擦力 R 改變反作用力的方向，向沖頭在運動，凹模不動

約束反作用力中還應包括產生在工具工作表面與變形金屬間接觸面上的摩擦力。摩擦作用於工具與金屬間接觸面的切線方向，並且其方向與金屬的流動方向相反。在金屬與工具間的摩擦力對變形過程影響甚鉅，通常都是改變反作用力的方向及使變形抗力提高。由於摩擦力也參與反作用，因此其方向不一定就如上述的那樣垂直於工具表面，而反對金屬流動了。

假如變形物體是處於平衡狀態時，則所有力的垂直分力的總和應等於零。如下式所示：

$$P = N_2 + \sum R。$$

由公式中可見作用在坯料頂端的主作用力 P 是大於作用於坯料下端的反作用力 N_2 。在這種模鍛方法下，開始時只是坯料的頂端開始變形，僅僅當坯料頂端的斷面適當增大後，才開始產生坯料下部的變形。

在這種模鍛方法下鍛模空間的上部將比其下部充滿得快，並且充滿的情形也較良好。

在活動衝頭的空間中進行模鍛。

在這種情形下，若變形體處於平衡狀態，則得出下式：

$$P = N_2 - \sum R$$

也就是說，用於坯料頂端的主作用力 P 將小於作用於坯料底部的反作用力 N_2 。採用此種模鍛方法，通常是坯料的底部先開始變形，只有當底部的面積適當增大後，才開始坯料頂端的

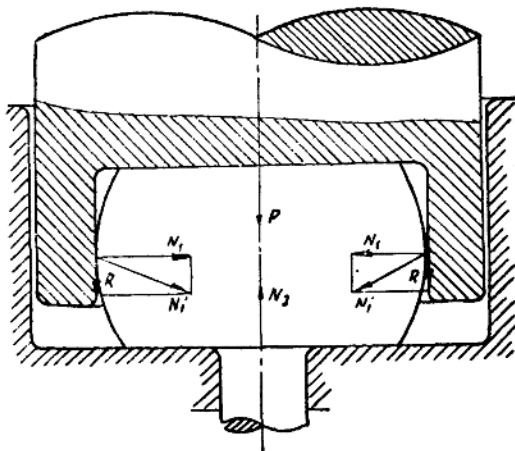


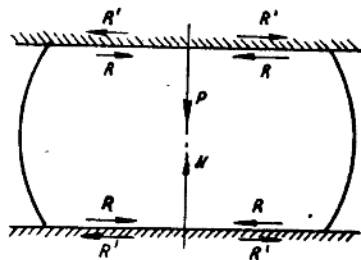
圖 9 坯料在封閉的沖頭內受粗，摩擦力使沖頭壁上的反作用力傾斜，沖頭運動，凹模固定

變形。

因之在此種模鍛方法下，衝頭空間的下部將比上部充滿得快，並且充滿的情形也良好。

所以我們在設計工藝過程時，必須要考慮在工具運動時摩擦力的方向。若忽略了此點，則會引起操作上的不便。

在金屬壓力加工時所產生的摩擦力可能是很大的。所以在設計鍛模時，必須要考慮由於摩擦力所引起的推力。在兩塊板中間進行坯料的鍛粗時，則在板的支持面上產生拉伸力 R' ，其大小與作用於金屬的摩擦力相等，而方向相反。



10 (E)

圖 10 引起摩擦力的支持面

摩擦力可分為動摩擦力和靜摩擦力兩種。此二者之間有較明顯的區別。

假如我們有一絕對剛體受了水平力 T ，則產生摩擦力 R 。摩擦力 R 之值與外力 T 之值相等。當力 T 之值達到相當大時，則該物體開始在平面上產生滑動。

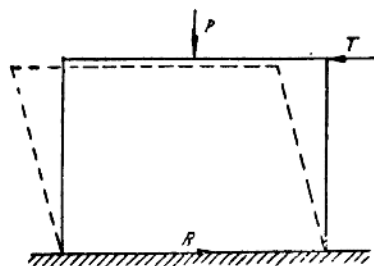


圖 11 沒有滑動時，加於塑性物體上之
摩擦力小於正壓力與摩擦係數的乘積

在均勻運動時，將得到下列平衡條件：

$$R = T$$

摩擦力 R 與法線作用力 P 之比值叫做摩擦係數，即

$$\mu = \frac{R}{P}; \quad R = \mu P。$$

僅有在產生滑動時，上述關係是存在的，在其他情形下，摩擦力均小於 μP 之值，即

$$R < \mu P。$$

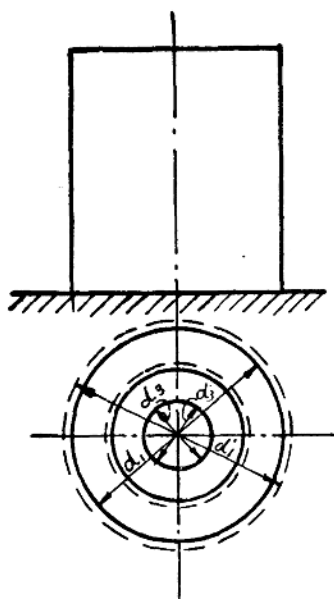
假如物體不是絕對剛體，而是一個可以變形的物體，則 T 力由零增長至 $T = \mu P$ 時，物體將先產生變形，然後開始產生運動，就像在上圖中用虛線來表示的一樣。這種情形是當 T 力不能引起物體的塑性變形時才存在。

假如當 $T < \mu P$ 時產生塑性變形，則一般不發生滑動，而發生物體上部與下部之間的相對運動。這種情形一般在錘上或壓床上進行塑壓時是存在的。

假如在圓柱體試樣的端面上刻有同心圓的圓周，則在塑壓後靠近外緣的圓周直徑增大了。這說明了在金屬與工具接觸表面的邊緣上產生了滑動。

在試樣靠近圓心的圓周直徑，而並未改變其大小時，這說明了在這一部份上沒有產生滑動。而這一部份變形的金屬就好像與工具結合在一起似的。這就說明了在試樣的端面上，距邊緣一定距離的地方，滑動就停止了；而且還僅僅是在金屬的頂端才有這種情形。這一問題以後還要作詳細的討論。

根據許多學者研究的結果，知道在金屬壓力加工時外摩擦係數之值如下：



$$d_1 > d_2$$

$$d_3 = d_2$$

圖 12

當冷變形使用滑潤劑時 $\mu \approx 0.1$;
 當冷變形不使用滑潤劑時 $\mu = 0.1 \sim 0.55$;
 當熱變形時 $\mu = 0.20 \sim 0.55$ 。

3) 慣性力

塑性變形按其本身之特性來講就是運動狀態。在塑性變形的不均勻運動時，除主作用力及反作用力外還有慣性力。慣性力等於物體的質量與其加速度的乘積。慣性力的方向與加速度的方向相反。

在金屬壓力加工時，物體的塑性變形運動都是不均勻的因此，在計算金屬的作用力或計算變形金屬對工具的壓力時，必須考慮到慣性力。為了計算慣性力則需要知道在物體內每一點的加速度，因為目前金屬壓力加工原理的研究工作做得還不够，所以一般不計算慣性力，但其影響可用經驗係數來表示。

§ 2. 內 力

假如對物體加以外力，並且不使受力的物體產生移動時，則物體的內部產生內力，同時物體本身將發生變形。內力產生的過程就是原子距離的改變。由於原子距離的改變，則引起了物體形狀的改變。這樣，在物體變形過程中除了外力之外，還有內力的作用。

內力的產生不僅是爲了力學上的平衡，同時在其他的情形下也可以產生內力，如在物理變化及物理力學變化中，在一切不均勻變形的情形下均可產生內力。引起這種內力的原因一般是由於變形體的完整性。

坯料在不均勻加熱的情形下，坯料的右半邊的溫度比其左半邊的溫度升高得快，這樣，由於熱脹的結果，坯料的右半邊就比其左半邊的長度要增加得快（見左圖虛線部份）。

但坯料爲完整的一塊，它各部份的伸長都將是相等的。坯料的右半邊被強制地與其左半邊平衡，則在坯料的右半邊產生塑壓內力，而在坯料的左半邊將產生拉長內力，此拉長內力與塑壓內力在坯料內部彼此相互平衡。

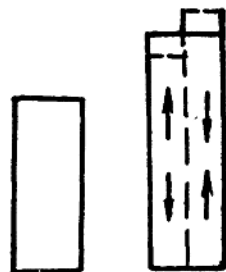


圖 13 在不均勻加熱時的坯料

在上述例子中，內力產生之原因就是在不均勻加熱時坯料所具有的完整性。假如將坯料分成左右兩塊，則此內力在每一部份中都消失了，這就是它們彼此互相平衡的原因。

§ 3. 應 力

所有的力，如外力或內力之值都是以強度來表示的，也就是說以單位面積上所作用力的大小來表示。

在研究內力時，此力的強度叫做應力。應力的一般概念為作用在極微小平面上的內力之值與該微小平面面積之比值而言。

$$\sigma = \frac{\Delta P}{\Delta F}。$$

式中 ΔF 為接近於零的微小平面面積；

ΔP 為在微小平面 ΔF 上所作用的均勻內力。

此應力概念是適用於完整連續性的物體。

祇有當內力是均勻地作用於被研究的平面上時，上述比值 $\frac{\Delta P}{\Delta F}$ 的概念就是應力。

應力與單位壓力不同，二者不可混淆。單位壓力是指當金屬壓力加工時，在變形區域平面的單位面積上所作用的外力而言。

同樣地也不應該把一點的應力狀態與物體的應力狀態相混淆。一點的應力狀態，是指該點的應力張量而言，也就是指該點上所作用應力之大小與方向而言。

$$T_H = \begin{vmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{vmatrix}$$

此對稱的型式叫做應力張量，其中包括法線分力 σ_x, σ_y 及 σ_z 及切線分力 $\tau_{xy} = \tau_{yx}, \tau_{yz} = \tau_{zy}$ 及 $\tau_{zx} = \tau_{xz}$ 。

物體的應力狀態是指原子被迫離開自己平衡位置時的狀態而言。在這種狀態下原子仍然傾向於返回其正常位置。

應力狀態之產生不僅是由於外力作用的結果，同時可能是由於與改變原子距離有關的物理化學變化（如加熱，不均勻冷卻，再結晶及擴散等）所引起的。

原子距離的強迫被發生變化會引起物體大小的改變（物體的變形），同時也破壞原子間的平衡並使物體的位能提高。

當物體的位能提高時，原子間距離會發生變化，也就是原子位置的變化。這些發生了位置變化的原子仍有返回原來能量最小時平衡位置的傾向。

因此當物體的位能提高後在物體內部產生內力，同時該物體處於應力狀態中。

這樣，假如物體的位能較其最低位能有所提高時，則物體處於應力狀態；而物體的形狀如與其具有最低位能的形狀相比較時，則也發生了變化。

§ 4. 彈性變形及塑性變形

物體受外力時（外力、內力）的形狀的變化叫做變形。

假如作用於物體的作用力取消後，物體又恢復到原始的形狀與大小，則此變形叫做彈性變形。

彈性變形的產生是由於原子離開自己的平衡位置而晶格距離發生改變的結果。

引起位能提高的作用力取消後，該物體位能也降低到最小值。物體的應力狀態也消失了，其原子恢復到最穩定的位置，物體的形狀與大小也就恢復如初。

關於應力與彈性變形之間的關係，可以用虎克定律來表示如下：

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad \text{或} \quad \sigma = \varepsilon E.$$

式中 ε —— 相對彈性變形；

σ —— 應力；

E —— 楊氏係數。

採用上述近似的關係式，計算起來非常簡易，而且是可以滿足實際的要求的。

楊氏係數 E 及波桑係數 μ 為彈性變形的主要常數。楊氏係數 E 為計算物體彈性變形抗力的指標，以（公斤/單位面積）表示之。

彈性變形抗力與彈性變形間的關係極為複雜，可以用高次方程式曲線來表示。實際上一般在物體中產生的彈性變形之值甚小，所以在變形的初期可以用直線來代替此變形抗力曲線。

所以一般認為在彈性變形的開始階段，變形抗力不是按其真正曲線來變化的，而是按其曲線的切線來變化的。這是因為在彈性變形很小時真正的曲線與其切線已相合為一了。

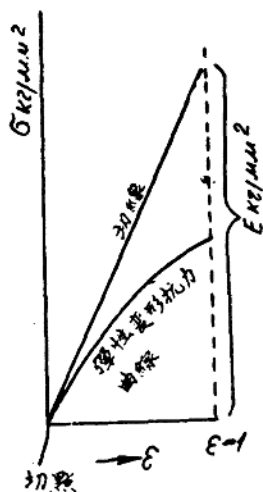


圖 14

根據上述假設，可以認為楊氏係數是為了要在金屬中求得單位的相對變形所需要的應力，而此應力是根據以下假設條件求出的，即彈性變形抗力不是按真正曲線變化，而是按該曲線在坐標軸原點所引的切線而變化。

由彈性原理中知道，直線拉長時相對塑壓 ε_c 與相對伸長 ε_p 之比值等於波桑係數 μ 。波桑係數 μ 永遠小於二分之一。

$$\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_p} = \mu < \frac{1}{2};$$

或者相對塑壓 ε_c 與相對伸長 ε_p 成正比，而前者永遠小於後者。

$$\varepsilon_c = \mu \varepsilon_p.$$

式中 $\varepsilon_p = \frac{\Delta l}{l}$ —— 為拉應力所引起的方形試樣的延長。

$\varepsilon_c = \frac{\Delta b}{b}$ —— 為方形試樣的相對收縮。

用三向應力狀態係數 K 來表示三向塑壓或三向拉伸的特性，茲表示如下：

$$K = \frac{E}{3(1-2\mu)}.$$

三向應力狀態係數或稱積彈係數 K 可以表示在三向均勻受拉或受壓時物體的相對體積變化與應力之間的關係：

$$\sigma = \frac{\Delta V}{V} K = \frac{\Delta V}{V} \frac{E}{3(1-2\mu)}。$$

利用楊氏係數及波桑係數可以計算出滑動係數 G 之值，由彈性原理中可知滑動係數等於：

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)}。$$

這樣可以認為楊氏係數及波桑係數為最穩定的機械特性，在金屬壓力加工或熱處理加工時，可認為是根本不發生什麼變化或者發生極小變化的性能。

當取消作用力之後，物體並不恢復到原始的形狀與大小，則此變形叫做塑性變形或稱殘餘變形。

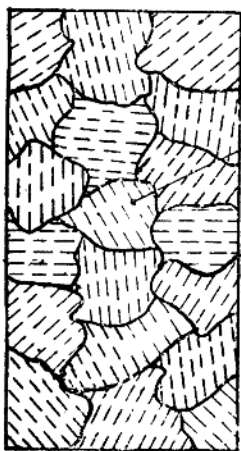


圖 15 多晶體犬牙交錯連結在一起的圖解
(虛線表示滑動面)

在受外力的情形下晶體內產生相互滑動的結晶平面叫做滑動面。如右圖所示：

在 P 力的影響下，滑動面上產生滑動應力 τ ，滑動應力 τ 使晶體的 A 與 B 部份產生相對滑動。在取消作用力以後，因為沒有任何可以使 A 部份返回自己原來位置的原因，所以滑動的結果就被保存下來了。

塑性變形本身的過程如下：當物體處於應力狀態時，在晶粒之間及在滑動面上有滑動應力的作用。此滑動應力是趨向於使晶體內部的滑動面上產生相對位移或相對滑動。

為了瞭解塑性變形的現象和塑性變形的實質，我們必須具有金屬多晶體構造的概念。

多晶的金屬就是非常堅固地連結在一起的晶粒集合體。晶粒彼此連結在一起是由於原子間吸引力的作用及純粹機械連鎖力的作用。此機械連鎖力乃由於晶粒在生長過程中形成柱狀晶粒。這樣，晶粒彼此間形成了犬牙相錯的狀態，因而具有非常強的機械連鎖力。

晶粒的大小決定於結晶的條件，假如晶核數量多而晶粒生長速度甚小，則得到細小晶粒的金屬；在相反的情形下，則得到粗大晶粒的金屬。

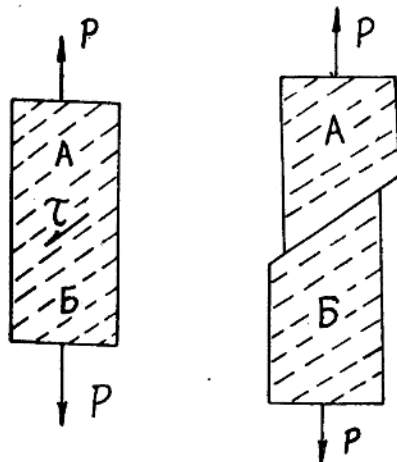


圖 16

當滑動應力達到一定大小之後，就能夠克服滑動面上阻力或晶界間的阻力，結果就產生了晶粒內部的相對滑動或晶粒間的相對位移。

在晶體內部滑動面上產生的相對滑動會引起晶體形狀的改變。在這種過程中，由於晶粒是彼此堅固地結合在一起所以這種形狀的改變就不能再恢復到原始的形狀，這種塑性變形的過程叫做晶內變形。

晶粒間的相對位移也引起了不可恢復的形狀的改變，這種塑性變形的過程叫做晶間變形。

物體的塑性條件之一，即為晶界的強度比晶粒滑動面的強度要高。若晶界強度不高時，則產生晶間變形，因為晶間變形一般的都是使晶界破壞。所以晶界變形是不利的。犬牙相錯的狀態被破壞後，就是已經破壞了晶粒的最強的結合力——機械連鎖力。

晶間變形能降低物理的強度。在僅有晶間變形的情形下，祇能產生很小的塑性變形，因為在開始有塑性變形產生時，已經有晶界破壞了，因而金屬也被破壞。如果希望得到較大的塑性變形時，則必須產生晶內變形，此晶內變形可能與較少的晶間變形相伴隨而產生。

必須注意的是，祇有當作用於滑動面上或晶粒間的滑動應力達到一定大小的值時，才能開始產生塑性變形的過程，此值決定於物體的特性，並且可以說：到這時候才能克服滑動面上或晶間的阻力。

還可認為，塑性變形之產生是由於晶格的破壞，及已被破壞的碎粒按金屬流動的方向排列起來所致。這樣可認為晶格的破壞及已被破壞的晶粒按金屬流動的方向排列起來是塑性變形的第三種型式。

以上指出，真正的金屬是由許多各種不同方向的晶粒所組成。這樣就要注意這個與塑性變形過程有關的重要特性。晶粒的這一特性就是指其異向性而言，所謂異向性就是指晶粒在不同方向具有不同的機械性能。但每個晶粒的這種異向性却保證了真正金屬的均勻性及等向性，也就是說，在所有方向金屬的機械性能都是一致的。

滑動面的強度決定於晶格的性能及其化學成份，晶界的強度決定於結晶的條件，預先的加工，晶粒大小及混合物的數量與種類。最後的因素對於晶界強度影響甚大，因為金屬內的不溶混合物在結晶過程中都集聚到晶粒之間，將晶粒包圍起來形成所謂晶間物質。

§ 5. 物體的應力狀態

在壓力加工時，為了計算各種設備的作用力，僅具有金屬物理化學性能方面的知識是不夠的，還必須知道物體的應力狀態，也就是會根據作用力求出物體每一點的應力。

設有一變形物體，在其上作用有主變形力 P 及反作用力 R 。選一直角標 xyz ，並且用一個平面將此物體分割為兩部份 A 及 B 。去掉 B 部份來研究 A 的平衡。物體的去掉部份對於留下部份的作用可用分佈在剖面上的力來代替。

在截面上取一基元面 dF ，以此基元面上的法線 N 來表示此基元面的方向。

假如作用力是均勻的分佈在截面上，則應力可表示如下：

$$\sigma = \frac{dP}{dF} = \frac{P}{F}。$$

式中 P ——物體放開部份 B 的作用合力；

F ——物體的截面面積。

由被研究的物體中分出一個微小基元六面體，並研究其平衡條件。

由上圖可看出，在分離出的六面體的六個平面上作用有幾個不同大小不同方向的應力。將作用於該六面體每一平面上的應力投影於 x, y, z 軸上，六面體平面上的法線方向分應力以帶相應角碼符號 σ 來表示之；而切線方向分應力以帶相應角碼的符號 τ 來表示之。

這些法線應力及切線應力在前面的圖中均表示得很清楚。法線應力的角碼表示該應力的方向所平行的軸；而切線應力的第一個角碼表示該力的方向所平行的軸，第二個角碼表示切線應力所作用的平面上的法線方向。

例如切線應力 τ_{xy} 表示此切線應力的方向為平行於 x 軸，並且作用於法線平行於 y 軸的平面上。

我們研究微小基元六面體的應力狀態可得出九個未知數來，其中三個為法線應力，六個為切線應力。我們認為所研究的六面體是處於平衡狀態，所以對 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ 方向的軸的迴轉力距之和應等於零，則得到

$$\tau_{xy} = \tau_{yx}$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zy}$$

$$\tau_{zx} = \tau_{xz}。$$

以上公式證明，作用在兩個互相垂直平面上及方向為垂直這些平面交線的切線應力彼此相等。這些在材料力學中的切線應力相應定律中已闡述得很清楚。

因此在研究六面體的應力狀態時只有六個應力的分力存在。

在這種情況下，可以用三個法線應力和三個切線應力的數值就完全可以確定物體的應力狀態。

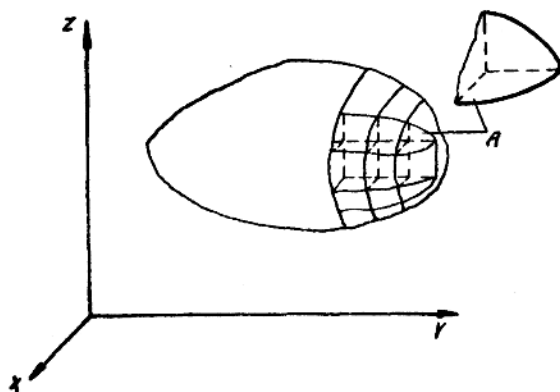


圖 19 物體表面上的微小基元四面體