

# 金屬的拉伸試驗及其在確定塑性 金屬性質的應用\*

W. 特洛茲考夫斯基 (W. Truszkowski)

(波蘭科學院金屬研究所)

## 一：緒 論

近年來用拉伸試驗來確定金屬塑性性質的問題曾引起廣泛的討論。作者們提出了許多關於應力-應變的經驗關係式；這樣找出來的公式的數目當然可以是無限多的。1945年 W. R. Osgood<sup>[1]</sup> 發表了一篇文章，對文獻中已出現了的廿多個應力-應變曲線的解析公式作了批判性的分析，這些公式大致和實驗結果是符合的，但是它們的主要缺點是它們只能適用於一定的變形範圍內。

Osgood 在他的文章中討論到如何使公式函數和實驗結果在形式上互相符合的問題。他認為，作為一個合適的函數，它的主要條件之一是：它的簡單性和它的參數數目少（可能的話不多於兩個）。由於在應力-應變公式中的這些參數是些物理量（這是說如果公式確有一個物理意義的話，而且這應是公式的主要優點），這些物理量的數目是決定於對變形過程起主要作用的物理因素的數目。所以我們可以說，在拉伸試驗的變形過程中，也就是對應力-應變曲線形狀，起主要作用的因素是：屈服點，加工硬化性及金屬的均勻度。

此外，由於在彈性區和塑性區內的變形機理不同，這兩部分應該用兩種不同的數學公式來表示。由於在彈性區域內的應力與伸長是一個直綫關係，這是無疑的，所以在拉伸試驗中的變形基本問題就是要確定一個適用於均勻伸長區域的合適公式。

實驗指出，從彈性過渡到塑性的變形是逐漸的。E. Voce 曾證實了這個過渡區的存在，他給予的解釋是：“…彈性直綫和加工硬化曲綫是由一個短的拐彎帶聯繫在一起的，而這個拐彎帶不完全屬於任何一部分。幾乎可以肯定的是，應力的局部分佈是極不均勻的，在金屬的內部有些區域是發生了塑性變形，而其餘的部分却仍停留於彈性階段。無疑的，正是由於在金屬中塑性的擴展過程是逐漸的，才產生了在曲綫上的彈性塑性的拐彎帶部分”<sup>[2]</sup>。

因此，在這個區域中的應力-應變關係、所受到金屬的均勻程度及試驗條件的影響是很大的。我們知道在均勻伸長到頸縮的過渡階段中，所觀察到的金屬不均勻性的影響是很大的；金屬在這個區域中的不均勻性就是過早形成頸縮的原因。

在一些經驗公式中，最常用的是 Ludwik 的真應力  $\sigma$  及綫應變  $\epsilon$  的關係式：

$$\sigma = a\epsilon^b \quad (1)$$

\* 本文係作者於 1958 年 1 月來我國訪問時在中國科學院金屬研究所及力學研究所所作的報告。

雖然很容易看出,這個方程式只適用於很小的變形範圍內,可是許多作者仍然用來作為拉伸試驗的數學表達式。在這些經驗公式中,假設的現象和真實的現象不够符合的原因是在於:在很多情況下金屬有一個屈服點,這個作為一個金屬的最大特點被忽略了,而只認為應力-應變曲綫中的彈性與塑性區域是連續的。

真實現象和 Ludwik 的冪函數公式不够符合的情形可用圖 1 來表示。在圖中的直綫是按 Ludwik 的關係式畫出的,點是代表 A. Krupkowski 及 W. Truszkowski<sup>[3,4]</sup> 的實驗結果。只有在 Ludwik 直綫和實際應力-應變曲綫相切的附近才看到較好的符合。

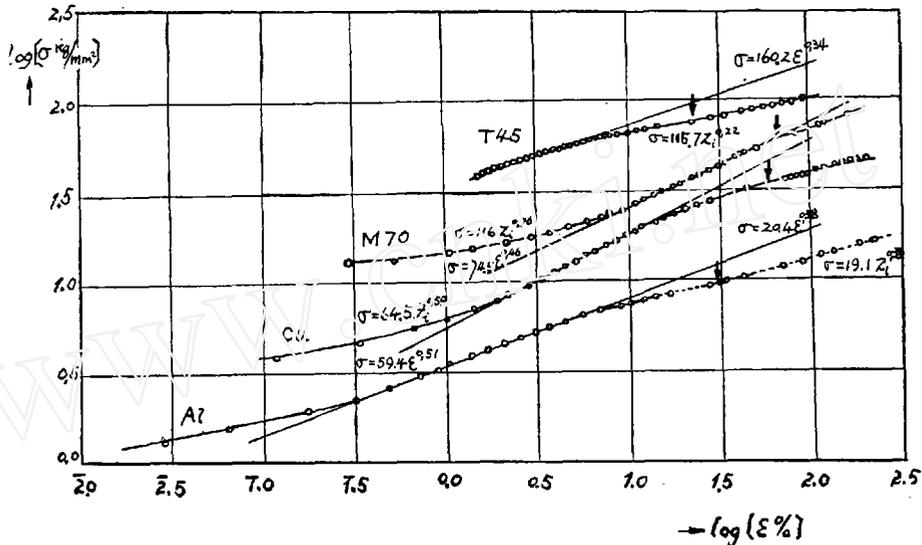


圖 1. 鋁 (Al), 銅 (Cu),  $\alpha$  黃銅 (M70) 和含碳 0.42% 的碳鋼 (T45) 的應力-應變圖  
直綫根據 Ludwik; 曲綫是根據 Krupkowski 作出的; 垂直箭頭表示均勻伸長極限;  
實驗點是由 A. Krupkowski 和 W. Truszkowski 作出的<sup>[2,3]</sup>

為了找出與實際符合得更好的冪函數公式, French 及 Hibbard<sup>[5]</sup> 建議把整個變形範圍分為兩段,在各段中的係數  $\alpha$  及  $\beta$  是不相同的。

綜合了幾個研究工作者的實驗結果,最近 E. Voce<sup>[2,6]</sup> 提出一個指數函數,它和實驗數據符合得較好,一部分原因是,由於他把變形的範圍劃分為各具不同的常值係數為特徵的兩個階段。他的方程式的形式是:

$$\sigma = \sigma_{\infty} - (\sigma_{\infty} - \sigma_1) \exp\left(-\frac{\eta}{\eta_c}\right), \quad (2)$$

式中的  $\sigma_1$  是金屬的屈服點,  $\sigma_{\infty}$  是達到很大變形時應力的極限值,  $\eta$  是按方程式  $\eta = \ln \frac{A_0}{A}$  的對數應變,  $\eta_c$  是確定曲綫形狀的一個應變常數。

在 1945 年 A. Krupkowski<sup>[7]</sup> 指出塑性金屬的拉伸試驗在均勻伸長的範圍內可用下列公式表示:

$$\sigma = KZ_i^m, \quad (3)$$

式中的  $Z_i$  是理論冷加工量,是從應力-應變曲綫外推到  $\sigma = 0$  時計算所得的數值。  $K$  與  $m$  為常數。這個公式已被許多黑色及有色金屬拉伸試驗的結果所證實<sup>[3,4,7,10,11,12]</sup>。

## 二. 金屬拉伸試驗中的應力-理論冷加工量關係

從拉伸實驗的外像來看, 塑性變形可分為兩類, 第一類包括了大多數的金屬與合金, 它們的應力-應變關係可用連續曲綫來表示。另一類金屬的表現可就不不同了, 當到達所謂上屈服點的時候, 應力稍微下降, 而伸長就在近於這個應力下繼續進行, 因此在應力-應變曲綫上出現一個相當於恆應力階段的“平台”。退火的碳鋼就是這樣變形的。

A. Krupkowski 的試驗指出, 屈服點幾乎為零的退火金屬發生變形時, 它們的變形過程用下列公式表示是比較更合適些:

$$\sigma = KZ^m,$$

式中的  $\sigma$  是真應力,  $Z$  是按試件斷面收縮比例所計算出來的冷加工量,  $K$  與  $m$  是常數。

為了確定屈服點不為零的第一類金屬的應力-應變關係, 我們假設屈服點  $\sigma_1$  是與一定程度的理論冷加工量  $Z_1$  的存在有聯繫的。  $Z_1$  是以  $\sigma = 0$  為原點處測量起的。  $Z_1$  的數值可由  $\sigma-Z$  曲綫外推到  $\sigma = 0$  處求得。 因此理論冷加工量  $Z_i$  是從一個新原點量起的, 而  $Z_1$  則是相當於屈服點處的理論冷加工量 (見圖 2)。 在這樣的坐標系統中, 應力-應變關係可用下列函數來表示:

$$\sigma = KZ_i^m, \quad (4)$$

式中的  $K$  及  $m$  表示金屬特性的係數。 只要知道  $Z_1$  值, 理論冷加工量  $Z_i$  就可計算出來,  $Z_1$  對某給定的金屬是個常數。

如果我們有一個退火金屬受到應變, 它的變形是決定於實際的冷加工程度  $Z$ :

$$Z = 1 - \frac{A}{A_0}, \quad (5)$$

式中  $A_0$  及  $A$  分別表示變形前後的斷面面積。 這個實際的冷加工程度也可以從伸長的情形來計算求得, 因為假設金屬的體積不因變形而有所改變, 則:

$$A_0 l_0 = Al, \quad (6)$$

式中的  $l_0$  及  $l$  表示試件在變形前後的長度。

如果現在我們有一個退火過的金屬, 其斷面面積為  $A_0$ , 其屈服點  $\sigma_1$  有一定程度的初始冷加工量  $Z_i = Z_1$ ; 而當在  $Z_i = 0$  及  $\sigma = 0$  時, 它的斷面面積是  $A_i$ 。 於是

$$Z_1 = 1 - \frac{A_0}{A_i}. \quad (7)$$

理論冷加工量可以按照圖 2 計算出來:

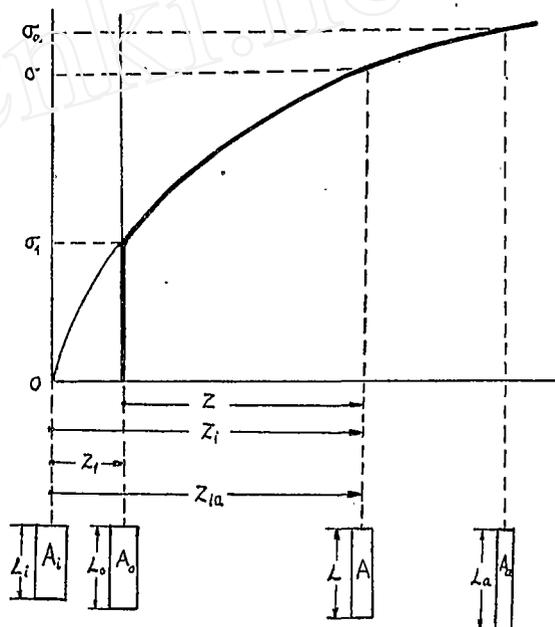


圖 2. 塑性金屬應力-冷加工量圖

$$Z_i = 1 - \frac{A}{A_i} \tag{8}$$

比較公式(5),(7)及(8)三個關係式,經過換算後即得出

$$Z_i = Z_1 + (1 - Z_1)Z \tag{9}$$

應該注意,  $Z_1$  對於具有一定程度變形的一個金屬,是個常數,它和屈服點有關. 對於一個屈服點等於零的金屬,係數  $Z_1$  也等於零. 從式(3)及(9),可以得出:

$$\sigma = K[Z_1 + (1 - Z_1)Z]^m \tag{10}$$

實驗會證明,用上述的方程式來描述在整個均勻伸長範圍內的應變過程是合適的,也就是說這個範圍是從  $Z = 0$  到  $Z = Z_a$ ,  $Z_a$  為相當於變形達到極限時所受到的冷加工量.

當  $Z = 0$  時,按公式(10)得:

$$\sigma_1 = KZ_1^m \tag{11}$$

這裏的  $\sigma_1$  是屈服應力.

在  $Z = Z_a$  時,

$$\sigma_a = KZ_{ia}^m \tag{12}$$

及當  $Z = 1$  時,

$$\sigma_{max} = K \tag{13}$$

上面的討論對於第二類金屬來說也是適用的. 只是要注意,這時的初始冷加工量可以是零甚至可以是負的.

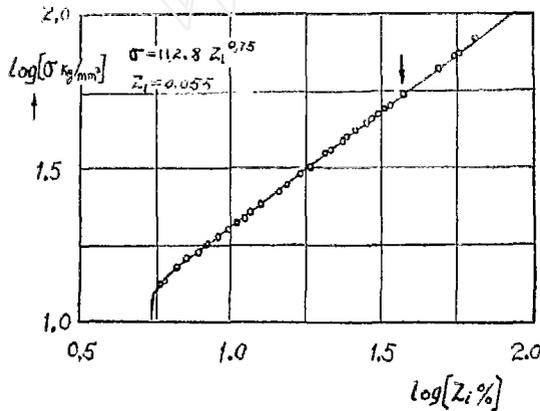


圖 3. 退火黃銅應力-理論冷加工量圖<sup>[3]</sup>

這個推導出來的公式與實驗數據的符合,已經被一些黑色和有色金屬的許多試驗所證實了<sup>[3]</sup>. 這些金屬或是退過火的或是經過冷加工的. 下面給出二條應力-冷加工曲綫作為例子,它們是把均勻金屬加以應變而得到的: 一是含有 70% 銅的黃銅,另一是含有 0.42% 碳的鋼(見圖 3 及圖 4). 在圖中的垂直箭頭表示均勻伸長在那裏到了極限.

此外,關係式(3)還有一個優點: 係數  $K$ ,  $Z_1$  及  $m$  都有一個確切的物理意義. 係

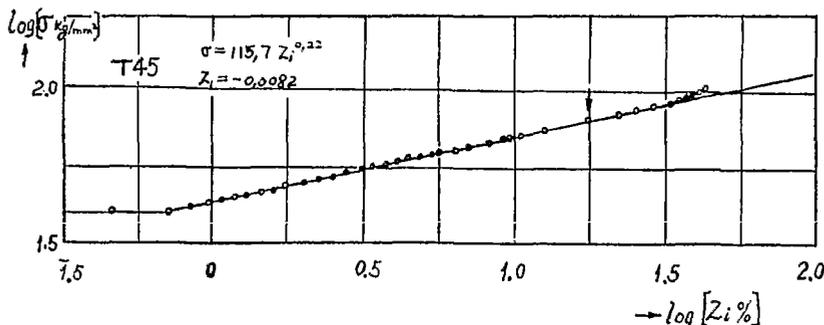


圖 4. 退火碳鋼(0.42% C) 應力-理論冷加工量圖<sup>[4]</sup>

數  $K$  的物理意義可以容易看出, 就是當  $Z = 1$  時,  $K = \sigma_{\max}$ . 因此係數  $K$  是代表了相應於由變形所產生的最大冷加工量時的最大真應力值, 這裏只假設了在均勻伸長極限以前和以後, 材料的變形都按照同一個方程式進行. 顯然的, 實際上這樣完全的均勻變形是不可能達到的, 這只是一個依靠外推來達到的一個極限. 同樣地, 係數  $m$  是決定金屬的某一種性質. 在均勻伸長範圍內, 一個金屬受到拉伸時, 下列不等式是成立的 (Sachs<sup>[9]</sup>):

$$\frac{d\sigma}{dZ} \geq \frac{\sigma}{1-Z} \quad (14)$$

在均勻伸長的極限處,  $Z = Z_a$ , 則可得

$$\frac{d\sigma}{dZ} = \frac{\sigma}{1-Z}. \quad (15)$$

將函數式(3)進行微分後, 可以找出金屬屈服點近於零時的一個關係式:

$$m = \frac{Z_a}{1-Z_a}, \quad (16)$$

容易得到

$$Z_a = \frac{a}{1+a}, \quad (17)$$

式中的  $a$  是從一個拉斷了的試件上直接測得的均勻伸長係數,

$$a = \frac{A_0}{A_a} - 1, \quad (18)$$

這裏的  $A_a$  是試件在均勻伸長區域內的斷面面積; 所謂均勻伸長區域是指既沒有頸縮又沒有夾頭部分的影響的區域. 從(16)及(17)式中, 可知

$$m = a. \quad (19)$$

因此可見, 對於一個屈服點近於零的均勻金屬, 係數  $m$  是等於均勻伸長係數.

對於一個實際的金屬來說, 屈服點並不等於零, 所以必須加以修正. 這裏我們不採用(16)式, 而是寫成

$$m = \frac{Z_{ia}}{1-Z_{ia}}, \quad (20)$$

式中的  $Z_{ia}$  是相當於達到均勻伸長極限時的理論冷加工程度. 於是

$$Z_{ia} = \frac{m}{1+m}. \quad (21)$$

若按照式(9), 假定:

$$Z_{ia} = Z_1 + (1-Z_1)Z_{(a)}, \quad (22)$$

式中的  $Z_{(a)}$  是相應於均勻伸長極限( $a$ )時的實際冷加工程度, 極限( $a$ )是從拉伸試驗數據計算出來的. 將(21)及(22)式進行比較後, 可得出

$$Z_{(a)} = \frac{m}{1+m} - Z_1, \quad (23)$$

再按公式(17), 可得

$$(a) = \frac{Z_{(a)}}{1-Z_{(a)}}. \quad (24)$$

從(23)及(24)式中,可得

$$(a) = m - Z_1(1 + m). \tag{25}$$

這個公式(25)使我們能夠計算出均勻伸長係數(a),只要知道係數m及Z<sub>1</sub>值。

已往的實驗曾指出,在非均勻金屬的拉伸試驗中,可以觀察到在將發生頸縮前的階段,偏離直線關係的部分可用下式表示:

$$\log \sigma = f(\log Z_i). \tag{26}$$

可是,在所有的情況下,在金屬變形開始時,描述變形的函數總是成直線型的,這標誌着金屬變形在開始時候的趨勢,所以在此基礎上依照以上所導出的公式計算出來的係數(a)值,就是表示:如果在整個均勻伸長過程內都是按照初始趨勢時,試件在均勻變形過程中所將達到的形變值,在這情形下,變形曲線在頸縮即將形成的區域內也不應有偏離直線的部分出現。

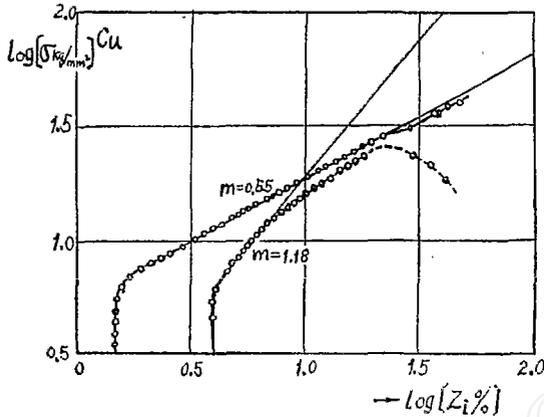


圖 5. 應力-理論冷加工量圖。電解銅 (m=0.55) 和鑄結銅 (m=1.18), 實驗資料得自[10]和[11]

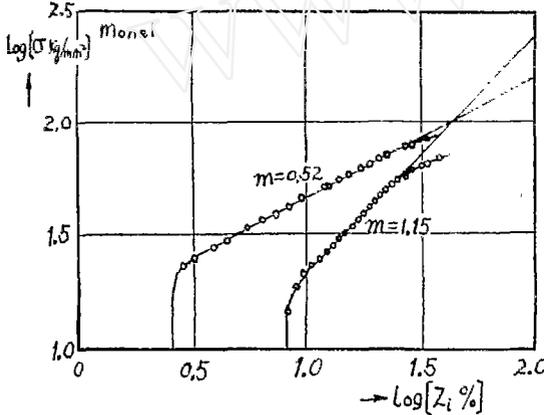


圖 6. 應力-理論冷加工量圖。兩塊具有不同晶粒大小的蒙奈合金。實驗資料得自[12]

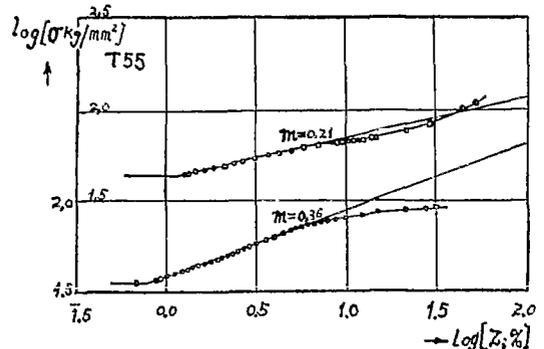


圖 7. 應力-理論冷加工量圖。兩塊具有不同晶粒大小的碳鋼(0.55% C)。實驗資料得自[12]

為了計算係數(a),必須考慮塑性變形的初始趨勢,這種趨勢可以利用幕函數關係式的直線型式來描述。把這樣計算所得的係數(a)值和直接測得的均勻伸長係數a值進行比較時,就等於我們在比較變形的初始趨勢和所能被觀察到的實際均勻伸長極限。

不均勻性對應力-冷加工曲線的影響曾在三種金屬中進行了系統的考察:銅、蒙奈合金及0.55%碳鋼<sup>[12]</sup>,這種選擇是使一個純金屬、一個固溶體及一個兩相合金都能進行實驗。圖5,6及7中所列的是具有最大不均勻值的試件的實驗結果圖。

實驗的結果告訴我們,金屬愈是均勻,直線關係的區域也愈大,係數(a)和a之間的差額也愈小,同時也觀察到係數m及a是最小。當金屬是完全均勻時,可以觀察到在均勻伸長的整個區域內,應力-應變圖可以用一個直線來描述。在這樣情況下,

$$(a) = a = a_0. \tag{27}$$

像這樣的均勻程度,在以前的文章中<sup>[4]</sup>,曾在二種鋼內得到過;它們的變形圖在均勻伸長的整個區域中是成直線形的,同時它們的係數值( $a$ )及  $a_0$  是相等的(它們的差額是在實驗誤差限度之內),這兩鋼是:18—8 奧氏體不銹鋼(圖 8),它的係數( $a$ ) = 0.687 及  $a_0$  = 0.670, 及含 0.10% 碳的軟鋼(圖 9),它的係數是( $a$ ) = 0.255 及  $a_0$  = 0.260.

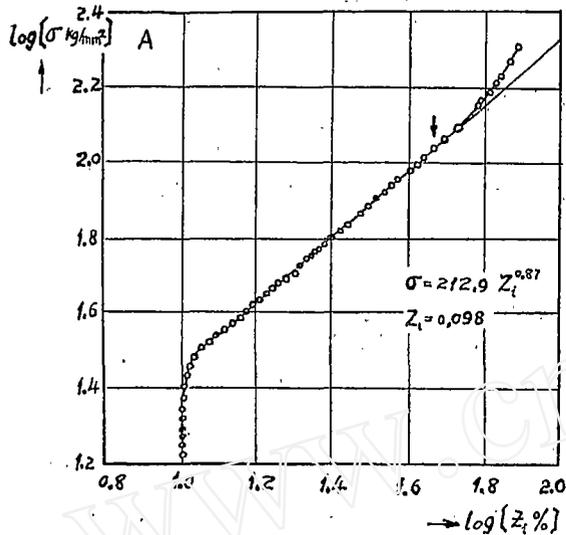


圖 8. 18/8 奧氏體鋼應力-理論冷加工量圖<sup>[4]</sup>

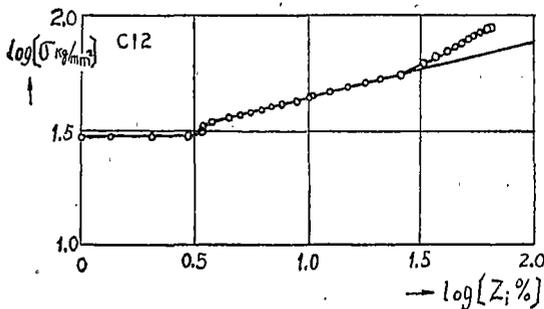


圖 9. 軟鋼(0.10% C)應力-理論冷加工量圖<sup>[4]</sup>

我們用  $s$  來作為金屬不均勻度的度量

$$s = \frac{(a) - a_0}{a_0} \quad (28)$$

從三種實驗過的金屬的圖中(見圖 10),可以見到關係式  $a = f_1(s)$  及  $a = f_2(s)$  都可用直線描述。因此在檢查所有不同均勻度的金屬試件時,利用外推法就可找出完全均勻金屬的均勻伸長度  $a_0$ 。

### 三. 結 論

1. 一個均勻金屬,無論是經過退火的或冷加工的,在受到拉伸時,它的變形過程可以滿意地用本文建議的函數來描述。

2. 在所建議的應力-應變公式中,採用的係數都有一個物理意義。它們決定塑性性

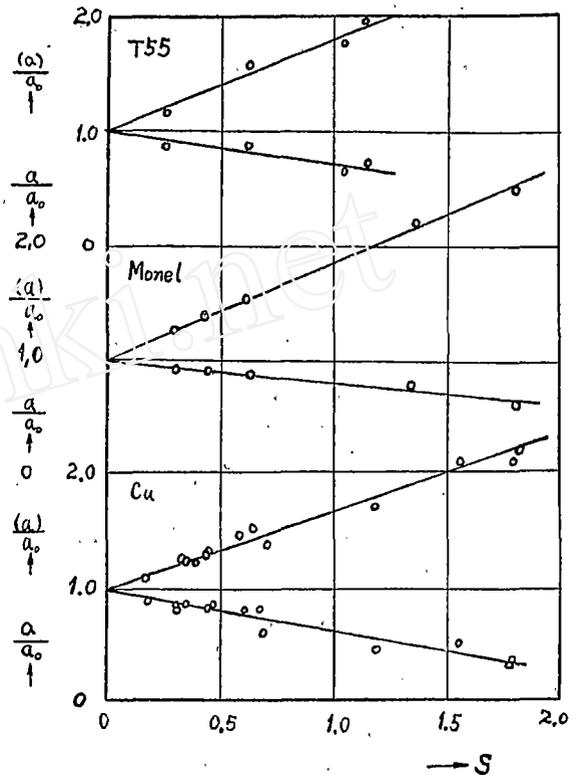


圖 10.  $\frac{(a)}{a_0} - s$  和  $\frac{a}{a_0} - s$  圖。銅,蒙奈合金和碳鋼(0.55% C)。實驗資料得自<sup>[12]</sup>

質、加工硬化性能和在某種程度上表示了金屬的屈服點。

3. 在頸縮形成的範圍內，金屬對不均勻性及表面缺陷是非常敏感的，公式與實際現象的符合與否是和許多次級因素有關。

4. 在頸縮形成之前，上述公式與實驗曲線的分歧可以作為金屬不均勻程度的指標。這種不均勻性是由於晶粒間界的雜質、晶粒過大及在晶粒內部的雜質所引起。

5. 採用所建議的方法，可以計算出被試驗金屬的均勻程度及一個均勻金屬的均勻引伸率。這個係數的決定可供判明一個金屬在拉伸試驗中所得到的係數  $\alpha$ ，究竟可否被認為是這個金屬真實性質的一個指標，還是它已由於不均勻性而發生了變化。

(中國科學院金屬研究所師昌緒譯)

### 參 考 文 獻

- [1] Osgood, W. R., Stress-strain formulas. *J. Aeronaut. Sci.* **13** (1946), 45.
- [2] Voce, E., A practical strain-hardening function. *Metallurgia* **51** (1955), 219.
- [3] Krupkowski, A., Truszkowski, W., Plastyczne odkształcenie metali w próbie rozciągania do granicy równomiernego wydłużenia. Księga Jubileuszowa M. T. Hubera, Gdańsk, 1950.
- [4] Truszkowski, W., Odkształcenie plastyczne stali w próbie rozciągania i twardości. *Archiwum Górnicze* **3** (1955), 345.
- [5] French, R. S., Hibbard, W. R., *Trans. Amer. Inst. Min. Met. Eng.* **188** (1950), 53.
- [6] Voce, E., The relationship between stress and strain for homogeneous deformation. *J. Inst. Metals* **74** (1948), 537.
- [7] Krupkowski, A., The deformation of plastic metals by strain. *Annales Acad. Pol. Sci. Techn.* **7** (1946), 113.
- [8] Truszkowski, W., Stress-strain relationship for tensile tested metals. *Arch. Mech. Stos.* **8** (1956), 581.
- [9] Sachs, G., Mitt. deutsch. Materialprüfungsanstalten. *Sonderheft* **2** (1926), 114.
- [10] Truszkowski, W., Deformation of metal at the neck of a strained test-piece. *Bull. Acad. Pol. Sci. Lettres, Serie A*, **1** (1952), 373.
- [11] Truszkowski, W., Dedo, A., Wpływ niejednorodności na odkształcenie miedzi w próbie rozciągania. *Arch. Hutnictwa* **2** (1957), 205.
- [12] Truszkowski, W., Etude de l'hétérogénéité des métaux soumis à l'essai de traction. *Revue de Metallurgie*, 1958 (in the course of publication).