

氣氛、感應、降浴 熱處理能 本外訓練教材
結晶粒度之測定

編號：PMG-GSM0803

編者：陳繁雄

審稿者：吳裕慶、黃立通

主辦單位：行政院勞工委員會職業訓練局

刊製單位：中華人民職業訓練研究發展中心

印製日期：九十一年十一月

單元 PMG-GSM0803 學習指引

本單元是指引從事氣氛熱處理、感應熱處理及鹽浴熱處理之學員提供有關結晶粒度之量測的四種方法，即 1.比較法，2.面積法，3.直線截距法及 4.圓周截距法。學習本單元之前你最好對鋼鐵之基本組織有相當的認識。如果你認為自己可以的話，請翻到下一頁開始學習。假如你認為自己還不熟習，請將本教材放回原位，並取出編號 PMG-BSF0202 (認識鋼鐵之基本組織) 開始學習。或請教你的老師。

引言

金屬零件均由鑄造 (casting) 或延鍛 (wrought) 加工而成，而延鍛材料係從鑄錠經壓延與鍛造而成，基本上都屬於多晶的材料。鑄造時由於鑄模的種類與鑄件的材質會有不同的凝固組織，再者澆注時如接種劑，細化劑或球化劑之添加亦會影響到其金相組織與結晶粒度。

延鍛加工可分為熱作與冷作，其中可能的製程如壓延、軋軋、鍛造、擠製、抽拉、抽引等等均會造成晶粒的細化與加工硬化。因此晶粒度檢驗常用在金屬製程上的設計與評估的重要參考根據。

再者金屬在熱處理過程中可能因淬火前之加熱(沃斯田體化)或滲碳處理，必須加熱於高溫而造成晶粒成長。而由於較大的沃斯田體晶粒經淬火後的組織其韌性較差，且易造成淬火破裂。因此在淬火前一瞬間的沃斯田體晶粒度，也就是原沃斯田體晶粒 (prior austenite grain size) 的檢驗常為鋼材破斷原因分析的重要工作。再者某種鋼料加熱於某高溫時晶粒成長之特性的檢驗亦常藉由滲碳或脫碳的前沃斯田體檢驗法去了解之。

肥粒體晶粒度的檢驗則係針對強化機制為加工硬化與晶粒細化型的含碳量低於 0.25wt% 之低碳鋼之晶粒度檢驗。

沃斯田體晶粒度與肥粒體晶粒度檢驗的粒度大小公稱均相同，因此本單元僅對粒度檢驗做介紹至於其檢驗前之熱處理或加工過程則不屬本單元討論的範圍。

定義

為使各位能對結晶粒度檢驗有所了解，所以先介紹以下與晶粒相關之觀念：

一、多晶材料凝固過程

- (一) 成核：金屬從高溫時的液態。降溫時，在液體不同位置中形成一些小塊固體，此種現象稱為成核。如圖 1(a)。原子以四方形格子代表。
- (二) 成長：隨溫度之降低，液體中之原子附著於成核處。而成不同方向的堆積的晶粒。如圖 1(b)
- (三) 凝固完成。如圖 1(c)
- (四) 金相顯微鏡中所觀察到的晶界(黑線)。如圖 1(d)

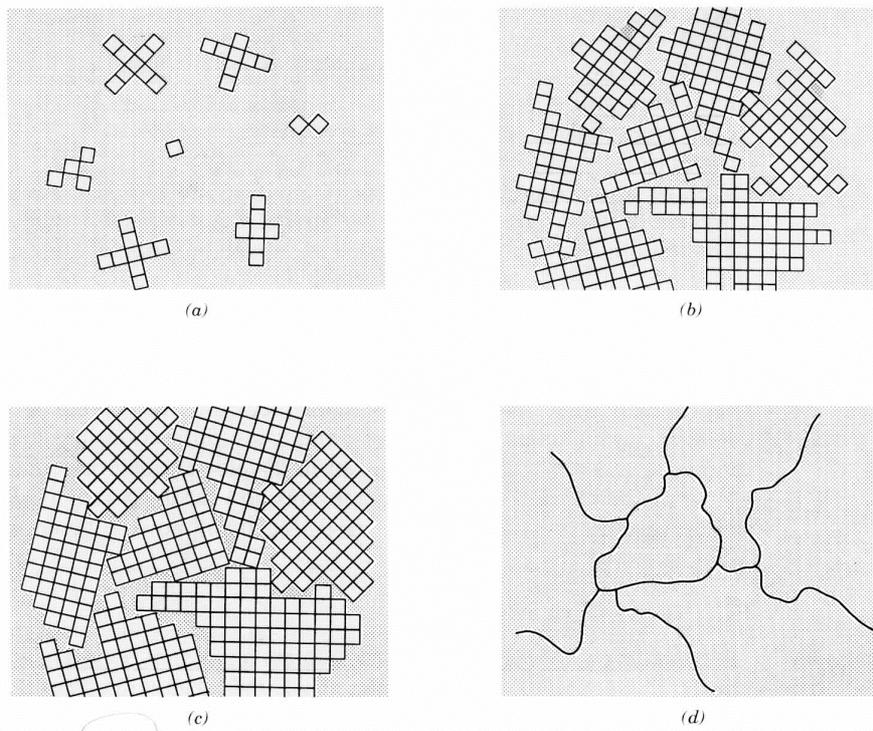


圖 1 多晶材料凝固過程

二、**晶界**：原子堆積方向不同之分界，如圖 2。而圖 3 為金相所實際看到之情形，線條即為晶界。

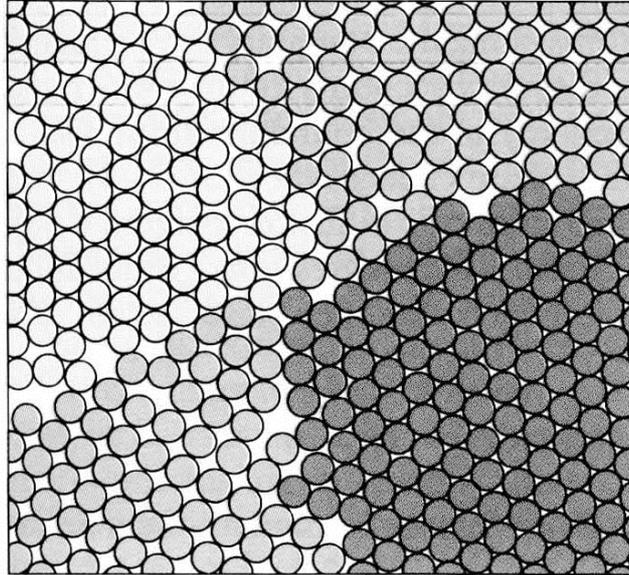


圖 2 晶界，注意原子堆積各有不同方向

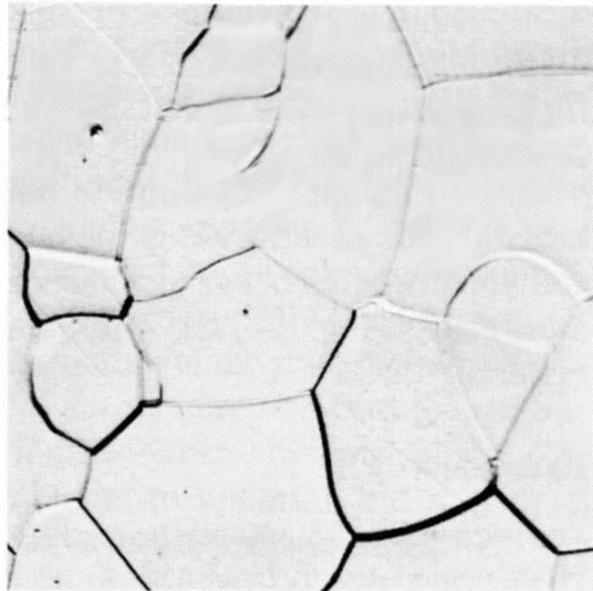


圖 3 晶粒與晶界，純鐵 500X

三、**晶粒**：被晶界包圍之區域

四、**結晶粒度**：表示晶粒的大小。以下介紹兩種結晶粒度之定義：

(一) ASTM 結晶粒度：N

1. N 與 n 之關係為

$$n=2^{N-1}$$

n 是放大 100 倍時，每平方英寸所含晶粒的數目

2. ISO 結晶粒度 G：

選擇適當倍率下，使其在 5000mm^2 圓之面積內至少有 50 個晶粒。圓內之晶粒數 n 計算如下：

$$n=n_1+n_2$$

此處 n_1 = 完全在圓內之晶粒數

n_2 = 被圓所截之晶粒數

求取 m 值 (晶粒數/ mm^2)

$$m=2 \times n(g/100)$$

此處 g = 放大倍率

將 m 值代入下列公式以求得 ISO 之結晶粒度 G

$$G=(\log m/\log 2)-3$$

ASTM 結晶粒度「N」與 ISO 結晶粒度「G」之關係可由下式表示

$$G=N-0.046$$

因為兩者相差很小，所以實際使用上兩者並無不同。

五、**等軸晶粒與延晶晶粒**：晶粒中各方向長度幾乎相等，如圖 4 軋子左側所示之晶粒稱之為等軸晶，而軋子右側之晶粒因為經加工而使晶粒拉長稱之為延晶，亦稱非等軸晶粒。

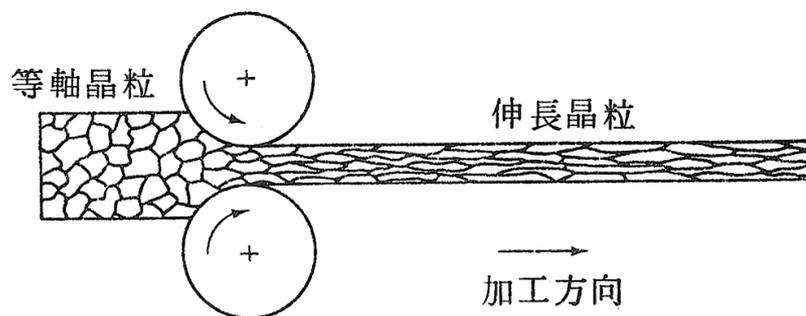


圖 4 冷加工結晶粒變化

學習目標

- 一、 正確使用比較法量測結晶粒度。
- 二、 正確使用截面積法量測結晶粒度。
- 三、 正確使用直線截距法量測結晶粒度。
- 四、 正確使用圓周截距法量測結晶粒度。

假如你認為對以上所列之學習目標的內容已經相當熟習，則請翻到第 31 頁的學後評量直接作答，你當然可以就下一頁的內容開始學習。

學習活動

本單元之學習活動包括相關知識及晶粒尺寸的量測之學習，可藉由下列途徑去學習。晶粒尺寸之決定有許多方法，本單元之學習活動介紹四種較常用及較準確之方法。你可藉由下列途徑去學習。

一、 閱讀本教材

二、 閱讀下列參考書：

(一) 汪建民，1998，材料分析，中華民國，中國材料科學學會，第 110~119 頁。

(二) 周安琪，張士欽，1983，實驗材料科學，中華民國，文京圖書有限公司，第 14~16 頁。

本教材的第一個學習目標是

參考相關之圖形，正確使用比較法量測結晶粒度。

比較法量測結晶粒度

- 一、該法係以圖面比較法求 ASTM 結晶粒度的方法，利用標準圖形與試片相互比較而求取相近之結晶粒度，方法簡便易行，但誤差較大。
- 二、此處之圖形僅供參考，因為本教材經製版後，放大倍率難免產生變化。故實際應用時須另外參考正確的圖面（"Atlas of Microstructures of Industrial Alloys " Vol.7, by American Society for Metals, 1972, p4）
- 三、ASTM 結晶粒度(N)係根據 $n=2^{N-1}$ 之關係所制定者，其中 n 代表放大 100 倍每平方英吋中之晶粒數。因此 N 與 n 之關係可由表一表示之。表一亦列出每一 mm^2 中之晶粒數。

表 1 ASTM 結晶粒度(N)與放大 100 倍每平方英吋中之晶粒數(n)之關係

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
n	1	2	4	8	16	32	64	128	256	512
晶粒數/ mm^2	16	32	64	128	256	512	1024	2048	4096	8192

四、比較法只適用於等軸晶。

標準圖片共 10 張，從 No. 1 ~ No. 10，如試片之晶粒大小超過此範圍，或在 No. 9，No. 10 之晶粒太小，無法清晰判別時可以使用較大倍率觀察再以下式求之：

$$Q=6.64 \times \log(M/M_b)$$

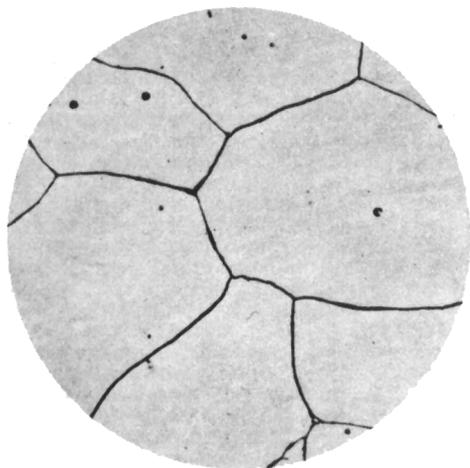
以上 Q 表示修正值， M_b 是標準圖片之放大倍率，M 為觀察時與標準圖片晶粒號數相符時之放大倍率。

如有一試片以 200 倍觀察時，其大小適與標準圖片 100 倍之晶粒號數 No. 8 相似，則由上式：

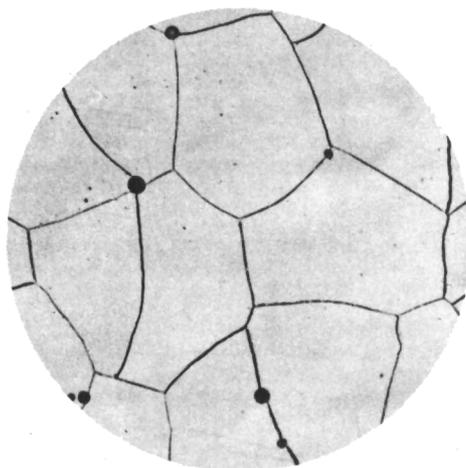
$$Q=6.64 \times \log(200/100) \approx 2$$

因此實際之晶粒號數應為 $8+2=10$

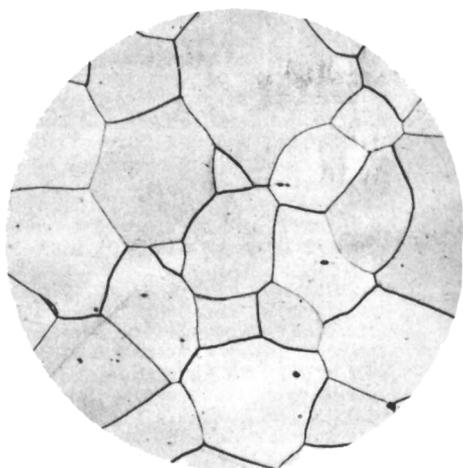
下面各圖為低碳鋼的各種晶粒號數相對應之金相組織，放大倍率為 100X。



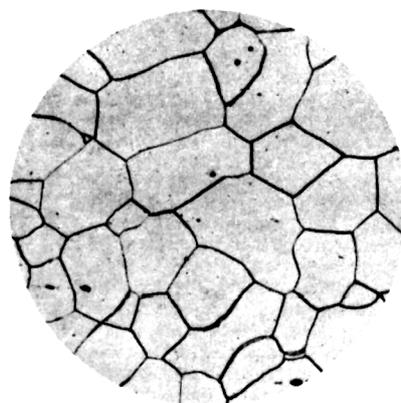
結晶粒度 No. 1



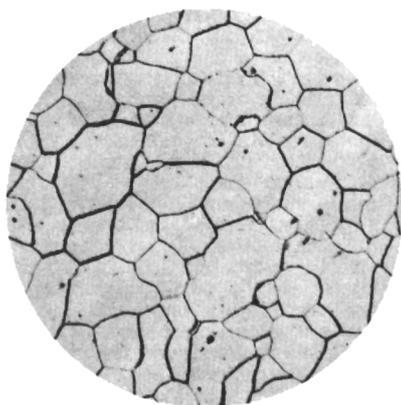
結晶粒度 No. 2



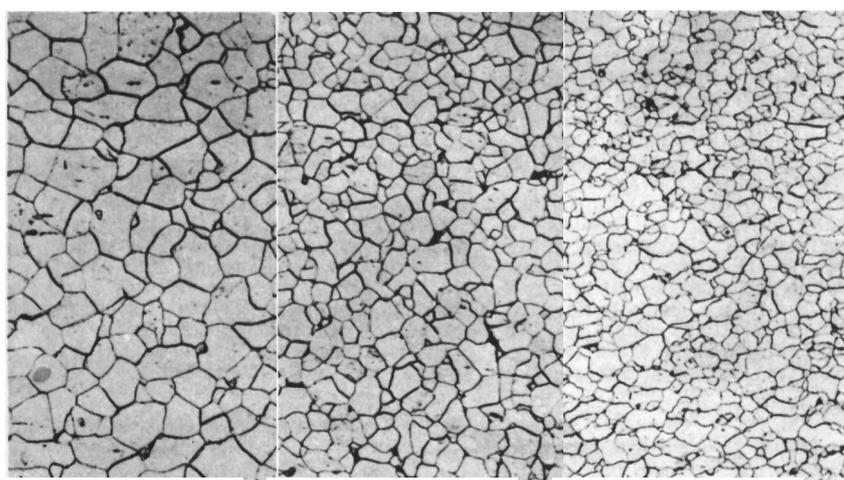
結晶粒度 No. 3



結晶粒度 No. 4



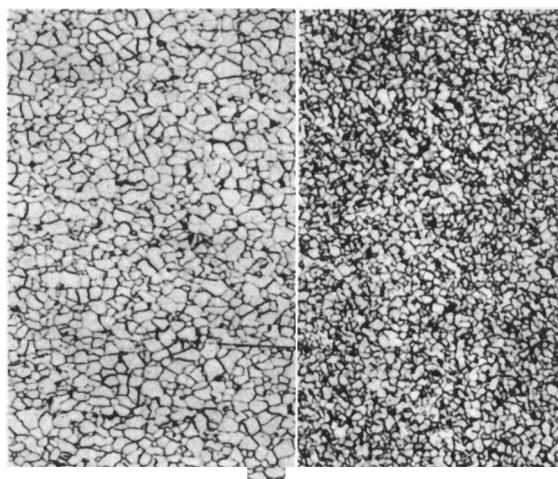
結晶粒度 No. 5



結晶粒度 No. 6

結晶粒度 No. 7

結晶粒度 No. 8



結晶粒度 No. 9

結晶粒度 No. 10

學習評量一

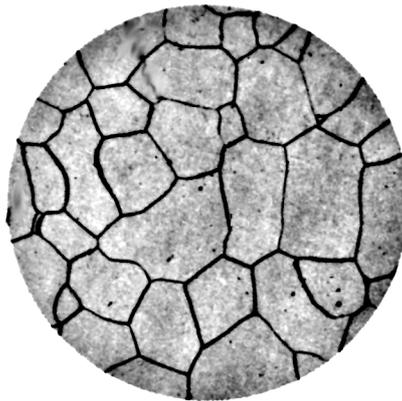
請不要參考資料或書籍，在下列各題前之空格寫出正確的答案：

(一)是非題

- 1. 比較用標準圖形之放大倍率為 200X。
- 2. 比較法簡便易行，但誤差大。
- 3. 比較法所使用的原理為在 100 倍的倍率下，每平方厘米所含晶粒的數目 n ，代入公式 $n=2^{N-1}$ ，即可得結晶粒度 N 。
- 4. 比較法只適用於等軸晶。

(二)應用題 (此題可參考前面之資料)

1. 請使用比較法，對照下列已知結晶粒度之標準圖形，評估本金相組織之結晶粒度 N 。



未知結晶粒度之金相組織

學習評量一答案

(一)是非題

- (×) 1 比較用標準圖形之放大倍率為 100X。
- (○) 2.
- (×) 3. 比較法所使用的原理為在 100 倍的倍率下，每平方英吋所含晶粒的數目 n ，代入公式 $n=2^{N-1}$ ，即可得結晶粒度 N 。
- (○) 4.

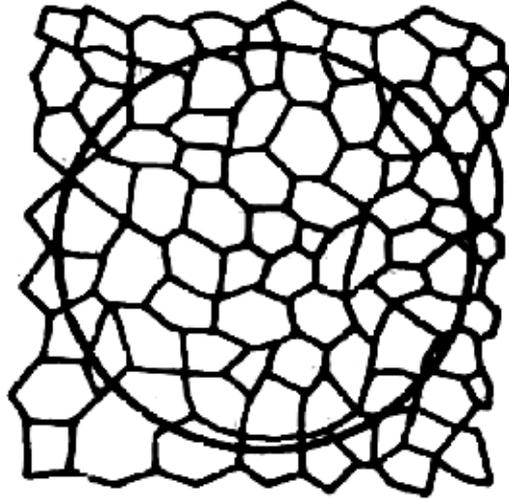
(二)應用題

1. 結晶粒度 No. 4

本教材的第二個學習目標是

參考相關之表格，正確使用截面積法量測結晶粒度。

截面積法量測結晶粒度



圖五.5 截面積法量測晶粒大小示意圖

- 一、在金相照片上任意處加上已知面積的圓，通常用半徑 39.9 厘米(mm)的圓，此時面積剛好是 5000 平方厘米。如圖 5 所示。請注意，取樣方法應隨機取樣。
- 二、選擇適當之倍率，使之在上述 5000 平方厘米的圓內至少有 50 個晶粒。因經驗指出測試圓內有約 50 個晶粒之倍率可得最佳之準確性。
- 三、計算在此面積下之晶粒數目。
- 四、晶粒數目計算方法為圓內晶粒數加上被圓所截晶粒數之半。
- 五、因所選擇之倍率不定(因圓內需至少有 50 個晶粒)，所以計算後之晶粒數目，乘以傑夫瑞乘數 f 之後得 n_a 值，[n_a 值為在放大倍率為 1 之下，每平方厘米之晶粒數 (晶粒數 / mm^2 , 1X)]。

$$n_a = f (n_{\text{圓內}} + n_{\text{被截}} / 2)$$

以上 f ：傑夫瑞乘數(Jeffries' multiplier) (見表 2，請依所放大之倍率選用相對應之 f)。 $n_{\text{圓內}}$ ：圓內晶粒數。 $n_{\text{被截}}$ ：被圓所截晶粒數。

表2 使用 5000mm² 之圓，傑夫瑞乘數 f 與放大倍率 M 之關係

放大倍率 M	傑夫瑞乘數 f
1	0.0002
10	0.02
25	0.125
50	0.5
75	1.125
100	2.0
150	4.5
200	8.0
250	12.5
300	18.0
500	50.0
750	112.5
1000	200.0

- 六、圓內之晶粒數目不要超過 100 個，因為費時不好計算。你可以在計算過之晶粒做記號，以正確得到在測試圓內之晶粒數及被圓所截之晶粒數。
- 七、計算出之 n_a [放大倍率為 1 之下，每平方厘米之晶粒數(晶粒數/mm²，1X)] 對照表三之 n_a 欄找出最接近之結晶粒度 G。

表3 結晶粒度G與所計算晶粒數 n_a 之關係

結晶粒度：G	放大倍率為1之下，每平方厘米之晶粒數（晶粒數 / mm^2 ，1X）， n_a
00	3.88
0	7.75
0.5	10.96
1.0	15.50
1.5	21.92
2.0	31.00
2.5	43.84
3.0	62.00
3.5	87.68
4.0	124.00
4.5	175.36
5.0	248.00
5.5	350.73
6.0	496.00
6.5	701.45
7.0	992.00
7.5	1402.9
8.0	1984.0
8.5	2805.8
9.0	3968.0
9.5	5611.6
10.0	7936.0
10.5	11223.2
11.0	15872.0
11.5	22446.4
12.0	31744.1
12.5	44892.9
13.0	63488.1
13.5	89785.8
14.0	126976.3

學習評量二答案

一、 $n_a = f(n_{\text{圓內}} + n_{\text{被截}}/2)$

因為倍率為 75，查表 2 得傑夫瑞乘數 $f = 1.125$

代入公式 $n_a = f(n_{\text{圓內}} + n_{\text{被截}}/2) = 1.125 \times (45 + 28/2) = 66.4$

查表 3 得最接近之結晶粒度 $G = 3$ 。

二、 $n_a = f(n_{\text{圓內}} + n_{\text{被截}}/2)$

因為倍率為 1000，查表 2 得傑夫瑞乘數 $f = 200$

入公式 $n_a = f(n_{\text{圓內}} + n_{\text{被截}}/2) = 200 \times (43 + 26/2) = 11200$

表 3 得最接近之結晶粒度 $G = 10.5$ 。

你對於截面積法量測結晶粒度已有初步的認知，請繼續學習本單元的第三部分。

本單元的第三個學習目標為

正確使用直線截距法量測結晶粒度。

直線截距法量測結晶粒度

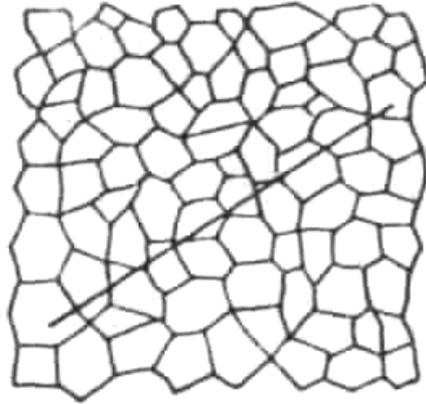


圖 6 直線截距法量測晶粒大小示意圖

因為以截面積法量測結晶粒度需於所劃圓之面積內一顆顆晶粒去計算，比較費時及因為在所劃圓之圓周附近較難計算晶粒數，造成所得出之結晶粒度 G 較不準確，所以發展出另一種較有效率之方法——直線截距法，如圖 6 所示。

直線截距法特別適用於非等軸晶粒。

- 一、**量測方法**：在金相照片上選用適當倍率，劃取一條或多條線段至少與 50 個晶粒相截，所截取之平均長度 L 即表示其晶粒大小。

$$L = L_T / (P \times M)$$

L ：平均相鄰兩截點之長度(晶粒平均之直徑，mm/晶粒)。

L_T ：測試線所劃線段之總長度。

P ：測試線與晶界相交之截點數。

M ：放大倍率。

- (一) 將計算出來之平均相鄰兩截點之長度 L 代入公式，結晶粒度 (G) 可由下式求出

$$G = (-6.643856 \times \log L) - 3.288 \text{-----(公式一)}$$

- (二) 另可將計算出來之平均相鄰兩截點之長度 L ，利用表 4 來找出最接近之結晶粒度 G 。

表4 結晶粒度 G 與晶粒平均之直徑 L (mm/晶粒)之關係

結晶粒度 G	晶粒平均之直徑 L (mm/晶粒)
00	0.4525
0	0.3200
1.0	0.2691
1.5	0.2263
2.0	0.1903
2.5	0.1600
3.0	0.1345
3.5	0.1131
4.0	0.0951
4.1	0.0800
4.5	0.0673
5.0	0.0566
5.5	0.0476
6.0	0.0400
6.5	0.0336
7.0	0.0283
7.5	0.0238
8.0	0.0200
8.5	0.0168
9.0	0.0141
9.5	0.0119
10.0	0.0100
10.5	0.0084
11.0	0.0071
11.5	0.0060
12.0	0.0050
12.5	0.0042
13.0	0.0035
13.5	0.0030
14.0	0.0025

二、計算測試線與晶界相交截點數之規則：

- (一) 由於測試線之端點通常在晶粒內，如所截取之截點數太少則難免降低其精確度。因此應使用較長之測試線或較低之倍率。
- (二) 因為在金相組織上不同的區域有不同的晶粒大小，為得到合理之結果，應於金相照片上任意選擇 3 至 5 處，取其計算的平均值。
- (三) 測試線與晶界相切之點計算為 1 個截點。
- (四) 測試線如與三個晶粒之交點相交，則計算為 1.5 個截點。
- (五) 如果晶粒為非等軸晶，為了消除非等軸晶所造成之偏差，計算之線段應使用 4 個或更多方向。

學習評量三

參考本單元介紹的學習目標(正確使用直線截距法量測結晶粒度)之(公式一)及表 4 請依下列條件求出結晶粒度 G。

- 一、金相照片上之放大倍率為 100X，測試線所劃線段之總長度為 50mm，測試線與晶界相交之截點數為 70，請依(公式一)及表 4 求出結晶粒度 G。

- 二、有一金相組織為非等軸晶粒，測試線長度為 50mm，測試四個方向，測試線與界相交之截點數為 69、68、66、66，金相所用之放大倍率為 50X，請利用(公式一)與表 4 找出結晶粒度 G。

學習評量三答案

一、 $L=L_T/(P \times M)$

$$L=50/(70 \times 100)=0.0071$$

(一) 代入(公式一)， $G=(-6.643856 \times \log L)-3.288=11$

(二) 查表 4 得結晶粒度 $G=11$

二、 $L=1L_T/(P \times M)$

$$L_1=50/(69 \times 50)=0.0145$$

$$L_2=50/(68 \times 50)=0.0147$$

$$L_3=50/(66 \times 50)=0.0152$$

$$L_4=50/(66 \times 50)=0.0152$$

$$L\text{之平均值為}(0.0145+0.0147+0.0152+0.0152)/4=0.0149$$

(一) 代入(公式一)， $G=(-6.643856 \times \log L)-3.288=8.8$

(二) 查表 4 得結晶粒度 $G=9$

你對於直線截距法量測結晶粒度已有初步的認知，請繼續學習本單元的第四部分。

本單元的第四個學習目標為

正確使用圓周截斷法量測結晶粒度。

假如你認為已經具備上述學習目標的認知，請翻至 29 頁作學習評量，如果你認為你需要更多學習的話，請翻至下一頁。

圓周截距法量測結晶粒度

當晶粒的形狀為非等軸晶粒，而是經加工過程而造成晶粒變形。使用線截距法來求得晶粒之平均直徑，雖可改善其誤差值，但仍會造成些許誤差。因此以圓周當做測試線當可獲得更精確的數據，因為圓的使用會平均測試所有方向，對於非等軸晶粒有自動補償之作用。

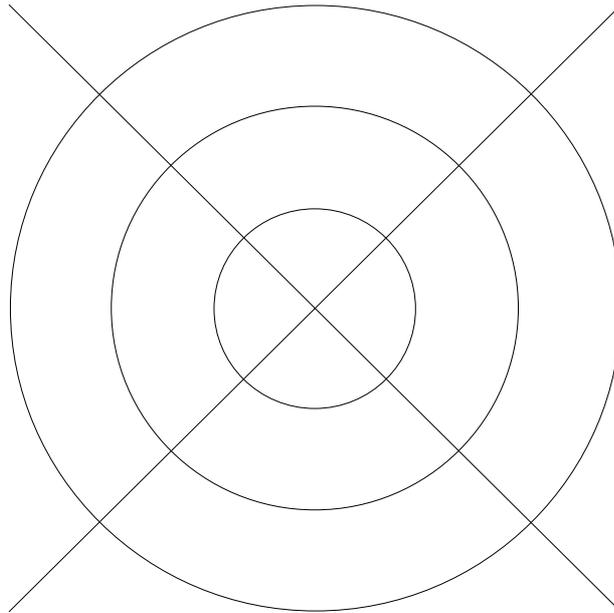


圖 7 圓周截距法之測試圖形。三個圓之圓周長分別為 250mm(直徑 79.58mm)、166.7mm(直徑 53.05mm)、83.3mm(直徑 26.53mm)

- 一、**量測方法：**本方法之測試線為總長 500mm 之三個同心圓(如圖七)。將畫好如圖 7 之同心圓的透明膠片隨意置於金相照片五個位置上，分別計算每一個測試圖上三個同心圓與晶粒之截點。然後計算出平均相鄰兩截點之長度。金相照片選用適當的倍率，使三個同心圓的圓周與晶粒的截點接近 100 個左右。首先粗略估計顯微組織的結晶粒度，然後由圖八查出使 500 mm 測試線能與晶界相交約 100 次所需的放大率，如果相交次數過多或太少，則需進一步調整放大倍率。

$$L=L_r/(P \times M)$$

L：平均相鄰兩截點之長度。

L_r ：所劃線段之總長度(500mm)。

P：測試線與晶界相交之截點數。

M：放大倍率。

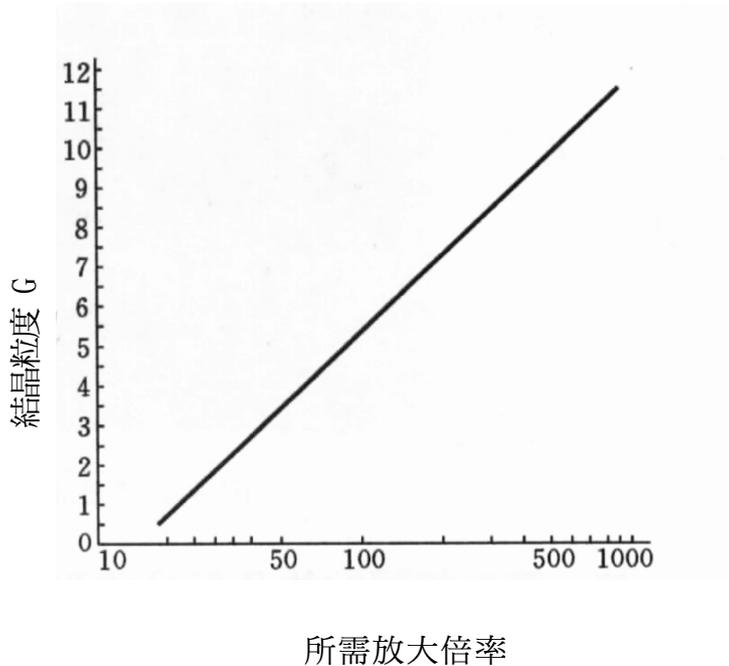


圖 8 用於粗略估計結晶粒度 G 與所需放大倍率 M 之關係圖

有三種方法可求出結晶粒度 G：

- (一) 將計算出來之平均相鄰兩截點之長度 L 代入(公式一) $G = (-6.643856 \times \log L) - 3.288$ ，即可得出結晶粒度 G。
- (二) 另可將計算出來之平均相鄰兩截點之長度 L，利用上節之表 4 來找出結晶粒度 G。
- (三) 計算出平均截點數，對照圖九找出最接近之結晶粒度 G。

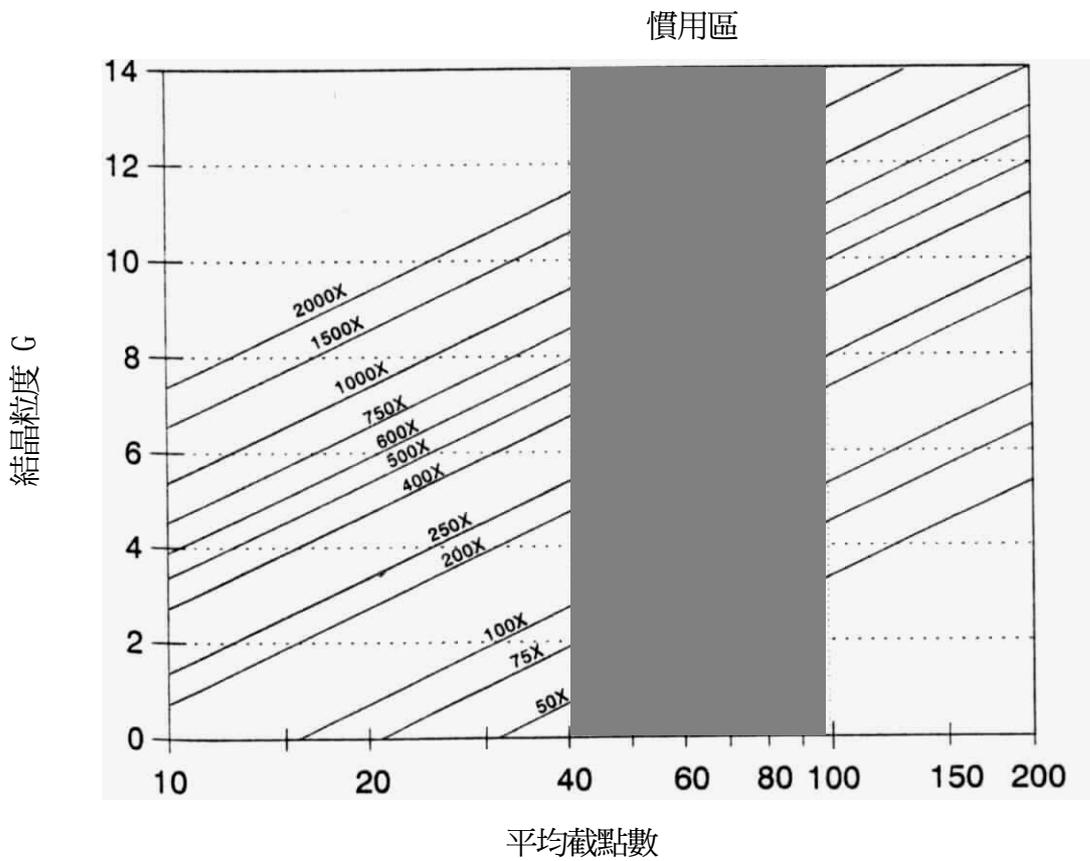


圖 9 平均截點數與結晶粒度 G 之關係圖

二、計算測試線與晶界相交截點數之規則：

- (一) 因為晶粒結構於材料內不同區域會些許不同，所以至少任意選擇 5 個位置來計算截點，以獲得較準確之結果。
- (二) 測試圓如與三個晶粒之交點相交，則計算為 1.5 個截點。

學習評量四

可參考本單元介紹的學習目標（正確使用圓周截距法量測結晶粒度）利用公式一、表 4 及圖 9，依下列條件求出結晶粒度 G 。

- 一、金相照片上之放大倍率為 200X，測試線與晶界相交之截點數為 92、96、99、95、91，請依(公式一)及表四求出結晶粒度 G 。

- 二、測試線與晶界相交之截點數為 104、101、106、109、109，金相所用之放大倍率為 100X，請利用(公式一)與表四找出結晶粒度 G 。

學習評量四答案

一、

$$L=L_T/(P \times M)$$

$$L_1=500/(92 \times 200)=0.027$$

$$L_2=500/(96 \times 200)=0.026$$

$$L_3=500/(99 \times 200)=0.025$$

$$L_4=500/(95 \times 200)=0.026$$

$$L_5=500/(91 \times 200)=0.027$$

L 之平均值為 $(0.027+0.026+0.025+0.026+0.027)/5=0.026$

(一) 代入(公式一), $G=(-6.643856 \times \log L)-3.288=7$

(二) 查表 4 得結晶粒度 $G=7$

(三) $(92+96+99+95+91)/5=94.6$, 查圖 9 得結晶粒度 $G=7$

二、

$$L_1=500/(104 \times 100)=0.048$$

$$L_2=500/(101 \times 100)=0.050$$

$$L_3=500/(106 \times 100)=0.047$$

$$L_4=500/(109 \times 100)=0.046$$

$$L_5=500/(109 \times 100)=0.046$$

L 之平均值為 $(0.048+0.050+0.047+0.046+0.046)/5=0.047$

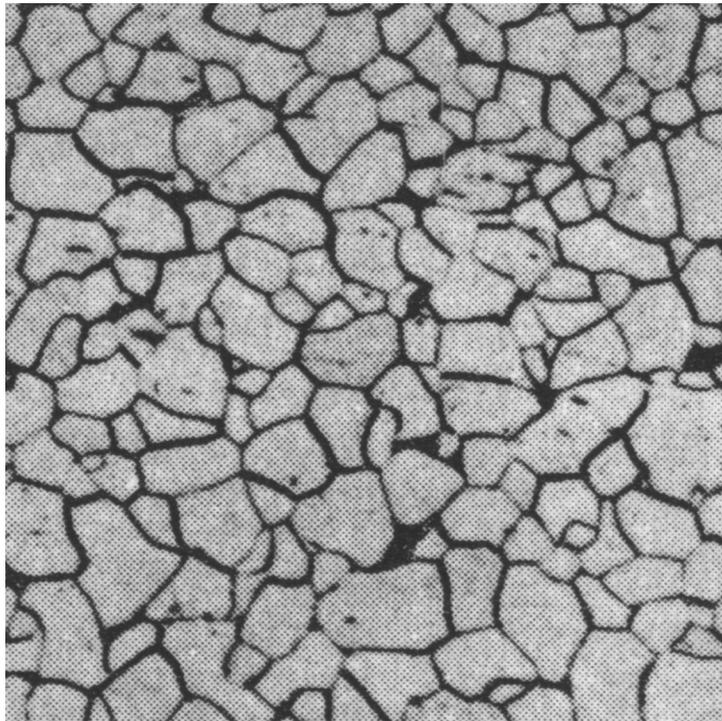
(一) 代入(公式一), $G=(-6.643856 \times \log L)-3.288=5.5$

(二) 查表 4 得結晶粒度 $G=5.5$

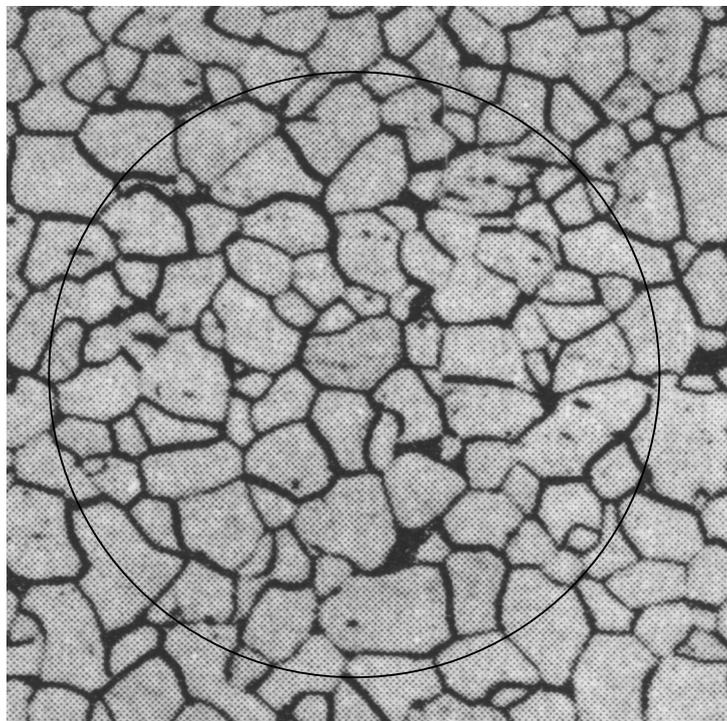
(三) $(104+101+106+109+109)/5=105.8$, 查圖 9 得結晶粒度 $G=5.5$

學後評量

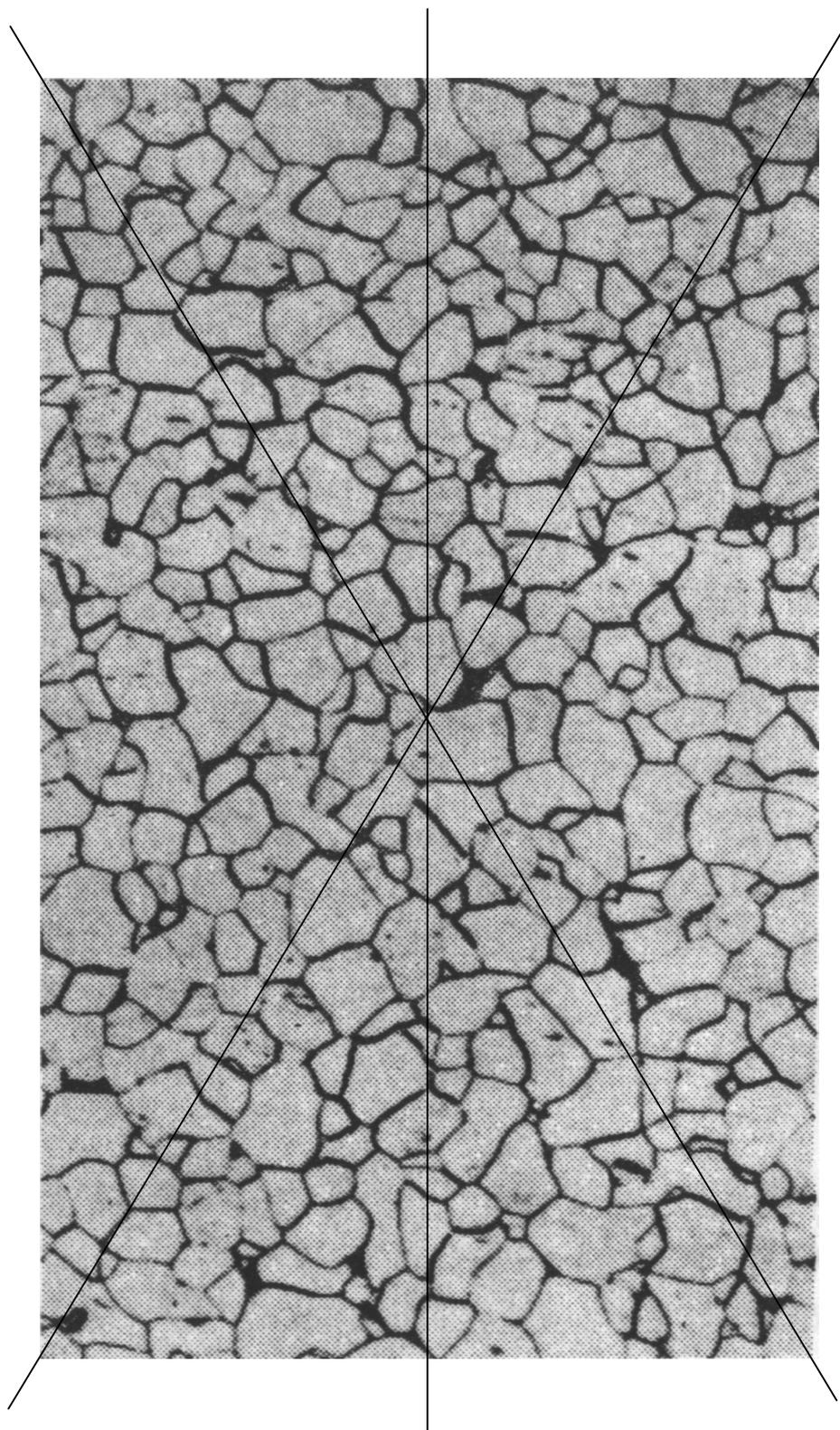
- 一、試述 ASTM 結晶粒度 N 與 ISO 結晶粒度 G 之關係。
- 二、請比較四種結晶粒度判定之優缺點。
- 三、下列四圖(圖一至圖四)為同一試片放大 300 倍之金相組織,請用前面介紹之四種結晶粒度判定方法分別求出金相組織之結晶粒度。



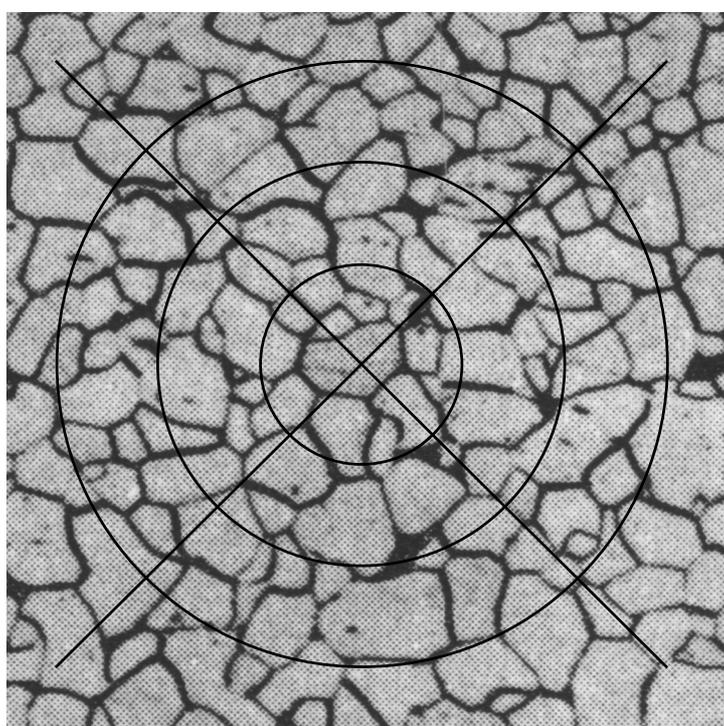
比較法
(圖一)



截面積法
(圖 二)



直線截距法
(圖 三)



圓周截距法
(圖 四)

學後評量

一、教師學科評量

題別	每題分數	答對題數	得分	備註
問答題(一、二,共2題)	10			
問答題(三,共4題)	15			
作答時間	30 分鐘內作答完畢得 20 分 40 分鐘內作答完畢得 10 分 50 分鐘內作答完畢得 0 分			
合計				

二、教師綜合評量

評分項目	單項得分	百分比	單項分數	總分	等級
學科評量		80%			A
學習態度		20%			B
總評	合格 不合格				C D E
備註	D 或 E 級為不合格				

三、評等標準：

- A=100~90 分
- B= 89~80 分
- C= 79~70 分
- D= 69~60 分
- E= 未滿 60 分

如你的評分等級為A或B則表示你已相當了解。如你的評分等級為C，則請重新溫習，如你的評分等級為D或E則表示你還沒有進入情況，需要繼續努力。

參考書目

- 一、汪建民，1998，材料分析，中華民國，中國材料科學學會。
- 二、周安琪，1983，張士欽，實驗材料科學，中華民國，文京圖書有限公司。
- 三、陳石法、蔡希杰，1990，機械材料，中華民國，高立圖書有限公司。
- 四、陳繁雄，1999，熱處理原理與實驗，中華民國，大同大學。
- 五、William D. Callister, Jr, 1994., Materials Science and Engineering, 3rd edition, U.S.A., Jonh Wiley & Sons, Inc.
- 六、Lawrence H. Van Vlack, 1989, Elements of Materials Science and Engineering, 6th edition, , U.S.A. Addison-Wesley Publishing Company.
- 七、ASTM, 1997, Annual Book of ASTM Standards, Vol 03.01, E 112, U.S.A.
- 八、ASM, 1972, Metals Handbook, 8th Edition, Vol.7, p4, U.S.A.
- 九、Karl-Erik Thelning, 1984, Steel and its heat treatment, U.K., Butterworths.