

科技用書

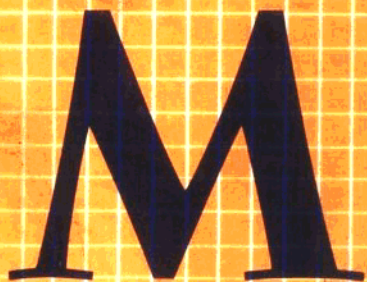
非鐵金屬材料

理論、實務、技術、解析

工 學 博 士

梶山正孝 著

賴 耿 陽 譯 著

A large, bold, black letter 'M' is positioned on the left side of the cover. It is set against a background of a grid of small squares in shades of orange and yellow. The letter is simple and blocky, with a slight shadow effect.

Metals
AND ALLOYS

復漢出版社印行

非鐵金屬材料

理論、實務、技術、解析

工 学 博 士

梶山正孝 著

賴 耿 陽 譯著

復漢出版社印行

中華民國七十一年十月出版

非鐵金屬材料

原著者：相山正孝

譯著者：賴耿陽

出版者：復興出版社

地址：台南市德光街六五一號

郵政劃撥三一五九一號

發行人：沈岳林

印刷者：國發印刷廠

版權所有
翻印必究

平裝 B
精裝
一八〇元
二二〇元

本社業經行政院新聞局核准登記局版台業字第〇四〇二號

序

本書解說非鐵金屬材料的性質、製造法、用途、使用上的問題等。非鐵金屬材料是指鐵鋼材料以外的金屬材料，屬此範疇的材料種類很多，無法以一書的篇幅網羅。所以本書只限於較大量生產、用途範圍較廣的合金材料，討論以銅、鎳、鋁、鎂、鈦、鋅、錫、鉛等為主體的金屬及合金材料。

本書只簡略概述金屬學基礎事項，偏重材料使用上的性質、實際生產的材料的種類、用途等，站在材料使用者的立場，提供必要的資料。

非鐵金屬材料的種類多，以各種金屬為主體，各成合金系，各合金系有獨自的性質、製造法、用途，各合金系也有共通的性質。因各合金系材料各有獨自的特性，各合金的說明內容不易劃一。材料的分類方法也是各合金系列各成體系，軸承用材料更不得不依用途區分。

復漢出版社有一系列的材料叢書，必要時，請讀者自行參閱。

編者

1982年6月

非鐵金屬材料／目次

第Ⅰ章 銅及銅合金	1
1.1 銅	1
1.1.1 銅的物理性質	1
1.1.2 銅的化學性質	2
1.1.3 機械性性質	4
1.1.4 銅的熔解、鑄造	7
1.1.5 市售銅	9
1.2 黃銅	12
1.2.1 黃銅的金屬組織	12
1.2.2 黃銅的性質	14
1.2.3 黃銅的熔解及鑄造	20
1.2.4 市售黃銅系材料	23
1.2.5 黃銅鑄物	28
1.2.6 特殊黃銅	29
1.2.7 加錫黃銅	29
1.2.8 高力黃銅	31
1.2.9 加鉛黃銅	35
1.2.10 洋白（銅鎳）	36
1.2.11 鋁黃銅	39
1.2.12 矽黃銅	41
1.3 錫青銅	41
1.3.1 錫青銅的金屬組織	42
1.3.2 錫青銅的性質	44
1.3.3 實用錫青銅	47
1.3.4 錫青銅的熔解與鑄造	49
1.3.5 鑄青銅	51
1.3.6 鉛青銅	54
1.3.7 鎳青銅	57
1.4 鋁青銅	58
1.4.1 鋁青銅的金屬組織	58
1.4.2 鋁青銅的鑄造性	63
1.4.3 Al 青銅鑄物的機械性性質	65
1.4.4 鋁青銅的耐海水性	71
1.4.5 被削性等	74
1.4.6 鋁青銅鑄物的用途	75
1.4.7 加工用鋁青銅	75
1.5 其他銅合金	81
1.5.1 銅-鎳合金	81
1.5.2 銅-鎳-矽合金	83
1.5.3 鈹銅	85
1.5.4 鉻銅	88

1.5.5 鈦銅.....	91	1.5.7 矽銅.....	93
1.5.6 鉛銅.....	91		

第2章 鎳及其合金 96

2.1 鎳.....	96		
2.1.1 鎳.....	96	2.1.4 鎳的機械性性質...	97
2.1.2 鎳的物理性質.....	96	2.1.5 鎳材料.....	98
2.1.3 鎳的化學性質.....	97		
2.2 鎳-銅合金.....	99		
2.2.1 金屬組織及性質...	99	2.2.2 實用合金.....	100
2.3 鎳-鐵合金.....	103		
2.3.1 鎳-鐵合金的金屬		組織.....	103
2.4 耐蝕性鎳合金.....	115		
2.5 耐高溫氧化性合金.....	118		

第3章 鋁與其合金 121

3.1 鋁.....	121		
3.1.1 鋁的生產與需要...	121	3.1.5 鋁的機械性性質...	125
3.1.2 鋁基金.....	121	3.1.6 鋁表面的陽極氧化	
3.1.3 鋁的物理性質.....	123	法.....	127
3.1.4 鋁的化學性質.....	124		
3.2 鑄物用鋁合金.....	128		
3.2.1 鋁合金鑄物.....	128	3.2.5 鋁-鎂合金.....	142
3.2.2 鋁-銅系合金.....	129	3.2.6 鋁-銅-鎂-鎳系合	
3.2.3 鋁矽合金.....	134	金.....	143
3.2.4 鋁-銅-矽合金...	140	3.2.7 壓鑄用鋁合金.....	145
3.3 展伸用鋁合金.....	147		
3.3.1 展伸用鋁合金.....	147	3.3.5 Al-Cu-Mg 系合	
3.3.2 鋁合金的耐蝕性...	151	金.....	158
3.3.3 耐蝕性鋁合金.....	152	3.3.6 Al-Zn-Mg 系合	
3.3.4 高力鋁合金.....	158	金.....	164

3.3.7 其他.....	168	規格.....	171
---------------	-----	---------	-----

3.3.8 高力鋁合金成品的	
----------------	--

第4章 鎂與其合金 174

4.1 鎂.....	174
4.2 鑄造品用鎂合金.....	175
4.3 鎂合金的熔解與鑄造.....	183
4.4 鎂合金材的防蝕處理.....	185
4.5 展伸用鎂合金.....	185
4.6 陰極防蝕用的鎂陽極.....	189
4.7 原子爐用鎂合金.....	190

第5章 鈦與其合金 192

5.1 鈦概說.....	192
5.2 海棉鈦.....	192
5.3 鈦的熔解、鑄造、加工.....	193
5.4 鈦的性質.....	196
5.5 二元系合金的金屬組織.....	200
5.6 鈦合金的熱處理.....	204
5.7 鈦合金的耐蝕性.....	210
5.8 實用鈦合金.....	211
5.9 鈦與鈦合金的用途.....	218

第6章 鋅與其合金.....220

6.1 鋅.....	220
6.2 鋅合金.....	222
6.3 鋅合金的粒間腐蝕.....	223
6.4 鋅合金與時效現象.....	223
6.5 鋅合金的機械性性質.....	226
6.6 其他鋅合金.....	228

第7章 錫、鉛與其合金	230
7.1 錫與其合金	230
7.1.1 錫	230
7.1.2 鑄造品用錫合金	232
7.1.3 軟焊材用合金	232
7.1.4 硬錫	233
7.2 鉛與其合金	235
7.2.1 鉛	235
7.2.2 鉛合金	237
第8章 軸承用合金	246
8.1 軸承合金的特性	246
8.2 錫系白合金	248
8.3 鉛系白合金	252
8.4 鋅系、鋅系軸承合金	254
8.5 銅系軸承合金	255
8.6 鋁合金	256
8.7 含油軸承	257
追 補	261

第 1 章 銅及銅合金

1.1 銅

銅在非鐵金屬材料中為最重要者之一，優於其他金屬材料之處是電及熱的傳導度高、耐蝕性優秀、塑性加工容易等，導電性良好為最重要的性質，銅的總需要量一半以上為製成電工業用的線、棒、條、板、管，諸如發輸配電用電器的導體、電纜心線、輸電線、配電線、電車架空線等。

1.1.1 銅的物理性質

銅有面心立方格子的結晶構造，其格子常數為 $3.6075 \text{ \AA}$ (20°C)，表 1.1 為主要的物理性質，這些性質因銅的純度而異，圖 1.1 及圖 1.2 為不純物含量對導電率的影響，所含微量元素為固溶限以下時，對

表 1.1 銅 (99.5% Cu-0.04% O) 的物理性質

性	質	
密度	20°C	8.89 g/cm^3
液相線溫度		1083°C
固相線溫度		1065°C
沸點		2595°C
熱膨脹率	$20 \sim 100^\circ\text{C}$	16.8×10^{-6}
	$20 \sim 300^\circ\text{C}$	17.7×10^{-6}
比熱	20°C	$0.092 \text{ cal/g/}^\circ\text{C}$
融解潛熱		48.9 cal/g
蒸發潛熱		1150 cal/g
熱傳導度	20°C	$0.934 \text{ cal/cm}^2/\text{cm/sec/}^\circ\text{C}$
導電率		約 101% IACS
固有電阻	20°C	$1.71 \mu\Omega\text{-cm}$
電阻的溫度係數	20°C	$0.00397/^\circ\text{C}$
帶磁率	20°C	$-0.080 \times 10^{-6} \text{ cgs 單位/g}$
彈性係數		12000 kgmm^2

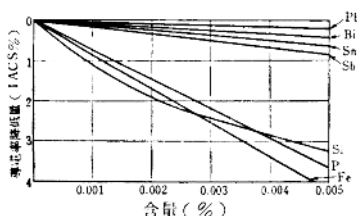


圖 1-1 銅的導電率所受微量不純物含量的影響

物為 Ti, P, Fe, Si, As 等。Al, Sn, Mn, Ni 等含有數 % 時也顯著減低導電率。實用上，常用國際軟銅標準 (IACS) 表示導電率，這是取 1913 年當時良質市售銅的平均值，以此為 100%，與此比較，以百分率表現導電率。現在精煉銅 (tough pitch copper) 製品在退火狀態約 102%。IACS 在 20℃ 有 0.153 28 $\Omega/\text{meter} \cdot \text{gram}$ 的比電阻或 58.0 $\text{m}/\Omega \cdot \text{mm}^2$ (Siemens) 的傳導度。

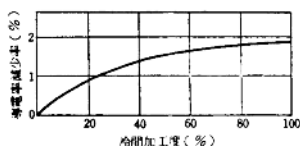


圖 1-3 銅的導電率所受冷間加工的影響

1.1.2 銅的化學性質

最常用的銅基為電解銅，這是將純銅約 99% Cu 的粗銅 (轉爐製銅) 電解精煉，有 99.95% 以上的純度。以反射爐等熔解此電解銅，製造成適當形狀尺寸的鑄塊 (形銅)。熔解之際，使爐氣成氧化性，增加

濃度成直線關係，有 2 種以上的元素存在時，若在固溶限以下，互不干涉，超此以上有時會干涉，例如添加氧，不純物成為氧化物而除去，少許存在反有改善傳導度的效果，但這是有不純物存在的場合，在高純度銅無此種效果。非常有害銅之導電率的不純

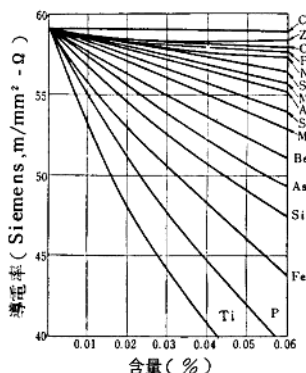


圖 1-2 銅的導電率所受不純物含量的影響

導電率若施行冷間抽線加工，會減少約 2% 以內 (圖 1-3)，導電率也因溫度而變化 (圖 1-4)。

銅為反磁性，不易通磁力線，若含鐵 0.04%，即成順磁性 (常磁性)。

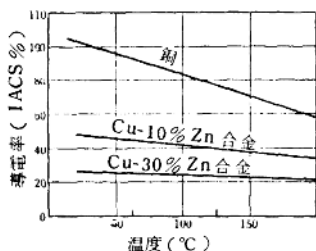


圖 1.4 銅和黃銅的導電率與溫度的關係

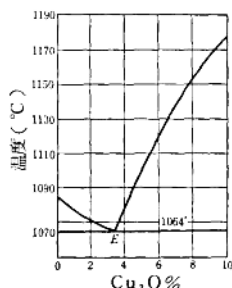


圖 1.5 $\text{Cu}-\text{Cu}_2\text{O}$ 系平衡狀態圖

熔銅中的氧濃度，降低氫含量，其後將松木投入（poling）熔液中，氧含量脫氧到 0.02 ~ 0.04 %，鑄入金屬模中。此熔解時，氧化熔解的目的為脫氫，最近因銅基純度高，氧化除去不純物已不大有意義。

圖 1.5 為銅 - 氧平衡狀態圖，有約 3.4 % Cu_2O 的共晶存在，此共晶組織成網狀存在於銅鑄塊中，如圖 1.6 所示，共晶組織量因氧含量而異。將鑄塊加工時， Cu_2O 相成微粒分散， Cu_2O 相愈多時，塑性加工能愈差。光製表面的光澤劣化。

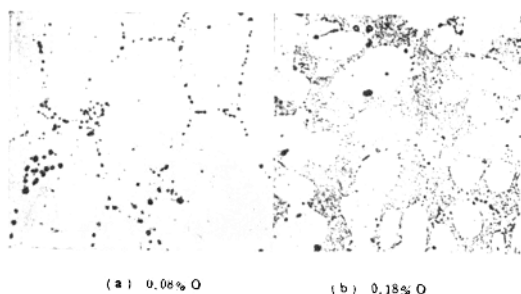
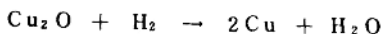


圖 1.6 銅的鑄造組織 ($\times 80$)

含有 Cu_2O 相的銅在還原性含氫氣體中加熱時，氫擴散侵入銅中，將 Cu_2O 還原，發生水蒸氣，



發生的水蒸氣為高壓形成微小氣泡，表面發生凸脹，有害材質的韌性，此氫脆性見於含氧約 0.03 % 的精煉銅製品，在高溫含氫氣體中使用銅時，須用減低氧含量的磷脫氧銅、無氧銅。

銅的腐蝕性：對大氣及水有良好的耐蝕性，因而，在屋內外使用的大量銅線、銅板等毫無塗裝的必要。銅板屋頂等的表面發生美觀灰綠色的綠銹，這是因大氣中 CO_2 、 SO_2 及水分等的作用生成的塩基性碳酸銅 $\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$ 、塩基性硫酸銅 $\text{CuSO}_4 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$ 等為主成分，形成不溶於水的保護層。

銅在水中的腐蝕率很關連氧擴散供給金屬表面的程度。自然水通常易形成保護膜，腐蝕率

非常低，銅廣用於水管、槽、熱交換器等。但軟水中的 CO_2 及氧溶存量增多時，腐蝕率相當高。這是由於生成碳酸，阻止生成保護膜。對低流速的海水有良好的耐蝕性，例如腐蝕率約 0.05 mm/年。

表 1·2 在各種酸溶液中吹入氧或氫時銅的腐蝕率

酸溶液的種類	銅的腐蝕率 (mg/dm ² /日)	
	吹入氧	吹入氫
6% H_2SO_4	920	22
20% H_2SO_4	840	36
96.5% H_2SO_4	250	35
4% HCl	8600	105
20% HCl	13400	75
6% 醋酸	143	8
50% 醋酸	445	19
50% 檸檬酸	170	29

銅的腐蝕速度為陰

極支配型，因而在使陰分極復極的氧化性環境中，耐蝕性劣化。亦即，在非氧化性酸的硫酸、醋酸等的水溶液中，銅有相當良好的耐蝕性，但這些水溶液中若含有氧、第 2 鐵塩等氧化性不純物，則腐蝕率增大。表 1·2 比較在各種酸溶液（常溫）吹入氧、氫時的腐蝕率。在硝酸（氧化性酸）或氧化性塩類的水溶液中，銅被急速侵蝕。對 Na，K 等的硝酸塩、硫酸塩、塩酸塩等中性塩類水溶液，有良好的耐蝕性。

1.1.3 機械性性質

銅在常溫塑性加工時的硬化速度低，有高變形能，常溫加工非常容易。圖 1·7 是各種銅（電氣銅、磷脫氧銅、無氧銅）常溫抽線加工時，抗拉強度、伸度、斷面減縮率與加工度的關係。圖 1·8 以加工 62.5 %

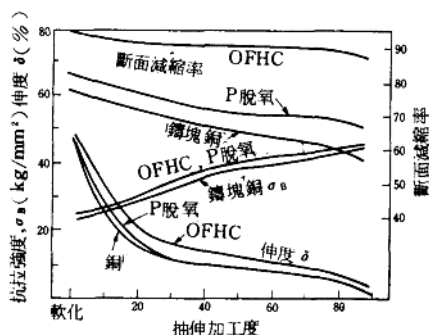


圖 1.7 銅的機械性質所受冷間加工的影響

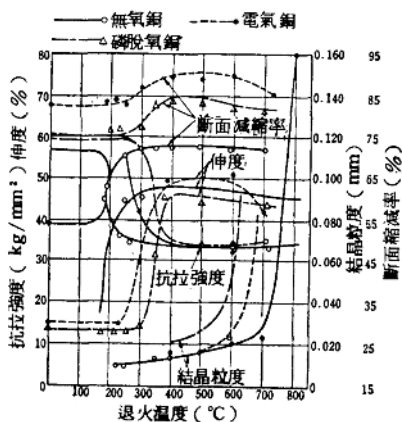


圖 1.8 62.5%冷間抽線的銅線機械性質所受退火溫度的影響(退火時間1hr)(Pratt)

的銅線在各溫度退火 1 hr 為例，表示常溫抽線的銅材退火時對各機械性性質的影響，此圖是退火 1 hr 的場合，圖 1·9 是冷間抽線（93%）的銅線在各溫度退火不同時間時抗拉強度的變化。圖 1·10 顯示常溫加工度愈高時，急速軟化的溫度愈低。

實際退火時，將爐內溫度保持 400 ~ 600 °C，退火時間依爐及爐內裝入量，適當定為 30 min ~ 1 hr 即可。如圖 1·8 所示，退火後的結晶粒度超過 600 °C 時驟增，機械性性質劣化，須加注意。強力冷間加工後退火的話，顯著形成集合組織，將銅板壓拉加工時，其影響很大。

A. 高溫的機械性性質

圖 1·11 是電氣銅線在高溫的抗拉強度、伸度、斷面減縮率，愈高溫時，強度漸減。韌性降低到約 500 °C，更高溫時再增大。因而，宜在 750 ~ 850 °C 高溫加工。銅中不純物對加工性的影響是熱間加工比冷間加工顯著。在銅精煉中，與錫同樣最難除去元素鉛有 0.02 %、鉍 0.002 % 時，已有熱間脆性。砷約 0.4 %、銻約 0.5 % 時有不良影

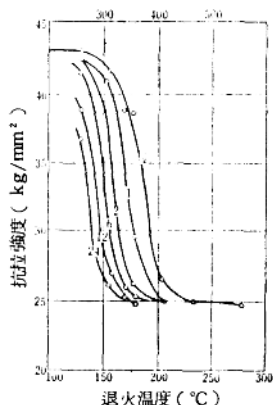


圖 1·9 93 % 冷間抽線的銅線（直徑 0.26 mm）抗拉強度與退火時間、溫度的關係（Alkins, Cartwright）

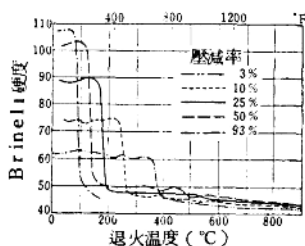


圖 1·10 冷間軋軋銅板的軟化溫度與冷間加工度的關係（退火時間 hr）（Köster）

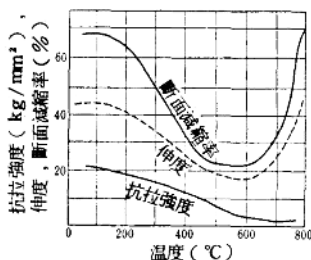


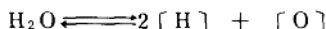
圖 1·11 電氣銅線在高溫的拉力試驗值

響。但是，鉛會因微量的氧，銻因微量的氧，磷、銻、鋇、砷因微量的磷，銻因微量的氧共存在改善熱間脆性。 $Pb-O$ ， $Bi-O$ 時都形成氧化物。脫氧銅的 $Bi-Li$ 因形成 $BiLi_3$ 而不固溶。

B. 被削性 銅的韌性大，在切削加工時的被削性不良，得不到美觀的加工面，但施行某程度的冷間加工而硬化的狀態，或在無害的範圍添加少量錫、鉛，可改善某種程度的被削性，增加氧含量，也可改善被削性。添加碲約0.5%的碲銅也是被削性良好，導電率也約90%。

1.1.4 銅的熔解、鑄造

銅用坩堝爐、Detroit 型電弧爐等熔解，大量鑄造形銅等鑄塊時，古來用反射爐，銅的熔解損失非常小，此點不大成問題。但銅熔液易吸收溶解氧及氫，因水蒸氣而形成氣泡孔，有時因氫、二氧化硫、一氧化碳等而發生氣泡。先討論水蒸氣的發生。對爐內氣氛的水蒸氣，熔液中的氧及氫的平衡關係如下示。



$$K = \frac{[H]^2 [O]}{P_{H_2O}}$$

熔液中的氧濃度反比於氫濃度的平方，氧濃度增加時，平衡氫濃度減少，對熔液中的脫氣有重要意義，圖1.12(a)為各溫度的平衡，圖(b)為各水蒸氣分壓的平衡關係。實際熔液的兩元素濃度在此平衡曲線的左下方時，溫度下降時，平衡曲線接近原點，在某溫度以下時，達平衡值以上的濃度，發生水蒸氣。

為抑制或調整水蒸氣發生量，在實際的熔解作業中，先稍增高爐氣的氧分壓，增加熔液中的 $[O]$ 濃度，降低平衡氫濃度，溶存的氫以 H_2O 形態放出熔液外。鑄入前，在熔液添加適當脫氧劑，減少熔液中的 $[O]$ ，鑄入時，可抑制水蒸氣所致的氣泡等。此氧化-還原熔解為最容易的實際作業。例如鑄造電氣銅鑄塊（形銅）時，以反射爐熔解電解銅時，對燃燒器供給過剩空氣，使爐內成氧化性，先形成氫含量低的熔銅，其次將松木插入熔液中，適當脫氧，此即poling。此時，常適

當脫氧，使熔液中的 $[O]$ 濃度成 $0.02 \sim 0.03\%$ ，此時，形銅表面凝固後，保持水平狀態。若超此以上脫氧，水蒸氣發生量減少，發生管狀收縮孔而下陷，所以觀察凝固的狀況，可判定某種程度的氧含量。近來基銅純度高，以往利用氧化溶解氧化除去有害不純物漸失意義，倒是以獲得適於加工的鑄塊為主目標。但鑄造純銅鑄物時，須盡量避免水蒸氣發生氣泡孔。在還原性爐氣中熔解，減低氧濃度，其次以磷預備脫氧，再以鈰(Ce)等徹底脫氧。若脫氧不完全，殘留的氧及氫在溶液的凝固過程中，在殘留融液中漸濃縮，在凝固末期，在最後凝固的位置生成水蒸氣氣泡孔。此時，若脫氧劑過剩，濃縮的氧被脫氣除去，最終可避免水蒸氣發生氣泡孔。為防止氫造成氣泡孔，有必要脫氫處理。

電氣銅在反射爐熔解之際，用松木為脫氧劑。坩堝熔解或製造銅鑄物時，利用磷-銅(約 $15\%P$)。但殘留的磷對導電率非常有害，要求導電性時，用磷-銅為預備脫氧劑，最後用金屬鋰或硼化鈣細脫氧，它們即使殘留若干，對導電率也無不良影響。鑄入銅鑄物時，例如只以磷脫氧時，磷量通常宜添加 0.015% ，以坩堝爐熔解而不易調節爐氣時，先使電解銅紅熱，趕出被電解銅吸藏的氫，此時生成的氧化皮熔解時，成為氧源而有利，有時在熔液中添加少量氧化銅而脫氫即可。

製造純銅鑄物時，除了須得氧及氫含量少的熔液外，應注意的是愈良質的熔液，吸收水蒸氣的傾向愈強，所以鑄模須用乾燥型。又因凝固

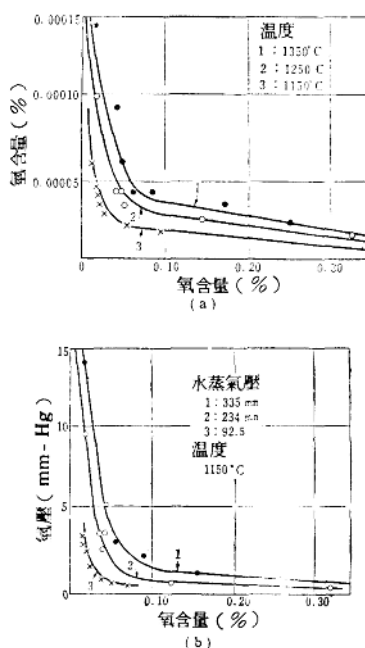


圖 1-12 熔銅中各溫度及各水蒸氣壓的氫及氧的平衡關係 (Allen)

溫度範圍極小，熱傳導度良好，所以，收縮下陷防止用冒頭須夠大，最好用冒頭保溫劑、冒頭用絕熱套筒。

1.1.5 市售銅

市售的銅常為得自電解槽的電氣銅（陰極銅），也可訂製形銅。

表 1.3 為電氣銅的規格。

表 1.3 電氣銅規則（JIS G 2121-1961）化學成分（單位%）

Cu	As	Sb	Bi	Pb	S	Fe
99.96 以上	0.003 以下	0.005 以下	0.001 以下	0.005 以下	0.010 以下	0.01 以下

備考 Ag 當成 Cu

電氣銅線用形銅規定於日本工業規格的 JIS H 2122-1961，表 1.4 示其概要，電氣用形銅有 JIS H 2123-1962 的規格，要求 99.90 % Cu 以上。

表 1.4 形銅規格（JIS H 2122-1961）

Cu%	導電率	種類
99.90 以上	100% 以上	60 番，90 番，100 番，110 番 125 番，135 番，180 番，190 番

市售的銅材料另有下示種種。

A. 靱煉銅（electrolytic tough pitch copper）主從電解銅熔製，標準組成爲 99.92 % Cu，0.03 % O。鑄成形銅等鑄塊時，發生氣體與凝固收縮恰好平衡，鑄塊上表面平坦（level set），加工成板、線、棒形，廣供電氣工業用，20℃的熱傳導度及比電阻的標準值分別爲 0.934 cal/cm²/cm/℃/sec，1.71 μΩ-cm（退火狀態）（相當於 101 %），表 1.5 爲銅板的機械性性質例。

B. 磷脫氧銅 熔解時，以磷充分脫氧，鑄造成殘留磷量約 0.02 % P 者再加工，即得磷脫氧銅，氧含量極低，曝露在高溫還原性氣體中也不呈脆性。也可用爲板，不過，通常，製造成管，用於氣體管