

中國科學院冶金陶瓷研究所專刊

乙 種 第 2 號

銅 鉛 軸 承 合 金

吳自良 鄧基永 著

中國科學院冶金陶瓷研究所編輯

中國科學院出版

1953

中國科學院冶金陶瓷研究所專刊

乙種 第2號

銅鉛軸承合金

吳自良 鄧基永 著

中國科學院冶金陶瓷研究所編輯

中國科學院出版

1953

中國科學院冶金陶瓷研究所專刊

乙種 第2號

銅鉛軸承合金

編輯者 中國科學院冶金陶瓷研究所
出版者 中國科學院
印刷者 上海藝文書局鑄字印刷廠
總經售 中國圖書發行公司

書號：53040(2)02
(滬)0001—3,300
字數：13,000

1953年8月初版
定價每冊2,200元

內 容 提 要

全篇約一萬字，附圖八幀。內容分五節：第一節討論在實際應用的場合中，軸承與轉軸面間的滑潤情況，界限滑潤的理論，軸承合金與滑潤油所起的作用。第二節分析軸承合金應具有的特性：減摩性、強度、抗蝕性等與製造方法和金相組織的關係。第三節總結工業上常用的錫基、鉛基、鋅基、鎳基、鋁基、銀基、銅基和無油軸承等八類軸承合金的機械性能和應用範圍。第四節討論銅鉛軸承合金的特性，理想的金相組織，和製造上存在的困難。第五節報導一種鉛呈網狀分佈的含鉛35%的銅鉛軸承的試製經過。篇末附有參考文獻目錄。

目 次

第一節 界限滑潤	1
第二節 軸承合金的特性	3
第三節 軸承合金	4
第四節 銅鉛軸承合金	6
第五節 銅鉛合金軸承的試製	9

銅 鉛 軸 承 合 金

中國科學院冶金陶瓷研究所

第一節 界 限 滑 潤

當軸在軸承中轉動時，若滑潤情況完善，軸的外表披着一層厚的油膜，軸與軸承間的摩擦面便不直接接觸，所以也不會有磨損，軸好像是浮在油膜中轉動一樣。此時所產生的摩擦阻力，只隨油的黏度而變，而與軸承材料的物理性能無關。這一種滑潤情況，稱之謂完全滑潤。若將油加壓注入轉速快而荷重小的軸上，軸面似乎可以黏着一層油膜，但軸與軸承仍有磨損；足見摩擦面上金屬的直接接觸，是無法避免的。所謂完全滑潤，只不過是一種理想情況而已。

實際上軸或軸承的表面，不論加工如何精細，仍不可能平滑；若將表面任何一小塊放大，便能見到上面有許多的峯（凸出部）與谷（凹入部）。這許多峯與谷間的距離，平均小於 10^{-6} 厘米^[1]。若軸的荷重大而轉速慢（或由靜止狀態開始轉動時），油膜往往被排開成為極薄的一層，這一層薄膜，甚至可呈單分子層存在着，因此有許多峯可以插出油膜之外；這時軸與軸承的表面，便有許多高出的峯直接接觸。谷中油膜的極化分子鏈的一端，與金屬表面的氧化膜作用而成皂（或者是參在滑潤油中的皂），因此被吸引在金屬表面。分子鏈的橫向相互應，使它們有順序地平行排列着，如圖 1 所示^[2]。這一種滑潤情況，稱之為界限滑潤。在界限滑潤狀態之下，摩擦面上的金屬是直接接觸的，所以摩擦阻力與金屬磨損，與軸承材料的物理性能有直接的關係。軸承合金便是用來適應界限滑潤的條件的。

在界限滑潤時，軸的荷重，一部份由金屬的峯坦負。因為峯的面積小，部份荷重所產生應力，足夠壓塌金屬峯使其面積增加到為百分率）。谷中二面油膜中的極化分子鏈接近的一端，都帶有相同的電荷，所以

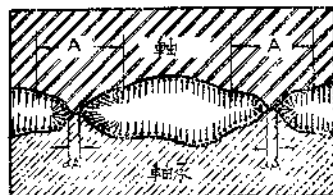


圖 1. 界限滑潤時金屬面之接觸
(D. Tabor)

產生對斥力，對消了一部份的軸荷重。但力的大小，與分子尾端的距離成反比。所以若谷的深度小，或油的分子鏈長，都可以使尾端的距離減少而增強對斥力。同時，若油膜所產生的對斥力大，則加在金屬峯上的負擔就小，峯被壓塌不多， α 就小，因此就減少了金屬摩擦。

現在我們假定在圖 1 中，只有 A 面積內的油分子，因尾端較為接近，能產生相當的對斥力，當軸承滑動時，所產生的摩擦阻力 F 應包括下列二部份：

(1) 金屬摩擦阻力：因為峯與峯間，存有相當大的壓力，使二摩擦面上金屬分子間的互相吸引力很大，有如鐸接。金屬面上的這種相互吸引力，雖可因氧化物或附着氣體分子之存在而減弱，但仍舊是很強烈的。為要使軸能滑動，便必需將峯的膠接面 αl 剪斷，所須的剪力為 αAS 。通常軸的材料往往比軸承材料硬，所以 S 便是軸承材料的抗剪強度。剪力 αAS 就是金屬摩擦阻力。

(2) 油膜的流動阻力：油膜的阻力就是要使面積為 $A(1-\alpha)$ 的油流動時所需的剪力 $A(1-\alpha)S_l$ ， S_l 是油的剪阻力。

所以軸的摩擦阻力為

$$F = A[\alpha S + (1-\alpha)S_l]$$

上式中 $S \gg S_l$ ，當軸荷重增加時， α 增大，所以摩擦阻力 F 也增大。在設計軸承時，我們永遠希望軸的摩擦阻力很小，這有三種辦法，可以達到此目的：第一種方法是改良油的品質。優良滑潤油的特點，是分子鏈長，當有順序地排列在谷中時，二面尾端的距離就接近，對斥力增強，因此對消了絕大部份的軸荷重，其分配給金屬峯的負擔便相對的減少了。此外優良的潤滑油，還需要有高的解吸溫度。極化油分子間的對斥力，與排列是否齊整很有關係。當溫度上昇時，分子的熱振動力部份地戰勝橫向的相互吸引力而使排列零亂，因此對斥力便減小。到一定的溫度，極化分子便從金屬表面解吸，此時的對斥力便消失了。所以我們可以瞭解，要使油的滑潤效率高，軸承的溫度必須低，軸承材料的導熱性就要好。第二種方法是增加軸與軸承的加工細度。表面愈平滑，峯與谷間深度差別愈小，峯與峯的距離愈大，能插穿油膜而形成直接膠接的金屬峯的數量便很少。絕大部份的軸荷重是由油膜的對斥力所承擔。第三種方法是改良軸承材料。能適應界限滑潤情況的軸承材料，必須具有幾種特性，在第二節中，我們將討論這些特性。

第二節 軸承合金的特性

(1) **減摩性**：在界限滑潤的情況下，金屬摩擦是無法避免的。在一般的機械中，我們都不希望磨損轉軸，所以常選用軟的軸承合金。第一節中已經說過：金屬的摩擦阻力，與它的抗剪強度成正比，所以為要減小金屬摩擦阻力，以資減低動力消耗及軸承溫度，合金必須包含有足量的抗剪強度低的金相，軸承合金中的主要元素如錫（抗剪強度 2.04 公斤/平方毫米），鉛（抗剪強度 1.28 公斤/平方毫米），鎢、鋅、鋁（抗剪強度 7.03 公斤/平方毫米）等，都是抗剪強度較低的金屬。此外，合金的範性變形性能也須良好，因為在實際的情況中，當軸開始轉動或停轉時，或當荷重或速度變化時，軸要不可避免地彎曲，軸端常嵌入軸承中，擠出摩擦面上的油，此時合金必須易於變形，以緩衝軸的彎曲。否則軸端的高壓點將受嚴重磨損，並發生高熱，以致損毀軸承，所以減摩性必須包括二種特性，即低的抗剪強度和高的範性變形性能。

(2) **強度**：通常軸承是承受壓力的，所以我們希望軸承合金的抗壓强度高，以免受荷重時被軸擠塌。在應用上，一般的運動機械，都承受往復應力，所以疲勞強度便成了主要的因素，事實上軸承的損毀，也以疲勞斷裂居多數，疲勞裂紋發生在表面，漸漸沿垂向往裏擴張，及到接近與襯背的銲接面，裂紋開始改變方向，而沿銲接面（但不在銲接面上）發展，最後使大塊合金成片剝落^[3]。雖然抗壓強度高的（硬的）金屬或合金，疲勞強度往往高，但在軸承合金中，二者的關係比較複雜，很難確定。

這裏更須指出的，就是軸承合金在高温時的強度，也很重要，因為實際上的軸承溫度，因摩擦關係難免升高，而此類合金的熔點都低，強度會因溫度之上升而劇速下降。應用最廣的巴比脫合金，在室溫中白氏硬度為 20，但到 100°C 時，硬度可以降至 10 以下。在 80°C 以上，此類合金，便不適用，所以合金也須要有高的導熱性，以減低軸承溫度，以保持它的強度並加強油的滑潤效力。

(3) **抗蝕性**：當油中有氧化生成物和其他若干種雜質存在時，金屬可以被油中的炭氫根腐蝕。銅鉛和鎳銀合金很易受油中氧化生成物的化學侵蝕^[4]。但腐蝕往往是有選擇性的，在銅鉛合金中，鉛是被蝕的一相，結果產生很多的坑，這許多坑是應力集中的地方，疲勞裂紋很容易在這許多地方產生。在腐蝕的環境中，裂紋擴張迅速，短期間就可將整個軸承摧毀。事實證明，軸承的損壞，以此原因

為最多。此外，腐蝕坑使表面粗糙，損壞合金的減摩性，所以抗蝕性對軸承來講，是極其重要的。

上面的特性中，減摩性與強度是相抵觸的，為提高減摩性，我們便採用軟的金屬（抗剪強度低），但這類金屬的抗壓及疲勞強度都低，所以減摩性優越的軸承合金，壽命往往很短。為克服這個困難，工業上便應用雙層或三層鐸接的辦法來製造軸承，就是利用一層薄的減摩性優越的合金，鐸接在鋼或青銅的襯背上。合金的厚度，自 0.1 到數毫米不等。實驗的結果，合金層愈薄，軸承的疲勞強度愈大，但合金與襯背的鐸接必須良好，鐸接的強度必須超過合金的抗拉強度。三層鐸接軸承就是在合金（或其他純金屬）上再鍍一層極薄的鉛、錫或銅等軟金屬。用這種方法做出來的軸承，既有優越的減摩性和強度，同時與油接觸的只是一層純金屬，抗蝕性亦甚良好。所以三層鐸接的軸承，除成本昂貴之外，具有最優越的性能，在航空發動機上，應用很廣。雙層鐸接軸承上應用的合金，最理想的金相組織，是含針狀、塊狀或星狀的結晶硬塊，均勻地分佈在軟的鉛、錫、鋅、銅等基塊中。前者能增加強度，後者改善合金的減摩性。在這裏更須指出：軸承合金最主要的任務，是減小軸的摩擦阻力，所以理想金相組織的能否獲得，乃是製造中的主要問題。

第三節 軸 承 合 金

軸承合金可依所包含的主要成份，分為錫基、鉛基、鋅基、鎢基、鋁基、銀基、銅基及無油軸承等八類。我們在每類之中，選擇幾種常用的成份，以及它們的幾種有用的數據，列在表 1 中。

錫基及鉛基合金，歷史攸久，但至今應用仍廣。這二種合金，原為巴比脫所發明，所以也稱為巴比脫合金。鉛基合金在室溫時，性能與錫基的相同，但當軸承溫度稍稍升高，抗蝕性與強度都不如錫基。尤以強度，下降很多，所以應用很受限制，後來加入少量碲（0.1%）^[5a] 或砷（1—2.5%）^[5b] 或銀（2.5—5%）^[6]，高溫強度大為改善。這類新產物，製造簡便，蘇聯也採用，但已非巴比脫所發明的合金了。因錫的價格昂貴，鉛基與鋅基，是用來代替錫基的。鋅基因性能較差，現已在被淘汰之中。銀基合金^[3,7] 是最新的產物，在鋼襯背上電鍍 0.1 毫米的純銀，再在表面鍍一層厚約 0.025 毫米的鉛（或銅）。這種軸承，減摩性和強度都很優越。用純銀的原因，是因為它的熔點高（高溫強度好），硬度低，導熱

表 1 軸 承 台 金

合金種類	工業上開始應用年份	合金元素 (%)	近似熔點 (°C)	熔鑄溫度 (°C)	抗壓強度 (29°C) (公斤/平方毫米)	屈服強度 (20°C) (公斤/平方毫米)	白氏硬度 (20°C)	減摩性	性 度	PV (公斤/平方毫米 × 厘米/秒)	抗 蝕 性	金 相	相 軟 相	主 要 用 途	參 考 文 獻
錫基	1839	Sb 4.5, Cu 4.5	223	441	90	3.1	17	上	下	12.5—15.2	比 Sn-Cu (板形成星形) 差	Sn	Sn	工作電機、汽車、馬達、發電機、磨機、磨力機、各種磨料機及磨料、各種磨料機及磨料、磨料機、水等	[3]
		Sb 8, Cu 8	240	491	124	4.6	27								
		Sb 14, Cu 2, Pb 18	181	366	106	3.5	22.5								
		Sb 15, As 0.75	244	332	90	2.1	15								
鉛基	(1839) 1941	Sb 12.5, Sn 10, As 0.2	244	327			27.5	上	下	14.3±	比 Sn-Cu (板形成星形) 差	Pb	Pb	同上	[3] [6] [8] [5]
		Sb 15, Sn 1, Cu 0.5, As 1	246	350			21								
		Na 0.6, Ca 0.7, Li 0.04	338	550	200		34								
		Sb 15, Sn 5, Ag 5	230				24								
銻基	1920	Al 21, Sn 25, Cu 1	480				40				好	Zn Sn, Cu Sn	Zn		[8]
銅基	1937	Ni 1.2	395		11.5	8.2	33	上	中下	>32.1	差	N: Cd ₇ (針狀) Ag Cd ₃	Cd	飛機及內燃機	[3] [7]
		Ag 0.5, Cu 2	360		14.5	9.5	29								
鋁基	1937	Ni 1.2, Sn 6.5, Cu 2, Mn 0.8	630		21.1	14.0	70								
		Ni 1.5, Sn 6.5, Si 1.5, Cu 1	640		17.6	16.2	50	中	上		好	Ni Al ₃	Al	工作母機及汽車	[3]
銀基	1947	Si 4, Cd 1.2	650		14.0	5.3	40								
		Ag > 93.75 鍍 Pb 或 In	960	電鍍	21.5	4.8	34	下	上		好	Ag	Pb, Sn, In	高速飛機	[3, 7]
無油軸承	1935	Cu, Sn 10, Pb 2-4, C 2	1000	800*	41.5	28.1	30-40								
		Fe, Cu 5-30	1480	1050*	14-56.2		25-45	下	上	17.8	好			紡織機、電機、馬達、輕便機械等	[9]
銅基	1800以前	Fe, C 0.5-2	1450	1120*	14.0-70.0		>50								
		Sn 16	960	1170	45.0	39.4	80	下	上						
		Pb 10, Sn 10	960Δ	1040	17.6	10.5	55	下	上						
		Pb 8, Sn 4, Zn 3	1040Δ	1120	21.4	10.3	52	下	上						
		Pb 20, Sn 4	1010Δ	1105	12.7	7.7	45	下	上						
		Pb 30, Sn 5	970Δ		7.7	5.6	35	中	中上						
銅基	1936 1935 1911		954Δ	1250	6.0	2.1	22-32	中上	中下		差	Cu ₃ P, Sn Cu Cu ₃ Sn, Cu	Pb	重製蒸汽機、內燃機及其他重型機械。	[3] [7] [8] [9] [10]
			954Δ	1250	5.6	1.8	20-30	中上	中下						
							14	中上	中下	>32.1					
			964Δ												

註: * 鑄結溫度 Δ 共析溫度

性良好，可以保持軸承至較低的溫度，所以很適宜於飛機發動機上應用。銅基合金中的鉛青銅合金^[8-10]具有很久的歷史，在載重大而轉速慢的機械上，應用很廣。在八種合金中以無油軸承和銅基中的銅鉛合金，製造較為困難。關於無油軸承，我所以後另有報告。本文僅討論含鉛 35% 的銅鉛合金，因含鉛 30% 以下的合金，文獻中多有報導^[11,12]，且我國已能自製^[13,14]。

在選用軸承合金時，我們希望它的摩擦阻力小，使軸承不易發熱，以便應用速度可以高。所以我們希望合金內的主要金相（連續相或基塊）是抗剪強度低的金屬或它們的固溶體，但這一類金屬，抗壓強度不高，不堪承受大的壓力。在設計時，我們常用許用速度和許用壓力的相乘積 PV 作為參攷： P 指軸承投影面上的壓力， V 指軸表面的線速度，雖然二者的關係複雜^[15]，但 PV 愈大，表示合金的品質愈高。文獻所查到各種合金的 PV 值^[16]，都列在表 I 中。自軸承製造改用雙層或三層銲接法後， PV 值在不斷地提高，但 PV 仍受合金所能忍耐的溫度所限制，因為 PV 愈大，軸承所發生的熱量愈多。目前軸承合金的新發展，是選用導熱性好的金屬，如銀（導熱係數 1.0 卡/平方厘米/厘米/°C/秒）和銅（導熱係數 0.94 卡/平方厘米/厘米/°C/秒）等，藉以發散因摩擦所生之熱量。

第四節 銅鉛軸承合金

在白色金屬中，鉛的減摩性最好，因為它的抗剪強度極低而範性變形性能高，此外鉛還有另一特性，就是很容易被擠成一層薄膜黏附在合金表面。這層鉛薄膜是俾爾貝（Beilby）層（但通俗錯誤的名字是非晶形層），是冷加工後的產物，但鉛在室溫中，仍不易發生應變硬化，所以它的抗剪強度仍很低，我們知道在車製含鉛相當高的銅鉛合金時，車刀磨損極微，這除因球狀分佈的鉛使車屑易於折斷外，車屑的表面，披滿一層薄鉛（所以車屑呈灰白色），後者滑潤車刀。當銅鉛合金受滑動摩擦，鉛也可被擠到表面形成薄層，而這層鉛膜的摩擦阻力特別小^[17]。這個特性，對軸承合金來說是很有價值的。

利用銅鉛合金來做軸承合金，早就為人們所注意到，但在製造上，存有若干困難，所得金相結構不合理想，因此影響它的性能。工業上應用，僅限於鉛青銅，但自 1936 年後由於鑄造技術之進步，這一類合金便在工業上再度出現，這是因為近年來在內燃機製造方面的要求是更大的動力和更高的速度，這一類機器的軸承溫度，往往超過錫基和鉛基合金許用界限之外，工程上便設法利用鉛的減

摩性和銅的高溫強度和導熱性，所以近年來銅鉛合金的發展，極為迅速。

銅鉛合金中最有代表性的二種成份，一種是含鉛 25--30%，以在汽車工業上應用最多；一種是含鉛 35%，多用於高速內燃機中。從表 I 可以看出這兩種合金的減摩性與耐勞性，都並不如何的優越。此外尚有一大缺點，就是不能耐油的腐蝕。糾正這許多缺陷的方法，就是用雙層鍍接法來增加強度，但銅鉛合金與鋼襯背的鍍接，往往比其他合金困難，這在製造上必須首先克服的。抗蝕性和減摩性都可藉金相的控制來改良。第二節中已經說過，減摩性好的合金，要求軟的連續相，如此，當金屬直接摩擦時，方可保證在任何摩擦面上，有充份的軟金屬供應，而且這樣的金相結構對範性變形性能也最有利，可以使合金有足夠的變形能力來緩衝軸的擠壓。但對銅鉛合金來說，因在室溫時銅鉛互相的固溶度極微，且此二種元素無中間化合物，因此要生產一種“硬結晶均勻分佈在軟基塊上”的結構，是無法成功的，唯一可以做到的結構，是細的銅晶粒（硬相）晶界被鉛（軟相）所包圍，如此鉛是網狀分佈的連續相，這樣的金相組織，對減摩性大可改善，同時對於抗蝕性而言，也頗有利。鉛的抗蝕能力原比銅好，但若與銅鍍接後而置於有離子的液體中（油便是這樣的液體），便成電池，因為鉛的電化順序比銅高，成了電池中的陽極，所以鉛便成了被侵蝕的相，在電池式腐蝕中若增大陽極的面積便能減低腐蝕程度。^[18] 鉛在網形分佈時比在球形分佈時暴露在滑潤上的面積大為增加，因之增大抗蝕性。從這裏我們可以瞭解，鉛在這類合金中的形狀和分佈，對於軸承的性能是有決定性的作用的。鉛呈網狀分佈的軸承合金（含鉛 35%），在高速機械上已有出現（見圖 5）。但它的製造方法，我們還沒有在文獻中查到過。

從銅鉛的平衡相圖中，我們可以看出製造鉛呈網狀分佈的結構是有若干困難的，尤其是含鉛 35% 的一種。圖 2 是銅鉛的平衡相圖^[19]， L_1 及 L_2 各為銅多和鉛多的均勻熔液。在銅多的熔液中，鉛的最高溶解度為 36%，超過此含量，銅鉛便成混合液，即使含鉛在 36% 以下，事實上，欲使熔液均勻，溫度往往須高至 1300°C 以上。在 1083°C 銅開始凝結，至 954°C 完全凝固。而鉛須冷至 326°C 方完全凝結，因為這種合金的凝固溫度界域很大，再加銅鉛二種金屬比重之懸殊，所以鉛便偏析出來，聚集在後凝結部份，成球狀鉛塊，孤立於銅基塊中（見圖 6），這種金相結構對於減摩性及抗蝕性都是不利的。若含鉛超過 36%，即使在液態的時候，已不能成均勻溶液，偏析趨向更屬嚴重，製造上的困難更多。為

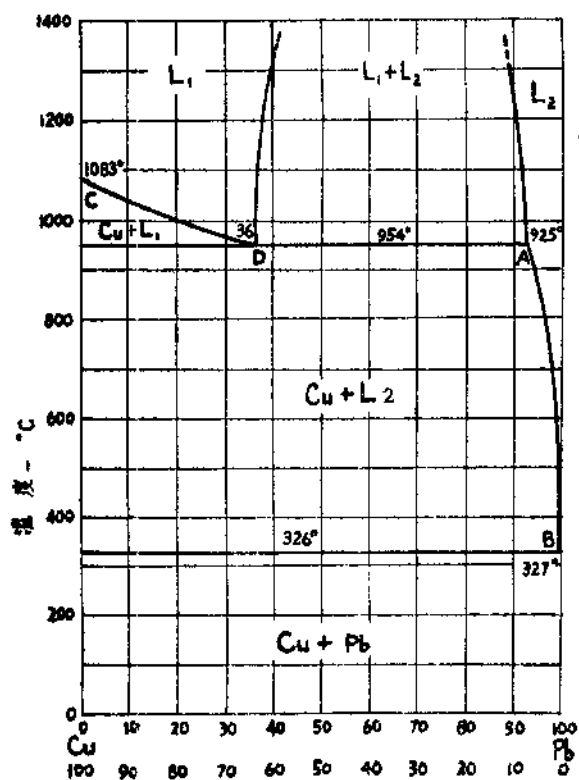


圖 2. 銅鉛平衡相圖 (M. Hansen)

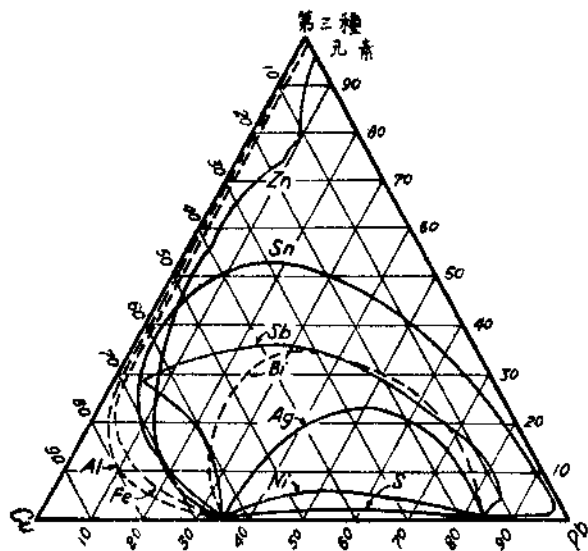


圖 3. 第三種元素對銅鉛混合界域的影響 (W. Claus)

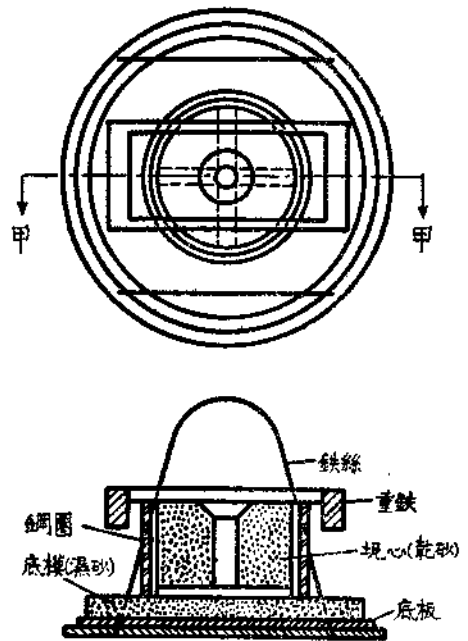
防止鉛的球狀析出，可以採用下列二種方法：第一種方法是增加冷卻速度，使鉛沒有時間成球狀體析出，勢非被細小的銅晶粒擠入晶界而成網狀組織不可；第二種方法是加入若干的合金元素，這幾種元素都必須能增加鉛在銅中的溶解度的。這樣就相當於將 CD 線（見圖 2）向右移，即使含鉛 36% 的合金，部份銅凝固時，所剩液體仍為均勻溶液，使鉛難以析出。圖 3^[20] 表示各種元素對銅中鉛的溶解度的影響。其中只有硫、鎳和銀能增加溶解度。此外，用粉末冶金的方法來製造銅鉛合金，文獻上也曾有報告。表面看去，似乎這種方法能使銅鉛分佈均勻，頗動人聽聞。事實上欲使銅粉藉擴散作用而聚結，所須的燒結溫度（ 800°C ）遠在鉛的熔點以上，此時液態的鉛，藉銅粉中的毛細管作用聚集成球。用粉末冶金製成的銅鉛合金的金相，鉛是半連續狀的（圖 7），我們可以推想它的性能應該界於鉛呈球狀的和呈網狀的二者之間。但其成本的昂貴，遠勝過它的優點。

第五節 銅鉛合金軸承的試製

(1) **鋼圈的清潔處理：**我們選用的軸承襯背，是含碳低的熟鐵管，內外車光後，再車割成圈（內徑 70 毫米外徑 78 毫米高 64 毫米）。為使合金與鋼圈的銲接良好，後者先經清潔處理，以除去表面的油跡。我們先用浸酸處理，發現在車痕中很易生銹，雖用熱水沖洗良久，數日之內，表面即生銹。但經陰極處理後的鋼圈，可以置放數月，表面仍光潔。陰極處理的手續^[21]是先將鋼圈在皂水中洗過，再置入每公升含 NaOH 50 克、 NaCN 50 克、 Na_2CO_3 25 克和 CuCN 25 克之水溶液中，以鋼圈為陰極，銅片為陽極，通入電壓為 5 伏特的直流電（電流密度為 0.4—0.6 安/平方厘米，溶液溫度為 60°C ），經五分鐘後取出，用水沖洗後，置於沸騰的 10% 鹽酸水溶液中煮一分鐘，再經水沖洗後吹乾即可。我們用陰極處理來清潔鋼圈，純粹為我們自己的方便。在工業生產上，若鋼圈不須要擱置很久，用浸酸處理，較為方便。

(2) **合金熔製：**用石墨坩堝在坩堝爐中熔煉，待銅熔化後再加 35% 的鉛，升高溫度使熔液達到 1300°C ，在此溫度中保持半小時至一小時，使熔液均勻化。然後取出坩堝加入 0.05% 的磷以去氧（用 15% 的磷銅），澆鑄溫度約為 1250°C ，澆前需不斷地攪動熔液。在有幾次的試驗中，熔煉時間較短，溫度僅到 1200°C ，澆鑄溫度約為 1100°C ，雖經常攪動熔液，鑄出的合金中，仍有相當數量的塊狀鉛存在。

(3) **澆鑄方法：**我們最成功的一種方法，是用砂模下注法（見圖 4）。用普通鑄鐵的型砂，坩心用乾砂，以免進入淌道中的熔液過份冷卻；底盤用濕砂，使預熱後的鋼圈可以稍稍壓入砂中，以免熔液澆入後經圈底漏出。熔液自坩心中的澆口經四條十字形淌道流到鋼圈。



甲甲切面

圖 4. 砂模和鋼圈

澆鑄的合金層厚約4毫米；倘合金層太薄熔液不易流遍。澆鑄之先，將鋼圈置入熔化的硼砂中（置於另一坩堝內與合金在同一爐中熔化）預熱二、三分鐘，再將鋼圈按置在砂模上，如圖4。先澆入硼砂（約 1200°C ），再澆合金，合金便置換出硼砂而流遍全圈。澆硼砂之先須用重鐵將鋼圈和坩心壓住，以免澆入合金後兩者浮起。為簡化製坩心手續，我們曾試用上注法，但試驗結果，除非將澆鑄的合金層加厚，否則易有硼砂夾雜在合金中。

(4) 冷卻方法：這類合金，因鉛與銅的熔點與比重差別很大，若冷卻速度慢，比重偏析很嚴重，所以須要浸入水中急冷。澆鑄所需的時間要短，完畢後迅速將整個砂模徐徐浸入冷水中，我們試驗十多次，毫無爆炸危險。自取出預熱後的鋼圈起，至砂模水冷時止，全部澆鑄時間，約在一分半鐘之內。若時間大於這個界限，除銅粒粗大加重塊狀鉛的生成外，鉛的比重偏析也很顯明。據我們的經驗，含鉛35%的合金，若澆鑄時間為3-4分鐘，近襯背層之合金含鉛24%，近坩心層含鉛40%。

(5) 檢驗結果：由上述的冷卻方法中，可知合金層的冷卻速度，近鋼襯背的一面較快，銅的晶粒也細；近坩心的一面冷卻較慢，銅的晶粒也粗；但若澆鑄迅速，鉛的偏析並不嚴重。銅的晶粒，呈柱狀垂直於鋼面。我們將此鑄件車削至合金層厚約0.5毫米，再檢查車削面上合金的金相組織。因此類合金很軟（白氏硬度26左右），金相拋光不易，所以用電解拋光法：先將試樣在三個○的砂紙上拋光，再在正磷酸中電解。試樣為陽極，陰極用銅片，直流電壓為2伏，電流密度約為0.007安/平方厘米，時間為半分鐘。金相檢驗的結果，鉛呈連續的網狀分佈，但仍有極少數的塊狀鉛夾雜其中，此因銅晶粒稍嫌粗大所致。鋼襯背與合金的銲接良好，雖將鋼圈鋸開拗平或反拗，合金層面上只呈現均勻的細裂痕，並無剝落現象，雖用尖鑿擊，也不能將合金沿銲接面上擊下。

(6) 加入其他元素的結果：第四節中已經說過，在銅鉛合金中加入硫、鎳、銀可以使平衡相圖中的混合液界域縮小，也就能增加鉛在銅液中的溶解度。從圖3中可以看出，三者之中，以硫的影響最大，銀最微弱。增加了鉛的溶解度，球狀鉛塊便不易析出。我們曾在含鉛35%的銅鉛合金中，各加入了硫1%、鎳1%、銀2%，其他澆鑄和冷卻等方法，一概與不加這三種元素的相同。但檢驗的結果，雖硬度無多大出入（含硫1%的白氏硬度24，含鎳1%的白氏硬度25，含銀2%的白氏硬度25），金相組織和不加元素的比較，加銀的合金，鉛全部呈

連續網狀，分佈在銅晶粒邊界上，不再有球狀鉛塊出現（見圖 8），其餘含硫或鎳或單純的銅鉛合金，都不如含有銀的合金的均勻；含銀的合金，曾反覆試驗數次，只要澆鑄溫度在 1200°C 以上，都能得如圖 8 所示的金相。後來我們在含銀 2% 的合金中，加入 0.2% 的鉛，目的是使銅晶粒細小和去氧。按圖 3 所示，鉛是使鉛在銅中溶解度減小最有效的元素，應該很有利於鉛的球狀化。但因加入量至微（合金中分析到的鉛只有 0.1% 左右）鉛仍呈連續網狀，金相組織與圖 8 相似，但含氣孔很少，比單用磷去氧的要優越。這種試樣的硬度為白氏 27，金相結構很合理。加銀的另一目的，是改善合金的抗蝕性。我們曾將銅鉛合金和加入硫、鎳、銀的四種試樣浸入含硫酸 0.2% 的油中（在 165°C ）一小時和含氫氧化鈉 0.5% 的油中（在 165°C ）十六小時，發現含銀的試樣被蝕最少，不加第三種元素的被蝕最多。

在澆鑄這種軸承時，有幾點是值得我們注意的。第一是合金與鋼襯背銲接問題。我們知道，鐵與鉛既不成化合物，相互溶解度又極小，所以合金的銲接，全仗銅與鐵的互相擴散。為加強擴散速度，澆鑄前鋼圈的溫度一定要高，所以我們將它置在礪砂中預熱（防止氧化鐵過厚）。此外預熱鋼圈的另一目的，是防止鉛的逆偏析：逆偏析的結果，是合金的外表都是鉛層，銅完全在鉛層之內，所以與鋼圈不能銲接；為防止這種疵病的發生，合金液與鋼圈接觸時，後者的表面溫度必須在 954°C 以上。第二是去氧的磷不能加入太多。在坩堝爐中熔製合金時，加入 0.05% 的磷已足夠去氧，若加入量超過 0.1%，則產生脆的磷化物，附着在合金與鋼的銲接層上，使合金在這裏裂開。此外磷會大大的減小合金的導熱性^[12]，這對高速軸承來說是應該竭力避免的。所以若代之以少量的鉛（0.1—0.2%）以去氧，便可免除以上的缺點^[10]。第三，為使銅晶粒細，藉以避免球狀鉛的析出，除澆鑄的時間必須縮短外，浸水前的合金，溫度必須在 1100°C 以上。此外冷卻劑的溫度也很有關係。我們的經驗，以冷水為最好，因為我們曾做下列二種試驗，但都不能得到滿意的結果：一種是將模浸入 80°C 的熱水中。做這個試驗的原因，是在試驗過程中，曾有一度無法獲得低炭熟鐵管，乃改用含炭 0.2% 的鋼管。但經淬入冷水後，鋼圈硬化，無法切削（圖 5 中所示的軸承，襯背是含炭 0.012% 的低炭鐵）。淬在 80°C 水中的結果，銅結晶比淬在冷水中的要粗，且有少數鉛塊夾雜在網狀鉛之中。另一種試驗，是將澆鑄後的模（石墨製）淬入熔鉛（ 450°C ）或熔鉛（ 700°C ）中使銅凝固，再淬入冷水中，因據文獻中報道^[22]，這樣的冷卻

方法，曾應用在含鉛 30% 的軸承合金上而獲得良好的結果；但我們的經驗，除製模較困難外，所得的銅結晶也粗。第四是合金層的厚度問題。前面曾經說過，若合金太薄，澆鑄熔液不易流遍；但若太厚，在水冷時所產生的內應力很大，常使合金層發生裂紋。

附言：本報告中有許多論點，完全是我們主觀的見解，可能是有錯誤的。實驗工作部份，也因人力物力的限制，不能做得徹底。我們只能將已得的初步結果，作一個簡單的報告，希望讀者指教和批評。

考 攷 文 獻

- [1] Bowlen, F. P.: *Proc. Roy. Soc.* A212, p. 439 (1952)
- [2] Tabor, D.: *Ibid.* p. 498.
- [3] A S M Metals Handbook, p. 745 (1948)
- [4] Uhlig, H. H.: *Corrosion Handbook*, p. 559, John Wiley & Sons N. Y. (1948)
- [5a] **Автомобильные Справочник, Машгиз 1950.**
- [5b] Phillips, A. I., Smith, Jr. A. A. and Beck, P. A. *Proc. ASTM* Vol. 41, p. 886 (1941)
- [6] Gillert, H. W. & Dayton, R. W.: *Metals & Alloys*, Vol. 15, p. 584 (1942).
- [7] Sisco, F. T. *Modern Met. for Engineers* Pitman & Sons (1948).
- [8] Corse, W. M.: *Bearing Metals & Bearings*, A. C. S. Monograph Series, No. 53 (1930)
- [9] A. S. T. M. Standard Part II, p. 592 (1949).
- [10] Everhart, J. L. et al. *Nat. Bur. Stand. Cir.* C447 p. 84 (1943).
- [11] Liddiard, P. D. & Forrester, P. G. *Foundry Trade Journal*, Vol. 92, p. 509 (1952)
- [12] Honeycombe, R. W. K. *Trans. Inst. Found. Soc.*, Vol. 56, p. 57 (1948).
- [13] 修紹文等：東北科學研究所彙報 第二卷 第二期 P. 162 (1951)
- [14] 孫凱南：鑄工 第三期 第一頁 (1953)
- [15] Tichomsky, J. M.: *Machinery*, Vol. 41, p. 265 (1936).
- [16] Willh. A. B.: *S. A. P. Journal*, Vol. 45, p. 513 (1939).
- [17] Bowden, R. P. & Tabor, D. *Journal of Applied Physics*, Vol. 14, p. 141 (1943)
- [18] Evans, U. R. *An Introduction to Metallic Corrosion*, Arnold (1950)
- [19] Hansen, M.: *Aufbau der Zweistofflegierungen*, Springer Berlin (1936)
- [20] Claus, W. *Metallwirtschaft* Vol. 13 p. 226 (1934) cf. 41.
- [21] Smithells, C. J. *Metal Reference Book* 龍門翻印 (1950)
- [22] Honeycombe, R. W. K. Discussion to Ref. 11, *Foundry Trade Journal*, Vol. 92, p. 451 (1952).