

87.108
RTC
6

一九五六年全國鐵道科學工作會議
論文報告叢刊
(6)

軸承合金的研究

人民鐵道出版社

87.108



一九五六年全國鐵道科學工作會議
論文報告叢刊

(6)

軸承合金的研究

一九五六年全國鐵道科學工作會議論文編審委員會編

人民鐵道出版社出版

(北京市霞公府17號)

北京市書刊出版業營業許可証出字第010號

新華書店發行

人民鐵道出版社印刷廠印刷

(北京市建國門外七聖廟)

1957年7月第1版

1957年7月第1版第1次印刷

印數0001—1,000冊

書號: 775 開本: 787×1092 $\frac{1}{16}$ 印張: 1 $\frac{3}{8}$ 字數

統一書號: 15043·330 定價: (9) 0.19

前 言

1956年全国铁道科学工作会议征集了技术报告、总结、论文三百余篇。它的内容，包括铁路业务的各个方面，基本上显示着全体铁路技术人员和有关高等学校教师们几年来在科学技术方面辛勤劳动的成果。对现场实际工作有参考价值，对铁路新技术的采用和发展方向，有启示作用。为此，刊印丛刊，广泛流传，保存这一阶段内的科技文献，以推动科学研究的进一步开展。

会议以后，我们对全部文件进行一次整编工作，然后组织部内设计总局、工程总局、工厂管理局、人民铁道出版社、车务、商务、机务、车辆、工务、电务各局、铁道科学研究院、北京、唐山铁道学院、同济大学、大桥、定型、电务等设计事务所的有关专业同志对每篇内容仔细斟酌，选择其中对目前铁路业务有广泛交流意义，或是介绍铁路新技术方向、和系统的经验总结，将性质相近的文件合订一册，单独发行。为了避免浪费，凡是其他刊物或是以其他方式刊印过的文件，除特殊必要外，一般都不再刊载。出版顺序根据编辑和定稿的先后，排定丛刊号码，交付印刷，并无主次之分。

苏联铁道科学代表团在会议期间曾经做过九次学术报告，我们已将文字整理，编入了丛刊。

文件中的论点，只代表作者意见，引用或采用时，还应由采用人根据具体情况选择判断。

丛刊方式还是一种尝试，我们缺少经验，希望读者提供意见，逐步的改进。

铁道部技术局

1957年2月

目 录

鉛鈣鈉軸承合金的初步研究.....	郑中岳 (2)
鉛錫錫軸承合金的成份与硬度的关系.....	郑中岳 (9)

鉛鈣鈉軸承合金的初步研究

鄭 中 岳

目 次

- 一、化学成份与金相組織
- 二、性能
- 三、制作方法
- 四、結束語
- 参考文献

一、 化学成份与金相組織

鉛基軸承合金分为兩类：一类含有錫錫等，另一类含有鹼金屬（鈉鋰）及鹼土金屬（鈣鋇鎂）等。目前我國鐵路車輛軸承合金成份屬於前一类。后一类在我國尙未見到有人熔制过，但在國外，为了節約錫錫，在本世紀初叶就已經研究成功。現將后一类的几种合金成份列於表 1。

國外鉛鈣鈉类型的合金成份 [1]

表 1

國 名	名 称 或 牌 号	化学成份 (Pb—其余 %)						
		Ca	Na	Ba	Li	Sn	Hg	Cu
德 國	Lurgi	0.40	0.30	2.80	—	—	—	—
	Bahn	0.69	0.62	—	0.04	—	—	—
美 國	uLCO	0.43	0.05	1.36	—	0.18	0.24	0.10
	SaTCO	0.60	0.07	—	0.06	2.00	0.25	—
苏 联	БК	0.75~1.10	0.65~0.95	—	—	—	—	—

德國 Lurgi 合金，1919年即在該國鉄路上使用，由於含有活潑性強的高至 2.8% 的鋇，易引起嚴重腐蝕，乃於第一次世界大戰結束後改用 Bahn 合金 [2]，它的鈣鈉含量比 Lurgi 合金的高，並引入了微量的鋰，與鉛形成固熔體，有利於抗高抗蝕能力 [1]。美國 uLCO 合金，1915年起由 Frary Tempels 及 De Campi 等研究發展起來的 [3]，它除了成份較複雜外，和德國 Lurgi 合金及 Bahn 合金一樣，存在着重熔時燒損大，與瓦背緊貼能力弱，對有害雜質敏感等重大缺點，因此，在 1929 年以後，美國一些鐵路改用 SaTCO 合

金, 据文献简略报导, 新合金有利於克服上述缺点[3][4]。苏联BK合金, 系А·М·Бочвар、А·А·Бочвар、В·Н·Вазингер等在冶金研究所研究成功的, 1931年起一直到现在, 仍在苏联鉄路上广泛使用, 这种合金除了成份简单, 价格便宜, 易於制作外, 並在实地装車試驗的基础上运用統計檢查法确定了最适当的鈣鈉成份范围, 避免了由於鈉含量过高或过低影响到疲劳强度及抵抗脆裂的能力以致易於產生裂紋及剝落現象, 同时也避免了由於鈣鈉含量过低影响到抵抗蠕变的能力以至易於產生碾出現象[5]。我們这次制作的鉛鈣鈉軸承合金成份, 其化学分析結果是Ca——0.72%、Na——0.5%, Pb——98.78%与苏联BK合金及德國 Bahn合金相接近。

为了了解鉛鈣鈉軸承合金的金相組織, 可以根据鈣鈉的一定含量, 考虑鉛鈣二元平衡圖(圖1)及鉛鈉二元平衡圖(圖2)。

由圖1可見, 鉛与大量鈣形成硬脆的 Pb_3Ca , 成为軸承合金的硬質点; 少量鈣与鉛形成固溶体, 包晶温度时, 鈣熔於鉛中为0.1%, $0^{\circ}C$ 时減至0.02%以下。由圖2可見, 鉛与鈉形成較純鉛为硬的 α 相固溶体, 成为軸承合金的軟基体; 鈉熔於鉛中的量, 共晶温度时高至1.9%, $0^{\circ}C$ 时低至0.4%。綜合考虑这两个二元平衡圖, 可以了解到鉛鈣鈉三元合金的金相組織是由硬質点 Pb_3Ca 嵌入在鉛鈉固溶体的軟基体上所組成的。圖3是我們制作的鉛鈣鈉合金的金相組織, 黑色樹枝狀組織为硬質点 Pb_3Ca 。軟基体为鉛鈉固溶体。这种組織, 与巴比特合金的組織一样都符合於夏甫法則, 即良好的軸承合金大都具有硬質点均匀分佈在軟基体上的多相組織。另外, 从平衡圖中可以了解到由於鈉鈣在鉛中熔解度随温度降低而降低, 它可引起时效硬化現象。

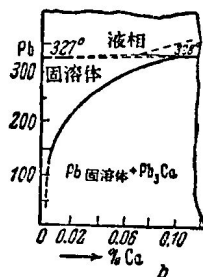


圖1 鉛鈣平衡圖之一角

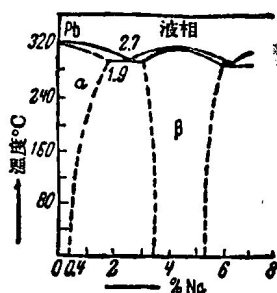


圖2 鉛鈉平衡圖之一角

为了与鉛鈣鈉合金進行比較, 我們熔制了目前我國鉄路車輛軸承合金中南№.8, 其化学成份 Pb——80%、Sb——15%、Sn——5%, 与美國 ASTM8号合金成份一致, 其金相組織如圖4所示, 白色方塊为硬質点B相 ($SbSn$), 基体为共晶体 ($\alpha + B + \delta$) [6]。

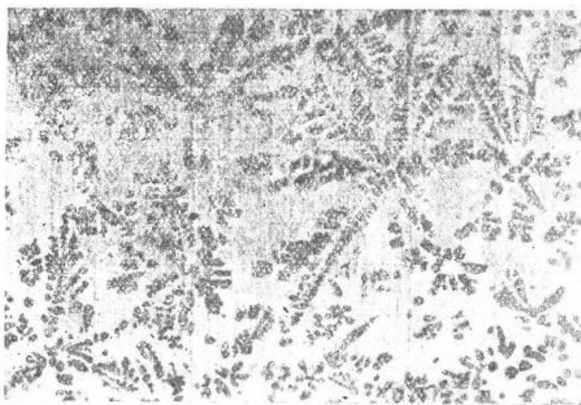


圖3 鉛鈣鈉軸承合金。100×。腐蝕剂: 5%硝酸溶液

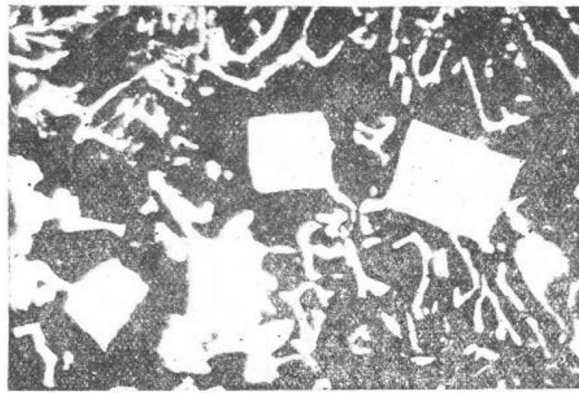


圖 4 鉛錫合金。500×。腐蝕劑：5%硝酸鈣溶液

二、性 能

合金的性能取決於它的成份與組織。我們熔制的鉛鈣鈉合金及鉛錫合金，其成份與組織已如上節所述，現將我們作的某些性能比較試驗結果列於表 2。

鉛鈣鈉合金及鉛錫合金性能比較表

表 2

合金名稱 項 目		鉛鈣鈉合金	鉛錫合金 中南 №.8	附 註
熔 點 °C	上	405	271	使用了電位計、電壓穩定器、冷端恒溫器等設備進行熱分析。
	下	314	236	
拉力強度（鑄態） 公斤/公厘 ²		10.28	6.03	雖軸承合金不承受拉力，但此數據有助於了解疲勞強度及提供延伸數據。
延伸（鑄 態）%		3.70	1.18	此數據有助於了解減磨性。延伸大的合金能緩和軸的彎曲，使軸承與軸頸易吻合。
抗壓強度（鑄態） 公斤/公厘 ²		17.82	9.93	試樣直徑為10公厘，高為20公厘，以試樣壓至18.73公厘時的壓力計算。
沖擊韌性（鑄態） 公斤公尺/公厘 ²		0.80	0.12	試樣尺寸為55×10×10，系無缺口的。
硬 度 H_s 10/250/60	室溫	31.2	20.3	熱態硬度試驗系在特制的小電爐內加熱，溫度測量應用了放大了電勢的熱電堆。
	125°C	21.1	8.0	
線膨脹係數×10 ⁶ 20~150°C		33.1	27.0	在德國 HTV 型式的光學膨脹儀上測定。
抗 蝕 性 克/公分 ² ×10 ³		10	1	A 試樣尺寸為35×15×5，浸入含硫酸5%的車軸油內，在165°C 維持3小時，稱量並計算每平方公分損失克數。B. 鉛鈣鈉合金在空氣中攪久，表面即腐蝕成氫氧化合物。
摩 擦 系 數	油摩	0.015	0.009	在AMsler摩擦磨耗試驗機上進行試驗。圓軸系中炭鋼，直徑為40公厘。合金樣品的寬度為10公厘，弦長為25公厘。荷重均為28公斤。油摩系用夏軸油，轉數為5萬。油摩后即進行干摩試驗，轉數為2萬。
	干摩	0.89	0.27	
摩 耗 量(克)	油摩	0.0049	0.0041	
	干摩	3.6488	0.0986	

由表 2 可見，鉛鈣鈉合金的优点如下：

1. 有較高的起始熔化溫度 (314°C)。比車軸油的閃點高。因此，它能安全地承受由於軸端高壓點，軸頸表面不良，軸承與軸頸吻合不好及油潤缺乏時所引起的過熱現象。

2. 除了室溫時抗壓强度高外，在 125°C 時 (通常鐵路車輛軸承工作溫度為 $60\sim 80^{\circ}\text{C}$ ，個別數據高至 115°C [7])，仍有較高的硬度，不會由於合金在較高的工作溫度時變軟引起扭曲咬結因而增加摩擦燒毀軸承。

3. 在高的拉力強度下仍有良好的延伸性，可能使軸承與軸頸易於吻合，對減摩有利。

4. 有較高的衝擊韌性，這對鐵路車輛軸承較重要，因為車輛每行駛到鋼軌接縫處週期性承受衝擊負荷，合金需具有較高的抵抗脆裂的能力。

同時，由表 2 可見，鉛鈣鈉合金的缺點如下：

1. 它的線膨脹係數大，使瓦背與合金之間的热應力大，使彼此緊貼不好，能促使合金的疲勞裂紋的產生與擴展，因此，通常需要在瓦背上機械加工成槽形以增強緊貼能力。

2. 它的抗蝕性低，這不僅損失金屬，還由於合金表面可能形成細坑，除了損壞合金的減摩性外，還能成為應力集中的地方，疲勞裂紋很容易在這裡產生。

3. 干磨時，它的摩擦係數及磨耗量急增，因此，需經常注意保持良好的潤滑狀態。

在這裡，需要特別提出的，由下節敘述的制作方法及有关文獻記載，可以知道鉛鈣鈉合金還有下列缺點：

1. 制作及重複熔合金時，由於鈣鈉活潑性強及合金澆鑄溫度高，鈣鈉極易氧化燒損。它不但引起經常校正成份的麻煩，而且引起金屬損失。因此，需要細心熟練掌握操作過程，否則合金質量不易達到標準。

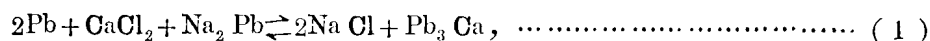
2. 對有害雜質較敏感。當合金中混入微量的銻砷鉍時，硬質點 Pb_3Ca 即遭到破壞，而形成 Ca_3Sb_2 、 Ca_3As_2 、 Bi_3Ca 。

3. 它的收縮為 0.75% ，比一般巴比特合金的 (0.5%) 大。因此，澆鑄時應注意填滿，以免產生大的縮孔 [8]。

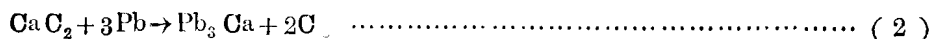
為了克服鉛鈣鈉合金的重大缺點，需要進一步研究某些元素對合金性能的影響。錫在國外一些國家系稀缺元素，但我國有相當的產量，因此，可以考慮利用少量的錫作為合金元素加入劑，研究它對減少氧化燒損，增強緊貼能力，及減弱對有害雜質敏感等方面的影響，另外，也可以研究鎂對提高抗蝕能力的影響 [9]。以上這些都有待今後作試驗，才能找出結合我國資源情況的令人滿意的合金成份範圍。

三、 制作方法

鉛鈣二元合金的制作，通常採用化學法 [2]。它的基本原理是鈉或鉛還原鈣的化合物。用鈉還原的，稱為氯化物法。如方程式 (1) 所示



用鉛還原的，稱為碳化物法。如方程式 (2) 所示，



氯化物法应用了价廉的 CaCl_2 ，但需加入熔点低至 97.7°C 的極易氧化燒損的金屬鈉。炭化物法由於 CaC_2 在空气中加热極易燒損，需配制被复剂保护或創立不含氮的（因氮易与 Ca 反应）还原性的炉气。我們这次熔制的是三元合金，採用氯化物法是考慮到加入適當多的鈉，除了还原 CaCl_2 形成 Pb_3Ca 硬質点外，还有剩余的則熔在鉛中成为較純鉛为硬的軟基体。我們共熔制8炉，現將熔制工藝叙述於下：

1. 熔化設備：碳碲棒电炉（或焦炭炉）及三个鑄鉄鍋、（不用石墨坩堝以免碲与鈣化合）。

2. 測溫設備：鉻合金——鋁合金热电偶及毫伏計式溫度指示器。

3. 配料[10]：鉛93%，脫水氯化鈣4.9%，金屬鈉2.1%。

4. 熔制程序：

① 脫水氯化鈣裝入第一个鉄鍋內，加热至 800°C ，变成熔融状态。

② 擦干的金属鈉裝入第二个鉄鍋內。

③ 第三个鉄鍋裝鉛，加热至 400°C 。

④ 將第三个鉄鍋的熔鉛（ 400°C ）倒入盛有金属鈉的第二个鉄鍋內形成鉛鈉合金。

⑤ 立即將第二个鉄鍋內的鉛鈉合金倒入盛有 CaCl_2 （ 800°C ）的第一个鉄鍋內，並用鉄棍小心攪动。

⑥ 黑色熔鹽（ $\text{NaCl}-\text{CaCl}_2$ ）浮上及合金溫度为 600°C 时，將熔鹽抓出。在 $550^\circ\text{C}-600^\circ\text{C}$ 时將合金澆鑄到鉄模（ 250°C ）內自然冷却。

5. 檢驗：

① 外觀檢查：鉛鈉錫合金为白色，鉛鈣鈉合金較黑。

② 硬度試驗（10/500/60）：由於合金有时效硬化作用，硬度随時間延長而增加。澆鑄后2~3小时， H_g 不应低於20，一天后，不应低於26[10]。

③ 化学成份与硬度关系，可根据下式近似計算[5]：

$$H_g = 21.135 \text{Ca} + 14.218; \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$H_g = 22.248 \text{Na} + 12.838. \quad \dots\dots\dots (2)$$

6. 合金重复熔化供掛瓦用时，为了減少氧化燒損，需注意下列几点：

（1）鉄鍋最好作成圓而深的，以減少合金与空气接觸面。

（2）鉄鍋裝載合金量最好与掛瓦需要量一致，以免多次熔化燒損。

（3）預热至 $120\sim150^\circ\text{C}$ 的合金裝入預热至暗紅色的鉄鍋內，以縮短熔化時間。

（4）鉄鍋供熔化用，也供澆鑄用，以免用勺取出合金再澆鑄时增加燒損。

（5）熔化前，在合金面上鋪一層鹽或5~6公厘大小的木炭。

（6）熔化溫度不要超过 600°C ，否則合金表面易生成黃色氧化物。

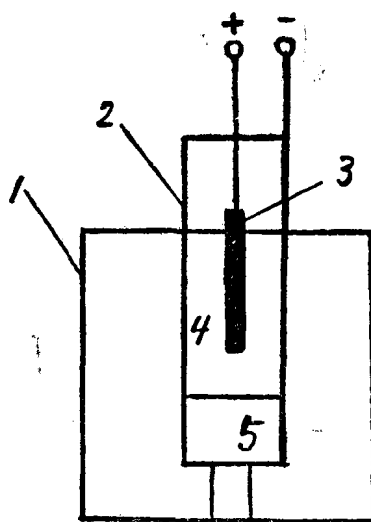


圖5 电解氯化鈉制作鉛鈉合金示意圖：

1——电爐； 2——鉄鍋；
3——炭精棒；4——食鹽；5——熔鉛。

(7) 熔化后立即熔鑄，如停留時間過長，往往使鈉鈣燒損大。

(8) 澆鑄溫度一般為 550°C 左右。澆鑄時，除了應不斷地均勻地流出合金外，鐵鍋尖端應接近模具，以縮短合金經過空氣層的距离，否則合金氧化膜增多，更不利于合金與瓦背之間的緊貼。

上述氯化物法應用了金屬鈉制得鉛鈉合金，如果採用電解氯化鈉法，亦可制得。圖 5 是電解法示意圖。現將我們在實驗室作的方法與數據敘述如下，僅作為進一步試驗的初步基礎。

1. 設備：

(1) 碳碲棒電爐一個，並附有溫度自動控制設備。

(2) 整流器一個，直流電壓 6~65 伏，直流電流 15 安。

(3) 圓而深的鐵鍋一個。

2. 陽極：石墨碳精棒。其尺寸為 $350 \times 33 \times 23$ 公厘。

陰極：熔鉛，鐵鍋及焊在鐵鍋上的銅板。

電解質：100% 氯化鈉，熔點為 810°C ，也可加入一些 CaCl_2 ，以降低熔點。

3. 操作程序：

(1) 先將鉛及食鹽順次裝入鐵鍋內。我們每次用了 2 公斤鉛，3 公斤食鹽。

(2) 將石墨碳精棒插入鹽內，其深度為 182 公厘。

(3) 將鐵鍋放入電爐內加熱，在電解過程中，始終維持鐵鍋外部溫度為 800°C 。

(4) 等食鹽熔化後，將石墨碳精棒接上整流器陽極，將焊接在鐵鍋上的銅板接上陰極。

(5) 通電後，維持電流 8~12 安，電流大小可以上下移動陽極控制（在電解過程中，氯氣逸出，而鈉進入鉛內。由於在接觸熔鹽部份的鐵鍋四週結成硬的鹽殼絕緣，不致於產生嚴重的短路，更有利於電解鈉進入鉛內）。

(6) 電解 12 小時後，倒出熔渣，再倒出合金至 250°C 的鐵模內自然冷卻。

(7) 檢驗：按照上述實驗結果，鉛鈉合金的布氏硬度為 14.1，含鈉量為 0.47% 為了制作鉛鈉三元合金，這種鉛鈉合金的含鈉量還不夠，因此，今後須增加電解時間提高電流效率選擇適當電流密度等以達到高至 2.1% 的含鈉量。

四、結 束 語

本文對鉛中加鹼金屬及鹼土金屬的幾種合金成份作了初步的評述；對它的組織作了金相方面的定性觀察；對它的某些性能與我國鐵路正在使用的鉛錫錫合金作了比較試驗，從而了解了它的一些優缺點；對它的制作方法進行了接近工業生產的氯化物化學法的試驗，並對電解法制作鉛鈉二元合金作了實驗室的嘗試；至於它在我國鐵路應用範圍問題，雖然國際聯運通車，蘇聯、東德等國鐵路上大量使用這類合金，我們有必要了解它的性能及制作方法；甚至，個別單位也可能需要熔制一些（除車輛段外機車搖連干銅套也可能需要掛 $\text{Pb}-\text{Ca}-\text{Na}$ 合金），但普遍推廣應用，則需要考慮到我國的資源情況及這類合金的某些嚴重缺點，因此，本文對這個問題沒有下最後的定論。

由於我國機車車輛載重和速度都日益增加，滾珠軸承還不能立刻普遍應用，因此，提

高滑动轴承合金的 PV (容許压力与容許速度的乘積) 数值的研究工作, 在一定時間內, 仍將引起注意。本文所提出的, 只是这方面工作的开始, 但它有助于進一步研究改善鉛鈣鈉合金的質量 (如錫鎂对合金性能的影响,) 或有助于結合我國資源情况尋找新的合金成份 (如加鉍对含錫高的鉛基合金的影响。)

〔朱德財、張志田、王会永三位同志参加試驗工作〕。

参 考 文 献

- 〔1〕 Энциклопедический справочник «Машиностроение», Т 4, МАШгиз, 1947
- 〔2〕 С. L. Mantell & C. Hardy, Calcium metallurgy and technology. p 78~86, 1945
- 〔3〕 R.J.Shoemaker, Discussion on bearing metals. Symposium on effect of temperature on metals. p 334, 1931
- 〔4〕 ASM Metals Handbook, p 1553, 1939
- 〔5〕 Исследование сплавов цветных металлов, сборник 1. стр 12 и стр 88, 1955
- 〔6〕 F.D.Weaver, Type metal alloys. Journ. Inst. Met. Vol 56, p 209, 1935
- 〔7〕 J.N.Bradley & H. O'Neill. Railway bearing metals. Their control and recovery. Journ. Inst. Met. Vol 68, p 259, 1942
- 〔8〕 В. А. Буталов. З менители дефицитных металлов и сплавов. стр 156, 1955
- 〔9〕 Экономия и замена цветных металлов. стр 7, 1953
- 〔10〕 В. К. Петриченко, Антифрикционные материалы и подшипники скольжения. стр 84, 1954

鉛錫鋅軸承合金的成份与硬度的关系

郑 中 岳

目 次

- 一、問題的提出
- 二、实验方法与数据
- 三、实验数据的相关分析
- 四、討論
- 参考文献

一、 問題的提出

目前我国铁路車輛軸承合金的化学成份为80%鉛、15%鋅、5%錫，代号为中南№8。由於重复熔化及澆鑄，合金成份不免發生变动，因而对使用性能有一定的影响 [参1]。如含鋅量超过15%，合金易脆裂 [参2]；如鋅錫含量过低，合金变軟，易变形及輾出；如含錫量过高，並且超过含鋅量时，下熔点將由240°C降至180°C，当合金过热时易發生重熔燒損事故 [参3]。总之車輛軸承的使用性能与合金的化学成份有关，控制成份在一定的范围是必要的。

根据化学分析的结果进行配料是控制成份的常用的精确方法，但它比較复杂及費时，現場（主要指車輛段）往往不易作到。因此，寻找一个簡單快速的控制方法，是現場所需要的。

大家都知道，硬度試驗是一个簡單快速的試驗方法，这是因为它的設備簡單，操作简单，不需要制备复杂的标准試样，且能在極短時間內就能得出試驗結果，如果合金的成份与硬度存在着一定的关系，同时考虑到合金成份在一定的范围波动，那末通过硬度試驗数据就有可能推算出合金的成份，那末硬度試驗方法就有可能成为本文所期望的一个簡單快速的控制方法。

關於鉛錫鋅合金的成份与硬度的关系，Weaver 曾比較詳細地研究过 [参4]，並繪制了等硬度曲綫圖，如圖 1 所示，大致表明了当含鋅量一定，並且大于14%时，硬度值随着含錫量增加而增加。利用圖 1，可以根据成份大致确定硬度，例如中南 №8 合金，其硬度約在 20~24 之間。但不能利用圖 1 根据硬度确定成份，因圖上每一条等硬度曲綫包括一系列的不同成份。曾有人提出，除了利用等硬度曲綫圖外，还利用上熔点等温曲綫（圖2），即可根据二个曲綫的交点确定合金的成份 [参5]。例如已知某合金的硬度为20，上熔点为

270°C，可从二个曲线的交点确定它的成份大致为 80%Pb、15%Sb、5%Sn。但利用热分析法测定熔点也是比较复杂及费时的，不是现场易于做到的。由以上所述可见，过去关于合金成份与硬度的关系的研究工作，虽对我们有些帮助，但没有解决我们所希望解决的问题，即借助硬度试验数据确定轴承合金的化学成份。因此，我们不得不对这个问题继续进行研究，企图在选择比较合适的成份范围的基础上利用相关分析写出回归方程式，近似地根据硬度值推算出合金的化学成份。另外，我们也需要根据我国工业纯的原料掌握精确

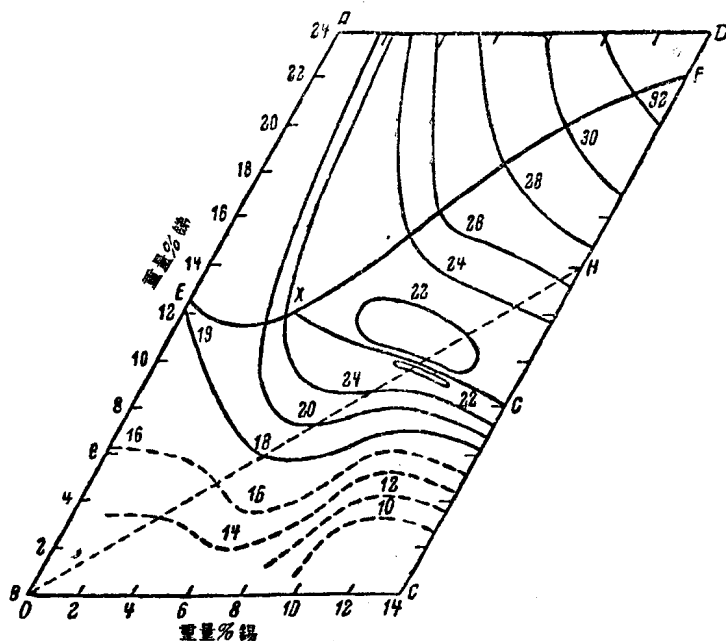


圖 1 等硬度 (H_v) 曲綫圖

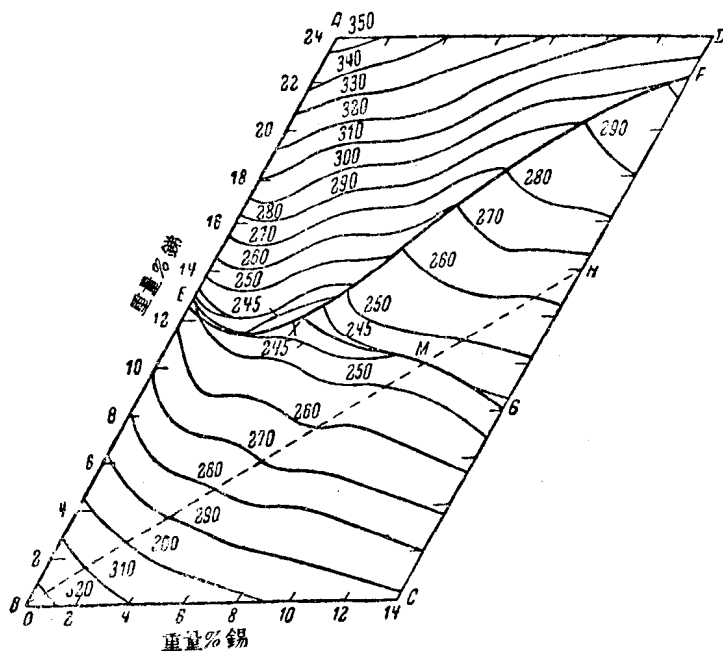


圖 2 上熔点等温曲綫圖

度高的硬度試驗方法及選擇有利的試驗条件等作出硬度試驗数据，而这些数据与过去一些人作的，由于試驗情况不同，会有些偏离的。

二、 实验方法与数据

选择供試驗用的合金成份范围，是在 Pb-Sb-Sn 三元平衡图的浓度三角形中，围绕中南 №8 合金成份所作的平行四边形内。在这个平行四边形内（如图 3 所示），一共熔配了 65 种不同成份的合金，锡含量波动在 2% 至 13%，锑含量波动在 11% 至 22%。选择这么多的不同成份的合金，不仅考虑到中南 №8 合金中 Sb、Sn 含量同时氧化烧损及长期累积所引起的成份波动范围，也考虑到个别现场由于混入其他牌号合金（例如混入中南 №7 合金）等原因所引起的成份波动较大的个别情况，同时也將现场取回的少量合金进行化学分析作为参考。

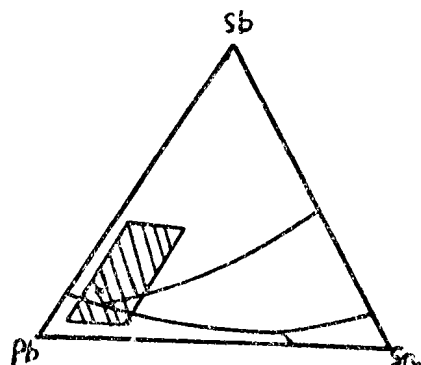


圖 3 成份范围的选择示意图

为了符合现场目前使用情况，均采用工业纯的原材料供作試驗，其中鉛的純度在 98.76% 以上，錫的純度在 99.90% 以上，錫的純度在 99.90% 以上。

所有合金都在碳碲棒电炉鉄鍋內熔化。在 700°C 熔化錫及 50% 的鉛后，停止加热，依次加入剩下的鉛及錫，小心攪拌冷至 400°C，即澆鑄至長方形冷鉄模內，試样尺寸为 120 × 25 × 15 公厘。在熔化过程中，为了避免氧化烧损，金屬上面鋪有一層木炭末。合金熔化后，經過化学分析核对配料成份。

硬度試驗系在槓桿式布式硬度机 (KPE3000 式) 上进行。鋼球直徑 (D) 为 10 公厘。压入負荷 (P) 为 250 公斤 (在 10 秒內平稳增至該数值)。由于合金再結晶温度低，当短時間維持負荷时仍急剧产生塑性形变，維持時間須控制在 60 秒。試驗温度为室温 25°C。合金的压痕直徑 (d) 最大为 4.35 公厘，最小为 3.42 公厘，都大于 0.2D，都小于 0.6D。这样，使不同合金的硬度值，可以在允許誤差範圍內彼此进行比较。所有压痕深度都小于試样厚度 (a) 15 公厘的十分之一，即 $\frac{a}{10} \geq \frac{P}{\pi D H_B}$ ，使压痕形狀及大小不致受到坚硬的底板的影响。試样底部磨平，以便平稳安放；試样表面 (与鉄模底壁接触的平面) 磨成光滑面，以便清晰观察压痕直徑。用放大鏡測量压痕直徑的誤差为 ±0.05 公厘。每个压痕直徑，取互相垂直的二个压痕直徑的平均值，但这二个压痕直徑不能相差 2%，否則压痕形狀及大小被認為有可能遭到破坏。每个試样上至少測量二个以上的压痕直徑，並取其平均值为 d ；同一試样上 H_B 之差很少超过 1，否則合金組織的均匀性被認為有可能遭到破坏。每个压痕中心距試样邊緣的距离 b 应大于鋼球直徑 ($b \geq D$)，两个压痕中心彼此之间距离 c 应大于鋼球直徑的兩倍 ($c \geq 2D$)，以避免压痕形狀及大小受到外来的影响。根据

压痕直徑 d 可按下式求出 H_B ，即 $H_B = \frac{P}{\pi D \left(\frac{D}{2} - \sqrt{\frac{D^2}{4} - \frac{d^2}{4}} \right)}$ (公斤/公厘²)，或由表格

找出 d 与 H_B 之間的关系。選擇了 51 种不同成份合金的硬度值列于表 1。

不同成份合金的硬度值

表 1

順 序 号	化学成份 (重量百分数)		硬度 $H_{B10/250/30}$
	Sb (%)	Sn (%)	
1	21.53	5.29	23.3
2	22.00	8.00	25.2
3	20	4	21.8
4	20	6	23.5
5	20	8	24.5
6	17.65	3.65	20.1
7	18	6	21.2
8	18	8	23.3
9	17	4	21.0
10	17.73	8	22.4
11	16.28	2.84	19.6
12	15	2	19.0
13	15.61	6	21.8
14	15	8	21.8
15	14	2	16.6
16	14	4	18.1
17	12	2	16.0
18	12	4	17.8
19	17	10	22.4
20	17	12	24.8
21	19	3	19.1
22	19	9	22.8
23	12	3	16.6
24	21	13	26.4
25	15	5	19.6
26	15	10	21.8
27	15	12	23.7
28	14	8	21.2
29	15.07	5.07	19.6
30	22	4	23.1
31	11	6	18.6

三、 实验数据的相关分析

本文根据中南 №8 合金重复熔化及浇铸时 Sb 及 Sn 可能同时烧损的规律等情况选择了上节列出的成份范围去研究它与硬度之间的关系。现在可进一步从图1、图3 及表1 见到, 本文所研究的 Sb 及 Sn 含量的变化一般说对硬度有影响, 即它们之间存在着关系, 换句话说, Sb 及 Sn 含量的变化范围及趋势, 不是与等硬度曲线平行, 而是横切好几条等硬度曲线, 也可以说, 在这个成份变化范围内, 含 Sb 量一定时, 硬度随含 Sn 增加而增加, 含 Sn 量

一定时, 硬度随含 Sb 量增加而增加, Sb 及 Sn 含量同时增加时, 硬度也随着增加。但应指出, 合金的成份与硬度之间的关系, 不像函数关系那样反映着彼此之间的严格依存性, 而是一种相关关系, 或称统计关系, 反映着一个相关因素的每一数值, 可以有几个数值与之相当, 这些数值是分散在它们平均数的周围的。既已了解是相关关系, 随后就要进行相关分析, 一方面要以数学式来反映 Sn 及 Sb 含量与硬度之间的联系形式, 另一方面也要确定这种联系的密切程度以估计这个数学式的价值与准确程度。如果这三个变数之间的联系是最简单的三元一次相关, 即具有直线回归方程式的形式, $z = ax + by + c$ 。那末就可以利用最小二乘方原理求出系数 abc , 使试验数据点对回归平面 $z = ax + by + c$ 沿 z 轴方向的偏差平方和 $S = \sum [z - (ax + by + c)]^2$ 为最小。但因为直线回归方程式 $z = ax + by + c$ 只表示了三变数间的平均关系, 故其价值以试验数据点在回归平面 $z = ax + by + c$ 两边的疏散程度而定。为了确定这种疏散程度, 也就是确定联系的密切程度, 可引用复相关系数 R 来度量, 当 $R=1$, 即 $S=0$ 时, 变数 z 与 x 及 y 间有函数性的联系, 即一切试验数据点都落在回归平面 $z = ax + by + c$ 的上面, 当 $R=0$ 时, 变数 z 对 x 及 y 之间没有直线相关, 但非直线相关还是可能存在的。

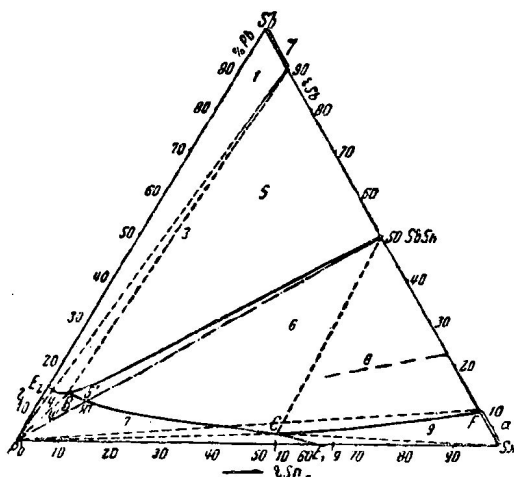


圖 4 Pb-Sb-Sn 平衡圖

进行相关分析, 须首先选择 Sb 及 Sn 含量与硬度的联系形式。为此, 应该预先对成份与性能的关系从金属学观点作理论上的分析, 一方面确定它是正联系或是负联系, 另一方面确定 $z = f(x, y)$ 的形状是多元多次相关的曲面形状或是多元一次相关的平面形状。在本文所研究的合金成份的范围内, 其金相组织, 由 Pb-Sb-Sn 平衡图 4 [参 6] 可见, 均系多

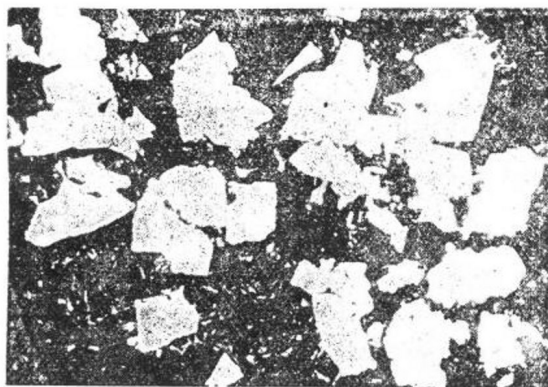


圖 5 化学成份 22% Sb, 8% Sn。冷模。
× 250。5% 硝酸銀腐蝕。白色不规则方塊系 r 包晶转变产物 SbSn。基体为共晶体 (Pb+SbSn+r)

相机械混合物。区域 1 为少量锡溶入铅中的固溶体 (r) 及二元共晶体 (Pb+r); 区域 2 为 Pb 及二元共晶体 (Pb+r); 区域 3 为 r , 二元共晶体 (Pb+r) 及三元共晶体 ($r + \text{SnSb} + \text{Pb}$); 区域 4 为 Pb, 二元共晶体 (Pb+r) 及三元共晶体 (Pb+SbSn+r); 区域 4' 为 Pb, 二元共晶体 (Pb+SbSn) 及三元共晶体 (Pb+SnSb+r); 区域 5 为 SbSn 及三元共晶体 (Pb+SnSb+r); 区域 5' 为 SbSn, 二元共晶体 (Pb+SbSn) 及三元共晶体 (Pb+SbSn+r)。以上七个区域也可以说是在 Pb-Sb

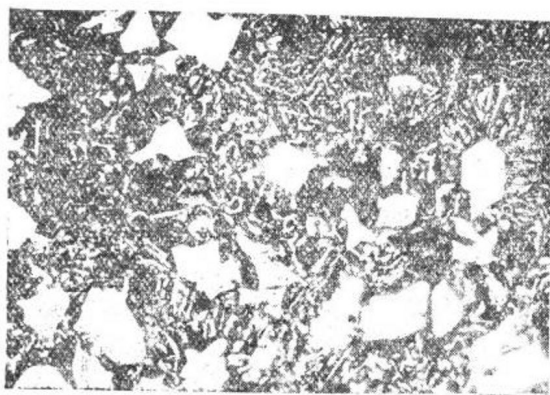


圖 6 化学成份18%Sb, 6%Sn. 冷模。
×250。5% 硝酸銀腐蚀。白色不规则方塊系r包晶转变产物SbSn。
基体为共晶体 (Pb+Sb Sn+r)

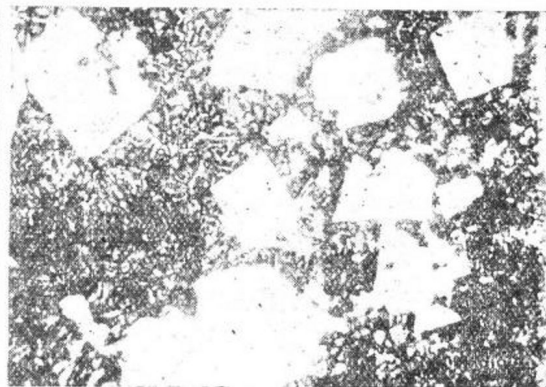


圖 7 化学成份 17%Sb, 12%Sn, 冷模。
×250。5%硝酸銀腐蚀。白色方塊为
初晶SnSb。基体为共晶体
(Pb+SbSn+r)



圖 8 化学成份17%Sb, 10%Sn. 冷模。
×250。5% 硝酸銀腐蚀。白色方塊
为初晶SnSb。基体为共晶体
(Pb+SnSb+r)



圖 9 化学成份15%Sb, 5%Sn. 冷模。
×500。5%硝酸銀腐蚀。白色方塊
为SnSb。基体为共晶体
(Pb+SnSb+r)

—SbSn濃度三角形之內。圖5、圖6、圖7、圖8、圖9 是我們熔配的不同成份合金的鑄态金相組織。大致頁荷上述相应区域应具有的组织。从以上所述可見，随着成份的改变，組織状态也發生变化，或者由某一区域轉入另一区域，或者在同一区域内相組成物彼此含量發生变化。更明确地说，随着 Sb 及 Sn 含量的增加，SnSb相及 r 相的数量也增加。而各相組成物的硬度，根据 Weaver 擦痕硬度試驗結果 [参7]，SbSn相为280公斤/平方毫米，r相为200公斤/平方毫米，Pb 为44公斤/平方毫米，以SbSn相为最硬，其次为r（另外，我們自己曾作过中南 №8 合金的显微硬度試驗，施加負荷为20克，維持時間为5秒，發現硬相的硬度为136.2公斤/平方毫米，基体的硬度为12.6公斤/公厘²。由此可見，随着SbSn相及r相的数量的增加，將引起合金硬度的增加，这是因为合金的硬度是它对硬的压头的抗力，即合金对塑性形变的抗力，抗力大，硬度就高，但抗力大小与內摩擦力的大小成正比，而合金的內摩擦力随着硬的相組成物在較軟的塑性基体上的增加而增大，因此，在室温时，由於Sb及Sn含量的增加，硬脆的SnSb相及r相也增加，結果是硬度值也增加，換句話說，合金的Sb及Sn含量与硬度之間存在着正联系。以上分析也为圖1、表1的試驗資料所証

实。至於这三个变数之間是否直綫相关的問題，大家都知道，由兩相机械混合物組成的合金，其成份与硬度之間存在着直綫关系，如圖10所示，同样，可以預期到由多相机械混合物組成的合金，在組織与硬度或成份与硬度之間在一定条件下也近似地呈現着直綫关系，这是因为多相机械混合物的性質也是各相組成物性質的平均值，但应指出，它的性質也与各相組成物的形狀大小及分佈有关，直綫相关的形式可能由於形成共晶組織的某些特殊条件（如形成細晶粒等）而遭到破坏，如圖10虛綫所示。同时这种形式与选择合金成份的表示方法有关，一般說，以原子百分数表示成份时，硬度与成份之間成近似的直綫关系[參8]。

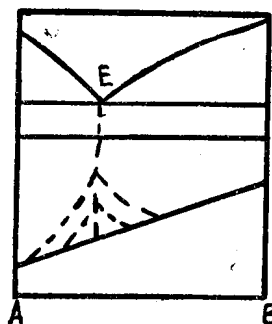


圖10 二元共晶合金成份与硬度的关系的示意图

我們选择 Sb 及 Sn 含量与硬度之間的联系形式为三元一次正相关，並以 $z = ax + by + c$ 来代表，就是基於以上的一些設想。現在，就利用最小二乘方的原理求出系数 a 、 b 、 c 。

为了使 $S = \sum m [z - (ax + by + c)]^2$ 为最小 ($m = \text{頻率}$)，須令 S 对各参变数的偏导数各等於零：

$$\frac{\partial S}{\partial c} = -2 \sum m [z - (ax + by + c)] = 0;$$

$$\frac{\partial S}{\partial a} = -2 \sum m [z - (ax + by + c)] x = 0;$$

$$\frac{\partial S}{\partial b} = -2 \sum m [z - (ax + by + c)] y = 0.$$

由此得 a 、 b 、 c 的方程式如下：

$$c \sum m + a \sum mx + b \sum my = \sum mz; \dots\dots\dots (1)$$

$$c \sum mx + a \sum mx^2 + b \sum mxy = \sum mxz; \dots\dots\dots (2)$$

$$c \sum my + a \sum mxy + b \sum my^2 = \sum myz. \dots\dots\dots (3)$$

因 $\bar{x} = \frac{\sum mx}{\sum m}; \quad \bar{y} = \frac{\sum my}{\sum m}; \quad \bar{z} = \frac{\sum mz}{\sum m}.$

方程式 (1) 可写成

$$c = \bar{z} - a \bar{x} - b \bar{y}. \dots\dots\dots (4)$$

將方程式 (4) 代入 $z = ax + by + c$ 后，得到下式：

$$z = \bar{z} + a(x - \bar{x}) + b(y - \bar{y}). \dots\dots\dots (5)$$

为了求方程式 (5) 的系数 a 、 b ，可以引入 $\delta_x = x - \bar{x}$ 、 $\delta_y = y - \bar{y}$ 、 $\delta_z = z - \bar{z}$ 及 x y 間、 x 与 z 間、 y 与 z 間的一次相关系数[參9]

$$r_{xy} = \frac{\sum m \delta_x \delta_y}{N B_x B_y}; \quad r_{yz} = \frac{\sum m \delta_y \delta_z}{N B_y B_z}; \quad r_{xz} = \frac{\sum m \delta_x \delta_z}{N B_x B_z}.$$

此处 $N = \sum m$ ， B = 标准差 (中誤差) ($B_x = \sqrt{\frac{\sum \delta_x^2}{n}}$; $B_y = \sqrt{\frac{\sum \delta_y^2}{n}}$;

$$B_z = \sqrt{\frac{\sum \delta_z^2}{n}}).$$

經過推导，可以得出：