

國產低矽矽鋼片熱處理的條件*

向 仁 生

(中國科學院應用物理研究所)

提 要

爲了提供生產上有用的數據，爲了考察國產低矽矽鋼片在不同溫度不同時間的條件下退火以後的效果，我們進行了具有相當系統性的關於退火條件的實驗。實驗結果表明：在較 850°C 爲低的溫度退火不同時間或多次退火，可使鐵心損失達到同一最低值；在高於 950°C 的溫度退火以後，即令再度在較低溫度退火，也不能達此最低值。此最低值約爲： $P_{10}=2.3$ 瓦特/千克， $P_{15}=5.2$ 瓦特/千克，較 ГОСТ 802-41 中對 31A 規定的最高值低 30%。

一. 緒 言

我國某鋼鐵廠試製矽鋼片已有一段時期，我們曾結合生產進行若干工作。矽鋼片的生產過程有冶煉、軋製、酸洗、熱處理(矽鋼片的熱處理是退火)、性能鑑定等環節。我們的工作集中於建立電磁性能測量方法及確定退火條件(即退火過程中的最高溫度及在最高溫度應保持的時間)，初步結果已寫成一篇報告^[1]。該報告中退火問題方面需要深入一步的工作。本文的目的即在於此。

文獻中關於矽鋼片的退火條件，已有許多記載^[2-6]。它們雖大致表示一些共同的趨勢，但退火溫度彼此間是有顯著差異的。不同方面的科學研究或工業生產的工作者，在其所用樣品的具體條件之下，採取適合於其設備條件的退火方法以進行試驗，因而得到自己的最佳退火溫度，而彼此的最佳退火溫度是可以不同的。因此，在我們國產矽鋼片的具體條件下，我們必須進行有一定系統性的相當完備的實驗工作以確定最佳的退火條件。

關於鐵磁金屬各種特性所由產生的機構，已有大量的理論方面及實驗方面的研究^[7-9]；關於金屬的熱處理問題，也有大量的研究結果。但對於某項具體的矽鋼片產品在其具體的生產條件下，磁學或金屬學目前還沒有可能提供預先推算具體的最適宜的退火條件的辦法。因此，各種矽鋼片產品的最佳退火條件的決定在目前只能主要依

* 1955 年 4 月 22 日收到。

靠實驗。

本文所報告的實驗中所用的退火方法，仍為鐵盒退火，盒中為殘存空氣。實驗未觸及其他的退火方法，如真空退火或氫氣退火等。退火前後所測量的性能為 P_{10} 及 $P_{15}^{1)}$ ，未測量其他的電磁性能如磁感應強度等，也未試驗高矽矽鋼片。這固然由於人力及樣品的限制，也由於我們的考慮。真空退火及氫氣退火固然重要，但就目前而言，生產上最重要的仍是普通鐵箱退火，箱中不通入其他氣體而只留殘存的空氣。根據我們過去的經驗，矽鋼片其他方面的性能如磁感應強度等總隨鐵心損失方面的性能的改善而改善。高矽矽鋼片的退火情況，一般趨勢與低矽矽鋼片並無不同，只是最佳退火溫度要高一些。而且文獻上的記載，關於高矽矽鋼片的退火實驗較多而且較完備；關於低矽矽鋼片的退火實驗似遠較為少。

二. 實驗的樣品及步驟

樣品皆來自某鋼鐵廠，其公稱厚度為 0.50 毫米，在廠中未進行退火，也未酸洗。軋製過程中除最後一步為以壓下量不大的冷軋進行平整外，其他各步驟皆為熱軋。表面情況良好，即很平整。

所用的樣品，軋至薄片以後的成分未分析，但有其鋼錠成分，含矽 0.83%。表 1 列德國規格 DIN 6400 的規定，德國規格 DIN VDE 4600 的規定，日本 1939 年的低矽矽鋼片的成分²⁾。樣品中除矽及錳外，其他成分的數字皆較低。

表 1. 低 矽 矽 鋼 片 的 成 分

	Si%	C%	Mn%	S%	P%
DIN 6400	0.9—1.2	≤ 0.10	0.20—0.35	≤ 0.04	≤ 0.04
DIN VDE 4600	0.6—1.2	≤ 0.10	0.20—0.35	≤ 0.04	≤ 0.04
日本片	1.1—1.4	≤ 0.09	≤ 0.35	≤ 0.04	≤ 0.04

這次實驗過程中所有的電磁性能測量皆用文獻 [1] 中所述的小埃波斯坦方圈（鐵心損失測量的可能誤差估計在 1.5% 以內）。樣品用利刃一次切成（不加工）長 25 厘米寬 3 厘米的試片，40 試片加用原樣品製成的適當數目的角鐵成為一套試品，其中試

1) 本文中 P_{10} 及 P_{15} 分別表示當磁感應強度幅值等於 10 及 15 千高斯時的單位質量的鐵心損失，皆對 50 週/秒的交流電源而言，單位一律為瓦特/千克。此後 P_{10} 及 P_{15} 的單位大致皆省去不寫，因其出現次數過多。

2) DIN 6400 見 [10]，也見 [11] 第 333 頁；DIN VDE 4600 見 [12] 第 74 頁；日本矽鋼片成分見 [6]。

片片長平行於壓延方向者一半,垂直於壓延方向者一半。在所有退火處理中角鐵與試片同樣處理。每套試品首先測定其原狀態下的 P_{10} 及 P_{15} , 然後進行一次或多次退火, 每次退火後再測定 P_{10} 及 P_{15} 。

此次曾進行試驗之試品有兩組, 分別取自同一品種但不同爐號的兩大張樣品。第一組有 7 套試品, 第二組有 8 套試品。所有測量皆用同樣儀器及同樣方法。第一組 7 套試品的質量及原狀態下的 P_{10} 及 P_{15} 列於表 2。第二組 8 套試品的質量及原狀態下 P_{10} 及 P_{15} 列於表 3。由表可知, 同一組內試品的原狀態差別不大, 不同組內試品的原狀態差別較大。

表 2. 第一組試品的質量及原狀態下的 P_{10} 和 P_{15}

試 品 號 數	1	2	3	4	5	6	7
試片總質量(克)	971.5	997.0	1003.5	1049.9	990.0	1008.2	971.7
試片加角鐵總質量(克)	1077.7	1102.0	1113.6	1145.0	1102.4	1122.2	1074.9
實效質量 (m_e) (克) ¹⁾	1005.0	1040.3	1047.4	1102.4	1031.9	1043.6	1008.7
P_{10} (瓦特/千克)	5.60	5.71	6.42	6.62	6.00	6.50	
P_{15} (瓦特/千克)	11.77	12.03	12.98	12.76	12.38	13.00	

表 3. 第二組試品的質量及原狀態下的 P_{10} 和 P_{15}

試 品 號 數	1	2	3	4	5	6	7	8
試片總質量(克)	1168	1187	1188	1220	1221	1187	1218	1166
試片加角鐵總質量(克)	1282	1304	1304	1336	1339	1307	1336	1287
實效質量 (m_e) (克)	1241	1269	1239	1304	1303	1268	1300	1236
P_{10} (瓦特/千克)	4.45	4.70	4.75	4.85	4.62	4.59	4.55	4.55
P_{15} (瓦特/千克)	9.22	9.49	9.64	9.88	9.74	9.53	9.68	9.46

每次退火皆用鐵盒及附有自動溫度控制器的電爐^[1]。溫度控制約 $\pm 5^\circ\text{C}$ 。鐵盒容積大致僅够裝滿試品, 盒中氣氛為殘存空氣。退火過程中昇溫及降溫時爐子的條件不變, 即接通電流以昇溫, 所通電流之值始終一定; 切斷電流以降溫, 冷卻時鐵盒在爐中。若作 850°C 退火, 昇溫需時 1 小時多一點, 降溫至 300°C 需時約 5 小時, 至室溫需時十數小時。

1) 由儀器讀數計算單位質量鐵心損失之算式示於 [1] 之式 (1):

$$w = \frac{W}{(M+m)(1-1.4c)} = \frac{W}{m_e},$$

其中 M 為試片質量, m 為角鐵質量, m_e 為實效質量 (其他符號的含義不重述)。

第一組試品基本上用於考察不同退火溫度一次退火及不同次序多次退火的效果，每次退火時間大致皆半小時。第二組試品主要用於考察不同退火時間的效果，保溫時間短者只 10 分鐘，長者達 50 小時。第一組各套試品先分別在不同溫度退火，然後第 2 號在 750°C 多次退火，第 1 號在不同溫度多次退火（溫度依次增高），第 4 第 5 號皆分別在不同溫度多次退火（溫度依次減低）。第二組試品中有 2 套在 750°C 分別退火不同時間，4 套在 850°C 分別退火不同時間，2 套在 950°C 分別退火不同時間。

三. 實驗結果

I. 第一組試品

第 1, 2, 3, 4, 5 號試品在測量原狀態 P_{10} 及 P_{15} 後，分別在最高溫度 650°C , 750°C , 850°C , 950°C , 1100°C 保溫半小時以進行退火，然後測量 P_{10} 及 P_{15} 。這一試驗的目的是找出其他一切條件相同而僅最高溫度不同時何種溫度最好。文獻 [1] 已舉出在 850°C 為最合適，那是由另一種試驗得到的，我們現在換一種方法考察。

這一試驗的結果示於圖 1。

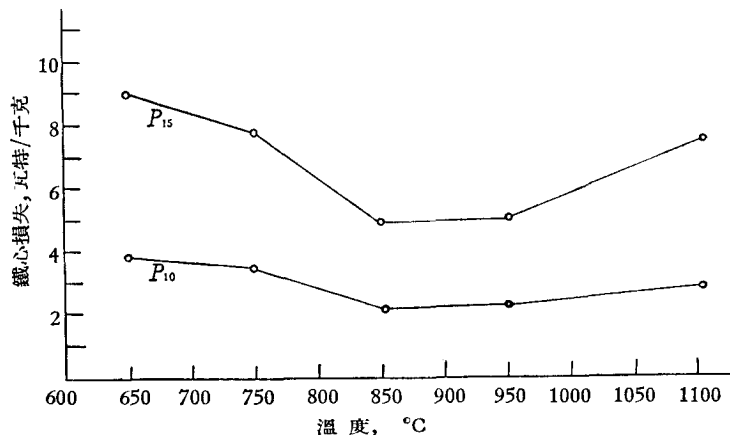


圖 1. 分別在不同最高溫度下保溫半小時以進行退火後的鐵心損失

這些結果表明， 850°C 的退火仍為最好， P_{15} 離 5 不遠， P_{10} 離 2 不遠。在 650°C 退火後的鐵心損失也遠較退火前為低。

在較 850°C 為低的最高溫度下多次退火，是否亦可得良好結果？圖 2 即表示這樣一種試驗的結果。曲線 I 相當於第 2 號試品，在第一次退火後繼續多次退火，最高溫度皆為 750°C ，保溫皆為半小時，起初每次退火皆降低鐵心損失，自第六次以後則保持不變，而且 P_{10} 及 P_{15} 的數值與圖 1 中 850°C 退火一次所得者完全相同。六次退火共計在最高溫度保溫 3 小時，取第 6 號試品退火一次，最高溫度 750°C ，保溫 3 小時，結果如圖 3 中之 II， P_{10} 及 P_{15} 之數值稍高。如再次退火，可能還降低，但未試驗。

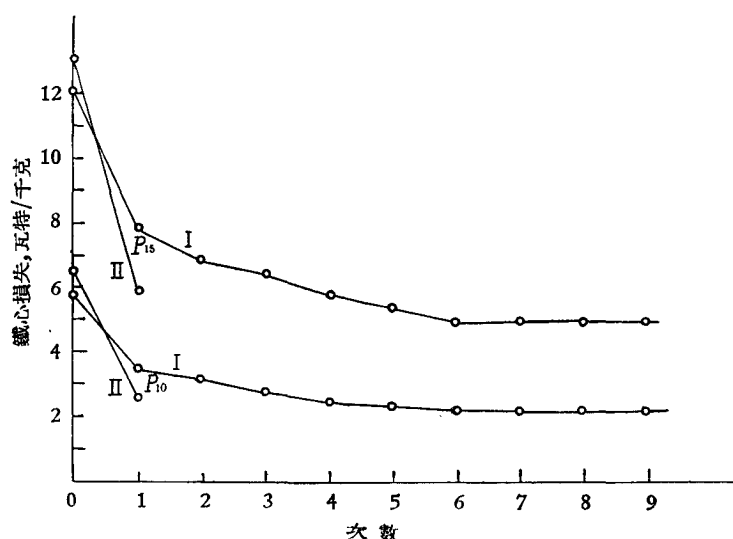


圖 2. 在 750°C 退火後的鐵心損失

I——每次退火在最高溫度 750°C 保溫 1/2 小時;
 II——在最高溫度 750°C 保溫 3 小時退火一次。

圖 3 示另一種試驗結果。第 1 號試品在 650°C 退火以後，再依次在 700°C, 750°C, 800°C, 850°C, 900°C, 950°C, 1000°C 退火，每次半小時，每次退火後量 P_{10} 及 P_{15} ，結果示如 I。II 及 III 的意義類推，唯溫度依次降低。文獻 [1] 中表 1 所表示的事實也就是 I 所表示的事實(但所用的試品是不同的)。第 1 號試品依次退火至 850°C 時的鐵心損失與第 3 號試品在 850°C 一次退火及第 2 號試品在 750°C 六次退火以後

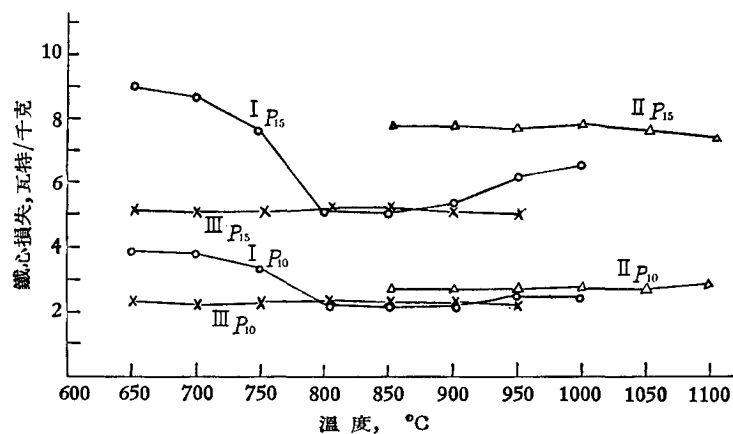


圖 3. 依次在不同溫度下退火半小時的鐵心損失

○, I——第 1 號試品, 溫度依次增高;
 △, II——第 5 號試品, 溫度依次減低;
 ×, III——第 4 號試品, 溫度依次減低。

的鐵心損失是一樣的。自高溫向低溫依次退火，鐵心損失不再降低。在 950°C 一次退火的結果與在 850°C 一次退火的結果相差不多。

以下列出一些數字，其中還包含若干圖 1，圖 2，圖 3 中未表明的實驗事實：第 1 號試品在最後一次 1000°C 退火後， $P_{10}=2.41$ ， $P_{15}=6.48$ ；再在 850°C 退火半小時，結果 $P_{10}=2.41$ ， $P_{15}=6.46$ ，未變。第 5 號試品在第一次 1100°C 退火後， $P_{10}=2.86$ ， $P_{15}=7.41$ ；第 7 號試品先在 1100°C 退火半小時，結果 $P_{10}=2.81$ ， $P_{15}=7.87$ ，基本上相同；第 7 號試品再在 850°C 退火半小時， $P_{10}=2.76$ ， $P_{15}=7.66$ ，大致未變。第 3 號試品在 850°C 退火半小時一次後， $P_{10}=2.16$ ， $P_{15}=4.90$ ；然後曾再在 850°C 退火 10 小時，結果 $P_{10}=2.24$ ， $P_{15}=5.50$ ，稍有增加。圖 1，圖 2，圖 3 中最低的 $P_{10}=2.12$ ，最低的 $P_{15}=4.90$ 。取在廠中已退火而作為成品的同類的矽鋼片用同樣方法測量其鐵心損失， $P_{10}=2.76$ ， $P_{15}=7.26$ ；再在我們實驗室以 850°C 退火一小時， $P_{10}=2.43$ ， $P_{15}=6.50$ ，有所改善。根據蘇聯國家標準 ГОСТ 802—41 中對 Э1А 的規定 ([9] 第 93 頁，[13] 第 371 頁，[14] 第 356 頁)， P_{10} 應不大於 3.3， P_{15} 應不大於 7.9¹⁾。

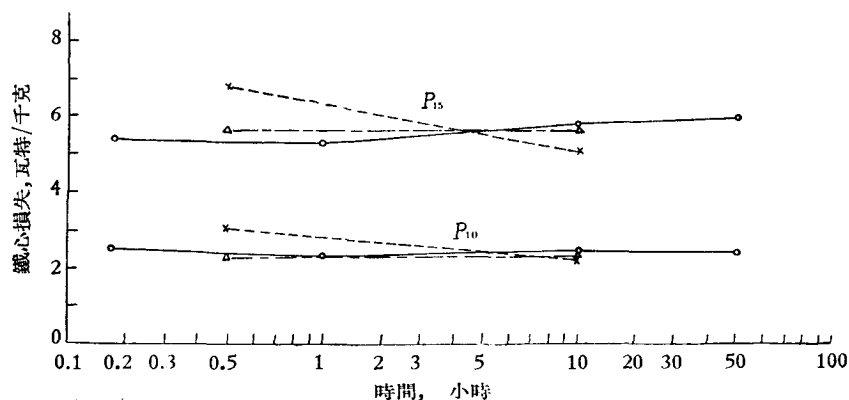


圖 4. 在不同溫度退火不同時間以後的鐵心損失

—○— 皆在 850°C 退火；
×..... 皆在 750°C 退火；
 ---△--- 皆在 950°C 退火。

II. 第二組試品

圖 4 示用第二組試品作實驗的結果。第 1 及 2 號試品皆在 750°C 分別退火 1/2 小時及 10 小時；第 3, 4, 5 及 6 號試品皆在 850°C 分別退火 10 分鐘，1 小

1) 校閱時註：蘇聯于 1954 年頒佈新標準 ГОСТ 802—54，原 Э1А 相當于新 Э11，鐵心損失規定未變。新標準見 Кифер, И. И. и Пантюшин, В. С., Испытания ферромагнитных материалов, Москва и Ленинград: Госэнергоиздат, 1955.

時, 10 小時及 50 小時;第 7 及 8 號試品皆在 950°C 分別退火 1/2 小時及 10 小時. 圖 4 表明: 在 850°C 退火 10 分鐘與退火 1 小時結果相差很有限, 退火 1 小時者稍較好, 退火 10 小時及 50 小時者較差; 在 750°C 退火 10 小時者與在 850°C 退火 1 小時者結果相仿; 在 950°C 退火 1/2 小時及 10 小時結果無大差異, 與在 850°C 退火 1 小時者比較, 結果相近但稍差. 圖 4 中最低鐵心損失的數值較圖 1, 2, 3 中最低鐵心損失的數值稍高, 即 $P_{10}=2.32$, $P_{15}=5.19$.

III. 實驗結果總結

實驗的結果可以歸納為:

1. 對於每一不同的最高溫度有不同的保溫時間, 相當超過此一時間的保溫對於成品的性能無甚影響, 超過太多有壞影響. 對於 850°C , 此一時間很短, 只約 1/2 小時; 對於 750°C , 此一時間可能長達 10 小時.

2. 在 $850-750^{\circ}\text{C}$ 或更低的溫度退火時, 調節保溫時間或再次退火可使成品的鐵心損失達到同一最低值. 在 950°C 以上的溫度退火時, 用實際上可能的調節保溫時間的方法或再次退火的方法都不能使成品的鐵心損失達到此最低值.

3. 前條所述的鐵心損失的最低值約為: $P_{10}=2.3$ 瓦特/千克, $P_{15}=5.2$ 瓦特/千克, 較 ГОСТ 802-41 中對 31A 規定的最高值低 30 %.

本文所述的實驗結果對於生產可能有的意義是明顯的. 對於國產低矽矽鋼片, 本文實驗結果指出: 退火溫度在 $750-900^{\circ}\text{C}$ 的範圍內都是可用的, 但須配合適當的保溫時間, 750°C 退火 10 小時的效果相當於 850°C 退火 1/2 小時. 如果產品質量不良且又斷定原因為退火溫度低於 850°C , 則可再次退火以作補救; 如果產品質量不良且又斷定原因為退火溫度遠超過 850°C , 則再次退火也是不能補救的. 生產現場用連續式退火爐所進行的退火, 通常時間非常長. ([6] 中也有記載). 似可參考本文的數據適當試驗縮短生產上的退火時間. 如果時間得以縮短, 則設備使用率可以提高而收到增加生產降低成本的效果. 而且, 生產方面存在着雖僅從退火着手亦能提高質量的可能性, 使其鐵心損失降為只約 ГОСТ 802-41 對 31A 規定的最高值的 70 %.

本文所述實驗工作的具體操作的很大一部分由在應用物理研究所實習的某鋼鐵廠的技術人員胡昌琦、李松二位同志完成; 他們在學習及操作過程中得到應用物理研究所朱硯磐同志不少幫助.

參 考 文 獻

- [1] 向仁生、朱硯蓉，對於國產矽鋼片試製品的試驗工作，1954 年金屬研究工作報告會會刊（科學出版社出版，1955），第五冊，37—48。
- [2] Yensen, T. D., Magnetic properties of the ternary alloys Fe-Si-C, *Trans. Am. Inst. Elec. Eng.* **43** (1924), 145—175.
- [3] Cazaud, R., Le recuit des tôles utilisées dans la construction électrique, *Rev. de Mét. Mém.* **21** (1924), 473—483.
- [4] von Moos, M., W. Oertel u. R. Scherer, Glühversuche zur Verbesserung von Transformatorenblechen, *Stahl u. Eisen*, **48** (1928), 477—485.
- [5] Pomp, A., u. L. Walther, Technologische Studien über das Blankglühen von Stahl im elektrische Ofen, *Mitt. K.-W. Inst. f. Eisenforschung*, **11** (1929), 15—30.
- [6] 湯川正夫、佐々木正三、牧田利徳，珪素鋼板の材質向上に關する研究（關於矽鋼片質量改進的研究），製鐵研究，No. 171 (1939), 183—208; No. 172 (1939), 209—220.
- [7] Bozorth, R. M., Ferromagnetism, New York: Van Nostrand Co., 1951.
- [8] Вонсовский, С. В. и Шур, Я. С., Ферромагнетизм, Москва и Ленинград: Гостехиздат, 1948.
- [9] Займовский, А. С. и Усов, В. В., Металлы и сплавы в электротехнике, Москва и Ленинград: Госэнергоиздат, 1949.
- [10] Pölguter, F., Dynamostähle, Verein deutsche Eisenhüttenleute, Werkstoff-Handbuch Stahl und Eisen, O—61, Oktober, 1927.
- [11] Greiner, E. S., Marsh, J. S. and Stoughton, B., The Alloys of Iron and Silicon, New York and London: McGraw-Hill Book Co., 1933.
- [12] 戴禮智，磁性材料，初版，商務印書館出版，1948。
- [13] Дроздов, Н. Г. и др., Электроматериаловедение, Москва и Ленинград: Госэнергоиздат, 1954.
- [14] Богородицкий, Н. П. 等著，甘明道譯，電工材料，龍門聯合書局出版，1953。

THE ANNEALING CONDITION OF DOMESTICALLY PRODUCED LOW SILICON STEEL SHEETS

HSIANG JEN-SEN

(Institute of Applied Physics, Academia Sinica)

ABSTRACT

For the purpose of supplying useful information to manufacturing organizations, and of systematically examining the effects of temperature and time of annealing on the domestically produced low silicon steel electrical sheets, a series of experiments has been performed. The results show that the lowest obtainable values of core loss of samples box-annealed in its own atmosphere are approximately $P_{10}=2.3$ watt/kg, $P_{15}=5.2$ watt/kg, 30% lower than the permissible values set in ГОСТ 802-41 for Э1А.