

# 炼钢文集

变压器鋼生产

3

冶金工业出版社

# 煉鋼文集

变压器鋼生产

[ 3 ]

冶金工业出版社

煉 鋼 文 集

變壓器生產〔3〕

編輯：杜華云 設計：朱駿英 校對：徐雲

冶金工業出版社出版（北京市燈市口甲45號）

北京市書刊出版業營業許可證出字第093號

北京市通州區印刷廠印 新華書店發行

1959年7月第一版

1959年7月 北京第一次印刷

印數 2,010 冊

開本850×1168 · 1/32 · 130,000字 ·

印張5 4/32 ·

統一書號 15062·1641

定價0.65元

## 出版者的話

变压器鋼是电机工业中的主要原料。随着大跃进形势的發展，国内变压器鋼的生产也日益广泛。为了满足广大变压器鋼生产技術人員的需要，我們从近几年来的外国杂志上选譯了13篇文章（其中第一篇系譯自Г. М. 波罗杜林和B. Г. 斯別朗斯基所著“变压器鋼在电爐中的生产”一書）編成本書出版。

書中除介紹了有关变压器鋼的冶煉操作技術外，还列有关于变压器鋼的加工及金相热处理方面的文章，可供从事变压器鋼的生产技術人員作参考用。

## 目 录

|                           |     |
|---------------------------|-----|
| 变压器鋼在电爐中的生产.....          | 1   |
| 变压器鋼的冶煉.....              | 46  |
| 真空熔煉变压器鋼.....             | 76  |
| 用混合平爐和电爐鋼水的方法煉制变压器鋼.....  | 89  |
| 变压器鋼的冶煉过程.....            | 93  |
| 生产变压器鋼(3320)的經驗 .....     | 96  |
| 变压器鋼的爐外去硫过程.....          | 101 |
| 变压器鋼在盛鋼桶中的脫硫过程.....       | 105 |
| 有关冷軋变压器鋼的生产問題.....        | 111 |
| 冷軋变压器鋼的生产.....            | 116 |
| 冷軋变压器鋼的塑性.....            | 122 |
| 几种工艺因素对冷軋变压器鋼电磁性能的影响..... | 129 |
| 連續澆注变压器砂鋼質量的研究.....       | 142 |

## 变压器鋼在电爐中的生产

Г. М. 波罗杜林 著  
B. Г. 斯別朗斯基

### 一、对变压器鋼的要求

变压器鋼在用交流电时的反复磁化損失。及渦流損失应尽可能的低，这些損失的总和称單位（瓦特）損失，其測量單位为每一公斤变压器鋼上的瓦特数。

鋼应具有最低的矯頑力和最低的导电性，因为矯頑力在很大程度上决定着單位損失大小，而导电性的提高会增加渦流損失。

圖 1 是說明單位損失  $P_{10}$  的大小（瓦特/公斤）与矯頑力  $H_c$ （奧斯特）之間的关系的圖表[1]。

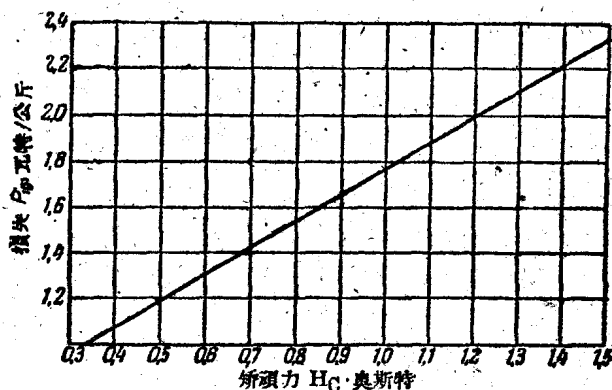


圖 1 單位損失  $P_{10}$  与矯頑力之間的关系

鋼在化学成份及物理状态方面应滿足一定的要求，使矽鋼片具有上述的电磁性能。

1. 碳含量要最低。大家知道，以碳化铁形式存在的碳会大大提高矫顽力，因而也将提高单位损失。

2. 粗晶組織。晶粒尺寸变大时，其总的晶粒界缩短了，结果降低了单位损失。

3. 鋼在非金屬夹杂物方面应最純。夹杂物位于晶粒界，会降低鋼的磁导率。因此，必須特別注意降低鋼中氧与硫的含量，氧与硫是生成氧化物及硫化物非金屬夹杂物的主要元素。

4. 鋼的除气程度要高，特別是氫与氮。根据現有資料，鋼中氫由0.0010%上升到0.0035%，單位損失就增加0.05瓦特/公斤[2]。

5. 生成碳化物的元素如鉻、錳及錒的含量要最低，因为它们会增加鋼的矫顽力。

在以上提到的这些化学元素中，对單位損失害处最大的是碳，其次是硫。

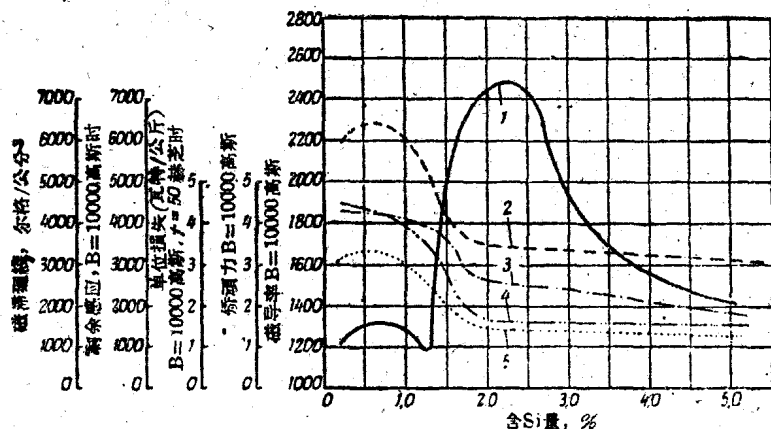


圖2 矽对軟鉄磁性的影响

1—磁导率, 2—剩磁感应, 3—單位損失,

4—磁滞回线, 5—矯頑力

通常用含矽軟鐵（含2.5~4.5%Si）制造变压器鉄心。矽鉄的特点是在磁化强度良好、矯頑力小和單位損失低的情况下具有低的导电性。

圖2是說明軟鋼磁性性能与軟鋼矽含量之間的关系的圖表〔3〕。随着矽含量的增加（約从1.25%开始）磁导率迅速上升，在矽为2.25%时达到最高值，以后开始降低。但与此同时，磁滞迴綫損失、矯頑力及总的單位損失也繼續降低。

热轧变压器鋼的矽含量波动范围很大，依照国家标准 802—54，它的含量（%）如下：

低合金鋼……………0.8~1.8

中合金鋼……………高于1.8~2.8

較高的合金鋼……………高于2.8~4.0

高合金鋼……………高于4.0~4.8

冷軟变压器鋼的矽含量为2.5~3.5%。

下面仅討論电爐熔煉变压器鋼的工艺。平爐鋼指标的列入仅作参考。

## 二、电爐熔煉变压器鋼的工艺

变压器鋼通常在容量較小的电弧爐內熔煉，因为鋼中的矽必須分布均匀。鋼的成份越均匀，它的电工性能就越高。整个熔池体积具有相同的溫度也有很重要的意义。当采用容量大的电弧爐时，最好設置电磁攪拌設備以达到上述条件。保証金屬成份均匀的另一種方法是倒桶法。这种方法常用于大平爐煉鋼时。采用倒桶法治煉变压器鋼时需要两个盛鋼桶，有时甚至要三个〔2, 4〕。这时在平爐內煉出工业純鉄，倒入第一盛鋼桶。再从第一盛鋼桶通过陶塞座流入第二盛鋼桶，在第二盛鋼桶的底部放有經過預热的矽鉄。出現渣膜时倒桶应停止，渣膜不应进入第二盛鋼桶。在



第二盛鋼桶中鋼水靜置20~25分鐘，直到矽鉄全部溶解。以后鋼水經過流咀倒入第三盛鋼桶，由第三盛鋼桶注入鋼錠模。

有时在电爐中煉变压器鋼时也采用倒桶法。

倒桶法的主要目的是使矽在整个熔池体积中分布均匀，并能充分利用它来进行鋼水脫氧和去硫。

下面介紹在二十吨电弧爐內熔煉变压器鋼的工艺，爐子沒有攪拌設備。

电弧爐（圖3）为着以下的主要参数及規程：

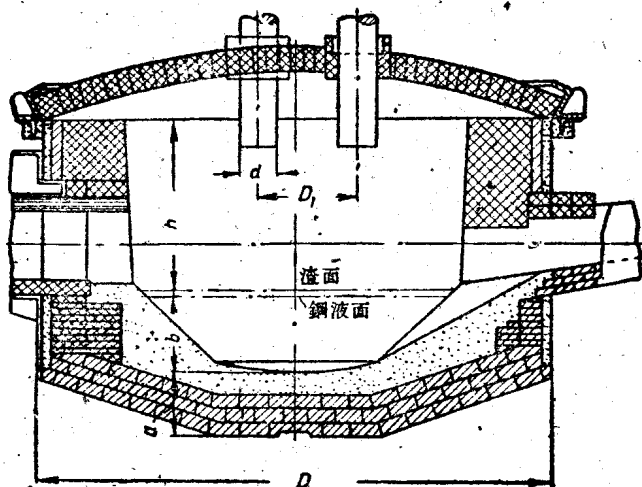


圖3 20吨三相电弧爐剖面草圖

額定容量，吨..... 20

实际裝料量，吨..... 25

爐壳直徑D，公厘.....4500

爐膛高度h，公厘.....1795

爐底厚度a，公厘..... 740

熔池深度b 公厘.....660

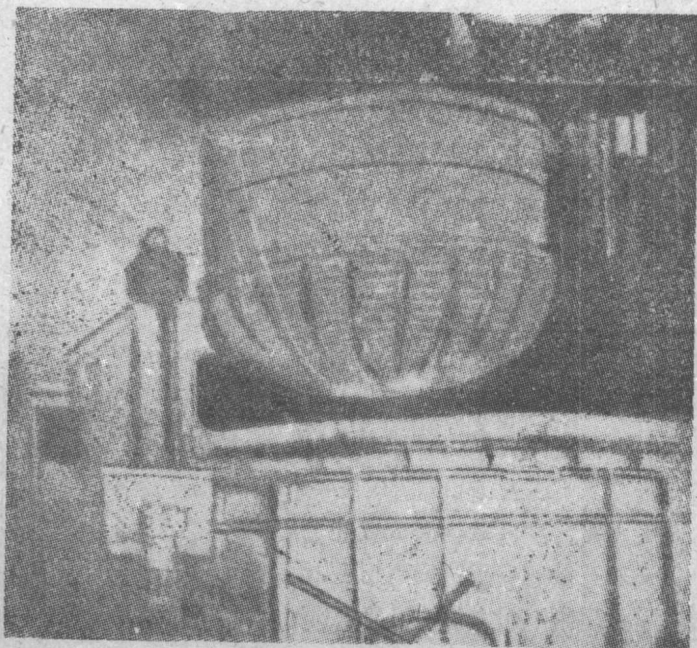


圖 4 电弧爐用裝料罐裝料

電極直徑 $d$ ，公厘.....400

電極心圓直徑 $D_1$ ，公厘..... 1400

變壓器功率，仟伏安.....6000

低壓級數，伏特 225, 198, 148, 128和114

利用裝料罐進行頂裝（圖 4）。

爐子設有爐身傾動機械，轉動範圍為離標準位置 $\pm 37^\circ$ 。有了傾動機械可減輕修補爐底的工作，避免了在熔化期產生局部過熱，這在熔煉低碳鋼時特別重要，而變壓器鋼是屬於低碳鋼的。

依照工廠採用的技術條件，製造冷軋變壓器鋼板的鋼錠應具有如下的化學成份： $\leq 0.05\%C$ ； $2.9\sim 3.3\%Si$ ； $\leq 0.20\%Mn$ ；

$\leq 0.010\%S$ ;  $\leq 0.015\%P$ ;  $\leq 0.15\%eu$ ;  $\leq 0.15\%Ni$ ;  $er$  为痕迹。

應該指出，这一化学成份是在工厂尚未掌握真空处理（鋼桶中，澆注前）工艺前就已确定的，这就說明为什么容許鋼錠中碳与硫有較高的含量。

## 原 材 料

含有少量磷，特别是硫的最純的碳鋼返回料，或平爐低碳鋼的軋制切边（ $\leq 0.25\%C$ ;  $\leq 0.30\%Si$ ;  $0.35\sim 0.65\%Mn$ ;  $\leq 0.040\%S$ 及 $0.050\%P$ ），都可用来作为熔煉变压器鋼的原料。在許多工厂中，变压器鋼的熔煉工艺規程規定在第一个試样中（爐料熔化后）最大硫含量不超过 $0.030\sim 0.035\%$ 。当第一个試样中硫含量較高时，該爐鋼用来煉成其它鋼种。

在大部分熔煉变压器鋼的工厂中，配爐料都是从这样的計算出發，熔化后鋼中碳含量不低于 $0.30\%$ 。若用低碳返回鋼作为爐料，則为了获得这一碳含量需在爐料中加入电极碎塊。鑄鉄与焦炭不适于这一用途，因为他們含硫很高（在鑄鉄中尚有磷）。

石灰應該是新焙燒的，从石灰焙燒爐出来后的耽擱時間不应超过一晝夜。鉄矿、螢石及鉄合金在熔化前都必須烤透，以免由于其中的水份而往熔池中帶入氫气。

在挑选螢石时必须仔細地观察每塊螢石，把黃鉄矿杂质挑出去，黃鉄矿杂质有时含有 $50\%S$ 。根据同一理由在爐料中只容許采用塊状螢石，細小的螢石碎粒在熔煉变压器鋼时是不用的，因为实际上在这种情况下黃鉄矿杂质是挑不出去的。

表1~3是用于熔煉变压器鋼的廢鋼（板坯切边）、鉄矿及螢石的化学成份。

板坯切边的大致的化学成份

表 1

| 鋼 号   | 化 学 成 份 (%) |           |           |        |        |
|-------|-------------|-----------|-----------|--------|--------|
|       | C           | Si        | Mn        | S      | P      |
| 3号沸腾鋼 | 0.14~0.22   | 痕 迹       | 0.40~0.65 | ≤0.050 | ≤0.050 |
| 3号镇静鋼 | 0.14~0.22   | 0.12~0.30 | 0.40~0.65 | ≤0.050 | ≤0.050 |

铁矿石的化学成份

表 2

| 铁 矿 石 名 称 | 化 学 成 份 (%) |      |       |      |                  |                                |     |     |
|-----------|-------------|------|-------|------|------------------|--------------------------------|-----|-----|
|           | Fe          | Mn   | P     | S    | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO | MgO |
| 克里沃洛格     | 64.0        | 0.06 | 0.028 | 0.09 | 5.5              | 0.8                            | 0.3 | 0.1 |
| 馬格尼托哥尔斯克  | 64.0        | 0.03 | 0.03  | 0.02 | 4.0              | 2.0                            | 0.7 | 0.2 |

螢石的成份 (国家标准7618—55)

表 3

| 牌 号  | 化 学 成 份 (%)          |                    |                   |                  |
|------|----------------------|--------------------|-------------------|------------------|
|      | CaF <sub>2</sub> 不少于 | SiO <sub>2</sub>   | CaCO <sub>3</sub> | H <sub>2</sub> O |
|      |                      | 不 大 于              |                   |                  |
| Φ—92 | 92.0                 | 3.0                | 3.0               | 1.0              |
| Φ—85 | 85.0                 | 由 协 商 规 定 之<br>同 上 |                   |                  |
| Φ—75 | 75.0                 |                    |                   |                  |

## 氧化期

变压器鋼熔煉的氧化期明显地分为两个步骤：去磷与去硫—沸腾。

氧化初期熔池的低溫、鋼水的氧化度及爐渣的較高碱度，都

能促使順利地去磷。

为了更完全地使鋼水去磷，在爐料一熔化并取出相应的試样后，立刻扒去約75%的渣，加入鉄矿、石灰及螢石。当熔池中磷为0.015%，碳降至0.15%时，第二次扒渣（也約为75%），后加入石灰与螢石組成的混合料，其量为金屬爐料重量的1.5~2.0%，繼續用鉄矿石氧化熔池，直到鋼水中含磷不超过0.010%为止。达到这一含磷量后可以認為去磷已結束，随后往熔池中送氧以去硫。当仅用一种鉄矿石时，实际上几乎不可能使鋼水中碳含量降至0.015~0.020%。只有采用氧气后这才成为可能。通常氧气是在加入一定量的矿石后送入的。熔池吹氧后，金屬溫度大大升高，因而使去硫过程进行得更完全。

在氧化末期，当碳含量約为0.02%、磷低于0.010%、錳低于0.09%时，扒去全部爐渣。这一步必須做得特別仔細，以免在以后的精煉期磷与錳 $\alpha$ 从殘剩的爐渣中还原出来。

一般在爐料熔化后鋼水中碳含量为0.30~0.40%，因此氧化期第一期用鉄矿石对熔池脫碳的速度（表4）与中碳合金結構鋼

用矿石氧化变压器鋼熔池时的脫碳速度

表 4

| 碳每小时的燃燒速度<br>(%) | 熔 煉 爐 数 | %     |
|------------------|---------|-------|
| $\leq 0.30$      | 10      | 4.5   |
| 0.31~0.40        | 33      | 14.9  |
| 0.41~0.60        | 80      | 36.4  |
| 0.61~0.80        | 58      | 26.1  |
| $> 0.80$         | 40      | 18.1  |
| 总 共              | 221     | 100.0 |

的一般脫碳速度很少有區別。鋼水用氧脫碳時，碳的燃燒速度在氧化第二期比用鐵礦石脫碳時的速度略低些（表5）。這是由於用氧氣氧化鋼水是在鋼水含碳量很低（小於0.10%）的情況下進行的。

為了要在真空下處理鋼水，出鋼溫度要較一般熔煉時為高，因為在真空處理過程中，盛鋼桶中鋼水的溫度大大下降（約下降40°C）。

用氧氣氧化變壓器鋼熔池時的脫碳速度 表5

| 碳每小時的燃燒速度。<br>(%) | 熔 煉 爐 數 | %     |
|-------------------|---------|-------|
| ≤0.10             | 20      | 9.1   |
| 0.11~0.30         | 98      | 44.4  |
| 0.31~0.50         | 44      | 19.9  |
| 0.51~0.70         | 18      | 8.1   |
| >0.70             | 41      | 18.5  |
| 總 共               | 221     | 100.0 |

圖5表示在盛鋼桶中真空處理和未經真空處理的各爐氧化末期含碳的情況。

由這些數據看出，出鋼後未經真空處理的鋼，在氧化末期碳含量較高。這是由於為避免鋼水吸氣和在澆注以後鋼錠上漲，熔煉溫度較低的緣故。此時，90%的爐鋼含碳在0.04—0.05%範圍內。如果此爐須在盛鋼桶中進行真空處理以除去氣體，那末就可以在較高溫度下進行熔煉，鋼中氣碳量可以較高。在這種情況下，90%的砂鋼沸騰完了時含碳不超過0.03%。

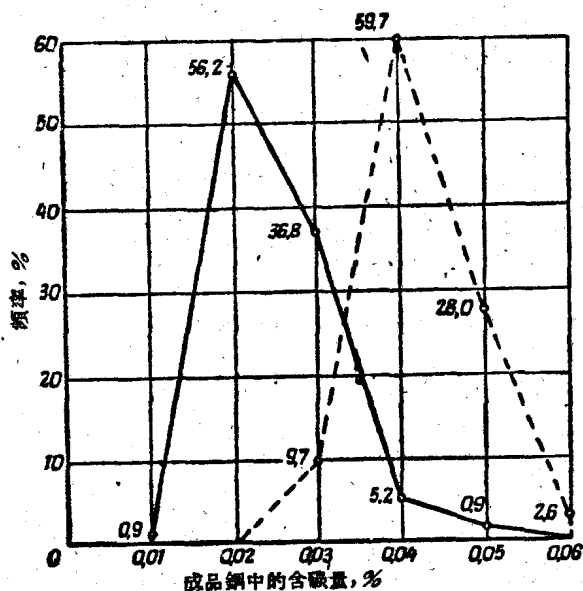


圖5 經過真空處理(實線)和未經真空處理(虛線)的變壓器鋼的含碳量

表6列有由用礦石氧化鋼水改為用氧吹煉時各爐的含碳量。這種轉變最好是在含碳量約0.10%時進行。

一般，氧化期必須氧化0.3—0.4% C，但是因為技術規程上對碳的含量沒有規定上限，則熔化了時，含碳是很高（0.5—0.6%），這樣就使得氧化期延長了。以後，熔化末期碳的含量規定為0.3—0.4%。

表7引列了工廠初期生產變壓器鋼時沸騰過程中各爐氧化之碳量。

由用矿石氧化鋼水改为用氧气氧化鋼水时  
变压器鋼中的碳含量

表 6

| 碳 含 量 (%)   | 爐 数 | %    |
|-------------|-----|------|
| $\leq 0.10$ | 125 | 57.0 |
| 0.11—0.15   | 77  | 35.2 |
| $> 0.15$    | 17  | 7.8  |
| 总 共         | 219 | 100  |

各爐变压器鋼按氧化的碳量

表 7

| 燃燒掉的碳 (%)   | 爐 数 | %    |
|-------------|-----|------|
| $\leq 0.25$ | 20  | 9.2  |
| 0.26—0.40   | 88  | 40.1 |
| 0.41—0.50   | 46  | 21.0 |
| 0.51—0.60   | 36  | 16.4 |
| $> 0.60$    | 29  | 13.3 |
| 总 共         | 219 | 100  |

熔煉变压器鋼时，延長氧化期特別不利，因为，此时鋼中的气体饱和度将会增高。

表 8 列有熔煉变压器鋼各爐的氧化期時間（包括扒去最后一次渣須要10分鐘）。

表 9 列有各爐用矿石氧化和用氧气氧化的時間。由这些数据看出，用氧吹煉所需的時間不長，75%以上的爐鋼用氧吹煉的時間均不超过30分鐘。用矿石氧化所需的時間較長，大部分爐鋼用矿



石氧化的時間由30到60分鐘。

各爐氧化期的時間

表 8

| 氧化期時間<br>(小時一分) | 爐 數 | %     |
|-----------------|-----|-------|
| ≤ 1-00          | 22  | 10.0  |
| 1-01到1-20       | 106 | 48.1  |
| 1-21到1-40       | 67  | 30.5  |
| 1-41到2-00       | 20  | 9.1   |
| > 2-00          | 5   | 2.3   |
| 总 共             | 220 | 100.0 |

用矿石和用氧氣氧化的時間

表 9

| 氧化時間<br>(分) | 用 矿 石 氧 化 |       | 用 氧 氣 氧 化 |       |
|-------------|-----------|-------|-----------|-------|
|             | 爐 數       | %     | 爐 數       | %     |
| ≤ 20        | 4         | 1.9   | 94        | 43.9  |
| 21~30       | 24        | 11.2  | 68        | 31.8  |
| 31~40       | 57        | 26.6  | 33        | 15.3  |
| 41~50       | 66        | 30.7  | 18        | 8.5   |
| 51~60       | 39        | 18.3  | 1         | 0.5   |
| 61~75       | 20        | 9.4   | —         | —     |
| 76~90       | 4         | 1.9   | —         | —     |
| 总 共         | 214       | 100.0 | 214       | 100.0 |

上面已經指出，單用矿石氧化鋼水（不吹氧）時，要得到低碳鋼（~0.02%）很困難，並且氧化期會延長。用很純潔的原材料