

# 學冶金鐵非

編等奇文張

251

440  
10  
1



行印局書合聯門龍

## 序 言

在進行新教學的過程中，中文教材的編著，是一件極重要的工作，冶金方面的中文教材卻是寥若晨星，我在執教十多年的時間裏，常想將一些講義編著成冊，供作教本，但一直未能進行；到去年在新教育政策的指導下，在諸位教授同學討論後，才決心共同來完成這個願望。

這本教材是以科學的方法，介紹了主要非鐵金屬的冶煉理論和技術，它的內容力求精簡，並且竭力使適合於國內大學的冶金教材，在這裏面包括着銅、鉛、鋅、金、銀、鎳、錳、鋁、鎂、鈾、鎢、鎘、錒、錒等一般的冶煉方法，我們選擇了這些是鑒於它們是非鐵金屬裏最重要的幾種，它們的冶煉方法可為其他各種金屬冶煉的借鏡。今後鋁和鎂的冶煉工業有極大的發展前途，具有放射性的鈾已為舉世所矚目，鎢，鎘，錒為我國主要的金屬礦產，所以這些都特別詳盡的作了介紹。

本書內容，除盡量搜集各國先進理論及技術外，並將國內非鐵金屬工業情形及冶煉方法詳細介紹，便在學習中能夠更密切的聯繫實際，對祖國冶金工業的發展更具信心，提高學習效率與興趣。

在工作的進行中我們分步驟地來搜集資料，而後彙纂成冊，但是由於各方面對此項教材的急需，我們想提早出版，因此沒有很好的來嚴剔精梳，一再修改；其中當有不少掛漏或錯誤之處，希望大家隨時提供意見和批評，使本書於再版時內容能更趨完善。

本書之得以出版曾受到國內冶煉機關，其他學校及本校負責同志的極大鼓勵和幫助，特此一併致謝。

張 文 奇

一九五一年國慶日

## 目 錄

|      |    |     |
|------|----|-----|
| 第一章  | 緒論 | 1   |
| 第二章  | 銅  | 24  |
| 第三章  | 鉛  | 134 |
| 第四章  | 鋅  | 158 |
| 第五章  | 鋁  | 207 |
| 第六章  | 鎂  | 246 |
| 第七章  | 錫  | 268 |
| 第八章  | 銻  | 284 |
| 第九章  | 鎢  | 306 |
| 第十章  | 金  | 325 |
| 第十一章 | 銀  | 347 |
| 第十二章 | 錳  | 360 |
| 第十三章 | 鎳  | 366 |
| 第十四章 | 鈷  | 378 |

# 第一章 緒 論

§1 冶金學的定義及領域 所謂冶金學，就是很經濟地從礦石中提取金屬，同時使這些金屬適合於人類利用的一種工藝 (art) 和科學 (science)。例如將有價值的礦石同礦渣 (gangue) 分開，和金屬的熔煉 (smelting)，精煉 (refining) 及加工 (working) 等操作方法及原理都是屬於冶金學範圍之內的。所以冶金學所研究的是如何將化學和物理學上的原理，應用到礦石的富集，金屬的提煉，淨煉 (purification)，加工及合金製作上，來完成任務和滿足我們的需要。

冶金學本身通常區分為如下的兩大領域：

(一) 生產 (productive)，提取 (extractive)，或化學 (chemical) 冶金，包括：

(A) 選礦 (ore dressing) 或礦砂富集法 (concentration)。

(B) 火冶法 (pyrometallurgy) 或熔煉法。

(C) 溼法冶金 (hydrometallurgy) 或溶濾法 (leaching)。

(D) 電冶法 (electrometallurgy)：

(a) 電解 (electrolytic) 法。

(b) 電熱 (electrothermic) 法。

(二) 物理冶金 (physical metallurgy)，包括：

(A) 金相學 (metallography) 及熱處理 (heat treatment)。

(B) X 光檢驗。

(C) 物理檢驗 (physical testing)。

(D) 金屬腐蝕學 (corrosion and protective coating)。

(E) 金屬的機械加工 (mechanical working)。

因為本書只討論一些非鐵屬金屬 (nonferrous metal) 的提煉問題，所以在此我們只能解釋一些與本題有關的名詞 (屬於上述第一項

的)如下:

所謂選礦或礦砂的富集,就是將礦石中的礦渣和有害的雜質分出,如是我們能夠“有利的”從這種選過的,或富集過的礦砂中提煉金屬。

所謂火冶或熔煉,就是利用燃料燃燒後放出的熱和燃燒生成物的化學作用來還元礦砂中的金屬。

所謂濕法冶金或溶濾法,就是利用化學藥劑的水溶液來溶解礦砂中的金屬化合物,然後再用電解法或沉澱法將溶液中的金屬提取出來。

所謂電冶,就是利用電流通過溶液時發生的電解作用,或是利用電流通過熔體(fused mass)時發生的高熱作用,使溶液或熔體中的金屬還元出來。

**§2 金屬** 金屬是一種元素物質,其氧化物及氫氧化物大都呈鹼性作用,同時還具有一些特殊性質,如硬度(hardness),強度(strength),韌性,光澤,結晶,電解時離子帶陽電,密度大和能夠延展等等。雖然過去我們曾經應用各種新式的工具,如X光和電子顯微鏡(electron microscope)等來研究金屬,因而獲得了不少關於金屬性質方面的知識。但是對於金屬的內部組織形態,以及這種組織形態與各種特性間的關係還沒有很恰當的解釋。

結晶形態為一切金屬共有的性質。金屬的晶體是由浸沉於陰電子氣氛中的陽離子組成。由於陽離子與陰電子互相吸引的結果,因而使晶體組織非常緊密,同時使離子與離子間,及電子與電子間互相排斥的力量達到平衡。電子能在結晶格體(lattice)間自由的運動,因此使金屬具有很好的導電度(electrical conductivity)和導熱度(thermal conductivity)。在無定形物質(氣體,液體和許多固體)裏面的原子是或多或少能自由移動的,每一原子無論在什麼時候都不能與其鄰近的原子保有一種特殊的關係;在這種情形下的原子是運動不息的,不受拘束的,它們之間的關係也是雜亂無章的,結果由這種原子構成的物質便缺乏結合力(coherence),強度(strength)和剛性(rigidity)。此外這種內部組織無規則的物質沿各種方向都具有一樣的性質,而金屬則

因方向不同而具有不同的性質。用電解沉積法(electro-deposition),我們可能製出無定形或極近似無定形狀態的金屬。Bridgman 曾經使某些金屬受極度的扭力作用,因而使其中的結晶組織幾乎全被破壞磨光的金屬表面,因受極度磨擦作用的結果,也往往呈無定形。Banett 認為在這些情形下,金屬可能具有極其細小的結晶粒子。

在足夠的溫度下,金屬都能熔化成液體。如果從液態金屬中繼續不斷的抽出熱量,則其組成分子的擺動度(extent of vibration)和擺動速度(rapidity of vibration)也會逐漸的降低,俟達到某一定的溫度(金屬的凝固點)後,分子即自動排列成相互間都具有—相當固定的位置,這些位置,事實上就是擺動的中心(centers of oscillation)。此時氣態和液態具有的那種不規則的狀態雖已消失,但是當金屬變成固態以後,分子的各種運動仍然不會停止。有時往往要把液態金屬的溫度降低到它的凝固點以下,方能使它很快的完全結晶,這種現象叫做“過度冷卻(supercooling)”。

有些金屬能與他種金屬組成一種或多種化合物(intermetallic compounds,例如  $\text{Fe}_3\text{C}$ ,  $\text{NaZn}_{11}$ ,  $\text{Mg}_2\text{Sn}$ ,  $\text{Cu}_3\text{P}$  等);此種化合物的形成,對於使合金能具備優良的性質一點來說,是有很大的益處的。如此形成的這種“中間的相(intermediate phases)”介乎理想的固體溶液(ideal solid solution)和真化合物(true chemical compounds)之間。事實上一種簡單的合金,在高溫之下可能與真的固體溶液相似,但在低溫下則可能與化合物相似。

固態金屬的內部組織是一種有規則的結晶組織,而氣態金屬內部則呈一種極混亂的狀態;致於液態金屬的內部狀態係介乎固態和氣態中間的一種形態,根據用 X 光研究所得的結果,是相當奇特的,既不像晶體組織那樣整齊,也不像氣體那樣混亂,很像一些鋼球裝在一只被擾動的箱子裏面的情形一樣。

在冶金學上,我們將金屬分成初生金屬(primary metals)和次生金屬(secondary metals);前者是從礦石直接提煉出來的,而後者則是

從熔煉金屬廢料(scrap)帶來的。

**§3 礦石(ore)** 所謂礦石就是自然界產生的礦物聚合體(aggregate of minerals)或礦物組合體(combination of minerals),從這種礦物聚合體我們能夠“有利的”提取出一種或多種金屬或礦物。此地所指出的“有利的”三字是非常重要的,因為一種礦物組合體是否能被用作礦石,要看下列各點來作決定:

1. 礦石中所含“有價值金屬(valuable metal)”的百分數。
2. 金屬在礦石中的存在形式(氧化物,硫化物或碲化物)。
3. 雜質在礦石中的存在情形;容易或不容易去掉? 如果不容易去掉,會不會使煉出的金屬產生不好的性質?
4. 礦石的物理狀態(水分,泥土等成分的多寡)。
5. 礦床的位置和性質。
6. 礦區和運輸系統的聯絡是否方便?
7. 煉出的金屬與其他商品在價格水準上的比較。

美國現在用以煉鐵的礦石含鐵量都在50%以上,所以有許多含鐵25%(成氧化鐵存在)的岩石在“目前”都不被視作“礦石”;但在英國和德國則不同,含鐵僅35%的礦石也加以提煉,這必須看情形來作決定,如果沒有富礦,則只有想辦法將貧礦富集以便達到提煉的目的。

銅有時成自然銅存在於岩石中,其提煉比較簡單,只要在倒焰爐(reverberatory furnace)裏加入礦石和適當分量的熔劑熔煉之,即能很快的,很容易的,很便宜的得到相當純淨的銅。但有時卻成硫化物與多量的硫化鐵和相當分量的砷,銻,金,銀等礦物共生。在提煉時要把主要金屬(銅)提出,將有害的雜質去掉,同時還要把有價值的副產收回,所以較單純的熔煉一種自然金屬礦石要複雜,並且耗費較多的成本。

礦石的物理狀態也能影響它的價值。例如處理一種乾淨的,大粒的鐵礦砂與處理一種參雜着泥土或一種細粒的鐵礦砂,或者處理一種凍結的富集礦砂或含相當分量的水,油質,無機鹽等的富集礦砂相比較,顯然是難易不同的兩回事。

礦床的位置對於決定一種礦石是否值得提煉，也是一個很重要的因素。例如美國猶太州(Utah)的巨大銅礦床，雖然平均只含銅約0.9%，金、銀含量也很低（每噸15分），但已經“有利的”開採和提煉了多年；反之，美洲中部的銅礦床，雖含銅平均在3%以上，但因為該地雨量太多，使建設進行困難並且昂貴，同時沒有鐵路和海岸聯絡，礦床小而又不規則，所以對於這個礦藏的開發，迄今尚被認為是無利可圖的事情。

礦藏量的是否豐富，也極其重要。因為建立一所大的新式冶煉廠，必須要先付出一筆巨額的資金。如果沒有足夠的礦砂以供數年或數十年的熔煉，是一件得不償失的事情。例如美洲中部的銅礦床，含銅成分雖然相當高，僅僅礦藏量太小一個因素，就可決定它無開發的價值。

在決定一種礦石是否值得提煉的時候，必須要考慮到提煉出來的金屬的價格水準。在第二次大戰以前的二十年中，銅的價格大致保持在每磅16分美金左右；如果保持銅與其他商品間的關係不變，則銅在今天的價格，每磅至少要30分美金，但實際上只值19.5分美金。高級礦砂和廉價勞動力的容易獲得，次生金屬生產量的增加，冶煉技術上的改進等，都能使金屬的價值貶低。

**§4 礦渣(gangue)** 所謂礦渣，就是礦石中所含的沒有經濟價值的廢石。通常所指的礦渣如石灰石(limestone)，石英砂岩(quartzite)，頁岩(shale)，石英斑岩(porphry)或礫岩(conglomerate)也是一種礦物聚合體。礦渣為組成礦石的絕大部份，以致常常使礦石中“貴重礦物”的成分過度稀薄，並且可能具有妨礙熔煉的性質，如果在熔煉之先不把它們除去掉，往往會增加熔煉工作的困難或增高成本。通常都先用富集選礦法和浮沫選礦法(flotation)，將礦石分成富砂(concentrate)和尾砂(tailing)，然後才能夠“有利的”從富砂中提煉出金屬來。因此提煉貧礦是一件相當複雜和不經濟的工作。不過如果有廉價的勞動力，電力，燃料等的供應，同時又能產生相當分量“有價值的”副產品時，則雖是一種低級礦石，也是值得熔煉的。

**§5 礦石的分類** 根據冶金學觀點，天然礦石可分為三大類，即

(一) 含自然金屬的礦石(native ore), (二) 氧化物礦石(oxide ore), 和 (三) 硫化物礦石(sulfide ore), 茲分述於下:

(一) 含自然金屬的礦石——因為金屬極容易與氧和硫化合, 所以在天然礦石中絕大部分的金屬都是成氧化物或硫化物存在, 很少成純淨的金屬狀態存在的。含自然金屬的礦石最常見的有自然銀, 自然金, 自然銅和自然鉑等; 此外如自然汞和自然錫雖然也有發現, 但這在礦物中可能是極稀有的東西。

如美國上密西根(Upper Michigan)州的大銅礦, 就是一種產生在礫岩中的自然銅礦石(富礦已經消耗殆盡, 現在提煉的都是含銅成分在1%以下的低級礦砂)。自然金和自然銀都是極其普遍的, 在蘇聯和哥倫比亞(Colombia)都有自然鉑出產, 是產生在砂礦沉積(placer deposits)中的礫岩裏面的一種自然金屬。

(二) 氧化物礦石——這一類包括普通金屬的氧化物, 碳酸鹽和矽酸鹽等礦石。雖然有極少數的金屬如金, 銀等對於水和空氣的作用具有很強的抵抗力, 不容易成為化合物; 但銅, 鉛, 鋅及其他大多數的金屬, 則是極其易於受氧化而變成化合物的。由於這一類礦石很容易使之還元, 所以是非常容易處理的。不過在經濟上來講, 則並不重要, 因為這類礦床都接近地面, 經過人類多年的發掘開採, 已所餘無幾, 所以現在僅佔所有礦石供應的一小部分。這類礦石是由硫化物受了含有氧氣及碳酸氣的地下滲濾水的作用, 經分解和變化而成的。

(三) 硫化物礦石——包括在這一類礦石之中的除硫化物礦石外還有硒化物, 碲化物, 砷化物和銻化物等礦石。因為普通金屬大都易於與硫化合, 所以自然界有大量的這類礦床存在, 成為金屬礦石供應的極主要部分。一般來說, 處理這類礦石是不容易的, 因為不但去硫是一件困難而且耗費的工作, 同時與硫化物共生的有砷, 銻, 硒, 碲等有害元素, 也是極不容易去掉的。

有時也將礦石分成簡單礦石(straight or simple ore), 磨鍊礦石(free milling ore), 複雜礦石(complex ore)和強頑礦石(refractory

ore)等。

簡單礦石就是只含一種金屬如銅，鐵，金或銀的礦石。磨鍊礦石就是一種含金，銀的礦石，使用很簡單的磨研和混汞法(amalgamation)，就能夠將其中大部分的貴重金屬提取出來。複雜礦石是含多種金屬的礦石，而這些金屬都是可以“有利的”加以提煉的。這類礦石最常見的如閃鋅礦(sphalerite,  $\text{ZnS}$ )和方鉛礦(galena,  $\text{PbS}$ )的混合礦石，在富集時，不但要把其中大量的硫化鐵和礦渣去掉，同時還要把其中有價值的硫化鋅和硫化鉛分開，使各成為富集礦砂，以便熔煉時操作比較容易，而且效力也比較大。這種複雜礦石的命名是由其中所含可提煉的金屬來決定的，例如一種每噸含銀 10 兩(ounces)的方鉛礦，就可以稱之為鉛銀礦石(lead-silver ore)。

有些礦物聚合體非常難於處理，稱為強頑礦石；這種礦石雖然含有相當分量的有價值金屬，但它與許多有害元素共生，而使提取增加困難，或耗費較高的成本。例如南美洲有一很大的高級銀礦礦床，其中之銀是與硫化合的，所以不能用混汞法提取，又因為是與錳共生的，所以也不能用氰化法(cyanidation)來“有利的”處理它。因此這礦床多年都未曾加以利用，一直到後來採用浮沫選礦法才能夠將其中的銀分取出高級富集礦砂，再與鉛礦共同熔煉之，有時也將錳作為副產收回。

礦砂的品級(grade)應該根據許多因素，如礦區位置，運輸情形，共生礦物和物理狀態等來作決定。但普通所指的品級都是指礦砂本身的價值而言。例如在美國，金礦如每噸含金值 25 美元，銅礦含銅 6%，鋅礦含鋅 45%，都稱為高級礦砂。

礦石也可以根據其中所含的礦渣不同而區分為砂質(siliceous)，土質(argillaceous)，鈣質(calcareous)和鐵質(ferruginous)礦石，看它是否含有多量的硅石，粘土，石灰石或鐵而定。酸性礦石為含有過量自由氧化矽(free silica)的礦石。鹼性礦石則為含自由氧化矽極少，而鈣，鎂，鐵及其他鹼性金屬之化合物極多的礦石。

**§6 選礦的益處** 許多低級礦石含有大量的礦渣(石灰石，硅石，

或其他造岩矽酸鹽)，以致往往不能‘有利的’直接用火冶法來處理。熔煉這種低級礦石，不但要消耗較多的搬運費，同時還要消耗大量的燃料和熔劑來熔化和造渣，常常使熔煉成本大大的超過了所獲得的金屬的價值；此外因為熔煉產生的爐渣體積很大，損失於其中的金屬也必定較多，所以金屬的提取率(recovery)也是很低的。所謂選礦或富集，就是將礦石中有價值的礦物集中，而將無價值的分出成尾砂或廢石。假如是複雜的混合礦石（例如鉛鋅礦），則可以將它分成兩種或多種有價值的富集礦砂和一種尾砂。如果礦石中含有妨礙熔煉或溶濾操作的成分（例如銅礦中的鉍化合物或鋅礦中的鐵化合物），雖然分量不多，亦必須用選礦法將它去掉，選礦的主要益處如下：

（一）富集選礦各步的操作費用大都是相當低廉的，因此用選礦法常能“有利的”將一種“無價值”的礦石變為值得提煉的礦石。

（二）有些礦石雖然可以直接加以熔煉，但為了減低運費，也常常先經富集處理後再運至煉廠，尤其是當礦山和煉廠間的距離太遠的時候。

（三）不能直接提煉的複雜礦石，經選礦後可以分成兩種或多種有價值的富集礦砂，分別加以提煉，即能將金屬提取出來。

但相反的，礦砂的選集也有如下的損失：

（一）礦砂富集的操作費用雖然低廉，但對整個冶煉成本而言，卻是一種增加的負擔。

（二）在富集操作過程中，將有相當分量的“有價值金屬”損失在尾砂裏面。

（三）有些礦石雖然經過富集，但並不如原礦(crude ore)易於熔煉，富集過的礦砂可能含有很多的水分，運送時較易凍結；顆粒很小，烘焙(roasting)或熔煉時可能產生較多的煙道塵(flue dust)；同時還可能含有某種化學藥劑，在運送時使礦砂硬化，到達煉廠後搬運很困難。

（四）富集礦砂在運送時，往往要時時額外加以戒備，以防發生意外（例如偷盜等）；因此多耗運費。

爲了對礦砂富集的效用更明瞭起見，今舉一例以說明之：某種鉛銀礦石含鉛9%，每噸含銀5噸，今如用直接熔煉和富集後熔煉兩種方法來處理100噸這種礦石，其所需成本和所得利潤比較如下：

### (A) 直接熔煉

|                      |         |
|----------------------|---------|
| 開採100噸礦砂，每噸需\$2.5，共  | \$250   |
| 運輸100噸礦砂，每噸需\$4.0，共  | \$400   |
| 熔煉100噸礦砂，每噸需\$17.0，共 | \$1,700 |
| 共需成本                 | \$2,350 |
| 熔煉得鉛16,200磅，每磅值6分，共值 | \$972   |
| 熔煉得銀480噸，每噸值40分，共值   | \$192   |
| 鉛銀共值                 | \$1,164 |
| 損失                   | \$1,186 |

### (B) 富集後熔煉

|                       |         |
|-----------------------|---------|
| 開採100噸礦砂，每噸需\$2.5，共   | \$250   |
| 富集100噸礦砂，每噸需75分，共     | \$75    |
| 運輸10噸富集礦砂，每噸需\$8.0，共  | \$80    |
| 熔煉10噸富集礦砂，每噸需\$10.0，共 | \$100   |
| 共需成本                  | \$505   |
| 熔煉得鉛15,390磅，每磅值6分，共值  | \$923   |
| 熔煉得銀412噸，每噸值40分，共值    | \$165   |
| 鉛銀共值                  | \$1,088 |
| 利潤                    | \$583   |

所以如果用直接熔煉法來處理這種礦石，每噸要損失\$11.86；如果經過富集後再加以處理，則每噸可獲利潤\$5.83，於此可以看出選礦的重要。

今將礦石之可以直接加以熔煉的和常須先經富集而後方能熔煉的，根據其金屬含量的不同，分別如下：

第一表 礦砂品質

| 礦石名稱 | 直接熔煉礦石含金屬百分數：%     | 須經富集礦石含金屬百分數：%           |
|------|--------------------|--------------------------|
| 鋁 礦  | 50 $Al_2O_3$       | 現尚未曾採用富集法                |
| 鉻 礦  | 40 $Cr_2O_3$       | 現尚未曾採用富集法                |
| 鋅 礦  | 6                  | 2.5(平均)<br>0.9(含石英斑岩的螢石) |
| 金 礦  | 因地方情形而異            | 每噸含 0.2 兩                |
| 鉛 礦  | 40                 | 8(平均)                    |
| 鐵 礦  | 12 氧化物<br>25 氧化物   | 0.13(海水)                 |
| 錳 礦  | 40                 | 25(溶濾)                   |
| 汞 礦  | 3 至 0.5            | 0.4                      |
| 銅 礦  | 50                 | 0.5                      |
| 鎳 礦  | 3 Ni; 或 2 Ni, 1 Cu | 1 Ni; 或 0.5 Ni, 0.5 Cu   |
| 銀 礦  | 因地方情形而異            | 每噸含 10 兩                 |
| 錫 礦  | 60 或更高             | 1 至 8                    |
| 鉬 礦  | 50—65 $WO_3$       | 1.0 $WO_3$               |
| 鈾 礦  | 60—90 $U_2O_5$     | 2 $U_2O_5$               |
| 鉍 礦  | 50                 | 10(平均)                   |

因為地方情形各有不同，而各種礦石性質的變異也相當大，所以在實際熔煉上，與上表中所列的數字，有很大的出入。例如在某種情況下，含鉛 30% 的鉛礦可能具有直接熔煉的經濟價值，但在某些別的情況下，含鉛雖高達 40%，也不可直接加以熔煉。一種礦石之是否可以直接熔煉，除其金屬含量外，還要看它本身的性質，才能決定。上表所列的數字，不過使我們明瞭一般的情形而已。

**§7 乾燥 (drying)** 含水的冶金產品（如富集礦砂）常須加以乾燥，一方面可以節省運費，另一方面可以使熔煉操作減少困難。通常用以乾燥較大的粒狀物質的方法和工具是不能用來處理粉細的或黏性物質的，因為粉細的物質，尤其是潮濕的粉細物質，具有黏性，能與任何與它接觸的東西黏着，並且容易成團，常將轉窯式 (rotary kiln type) 乾燥爐的內部堵塞。

成團的潮濕粉細物質，由於其內部的水分不易發散，所以很難使之乾燥，同時很多的富集礦砂都含有有機物質，使團塊黏在一起，更增

加乾燥的困難。慢慢加熱，雖然可以獲得較好的乾燥結果，但如此將使乾燥所需的時間過度增長，最好是使用較高的溫度，同時將礦砂加以攪拌，隨時擊破不透氣的包圍層，暴露新表面，使水分易於發散。

最近發明的勞頓乾燥器 (Lowlen drier) 已克服了上述乾燥操作上的困難。這種乾燥器具有一個很大的鋼盤，為盛載礦砂之用，於其下燃燒燃料或用廢氣加熱，另備有一組攪拌耙將礦砂不斷的攪拌，攪拌耙與鋼盤長邊成一45度的角，運動時耙柄沿長邊伸縮，耙齒一方面將礦砂推動前進，另方面將礦砂由一側推至另一側，同時將礦砂團塊擊碎。攪拌耙是用皮帶帶動，速度很慢，以免發生過度的擾動，致使礦砂塵化(dusting)。

**§8 熔煉** 熔煉是一種還原或富集的作業，經過這種作業可以將礦石中絕大部分的有價值組成物集中成為金屬，混合的硫化物(例如冰銅 matte)或混合的碲化物(例如碲銻 speiss)，同時無價值的礦渣等，則與熔劑(ilux)熔合成為爐渣(slag)。在熔煉之先，有時常常將礦砂加以烘焙(roasting)和煨燒(calcining)，以使得出的產品較易於熔煉，或借此去掉一些對熔煉能發生妨礙的雜質。

任何冶金的熔煉法中都包含有相當複雜的化學反應和物理變化。一個初生反應(primary reaction)發生時，往往可能隨着或接連着就有幾個次生反應(secondary reaction)發生。這些化學反應和物理變化都附帶一種吸熱的或放熱的作用；加入煉爐的熱量與煉爐支出的熱量之差，必須要大於或最低限度要等於由於傳導，對流，輻射和由於爐子本身及爐中物料吸熱等作用而損失了的熱量，否則爐中反應就不能自動推進(self-propagating)。熔煉時爐中能達到的溫度，要看下列情形而定：

- (一) 爐料(包括礦砂，熔劑，燃料，空氣等)帶進爐中的顯熱(sensible heat)。
- (二) 爐中化學反應(包括燃料的燃燒在內)放熱和吸熱的程度。
- (三) 爐中物理變化吸熱的程度。

(四) 熔煉生成物(包括金屬, 爐渣和爐氣等)比熱的大小。

(五) 冷卻水(cooling water)吸收的熱量。

(六) 由於熱之傳導, 對流, 輻射等損失的熱量。

如欲明瞭煉爐中能量的產生, 利用和損失情形, 可以參看下表:

第二表 電爐的熱量平衡表

| 熱量的供給                  | 熱量的百分數 | 熱量的分配       | 熱量的百分數 |
|------------------------|--------|-------------|--------|
| 燃料帶進爐中的顯熱:             | 0.06   | 爐氣出爐時的顯熱:   | 2.66   |
| $C \rightarrow CO$ :   | 3.47   | 爐渣出爐時的顯熱:   | 8.97   |
| $C \rightarrow CO_2$ : | 7.93   | 合金出爐時的顯熱:   | 1.27   |
| $S \rightarrow SO_2$ : | 0.76   | 爐殼輻射損失:     | 6.57   |
| 合金生成熱:                 | 0.92   | 冷卻水吸收:      | 0.41   |
| 爐渣生成熱:                 | 1.53   | 去水及探食爐料中水分: | 3.06   |
| 電能:                    | 85.33  | 使氧化物還原:     | 12.01  |
|                        |        | 分解水分:       | 5.72   |
|                        |        | 驅出焦炭中揮發物:   | 0.07   |
|                        |        | 分解石灰:       | 0.13   |
|                        |        | 機械損失:       | 20.13  |
|                        |        | 熱傳導損失:      | 39.60  |
| 總共                     | 100.00 | 總共          | 100.00 |

所用的爐子是有蓋頂的弧光式(arc-type)電爐, 用“炭還原法”(carbon reduction)製造鈮鐵(ferro-vanadium)。這種作業產生大量的爐渣, 所以生產每磅金屬耗費的電能相當可觀。雖然傳導損失和機械損失都很高(兩項共達總熱量的 59.13%), 但此法在經濟上一般還認為是有利的, 實際上消耗於使氧化物還原的熱量只佔總熱量的12%, 其餘的88%都消耗於次生反應, 機械損失, 傳導損失, 輻射損失, 和爐中產物的顯熱等等。

**§9 混合硫化物的熔煉** 有些金屬硫化物(例如硫化銅), 在一般煉爐溫度之下不能用普通的還原劑使之直接還原; 但硫與銅的化學親和力(chemical affinity)比較硫與鐵的化學親和力為強, 而氧與鐵的化學親和力則比較氧與銅的化學親和力為強。所以當這種含銅鐵硫化物的礦石經熔煉(或烘焙)時, 其中大部分的硫化鐵與空氣中的氧

氯化合成氧化鐵，再與礦渣，熔劑等熔合成爐渣，如果保持爐中有一定分量的硫化鐵不被氧化，則可以保險硫化銅不致與氧發生作用。在還原的或中性的氣氛中和爐溫之下硫化銅成穩定的 $\text{Cu}_2\text{S}$ 存在。同時在液體狀態下 $\text{Cu}_2\text{S}$ 和爐中剩下的硫化鐵( $\text{FeS}$ )能依任何比例互相溶解，且當凝固以後兩者造成一種低熔混合物(eutectiferous mixture)。這種混合物，不管是液體或固體，都名為冰銅(matte)。液體冰銅能溶解金，銀，鉑等貴金屬，但不幸的也能溶解砷，銻，鉍等有害雜質。所以混合硫化物的熔煉，實際上是一種富集作業，將礦石中的一部分雜質清除，把銅的成分提高，以利以後的還原和精煉工作。

**§10 氧化物的還原** 自然界的礦物只有極少數是成金屬狀態產出的，極大多數是金屬與非金屬的化合物。如果礦物是氧化物，一般都可以用還原劑，將其中的金屬還原出來；不過各種金屬氧化物的“還原度”(reducibility)的差別是相當驚人的。一般言之，如果要使一種氧化物發生熱分解作用(thermal dissociation)，則它的張力(tension)必須達到0.21大氣壓力(空氣中氧的部分壓力)以上才能完成。在大氣壓力之下，氧化汞( $\text{HgO}$ )只須相當低的溫度就可使之分解，而氧化鐵則必須在燃燒燃料的爐中用一氧化碳或炭來還原；其他如鉍，鉻，鉍等的還原須要更高的溫度，常在電爐中用“炭還原法”完成之，同時也可以用金屬鋁或矽來還原之。

**§11 發動溫度(initiation temperature)** 一般的金屬氧化物都是穩定的化合物，所以如果要使之還原，必須供給相當的熱量。在極少數的情形(最顯著的，如氧化汞的熱分解和用鈉來還原水)下，發動還原反應的溫度比較低，但大多數的金屬氧化物，不但需要大量的熱來完成還原反應，同時還需要很高的溫度來發動還原反應。用鋁還原過氧化鈉的發動溫度為 $410^\circ\text{C}$ ，還原氧化鉍的發動溫度為 $560^\circ\text{C}$ ，還原氧化鐵的發動溫度為 $1,025^\circ\text{C}$ 。

如果一個化學反應一經發動之後，本身即能放出足夠的熱量來供給完成反應所需要的熱能和維持反應的發動溫度，則這種反應叫做自

動推進的反應。大多數冶金作業中的還原反應都不是自動推進的，有的需要很快的供給熱能和很高的溫度，所以不能在一般的燃料燃燒爐中發生，而必須使用電爐。如果一個反應不能自動推進，我們可以加入適當的反應加速劑(reaction accelerators)來促使反應的進行，這些反應加速劑能在較低的發動溫度下互相化合，同時與礦石中某些組成物化合而放出熱量；所以用這種方法我們可以使某些必須使用電爐的冶金作業能在燃料燃燒爐中完成。

§12 用炭還原法(reduction with carbon) 大多數的普通金屬，如鐵，銅，鉛，鋅等都可以用炭還原其氧化物得之。這種用炭還原金屬氧化物的作業，往往產生大量的燃燒生成物和氧化生成物，如一氧化碳，二氧化碳和氮氣等，這些體積龐大的爐氣在離開煉爐時的溫度很高，能帶走大量的熱，因之加重熔煉的負擔，所以這種用炭還原法，不論是電爐作業或燃料燃燒爐作業，都必須外加巨量的熱能方能完成之，這種被爐氣帶走的熱量，雖然可以使用廢熱鍋爐(waste heat boilers)或蓄熱室(regenerators)將其大部分收回來，不過還不如用較貴的鋁，矽或鎂等作還原劑比較經濟（見下節）。

§13 用金屬還原法(reduction with metals) 因為用鋁還原的反應生成物只有金屬和氧化鋁，所以如果與用炭還原比較，不但放出的氣體和蒸氣較少，同時產生的爐渣也比較簡單。鋁熱反應(alumino-thermic reaction)於反應速度(reaction velocity)對反應溫度的影響，給予我們一個很好的解釋：一公斤鋁粉氧化後放出的熱為 7,140 大卡，一公斤氫氣氧化成水後放出的熱為 34,553 大卡，而一公斤的碳氧化成二氧化碳後放出的熱為 7,859 大卡；從表面上看，碳氧化產生的溫度似乎至少能比得上鋁氧化產生的溫度，但由常用的鋁熱焊接法證明並不如此。事實上碳氧化時能達到的理論溫度(theoretical temperature 或火焰溫度(flame temperature))僅為  $1,800^{\circ}\text{C}$ . 左右，而鋁氧化時則可達  $2,700^{\circ}\text{C}$ . 的理論溫度。同樣氫氧化時產生的火焰溫度似乎應該較鋁氧化時產生的火焰溫度要高得多，但事實上則僅僅稍微高一點而