

高等学校教学用书

普通重金属冶金学

中南矿冶学院等编



中国工业出版社

高等学校教学用书

普通重金属冶金学

中南矿冶学院等编

目 录

第一章 铜冶金

- §1 概論..... (7)
 - 1. 铜在国民經济中的意义..... (7)
 - 2. 炼铜原料..... (7)
- §2 炼铜方法和原理..... (9)
 - 1. 炼铜方法..... (9)
 - 2. 火法炼铜的原理..... (9)
 - 3. 冰铜..... (11)
 - 4. 炉渣..... (12)
- §3 鼓风炉熔炼..... (13)
 - 1. 还原熔炼..... (13)
 - 2. 自热熔炼..... (15)
 - 3. 改良自热熔炼 (铜硫熔炼) (17)
 - 4. 半自热熔炼..... (19)
 - 5. 鼓风炉熔炼的实践..... (20)
- §4 铜精矿的反射炉熔炼..... (22)
 - 1. 概述..... (22)
 - 2. 反射炉熔炼的理論基础..... (23)
 - 3. 現代反射炉的构造..... (25)
 - 4. 反射炉与鼓风炉熔炼之比較..... (27)
- §5 电炉熔炼..... (28)
 - 1. 电炉熔炼的理論基础..... (28)
 - 2. 現代熔矿式电炉的构造及其主要尺寸..... (30)
 - 3. 电炉熔炼的生产率及技术經济指标..... (32)
 - 4. 现有电炉的优缺点..... (33)
- §6 从冰铜中提炼铜..... (33)
- §7 粗铜的火法精炼..... (35)
- §8 铜的电解精炼..... (42)
 - 1. 铜电解精炼的理論基础..... (42)
 - 2. 铜电解精炼的实践..... (47)
- §9 铜的水冶..... (49)
 - 1. 概述..... (49)
 - 2. 浸出过程..... (50)
 - 3. 沉积过程..... (52)

第二章 镍冶金

- §1 概論..... (56)
 - 1. 镍的性质及其应用..... (56)
 - 2. 镍的矿石..... (57)

- 3. 镍矿的处理方法..... (57)
- §2 氧化镍矿的处理..... (60)
 - 1. 矿石的准备..... (60)
 - 2. 古风炉熔炼..... (61)
 - 3. 镍铈的吹炼..... (64)
 - 4. 镍高铈的处理..... (64)
 - 5. 氧化亚镍的还原..... (66)
 - 6. 氧化镍矿直接处理成镍铁..... (66)
 - 7. 氧化镍矿的湿法冶金..... (67)
- §3 铜镍硫化矿的处理..... (67)
 - 1. 铜镍矿石与精矿的焙烧..... (67)
 - 2. 精矿及富矿石的熔炼..... (68)
 - 3. 铜镍高铈的吹炼..... (69)
 - 4. 铜镍高铈的处理..... (70)
 - 5. 铜镍硫化矿及其精矿的高压水冶..... (75)
- §4 镍的电解精炼..... (76)
 - 1. 粗镍阳极的电解精炼过程..... (76)
 - 2. 镍电解液的净化..... (77)

第三章 鉛冶金

- §1 概論..... (79)
 - 1. 鉛的重要性质及用途..... (79)
 - 2. 鉛的矿物、矿石及精矿..... (79)
 - 3. 生产鉛的方法..... (80)
- §2 鉛精矿的烧结焙烧..... (81)
 - 1. 概述..... (81)
 - 2. 理論基础..... (82)
 - 3. 焙烧前炉料的准备..... (85)
 - 4. 烧结焙烧的实践..... (87)
- §3 鼓风炉还原熔炼..... (88)
 - 1. 概述..... (88)
 - 2. 还原熔炼的理論基础..... (88)
 - 3. 还原熔炼的实践..... (93)
- §4 粗鉛的火法精炼..... (96)
 - 1. 概述..... (96)
 - 2. 除銅..... (97)
 - 3. 除錫、砷及鏷..... (99)
 - 4. 除銀及金..... (100)
 - 5. 除鋅..... (102)
 - 6. 除鉍..... (102)

7. 除鎂及鈣	(103)
8. 鉛的連續精煉	(103)
§5 鉛的電解精煉	(104)
第四章 鋅冶金	
§1 概論	(107)
1. 鋅的性質和用途	(107)
2. 鋅的礦物、礦石和精礦	(107)
3. 鋅的冶煉方法	(108)
§2 鋅精礦的焙燒	(109)
1. 鋅精礦焙燒的理論基礎	(109)
2. 多層爐焙燒	(111)
3. 懸浮焙燒	(112)
4. 沸騰焙燒	(112)
5. 燒結焙燒	(117)
§3 蒸餾法煉鋅	(119)
1. 蒸餾過程的理論基礎	(119)
2. 平罐煉鋅	(122)
1) 平罐蒸餾爐	(122)
2) 蒸餾的實際操作	(123)
3. 豎罐煉鋅	(124)
1) 團礦製備	(125)
2) 豎罐蒸餾爐的構造	(126)
3) 豎罐蒸餾爐的實際操作	(127)
4) 豎罐煉鋅的主要技術 經濟指標	(128)
§4 鼓風爐煉鋅	(129)
1. 概論	(129)
2. 鼓風爐煉鋅的理論基礎	(129)
3. 煉鋅鼓風爐及其實踐	(130)
§5 粗鋅的精煉	(132)
1. 熔析法精煉	(132)
2. 精餾法精煉	(133)
§6 鋅的水冶	(136)
1. 概論	(136)
2. 鋅燒礦的浸出	(137)
1) 浸出方法及影響因素	(137)
2) 鋅燒礦各組分在 浸出時的行為	(139)
3) 浸出過程的實踐	(140)
3. 硫酸鋅水溶液的淨化	(144)
4. 硫酸鋅水溶液的電積	(146)
1) 硫酸鋅水溶液電積 過程的理論基礎	(146)
2) 電流效率及影響因素	(148)
3) 槽電壓及電能消耗	(149)
4) 電積過程的實踐	(150)

5. 陰極鋅的熔鑄	(151)
-----------	-------

第五章 錫冶金

§1 概論	(153)
1. 錫的主要性質及用途	(153)
2. 煉錫原料	(153)
3. 煉錫方法簡述	(154)
§2 錫精礦的還原熔煉	(156)
1. 錫精礦熔煉前的準備	(156)
2. 錫精礦還原熔煉的理論	(157)
3. 錫精礦還原熔煉的實踐	(159)
4. 返回爐渣的處理	(160)
§3 粗錫的精煉	(161)
1. 概論	(161)
2. 粗錫火法精煉	(162)
3. 粗錫電解精煉	(165)

第六章 銻冶金

§1 概論	(166)
1. 銻及其主要化合物的 性質和用途	(166)
2. 銻及其主要化合物的 性質和用途	(166)
3. 銻的礦物、礦床及礦石	(167)
4. 煉銻方法簡述	(168)
§2 硫化銻礦石及精礦的揮發 焙燒-還原熔煉法	(169)
§3 硫化銻礦石及精礦的 沉淀熔煉法	(171)
§4 銻礦石及精礦的水冶	(172)
1. 銻礦石及精礦的浸出	(172)
2. 含銻水溶液的置換	(172)
3. 含銻水溶液的電積	(172)
§5 銻的精煉	(173)
1. 火法精煉	(173)
2. 電解精煉	(174)

第七章 汞冶金

§1 緒論	(175)
1. 汞及其主要化合物的 性質和用途	(175)
2. 煉汞原料	(175)
3. 煉汞方法簡述	(176)
§2 汞礦石和精礦的焙燒	(176)
1. 焙燒過程的原理	(176)
2. 焙燒過程的實踐	(177)
§3 汞蒸氣的冷凝	(179)
1. 冷凝過程的原理	(179)
2. 冷凝過程的實踐	(180)
§4 汞毒及其防護	(182)
主要參考文獻	(182)

第一章 銅冶金

§1 概論

1. 銅在国民经济中的意义

銅是古代就为人們所知道的金属之一。由于銅具有許多可贵的性质，因此自古以来銅的应用在不断增长着。銅是比较柔軟的金属，易于加工，并可与錫和鋅組成合金。銅有高度的导电性，所以它在現代电气工业中应用很广。現代銅产量約有一半以上是用来制造电线、电纜、軟线及其他輸电和电訊制品。

用作合金（青銅、黃銅、白銅、炮銅等）的銅占国民经济中銅的全部消耗量的30—40%；有10—15%用来滿足汽車和拖拉机制造工业的需要。由于銅具有高度的导热性和耐腐蝕性，因此用来制造各种热交换器、冷凝器以及汽車和拖拉机的散热器等。

銅的純度愈高其导电性、导热性及可塑性也愈高。无氧銅具有很高的可塑性，易于承受精密的冷加工。

在农业中，硫酸銅被广泛用作杀虫剂。

2. 炼銅原料

銅矿石以及工业和生活上的銅及其合金的废件都是炼銅的原料。从废件中提銅亦占有相当重要的地位，它几乎占銅总产量的30%。

矿石中銅的含量很少超过1—5%。含銅0.5%以下的矿石一般不能作为工业矿石。

銅矿物有240种以上。表1—1所列的10种矿物是在工业上最重要的。

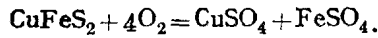
表1—1 最重要的銅矿物

名 称	化 学 式	銅的含量, %
黃銅矿 (含銅硫化铁矿)	$CuFeS_2$	34.6
斑銅矿	Cu_3FeS_3	55.6
輝銅矿	Cu_2S	79.9
銅 藍	CuS	68.5
孔雀石	$CuCO_3 \cdot Cu(OH)_2$	57.4
藍銅矿	$2CuCO_3 \cdot Cu(OH)_2$	55.1
紅銅矿	Cu_2O	88.8
黑銅矿	CuO	79.9
硅孔雀石	$CuSiO_3 \cdot 2H_2O$	36.2
自然銅	Cu	达99.9

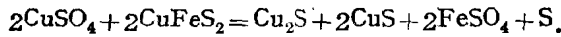
在所列的矿物中，仅有黃銅矿和其他部分硫化矿物是由岩漿生成的(原生矿物)；其余矿物是由地质变动結果而生成的(次生的)。

在原生矿体的露头地方，进行着改变該矿体的物理化学过程。例如，黃銅矿被氧化

而生成可溶于水的硫酸铜和硫酸铁:



硫酸盐溶液向矿体的深处渗入时, 又与黄铜矿发生相互作用并形成次生硫化矿物:



当溶解的硫酸盐与其他岩石(例如同石灰岩)进行相互作用时, 便获得铜的氧化物:



地下水浸透的深度是不大的, 而且原生硫化矿物的转化也是缓慢进行的。因此自然界全部铜有2/3以上仍旧是以原生矿物的形态, 主要是黄铜矿的形态而存在。

铜矿石的脉石是由黄铁矿、磁硫铁矿、石英、镁和钙的碳酸盐、以及含有铝、钙、镁、铁等的氧化物的各种硅酸盐所构成。

硫化铜矿可以分为致密的黄铁矿类的和浸染状的铜矿类, 前者的矿体主要是由铜、铁的硫化物构成, 后者乃是在石英和硅酸盐脉石中赋存的硫化矿物的浸染; 有时这些浸染具有着显微镜上的微细粒度。黄铁矿类的矿石与浸染状铜矿不同, 它具有相当高的铜和铁的含量(表1-2)。

表1-2 铜矿石化学成分的实例

矿 石 类 型	含 量, %							
	Cu	Fe	S	Zn	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO
致密黄铁矿	2.5	39.4	45.6	1.7	5.3	2.4	0.4	0.5
	5.6	23.0	24.5	6.3	23.0	10.2	4.0	1.2
浸染状硫化矿	1.5	8.5	9.0	—	52.6	10.8	2.2	0.7
氧化矿	2.1	1.0	0.1	—	68.0	16.0	0.7	0.7

在硫化和氧化铜矿中往往伴生着一些其他有价值的成分, 如铅、锌、镍、钴、硫、硒、碲、钼、砷、铋、金、银、铂及铂族金属, 因此提取矿石中之铜时应考虑到最大限度地提取出这些伴生金属。

铜的混合矿是硫化矿还未完全转化为氧化矿的产物, 它除了氧化矿物之外还含有铜的硫化矿物。

铜矿石的物理特性是各种各样的。致密的含铜黄铁矿类矿石, 一般是以坚实的巨块即以矿块的形式由矿体取得, 很少以微细的颗粒即所谓疏松体的形式取得。氧化矿则往往是粉状的。

铜矿石的矿产地在我国的许多地区已被勘察。外国的铜矿石矿产地主要集中在美洲和非洲大陆。在这些地区铜的总埋藏量占世界的91%(苏联除外); 在欧洲地区约有6%; 在亚洲和澳洲的矿产地一共约占世界铜埋藏量的3%。

美洲大陆的最大矿产地是在智利和美国; 非洲的是在北罗德西亚和刚果; 欧洲的是在西班牙、南斯拉夫和斯堪的那维亚。

现代仅有数量不大的铜是直接原矿石中炼出的。矿石通常都经过预先富集, 然后对所获得的精矿进行冶炼处理。

用浮选法富集矿石的结果而获得的铜精矿含有8—35%的铜。用优先浮选法浮选复

合矿石时，可以成功地分离出铜以外的铅、锌或镍等的精矿，它们可作为生产相应金属的原料来使用。

获得富铜精矿是困难的，这主要是由于铜和铁的硫化矿物有相近的浮选性，同时也由于这些矿物在矿石中互相紧密地交错生成的缘故。进行浮选时则能获得铜精矿和硫化铁尾矿，或者一开始就选出综合的铜-黄铁矿精矿，然后再进行二次浮选来将它们分离。从含铜硫化矿中可以把85—90%的铜提取到铜精矿中。硫化铁精矿是生产硫酸的有价值的原料；它含有45—50%的硫。

浮选氧化矿的时候，由于向矿浆中加入了硫化钠，以致铜矿物的表面为铜的硫化物薄膜所掩盖。

从复合的矿石，例如从铜-锌矿石，用优先浮选法，则能成功地把80—90%铜提到铜精矿中，并把65—70%锌提到锌精矿中。

§ 2 炼铜方法和原理

1. 炼铜方法

从矿石和精矿中提炼铜的方法有火冶法和水冶法。

火冶法适用于处理硫化矿、氧化矿以及混合矿；水冶法只对氧化矿和自然铜矿的处理是有利的。火冶法能够从矿石和精矿中提取铜时顺便提取出贵金属；但用水法冶金处理时，贵金属则提取不出来。

处理贫氧化矿时，水冶法具有优点。这时从矿石中浸出铜要比进行熔炼更为有利。如果矿石能够进行选矿，并以高提取率将铜富集到精矿中时，则用火冶法处理一般要比水冶法有利。

在铜冶金中，主要采用火冶法，这种方法对于处理所有形式的矿石原料都是适合的。在全世界炼铜实际操作中，以火冶法获得的铜大约有80—85%，以水冶法获得的铜总共约有15—20%。

在上世纪，铜是直接由矿石炼得的。在现代浮选法的发展情况下，许多矿石都要预先经过选矿，然后进行精矿的熔炼，这样就大大地提高了铜的总回收率，并降低了成本。

虽然如此，矿石的直接熔炼也还保持了本身的意义。如果金、银进入铜精矿中则矿石的富集是有利的，因为在熔炼精矿时，这些金属可以进入铜中，并能够在电解精炼时提取出来；当部分贵金属进入浮选尾矿时，则须补充处理尾矿，但这不是经常可能与有利的。有时从铜矿石中除提取铜外还可能顺便提取元素硫，这种情况有时不得不放弃浮选而进行直接处理矿石。这种方法已被研究成功并已运用到生产中。

在每一个不同场合下，铜矿石的处理方法都要根据技术经济计算来选定，但同时还要考虑到该地区应用的可能。

2. 火法炼铜的原理

现代用火法从铜的硫化矿石或精矿中提铜照例是首先在鼓风炉或反射炉中炼成冰铜（以硫化亚铜和硫化亚铁为主的熔合体），然后再将冰铜用转炉吹炼成粗铜（称为泡铜）。这种炼铜法比将铜的硫化物焙烧成氧化物，然后用炭还原成金属铜的方法有利得多。此法

的理論基础是在于，在炉温下，銅与硫的亲合力比铁和硫的亲合力大，而銅与氧的亲合力比铁与氧的亲合力小得多（图 1—1， 1—2）。由于銅与硫的亲合力大，因此在制炼成冰銅的过程中，虽然矿石或精矿中一部分铁的硫化物被氧化成氧化物进入渣中，而几乎全部銅都形成硫化亚銅进入冰銅中，因此損失于渣中的銅就极少。由于铁与氧的亲合力比銅大得多，所以就很容易将冰銅中的铁氧化而使之进入炉渣（硫的氧化也很容易）而得到金属銅。

在鼓风炉或反射炉制炼冰銅过程中，生成的熔体分成上下两层。下层是冰銅（比重接近 5），上层基本上是炉渣（比重近于 3）。

矿石在炉中尚未熔化以前銅和铁的硫化矿物就进行分解了，形成简单的硫化物和硫蒸气：

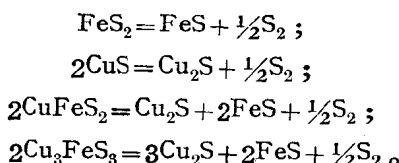


图 1—1 示出了 FeS_2 在 680°C 时的离解压已经达到 1 大气压 ($\lg P_{\text{S}_2} = 0$)，而 CuS 在 575°C 时就达到 1 大气压；斑銅矿和黄銅矿的离解压也处在靠近的范围内（图中未示出）。硫化亚銅和硫化亚铁在高温下都是稳定的。因此熔融的冰銅不管原矿中的銅和铁

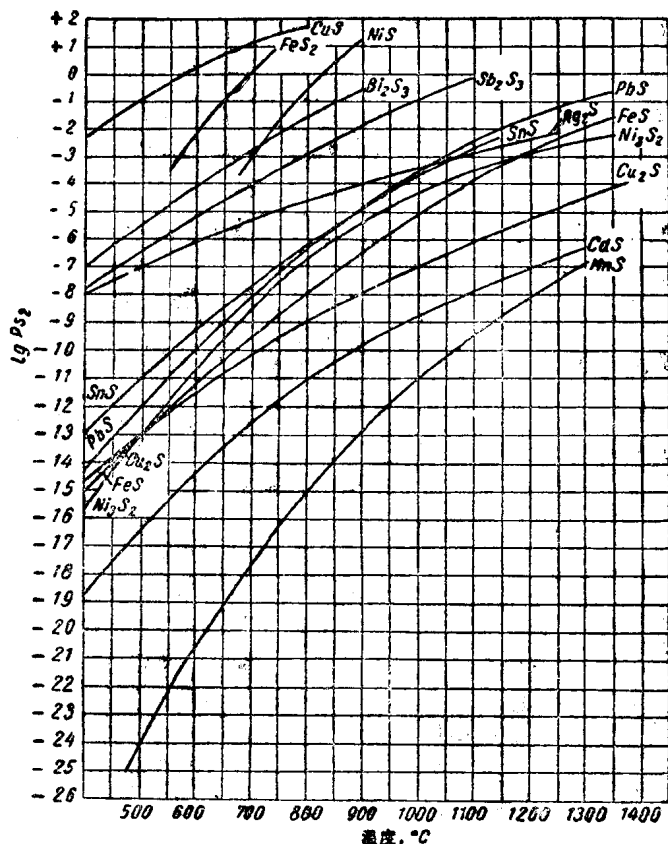


图 1—1 某些硫化物的离解压与温度变化曲线

的硫化矿物形态如何，总归是 Cu_2S 和 FeS 的熔合体。

脉石 (SiO_2 、 CaO 、 Al_2O_3 、 MgO 等) 在熔炼时成为熔融状的炉渣，并能很容易地与冰銅分开而除去。

由于在銅的硫化矿石中，很大部分是铁的硫化矿物，所以必須在焙烧或熔炼中将一部分铁的硫化物用空气氧化成氧化亚铁而使之进入炉渣中。并使所剩下的铁的硫化物与全部硫化亚銅形成我們所选定的成分的冰銅（一般选定冰銅成分为 20—45% Cu ）。

$2\text{FeS} + 3\text{O}_2 = 2\text{FeO} + 2\text{SO}_2$
此时 Cu_2S 也可能同时被氧化：

$2\text{Cu}_2\text{S} + 3\text{O}_2 = 2\text{Cu}_2\text{O} + 2\text{SO}_2$
但是最終結果只是 FeS 被氧化，而炉料中全部銅均保持

Cu_2S 形态, 因为 Cu_2O 与 FeS 能相互作用而重新被硫化:
 $\text{Cu}_2\text{O} + \text{FeS} = \text{Cu}_2\text{S} + \text{FeO}$ 。

由于炉料中大部分铁的硫化物氧化而进入炉渣中, 剩下少部分的铁保持为 FeS 的形态与全部 Cu_2S 组成冰铜, 因此铜在冰铜中就大大地富集起来。

在鼓风炉熔炼中, 炉料不能用粉矿而只能用块矿或烧结块, 因此铁的硫化物的氧化过程是在烧结过程中及鼓风炉熔炼过程中进行。在反射炉熔炼中, 由于炉气基本上是中性或微氧化性的, 所以铁的硫化物的氧化过程基本上是用预先焙烧来解决。

冰铜在转炉中进行吹炼。当空气通过熔融的冰铜时, FeS 首先被氧化生成 SO_2 气体和 FeO , FeO 与加入的石英形成炉渣而除去。当铁被除去后, 剩下的 Cu_2S 称作白冰铜。白冰铜继续吹炼则发生下列反应:

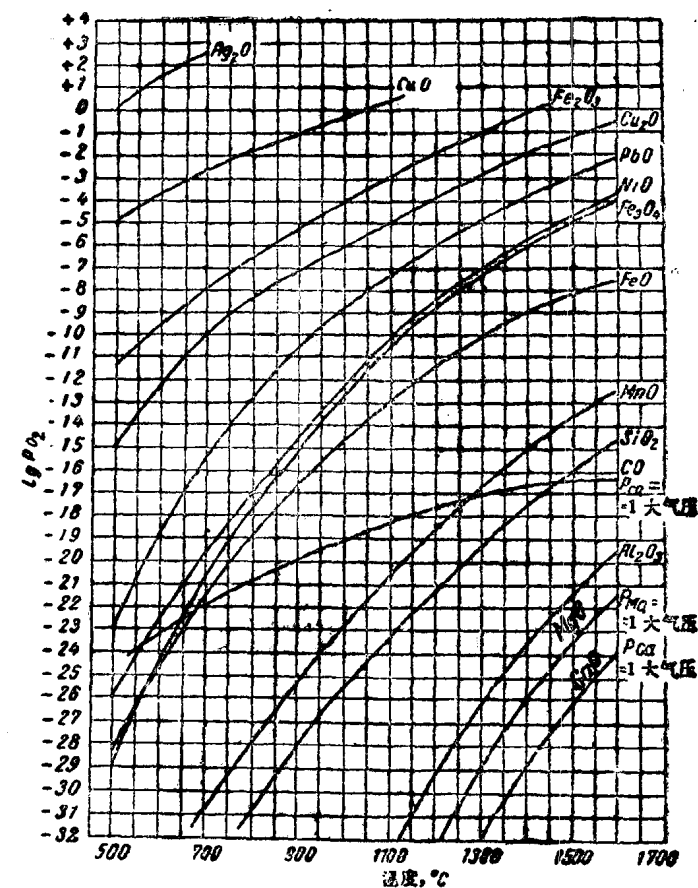


图 1—2 某些氧化物分解压力随着温度的变化曲线

所生成的金属铜叫做泡铜。泡铜含有 1—1.5% 之杂质, 不能在工业上应用, 并且其中含有一定量的稀散金属及贵金属, 所以必须进行精炼以提高其质量并将其中有价金属提取出来。图 1—3 是一般火冶法的流程图。

3. 冰 铜

冰铜是从铜矿和铜精矿炼得铜的中间产物。炼铜成本在相当大的程度上与冰铜的组成及其性质有关。

冰铜主要是由 Cu_2S 和 FeS 组成, 并有 Fe_3O_4 、 Au 、 Ag 、 As 、 Sb 、 Bi 等杂质溶解于其中, 有时有 ZnS 、 PbS 、 Ni_3S_2 等存在。

冰铜有很好的溶解贵金属的能力, 这样就可使得矿石中几乎全部的贵金属在熔炼时富集在冰铜中。

冰铜的熔点与其组成有关。从 Cu_2S — FeS 状态图 (图 1—4) 可以看到一个具有熔

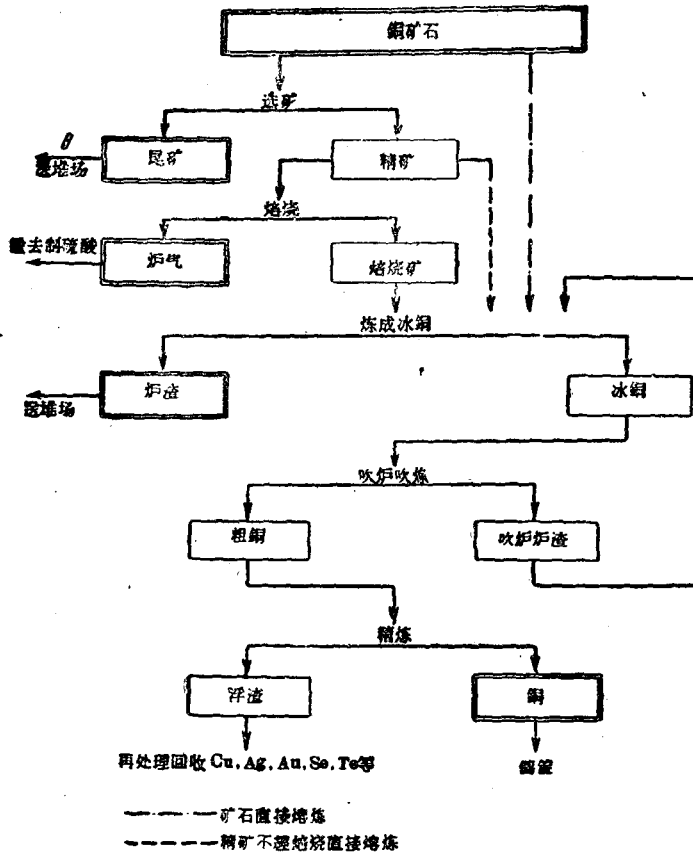


图1-3 铜的火法冶金一般流程

点为 985°C 的共晶和熔融硫化物之间的无限相互溶解度。工厂产出的冰铜，组成相当复杂，其熔点在 $900-1050^{\circ}\text{C}$ 之间。贫冰铜较富冰铜更难熔。

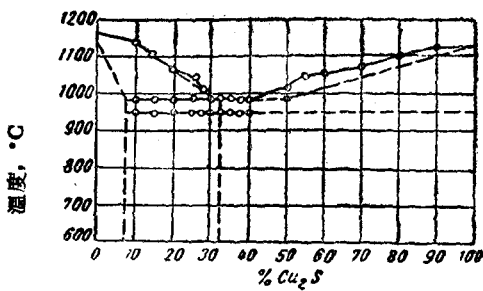


图1-4 $\text{Cu}_2\text{S}-\text{FeS}$ 系状态图

Cu_2S 的比重为5.7, FeS 的比重为4.6; 冰铜的比重在4.6—5.7之间。冰铜愈富, 其比重就愈大。

冰铜的含铜量(品位)一般在20—45%范围内。冰铜品位愈低, 则冰铜含铁量愈高, 这样就使得吹炼所需时间加长, 同时造成大量的返渣。含铜量过高, 则炉渣中含铜量也相应提高, 铜的损失加大。一般工厂所产冰铜的含铜量与渣中含铜量之比为100:1左右。

4. 炉渣

炼铜炉渣多半是废弃产物。炉渣产出量很大: 每产出1重量单位的冰铜可得到10重量单位的炉渣, 其中含有0.1—0.5%Cu。如果冰铜品位为50%, 则不难看出炉渣带走的

銅可达总銅量的10%。炼銅成本在相当大程度上与炉渣产出量及其中的含銅量有关。

炉渣产出量主要决定于被处理原料的組成和加入的熔剂数量。銅在炉渣中的含量与炉渣組成及熔炼特性有关。

銅在炉渣中的損失有：

(1) 化学損失。主要是由于 Cu_2O 和 FeS 之間的作用不完全所引起，因而有部分的銅在炉渣呈溶解的 Cu_2O 形态存在。但此損失很小，沒有重大意义。

(2) 物理損失。由于銅呈 Cu_2S 形态溶解于炉渣中而引起。 Cu_2S 的溶解度与炉渣組成及温度有关，但最大不超过0.2—0.3%。

(3) 机械損失。由于下列原因引起：冰銅与炉渣的比重差較小，以致冰銅小珠澄清不完全；炉渣粘度高；澄清時間短；等等。

炉渣的組成应基于炼得粘度最小和最轻的炉渣来选择。同时必須力求使用最少量的熔剂。

炼銅炉渣的主要組份是 SiO_2 , FeO , CaO ，其总含量达80—90%。此外，还含有达15%的 Al_2O_3 以及 MgO , BaO 等。

炉渣的熔点应与熔炼过程的条件相适应。太难熔的炉渣会使燃料消耗增大和耐火材料损坏；太易熔的炉渣则会在主要熔炼反应完成之前过早地成为液体状态。炼銅炉渣的熔点通常在 1050—1150°C 之間。

炉渣各銅組份单独的熔点很高。但由于形成共晶和化合物，各組份的混合物可在較低的温度下熔化。

在图 1—5 上，除了熔化等温线外，还有等粘线。利用这个图，

有可能結合工厂实践的具体情况选择具有适当熔点和粘度的炉渣的成分。

炉渣的比重与其化学組成有关。一般在3.2—4.0的范围内。

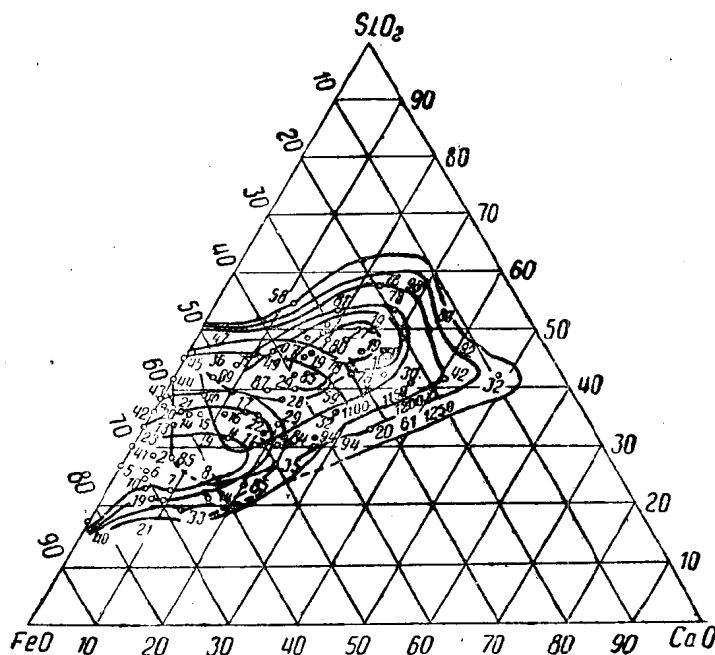


图 1—5 $\text{CaO-SiO}_2\text{-FeO}$ 系熔化等温线及粘度

§3 鼓风爐熔炼

鼓风爐熔炼是在一种直立作业空間的炉內进行的 (图 1—6)。矿石 (或燒結块)、熔剂与燃料从炉的上部加入，空气经过炉壁下部的风口鼓入。燃料与炉料中可燃成分燃烧所生成的气体以及鼓入的空气从下面沿着料块之間的空隙而上升；炉料和燃料随着炉

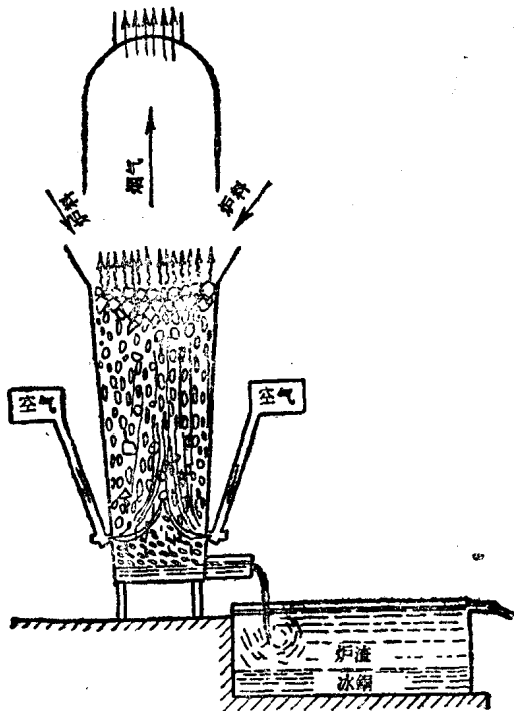


图1-6 鼓风炉熔炼示意图

料的熔化而下降。

鼓风炉内热的来源是燃料的燃烧或硫化物氧化的反应热。

炉料经过熔炼生成的熔体是冰铜与渣的混合物，熔体连续地流到前床。渣与冰铜由于比重的不同而在前床中分离。炉气则由炉顶排出。

鼓风炉中的熔炼过程，可以下列各特点来说明：

1. 只有粗大的物料，才可在鼓风炉中处理。细小物料（小于10—12毫米者）用鼓风炉处理不相宜。若炉料内有大量碎料存在，便会使炉内鼓风分配不均匀，并且鼓风的利用也不完全；相当大部分的碎料会被炉气从炉中带走，并且熔炼过程也被扰乱。未经专门制备（烧结）的细小精矿和3—5毫米大小或更小的矿石碎料，根本不能用鼓风炉来处理。

2. 炉料与气体的逆向运动，能使炉气的热利用增大，从而在鼓风炉中获得大的热利用率（达70%及更大）。

3. 鼓风熔炼的燃料为焦炭或含铜黄铁矿（在自热熔炼或半自热熔炼的情况下）。在鼓风炉中，焦炭及矿石的燃烧是在炉料内面发生的。由于燃料及炉气之直接与熔炼物料接触，故热传播的条件改善更多。

4. 鼓风炉中的最高温度，是在碳或硫化物燃烧强烈的区域中（即在所谓炉焦点）发展起来的，此区域通常系建立在风口稍上的范围。进入炉中的炉料，一面往下降落，一面则通过温度范围很宽的区域——从装料水平的200—400°到炉焦点的1300—1500°。在炉本床区域中，熔炼产物的温度通常为1250—1300°，也就是超出共熔点约150—200°。

5. 鼓风炉内的最高温度，是由炉渣的熔化温度（及其一定的过热）和炉焦点区热收入与热支出之比来决定的。

若炉渣成分及炉渣量为一定，则焦炭消耗的增高（当然要同时增高鼓风消耗），只能使炉料的熔化量增大，但不能提高炉焦点的温度。

6. 在鼓风熔炼时，气相与炉料组成物之间的化学交互作用具有重要的意义；固体物质与液体物质之间的各种化学交互作用也经常会在过程中发生。

7. 鼓风熔炼的反应，通常是按其进行地区分布如下：吸热反应（如离解反应），主要是在炉上部进行；放热反应（如燃烧反应、炉渣形成反应等等），主要是在炉下部进行。反应的这种分布是有利的，因为可促使高温区集中起来。

视炉内气相成分的不同，鼓风熔炼分成两种主要不同的方式——还原熔炼及氧化熔炼。还原熔炼用于处理氧化矿，氧化熔炼则用于处理硫化矿。

硫化矿鼓风熔炼的性质，与矿石中的黄铁矿含量以及矿石为片状和嵌布脉石所冲淡

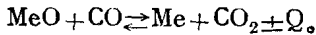
的程度有关。硫化矿鼓风熔炼法有三种：自热熔炼、半自热熔炼及改良自热熔炼。

如果矿石是纯净的含铜黄铁矿，使用自热熔炼或改良自热熔炼来处理；半自热熔炼法则用来处理所有其他各种硫化矿。

1. 还原熔炼

这种熔炼方法主要是用焦炭来还原富的铜氧化矿以直接得到金属铜。或用来处理精炼炉渣和杂铜。

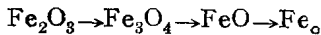
氧化物的还原反应可用下列的一般方程式来表示：



这个反应的平衡常数当 MeO 及 Me 呈凝聚相且不形成固溶体或溶液时，则可按下式决定：

$$K_p = \frac{P_{\text{CO}}}{P_{\text{CO}_2}}$$

从图 1—7 可以看出，铜的氧化物是最容易还原成金属。铁的氧化物在炉中被 CO 还原的顺序是：



熔炼时，铁的氧化物应力求还原至

FeO 形态而造渣，而防止还原成金属铁。否则金属铜中含铁过高。图 1—7 中的 β 区域是相当于铜的氧化物能还原为金属铜而氧化亚铁则不能还原为金属铁，由此可以算出在铜的还原气氛中炉内所需 CO 含量的范围。

还原熔炼最大的缺点是渣含铜高，可达 0.7—1%（制炼冰铜的渣含铜在 0.4% 以下）。因此处理硫化矿时不宜采用先将铜的硫化矿氧化成氧化物再用焦炭还原的方法。

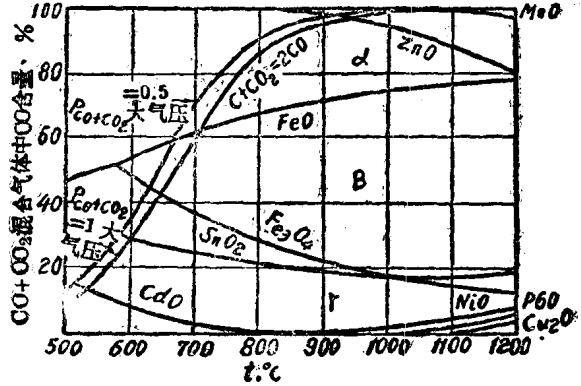
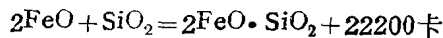
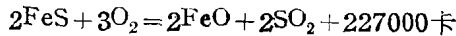


图 1—7 某些金属氧化物还原时 CO+CO₂ 气体混合物平衡成分与温度的关系曲线

2. 自热熔炼

如果矿石中含有 75% 或更多的黄铁矿时，则可不需另加（或加 3% 以下的）焦炭而靠黄铁矿的氧化和造渣的反应热来进行熔炼而得到冰铜。

硫化亚铁的氧化及所生成的氧化亚铁的造渣反应热效应如下：

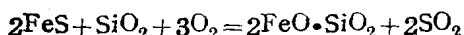


在自热熔炼有一个困难需要解决：

硫化亚铁的熔点（1150°C）较自热熔炼炉的焦点区温度（1250—1450°C）低得多，所以硫化亚铁在未到达焦点区以前便开始熔化。熔融的硫化亚铁容易沿着固体物料之间的空隙迅速流下而来不及氧化和造渣，即达到本床。这样就不能放出大量的热来维持熔炼，并且亦只能产出大量的很贫的冰铜。解决困难的途径就是如何使液体 FeS 通过焦点区时减低速度和分散开来。现代工厂具体解决这个问题的方法是在炉内造成和保存许多多孔的石英窝。

石英窩的制造是在开炉时用系統而严格地在炉料中增加一定量的石英的方法逐渐制备而成。

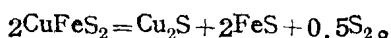
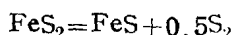
在熔炼过程中，FeS、SiO₂ 和鼓风中的氧之間应保持一定的精确不变的比数。这个比数是由下列自热熔炼的主要反应来确定：



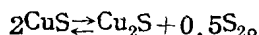
如果比数被破坏便会引起熔炼的不正常：（1）如果超过以上比数的空气，則有較多的硫化亚铁氧化成FeO。FeO 造渣所不足的SiO₂ 便需由石英窩来补偿，因此破坏了石英窩，并且剩余的氧进入預备区則引起該区中硫化物过早氧化。相反，空气量不足則生成FeO 过少，則炉內石英窩不断聚集。此时，炉內由于热量不足而会发生冻结。（2）如果炉料中SiO₂ 过多或过少，則会引起石英窩的聚集或破坏。（3）如果FeS 量过低，則剩余的氧将进到預备区，而使其中性气氛变成氧化气氛，剩余的二氧化硅将聚集石英窩上。同时由于热量不够而会使炉內冻结。

在自热熔炼中，根据炉內的各种过程的特点，可按炉子高度分成四个区域：

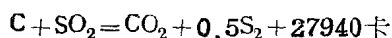
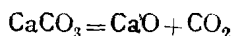
上部預热区（温度为300—900°C） 这里进行着吸热过程。呈中性气氛。铁和銅的高价硫化物发生离解：



銅蓝是不稳定的，在中性气氛中也进行离解：



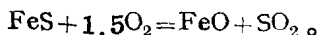
在温度800—900°C的預热区下部发生石灰石的离解，并且加入炉中的少量焦炭也在此靠二氧化硫发生燃烧：



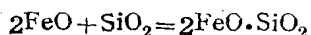
如果焦炭过量，过剩的焦炭达到炉子焦点并依靠鼓风中氧而优先完全燃烧，这样一部分FeS 就不能氧化而进入冰銅中，从而降低了冰銅含銅量。同时石英也未按反应的比例消耗，剩余的石英逐渐堆积在炉內，形成石英炉結。

中部区域（900—1200°C） 硫化物及石灰石的离解在此进行完毕。炉料中最易熔化的组分（铁和銅的硫化物）开始熔化。石英在此处不能熔化，往下降落，并且炉內造成多孔质石英窩。此区也近乎中性气氛。

焦点区（1250—1450°C） 熔体中的硫化物处在部分解离成离子状态（金属离子和硫离子）。FeS 在焦点区按下面的反应优先地强烈氧化：



生成的FeO 与石英窩中赤热的SiO₂ 形成炉渣：



炉渣经充分过热后，便将炉料中的氧化鈣和造岩矿物溶解其中，随各种硫化物一道而流入本床，形成冰銅。

本床区（1250—1300°C） 在此区中，液体熔炼产物的成分基本上不发生化学变化。总结上述基本原理，可以看出自热熔炼的主要特点是：

1）自热熔炼所需的全部热量是在炉子的焦点区生成的，并且是靠FeS 的氧化和氧