



从校园到职场

——成就铸造工程师之路

有色金属熔炼 入门与精通



吴树森 吕书林 刘鑫旺 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

从校园到职场——成就铸造工程师之路

有色金属熔炼入门与精通

吴树森 吕书林 刘鑫旺 编著



机械工业出版社

本书是铸造专业《从校园到职场——成就铸造工程师之路》系列丛书之一。系统地叙述了几种主要有色金属（包括铝合金、镁合金、钛合金、铜合金、镍基合金、锌合金及轴承合金等）熔炼的原理、配料、熔炼工艺、熔炼设备及熔体质量检验等。内容丰富，突出应用实例，辅以大量数据图表，具有实用性和启发性。

本书可作为相关专业大学本科生、大专生、高职生的学习教材，也可供机械工程、冶金工程专业技术人员参考。

图书在版编目（CIP）数据

有色金属熔炼入门与精通/吴树森，吕书林，刘鑫旺编著。
—北京：机械工业出版社，2014.2
（从校园到职场——成就铸造工程师之路）
ISBN 978-7-111-45569-1

I. ①有… II. ①吴…②吕…③刘… III. ①有色金属合金—熔炼 IV. ①TF805.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2014）第 016336 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）
策划编辑：季顺利 责任编辑：季顺利 高依楠
版式设计：霍永明 责任校对：任秀丽
责任印制：刘 岚
北京京丰印刷厂印刷
2014 年 5 月第 1 版·第 1 次印刷
169mm×239mm·19.5 印张·433 千字
0 001—2 500 册
标准书号：ISBN 978-7-111-45569-1
定价：49.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务

策划编辑电话：(010) 88379769

社服务中心：(010) 88361066

网络服务

销售一部：(010) 68326294

教材网：<http://www.cmpedu.com>

销售二部：(010) 88379649

机工官网：<http://www.cmpbook.com>

读者购书热线：(010) 88379203

机工官博：<http://weibo.com/cmp1952>

封面无防伪标均为盗版

前 言

近年来，有色金属在汽车工业、通信电子业和航空航天业等领域得到了日益广泛的应用，有些有色金属的使用量以每年 20% 左右的速度增长，例如铝合金、镁合金用于汽车、飞机及笔记本电脑，钛合金用于飞机，铜合金用于电工及造船等。有色金属零部件的主要成形制造方法之一就是铸造，而铸造过程的首要任务是熔炼出合格的有色金属熔液。此外，变形加工的型材等有色金属材料也需要首先进行熔炼和配制合金。因此，有色金属的熔炼对于零件的制造质量及材料的使用性能具有十分重要的作用。

作为机械工业出版社策划并组织编写的铸造专业《从校园到职场——成就铸造工程师之路》系列丛书之一，本书较详细地介绍了几种主要有色金属熔炼的原理、配料、熔炼工艺、熔炼设备及熔体质量检验等，并着重阐述了有色合金的熔炼过程原理、生产工序及主要技术参数，以及对实际的合金熔炼工艺举例等。本书在注重经典原理的同时，注意反映国内外先进熔炼技术的发展状况，努力做到基本性叙述与先进性介绍的融合。

本书所涉及的有色金属及合金的种类主要是较常用的七种有色金属，包括铝合金、镁合金、钛合金、铜合金、镍基合金、锌合金及轴承合金，内容比较丰富。

作者希望通过通俗易懂、循序渐进的叙述方式，以及图文并茂、应用举例等方法，便于初“入门”的读者学习及应用。同时，通过本书在一些具体内容中的翔实叙述及大量数据图表的运用，若能对读者具有实用性及启发性，逐渐“精通”有色金属的熔炼技术，作者将十分欣慰。

本书各章的编写分工如下，吴树森编写绪论、第 1 章、第 2 章及第 6 章；刘鑫旺编写第 3 章；吕书林编写第 4 章及第 5 章。全书由吴树森统稿。在本书编写过程得到过有关专家的帮助，在此表示衷心感谢！

由于编者水平有限，书中的疏漏及错误在所难免，恳请读者批评指正！

编 者

目 录

前言

绪论	1
第1章 铝合金熔炼	8
1.1 铝合金熔炼的特点及过程原理	8
1.1.1 铝合金的分类、性能特点及用途	8
1.1.2 合金元素和杂质对铝合金性能的影响	14
1.1.3 铝合金熔炼中的氧化、吸气与夹杂物	17
1.2 铝合金熔炼时的金属损耗与配料	29
1.2.1 配料的基本原则及金属损耗	29
1.2.2 配料计算方法及举例	30
1.3 铝合金熔炼设备及操作要点	33
1.3.1 电炉类	33
1.3.2 燃料炉类	35
1.3.3 坩埚	38
1.4 铝合金的熔炼工艺	40
1.4.1 一般工艺过程及熔炼准备	40
1.4.2 涂料及溶剂准备	41
1.4.3 铝合金的典型熔炼工艺	43
1.5 铝液的精炼	44
1.5.1 铝液的除氢原理及除氢速度	44
1.5.2 吸附精炼	45
1.5.3 非吸附精炼	52
1.6 铝合金的细化与变质处理	53
1.6.1 初晶 α -Al 晶粒细化处理	53
1.6.2 Al-Si 合金共晶硅的变质处理	58
1.6.3 Al-Si 合金初晶硅的晶粒细化	61
1.6.4 Al-Si 合金的双重变质处理	63
1.7 铝液质量检测技术	66
1.7.1 炉前常规检测	66
1.7.2 铝液含气量检测	67
1.7.3 夹杂物检测	72
1.7.4 变质效果检测	75
参考文献	82
第2章 镁合金熔炼	84

2.1 镁合金熔炼的特点	84
2.1.1 镁合金的特点、分类及用途	84
2.1.2 合金元素和杂质对镁合金性能的影响	89
2.1.3 镁合金熔炼中的氧化、吸气与夹杂物	93
2.2 镁合金熔炼的保护	96
2.2.1 覆盖剂保护	97
2.2.2 气体保护	99
2.3 镁合金熔炼设备及操作要点	101
2.3.1 坩埚	101
2.3.2 熔化炉	103
2.3.3 镁合金熔炼的保护气体混气装置	104
2.4 镁合金的熔炼工艺	107
2.4.1 炉料、涂料及溶剂准备	107
2.4.2 镁合金的典型熔炼工艺	109
2.5 镁液的精炼与变质	111
2.5.1 熔剂净化	111
2.5.2 吹气净化	116
2.5.3 过滤净化	117
2.5.4 镁合金的细化与变质处理	118
2.6 镁液质量检测技术	119
2.6.1 炉前常规检测	119
2.6.2 镁液含气量检测	121
2.6.3 夹杂物检测	124
参考文献	125
第3章 钛合金熔炼	126
3.1 钛合金熔炼的特点及过程原理	126
3.1.1 钛合金的特点、分类及用途	126
3.1.2 钛和钛合金的物理化学性质	132
3.1.3 钛合金熔炼的特点	134
3.1.4 凝壳熔炼过程原理	140
3.1.5 磁悬浮熔炼及过程原理	144
3.2 钛合金熔炼时的金属损耗与偏析	148
3.2.1 熔炼时的金属损耗	148
3.2.2 熔炼过程的偏析	151
3.3 钛合金的熔炼工艺	154
3.3.1 真空自耗电极熔炼法	154
3.3.2 真空非自耗电极电弧熔炼	157
3.3.3 电子束冷床熔炼法 (EBCHR)	158
3.3.4 等离子弧冷床熔炼法 (PACHR)	161

3.3.5 电磁感应熔炼	165
3.4 钛合金熔炼设备	169
3.4.1 电弧熔炼炉	169
3.4.2 冷床熔炼炉	175
3.4.3 等离子体熔炼炉	177
3.4.4 悬浮熔炼炉	180
3.5 钛合金的精炼	182
3.5.1 克劳尔 (Kroll) 法	182
3.5.2 电子束精炼法	183
3.5.3 区域熔炼法	184
3.5.4 复合工艺	185
3.5.5 其他方法	185
3.6 钛合金熔体质量检测	186
3.6.1 原子光谱法	186
3.6.2 分子光谱法	188
3.6.3 应用实例	189
参考文献	190
第4章 铜合金熔炼	193
4.1 铜合金熔炼的特点	193
4.1.1 铜合金的特点、分类及用途	193
4.1.2 合金元素和杂质对铜合金性能的影响	198
4.1.3 铜合金熔炼中的氧化、吸气与夹杂	201
4.2 铜合金熔炼时的金属损耗与配料	202
4.2.1 铜合金熔炼时的金属损耗	202
4.2.2 铜合金熔炼用炉料	203
4.2.3 铜合金熔炼的配料方法	210
4.3 铜合金熔炼设备及操作要点	214
4.3.1 感应电炉	214
4.3.2 燃料炉	224
4.3.3 熔炼设备常见故障诊断及排除	226
4.4 铜合金的熔炼工艺	228
4.4.1 熔炼前的准备	228
4.4.2 工业纯铜的熔炼工艺	230
4.4.3 黄铜的熔炼工艺	235
4.4.4 青铜的熔炼工艺	241
4.4.5 白铜的熔炼工艺	246
4.4.6 收尘和铜渣回收	247
4.5 铜合金的精炼	251
4.5.1 除气精炼	251

4.5.2	脱氧精炼	254
4.5.3	氧化精炼	257
4.5.4	除渣精炼	257
4.6	铜液质量检测技术	258
4.6.1	化学成分检测	258
4.6.2	H含量检测	259
4.6.3	O含量检测	260
4.6.4	断口及弯曲试验	260
	参考文献	261
第5章	镍基合金熔炼	263
5.1	镍基合金熔炼的特点	263
5.1.1	镍基合金的分类、特点及用途	263
5.1.2	合金元素和杂质对镍基合金性能的影响	268
5.1.3	镍基合金的熔炼特点	271
5.2	镍基合金熔炼时的金属损耗与配料	271
5.3	镍基合金熔炼设备及操作要点	272
5.3.1	感应电炉	272
5.3.2	电弧炉	273
5.3.3	电渣重熔炉	276
5.3.4	等离子熔炼炉	279
5.3.5	电子束重熔炉	282
5.4	镍基合金的熔炼工艺	284
5.4.1	感应电炉熔炼工艺	285
5.4.2	电弧炉熔炼工艺	288
5.4.3	电渣炉熔炼工艺	291
	参考文献	293
第6章	其他有色重金属熔炼	295
6.1	锌合金熔炼	295
6.1.1	锌合金的特点、分类及用途	295
6.1.2	锌合金的熔炼工艺	298
6.1.3	净化、变质处理与炉前检验	300
6.2	轴承合金熔炼	301
6.2.1	锡基和铅基轴承合金	301
6.2.2	锡基和铅基轴承合金的熔炼	302
	参考文献	304

绪 论

1. 有色金属的分类

所谓有色金属，是指铁、铬、锰三种金属以外的所有金属。较常见的有色金属主要是铝、铜、镁、铅和镍等。通常将铁、铬、锰称为黑色金属。

对于有色金属的分类，各个国家并不完全统一。大致上按其密度、价格、在地壳中的储量及分布情况，以及被人们发现和使用的早晚等分为五大类：轻金属、重金属、贵金属、半金属和稀有金属。

(1) 轻金属

一般指密度在 4.5g/cm^3 以下的有色金属，包括铝、镁、钠、钾、钙、锶、钡。这类金属的共同特点是：密度小（密度 $0.53 \sim 4.5\text{g/cm}^3$ ），化学活性大，与氧、硫、碳和卤素的化合物都相当稳定。

轻金属铝在自然界中占地壳质量的 8%（铁为 5%）。随着近代炼铝技术的发展及铝在国民经济各部门的广泛应用，目前铝已成为有色金属中生产量最大的金属，其产量已超过有色金属总产量的 $1/3$ 。

(2) 重金属

重金属一般指密度在 4.5g/cm^3 以上的有色金属，其中有铜、镍、铅、锌、钴、锡、锑、汞、镉和铋。每种重金属的特性，在国民经济各部门中都有其特殊的应用范围和用途。例如铜是军工及电气设备的基本材料；铅在化工方面如制造耐酸管道、蓄电池等有着广泛应用；镀锌的钢材广泛应用于工业和生活方面；而镍、钴则是制造高温合金与不锈钢的重要战略物资。

(3) 贵金属

这类金属包括金、银和铂族元素（铂、铱、钨、钌、钯和铑）。由于它们对氧和其他试剂的稳定性很强，而且在地壳中含量少，开采和提取比较困难，故价格比一般金属贵，因而得名贵金属。

这类金属除金、银、铂有单独矿物，从矿石中生产一部分外，大部分要从铜、铅、锌和镍等冶炼厂的副产品（阳极泥）中回收。

它们的特点是密度大（ $10.4 \sim 22.4\text{g/cm}^3$ ），其中铂、铱、钨是金属元素中最重的几种金属；熔点高（ $916 \sim 3000^\circ\text{C}$ ）；化学性质稳定，能抵抗酸、碱的腐蚀（除银和钯外）。另外，金和银具有很高的韧性和塑性，钯、铂也有良好的可塑性，其他均为脆性金属。金银有良好的导电性和导热性，而铂族元素的这两种性质却很弱。

贵金属在工业上广泛地应用于电气、电子工业，航天航空工业，以及高温仪表和接触剂等。

(4) 半金属

半金属一般是指硅、硒、碲、砷、硼。其物理化学性质介于金属与非金属之间，如砷是非金属，但又能传热导电。

此类金属根据各自特性，具有不同用途：硅是半导体主要材料之一；高纯碲、硒、砷是制造化合物半导体的原料；硼是合金的添加元素等。

(5) 稀有金属

稀有金属通常是指那些自然界中含量很少、分布稀疏或难从原料中提取的金属，如锂、镧、铈等。为了便于研究，根据各种稀有金属的某些共同点（如金属的物理化学性质、原料的共生关系、生产流程等）划分为以下五类：

1) 稀有轻金属。包括五种金属：锂、铍、铷、铯和钛。它们的共同特点是密度小（锂为 0.53g/cm^3 ，铍为 1.85g/cm^3 ，铷为 1.55g/cm^3 ，铯为 1.87g/cm^3 ，钛为 4.5g/cm^3 ），化学活性很强。这类金属的氧化物和氯化物都具有很高的化学稳定性，很难还原。

2) 稀有高熔点金属。稀有高熔点金属包括八种金属：钨、钼、钽、铌、锆、钪、钒和铪。它们的共同特点是熔点高（ $1830 \sim 3400^\circ\text{C}$ ），硬度高，耐蚀性强，以及可与一些非金属生成非常难熔的稳定化合物，如碳化物、氮化物、硅化物和硼化物。这些化合物是生产硬质合金的重要材料。

3) 稀土金属。稀土金属包括镧系元素以及和镧系元素性质很相近的钪和铈，共 17 种：钪、铈、镧、铈、镨、镱、钆、铽、钇、钆、铽、铈、铈、铈、铈、铈、铈、铈、铈。从镧到钪又称为轻稀土；从钆到铈包括钪和铈称为重稀土。18 世纪时，只能获得外观似碱土（如氧化钙）的稀土氧化物，故起名“稀土”，并沿用至今。这些金属的原子结构相同，因而其物理化学性质很近似。在矿石中它们总是伴生在一起的，在提取过程中，需经繁杂作业才能逐个分离出来。

4) 稀有分散金属。简称稀散金属，包括镓、铟、铊、铋等。大部分赋存于其他元素的矿物中。

5) 稀有放射性金属。属于这一类的是各种天然放射性元素：镭、钋、钷、钷和钷。还有几种人造超铀元素：钷、钷、钷、钷等。

稀有金属在冶金工业中常用来制造特种钢、超硬合金和耐高温合金等。稀有金属的名称也具有一定的相对性，稀有金属并不全都稀少，许多稀有金属在地壳中的含量比常用金属大的多，如锆、钒、锂、铍的含量比铅、锌、汞、锡的含量都大。随着技术的发展，它们与普通金属的界限正在逐步消失。

2. 有色金属熔炼技术的现状及发展趋势

在工业生产，特别是铸造或锻造工艺中使用的大多数是合金，而非纯金属。

由一种有色金属作为基体，加入另一种（或几种）金属或非金属组成的既具有基体金属通性又具有某些特定性能的物质称为有色金属合金。

有色金属合金分类方法也很多。按基体金属可分为铝合金、镁合金、铜合金、钛合金、镍合金等；按其生产方法可分为铸造合金与变形合金；根据组成合金的元素数目分为二元合金、三元合金、四元合金和多元合金。一般来说，合金组分的总质量分数小于

2.5%者为低合金，在2.5%~10%范围内者为中合金，大于10%者为高合金。

在铸造合金或变形合金的生产中，采用的熔炼方法主要是熔配或重熔，与生产、提取纯金属的冶金方法有一定的区别。所谓熔配，是根据需要的合金成分，将几种纯金属或非金属熔化在一起，并进行熔体处理，获得满足要求的合金熔体的过程。所谓重熔，通常是将已经配制好的合金锭，进行加热熔化，然后进行熔体处理，获得满足要求的合金熔体的过程。

因此，根据熔配或重熔工艺的特点，有色合金熔炼技术的发展中使用最多的是采用坩埚熔炼，利用燃料或电力加热熔化。多数是在大气环境下熔炼，而对易氧化的合金采用真空熔炼。

由于有色金属或合金的种类较多，熔炼技术差别较大。下面介绍本书主要涉及的、最常用的几种有色合金的熔炼技术现状及发展趋势。

(1) 铝合金熔炼

近年来，随着我国铝加工业迅猛发展，铝合金制品在国民经济各个领域应用更加广泛。我国现有原铝产量已居世界第一位，2012年我国原铝产量达到了1968万t。

铝合金熔炼技术相对来说发展得比较成熟。然而，铝合金熔炼是一个高耗能的过程，是节能减排的重点，世界各国投入了许多力量进行研究，因此近期在铝合金熔炼炉及熔炼工艺方面仍然在不断地进步及发展。

近几年，美国阿帕格（Apogee Technology Inc.）公司等单位共同研发的具有划时代意义的等温熔炼技术（ITM, Isothermal Melting），与当前的常规反射炉熔炼技术相比，可节能70%，减排80%，铝的烧损下降4%，熔体质量显著提高。在节源（资源与能源）、减排方面意义重大，已处于实用化试生产阶段。等温熔炼是指在恒定温度下进行熔炼，而在等温熔炼系统炉膛的铝熔体温度不但在很小范围内变动，而且各处的温度几乎一致。此处所指的炉膛即铝熔体池，温度由计算机自动监控，通过熔池底部的发热板来精确控制温度。熔体池相当于常规的静置炉。

等温熔炼是一个连续的工艺过程，熔化后的铝熔体在一个完全封闭的系统内循环流动，它由四个区（循环泵区即泵送区，固体炉料区即装料区，浸没加热区，中间处理区即除气、净化处理区）与熔池（保温炉膛）组成。等温熔炼炉的关键零部件有熔体循环泵、直接浸没式电加热元件、熔体净化处理石墨旋转喷嘴和保温加热墙。实际上这些零部件过去或现在在冶金部门都有应用，但采用了新的设计及控制。已设计与制造出熔炼速率达14.5t/h和35t/h的等温熔炼炉。这种快速熔化的等温熔炼炉的容量与当前使用的常规反射熔炼炉的容量相当。

此外，在提高铝合金熔炼炉的燃烧效率方面，蓄热式高温空气燃烧技术的诞生，突破了几百年来人们对燃烧技术的传统认识和概念。该技术采用蓄热装置，通过极限回收烟气余热，使空气预热到800~1000℃，将高温空气吹入炉膛，同时将燃料输送到气流中燃烧。燃烧区维持低氧状态，空气含氧量（体积分数）在7%~15%范围内，最大限度地降低了燃烧中NO_x的排放量，从而达到高效节能，降低生产成本，减少污染物（特别是NO_x）排放量，降低燃烧噪声等多重效果。因此，通过借鉴目前在钢铁冶金行

业轧钢加热炉上广泛应用的蓄热式高温空气燃烧技术，结合铝熔炼炉的结构及熔炼工艺特点，把该技术应用到铝熔炼炉的燃烧系统上，起到了节能减排的效果。

在铝合金熔体净化处理技术方面，旋转喷吹技术得到了推广应用。旋转喷吹技术是利用高速旋转的喷头自铝液底部吹入惰性气体，气泡被分离或弥散，均匀的气泡增加了气体与溶液的接触面积和作用时间，能有效地去除氢和夹杂物。为提高精炼效果，应从以下两方面进行优化：通过改变喷头的结构使得进气方式发生改变以求减小气泡尺寸；以氦气或氩气作为载体，加入少量的无毒精炼剂进行喷吹提高精炼效果。

透气砖熔炼技术是采用透气砖吹入弥散的惰性气体的熔体净化处理技术，它的核心部件是透气砖。透气砖熔炼技术应用先进的控制系统，适时控制每组透气砖的供气量、供气压力，制造沸腾大脉冲的造浪，促使铝液三维对流传质，进行有规律的、有序的对流及湍流的搅拌过程。气体始终是从底部向上运动，吸附带出悬浮在铝液中的杂质相，运动过程将炉底和熔体中大的夹杂物也带到铝液面，这样减少了炉床和炉角的结渣，保持了炉子容积，使炉床相对清洁。该技术主要应用于生产变形铝合金的大型熔铝炉等。

总之，铝合金熔炼技术仍然在不断地进步和发展。随着与铝熔炼过程相关的流动、传热、燃烧等理论的完善以及计算机技术的迅速发展，运用计算流体力学软件对铝熔炼炉熔炼技术进行优化升级，同时大力研发新兴熔炼技术，以满足能源、环保的要求和优质铝合金铸件的需求是今后一段时间亟待解决的技术问题。

(2) 镁合金熔炼

近年来，镁合金在汽车工业、通信电子业和航空航天业等领域得到日益广泛的应用，其产量在全球的年增长率高达 20%，显示出了广阔的应用前景。我国金属镁的产量占世界产量的 80% 左右，达到年产 70 万 t 左右。因此开发及利用好镁合金具有重要意义。

限制镁合金广泛应用的主要问题之一是镁合金在熔炼和加工过程中极易氧化燃烧，使得镁合金的生产难度较大。近年来，通过对基于气体保护的熔炼铸造设备的开发，大大推进了镁合金熔炼技术的发展。例如，德国开发了集熔化与压铸为一体的封闭型镁合金生产系统，熔炼在密封的坩埚内进行。通过固定的吸管将镁液送入压铸型腔底部，坩埚及压铸型腔内都通有氩气，不用 SF_6 气体保护。这套工艺系统可以有效解决熔炼及浇注过程中对镁液的保护。欧美的一些镁合金压铸企业采用容积泵（Gas displacement pump）定量浇注，减少 SF_6 气体的用量。容积泵有一个圆柱形泵室，靠阀调节流量，液流速度通过氩气压控制，很适合于镁合金压铸生产。

镁合金熔炼还开发了单室、双室、三室熔炼炉。单室熔炼炉是熔化、保温和镁液出炉都在一个坩埚内完成，适于非流水线生产的砂型铸造或小批量压铸。双室炉的坩埚内有一隔板把坩埚内的空间分隔成两部分，隔板下部有孔将两熔池连通；也可以采用两个坩埚，用能加热的输液管使两者连通。双室炉中的一个熔池（坩埚）用于熔化镁锭，向另一个熔池（坩埚）提供镁液，同时起集渣作用；另一个熔池（坩埚）保温，并直接向压铸机提供镁液。双室炉有利于使熔渣集中于熔化室，使提供给压铸机的镁液纯净、温度恒定、质量稳定。三室炉的熔化室温度较低，向压铸机提供镁液的供液室温度

较高，中间室的温度由熔化室一侧到供液室一侧逐渐升高。熔化室温度低有利于 CO_2 气体保护，中间室是密闭的，平衡熔化室和供液室之间的压差，同时也起到第二次集渣的作用。镁合金熔炼炉的镁液温度、液位检测与控制装置、气体保护装置、熔炼和注射过程的自动控制系统等是目前研究开发的重点。

气体保护是在镁液表面覆盖一层惰性气体或者能与镁反应生成致密氧化膜的气体，从而隔离空气中的氧。目前用的保护气体主要有 SF_6 、 SO_2 、 CO_2 、Ar 等。 SF_6 是一种无色、无嗅、无毒的气体，在镁液面会生成含有 MgF_2 的致密氧化膜，阻止镁液的进一步氧化。通常将 SF_6 和干燥的空气、 CO_2 混合使用。该工艺已经相当成熟。由于 SF_6 的温室效应是 CO_2 的 23900 倍，因此减少 SF_6 的使用，或者研制有效无毒副作用的 SF_6 气体代用品和技术，或者寻找其他保护途径，已经成为镁合金先进熔炼技术的重要开发内容。

在减少 SF_6 的使用量技术方面，国际镁业协会提出在当前情况下采取以下四项措施：

- 1) 改进镁合金熔炼时坩埚盖的密封性，减少 SF_6 的泄漏。
- 2) 研究自动加料、吸取镁液的装置。
- 3) 优化保护气体的供气系统，使气体在镁液表面分布更加合理，更加有效。
- 4) 优化混合气体的组成及 SF_6 的含量。

在 SF_6 的替代物研究方面，1999 年国际镁业协会（IMA）发布了 SO_2 和 SF_6 气体的替代品研究计划，在全世界范围内进行招标。挪威的一家私立研究机构 SINTEF 与挪威科技大学共同获得了国际镁协的资助，主要研究一些氟化物和氟碳化物（HFC-134a、HFE7100 等）的保护性能，表明具有较好的保护效果。此外，在众多的 SF_6 替代物中，3M™ Novoc™ 612 镁保护液（一种氟化酮）在工业生产规模的镁熔炼保护测试中显示，它作为保护剂具有和 SF_6 一样好的效果，而它的排放物没有健康和安全问题，同时它的温室效应低，约为 SF_6 的 1%，所以该种镁保护液成为 SF_6 合适的替代物。氟化酮汽化有两种方法：一是在压力室中，使氟化酮的高压蒸气转变为饱和蒸气（5% ~ 7%），再稀释为保护气；另一种方法是把液体抽到待混合的气体中，使它快速蒸发为气体。

合金化阻燃是镁合金熔炼保护的另一个研究方面。通过加入合金元素，使镁合金表面生成致密的保护性氧化膜，以提高镁合金的燃点，从而阻止镁合金氧化燃烧，实现在大气中直接熔炼和加工。研究表明，加入 Ca 能够提高镁合金的着火点，改善镁合金的阻燃性。然而，含 Ca 镁液的阻燃保护膜受到搅动或冲击后极容易破裂，一旦表面保护膜破裂，镁液就会发生氧化燃烧。Be 在镁熔体中有高的扩散速度，所产生的 BeO 具有高的热力学稳定性，且挥发倾向性小。BeO 产生压应力，作为使燃烧达到最低程度的添加剂。常规镁压铸合金操作中 Be 的含量为 $5 \times 10^{-6} \sim 15 \times 10^{-6}$ 。

（3）钛合金熔炼

钛是地壳中仅次于铝、铁和镁，居第四位的结构金属元素。钛材料具有记忆性、超导性、高比强度、高耐蚀性、亲生物性、高低温性能优良等特性，因而被称为第三金属（相对于铁、铝）、海洋金属（耐海水性能良好）、航空金属（理想的航空航天材料）和

未来金属（朝阳产业）。钛工业是一个国家现代科学技术发展水平的重要标志之一。目前，在世界上只有美国、日本、俄罗斯可以进行钛的规模化生产，中国是第四个拥有完整钛工业体系的国家。钛金属被广泛应用于航天、航空、化工、石油、化学、电力、冶金、医药以及海洋工程、地热工程、制冷工业、体育、旅游等领域，随着这些行业的产业升级换代，国家经济实力逐步增强，钛材料日益明显地成为“工程技术和高科技领域中的关键材料和支撑材料”。

钛及其合金是一种高化学活性金属，在熔融状态下，几乎要与所有的耐火材料发生化学反应，生成化合物，需要采用较为特殊的熔炼方法。钛必须在水冷或 Na-K 冷却的铜坩埚中以及真空或氩气、氮气等惰性气氛中熔炼，因此掌握钛合金熔炼技术的难度较大。

钛及其合金的熔炼主要分为两类：真空自耗（VAR）熔炼和真空非自耗熔炼。真空自耗熔炼主要包括真空自耗电弧熔炼、电渣熔炼、真空凝壳炉熔炼。非真空自耗熔炼主要包括真空非自耗电弧熔炼、电子束熔炼、等离子束（或等离子弧）熔炼等，后两种又称冷床炉熔炼。

VAR 熔炼速度快，能生产大型铸锭，但是容易产生高密度及低密度夹杂，产生成分偏析，而且制造电极、破碎料增加了成本。冷床炉克服了 VAR 的一些缺点，可以生产高质量的铸锭，但是也有不足。电子束熔炼（EBM）在真空下熔炼，容易造成元素的挥发，致使铸锭成分波动难以控制，而且污染炉子。等离子炉需要等离子气体，会增加成本。凝壳-自耗电弧炉几乎具有所有炉子的优点，但是不适合自动化控制。随着对钛合金需求的增加，质量要求的提高，以及对自动化、环保、低成本等的要求，近期提出的建立在冷床炉基础上的新的熔炼方法将会占据主导地位。如何获得成分均匀、准确、杂质含量低的钛合金是熔炼方面急需解决的问题。

（4）铜合金熔炼

铜合金材料由于具有优异的导电导热和耐蚀性能、优良的力学性能、良好的加工成形性能等，成为各行业广泛使用的材料。迄今为止，铜合金系列有上百种，已工业化生产的铜合金有 500 多种，主要分为四大类：纯铜、黄铜、青铜和白铜。

铜合金的熔炼方法与前述的铝合金相似，既可以用传统的燃料坩埚炉熔炼，也可以采用感应电炉熔炼。对于一些目前备受关注的电工铜合金，如 Cu-Cr-Zr 铜合金等，真空熔炼是目前普遍采用的工艺，但是真空熔炼对炉体的密封性和原料成分与杂质含量要求很高，不能连续性生产，铸锭规格小，设备投资大，导致合金的生产成本居高不下。为了实现 Cu-Cr-Zr 系合金的大规模生产，日本、德国、美国等对该系合金的非真空熔铸技术进行了大量的研究，针对不同的需求开发出多个系列产品，并且已经商业化生产，但其技术细节被严格控制。近年来，国内铜加工企业和科研单位都致力于开发非真空 Cu-Cr-Zr 熔炼技术，并取得了一定的进展。如在 300kg 熔炼设备上进行 200kg 规模的非真空熔炼-半连续铸造试验，Cr 的平均收得率为 81.5%，Zr 的平均收得率为 81.2%，Cu 的平均收得率为 95%。一些措施包括，在高纯氩气等保护性气氛下进行熔炼，炉衬材料采用镁砂或氧化锆坩埚，Cr 和 Zr 元素采用中间合金的方式加入并采用包内冲熔，以

提高合金元素的收得率，在加入合金元素之前添加小于2%（质量分数）的Cu-Mg进行脱氧处理，选用木炭、磷片石墨和特殊的复合覆盖剂，提高合金元素的收得率和吸收稳定性。

虽然我国已经成为世界铜合金生产和消费的第一大国，但在高性能铜合金材料开发和熔炼技术等方面与世界先进水平还存在差距。因此，如何开发高性能铜合金材料及其成形加工技术，以及开发先进的熔炼技术等是目前面临的主要技术问题，同时需要加大科技投入和技术改造，淘汰落后生产工艺和装备，降低能耗和保护环境。

（5）镍合金熔炼

镍及其合金的主要熔炼方法是感应电炉熔炼，许多镍基高温合金需要真空感应电炉熔炼，以减少氧化及夹杂。

目前的状况是真空技术及其理论已发展到相当成熟的程度，扩展到各种技术领域。20世纪30年代以后，真空冶金得到发展，在钢铁冶金中应用真空技术稍早，规模也较大。同时，在镍基合金及稀有金属冶金中也较多地使用真空设备。

由于有色金属及其化合物的种类多，作业多样，而现在真空冶金和熔炼的应用还不很普遍，对于多样化的作业和物料来说，可用于生产的设备还不算多，所以有色金属真空冶金或熔炼也需要进一步的发展。

参 考 文 献

- [1] 高振中, 白文昌, 王祝堂. 开创铝熔炼技术新时代的等温熔炼炉[J]. 轻合金加工技术, 2007, 35(2): 1-6.
- [2] 王计敏, 闫红杰, 周子民, 等. 铝熔炼炉熔炼技术评述及其研究展望[J]. 有色冶金节能, 2011(3): 18-23.
- [3] 付彭怀, 王渠东, 蒋海燕, 等. 镁合金熔炼技术研究进展[J]. 铸造技术, 2005, 26(6): 312-316.
- [4] S Dean, St Paul. 3M™ Novec™ 612 magnesium protection fluid; Its development and use in full scale molten magnesium processes [C]. IMA—PROCEEDINGS, Annual world magnesium conference 60th, 2003, 26-30.
- [5] S Bartos, C Laush, J Scharfenberg, et al. Reducing greenhouse gas emissions from magnesium die casting [J]. Journal of Cleaner Production. 2007, 15(10): 979-987.

第 1 章 铝合金熔炼

1.1 铝合金熔炼的特点及过程原理

1.1.1 铝合金的分类、性能特点及用途

根据铝合金中合金元素的含量和加工工艺性能特点，铝合金可分为铸造铝合金和变形铝合金。

1. 铸造铝合金

铸造铝合金是指主要用重力浇注或压铸等铸造方法制造零件或毛坯的铝合金。铸造铝合金中合金元素的含量比较大，合金元素总的质量分数在 6% ~ 30% 范围内。一般铸造合金的铸造性能好，压力加工性能差，且在实际使用中还要求铸件具有足够的力学性能。因此，铸造合金的成分并不完全都是流动性好的共晶合金，只是合金元素的含量比变形铝合金高一些。主要的铸造铝合金分类、性能特点及用途见表 1-1。我国铸造铝合金的牌号、化学成分见表 1-2 和表 1-3。

表 1-1 主要的铸造铝合金分类、性能特点及用途

合金种类	合金系	牌号举例	性能特点	主要用途
铝硅合金	Al-Si (简单铝硅合金)	ZL102	铸造性能好，不能热处理强化，力学性能较低	适于形状复杂、中等载荷零件，如仪表壳体、盖等
	Al-Si-Mg	ZL101	铸造性能良好，可热处理强化，力学性能较高	适于形状复杂、中等或高载荷零件，如机架、泵体、曲轴箱、气缸头、活塞等
	Al-Si-Cu	ZL107		
	Al-Si-Mg-Cu	ZL105、 ZL110		
	Al-Si-Mg-Cu-Ni	ZL109		
铝铜合金	Al-Cu	ZL203	力学性能高，耐热性好，流动性差，易热裂，耐蚀性差	适于高温或室温强度要求较高的零件，如机架、小型气泵活塞等
	Al-Cu-Mn	ZL201		
铝镁合金	Al-Mg	ZL301	耐蚀性好，力学性能较高	适于高静载荷或要求耐蚀的零件，如雷达座、装饰件等
	Al-Mg-Si	ZL303		
铝锌合金	Al-Zn	ZL402	能自动淬火，力学性能高，耐热性低	适于形状复杂、高静载荷的汽车、医药机械零件
	Al-Zn-Si	ZL401		

表 1-2 铸造铝合金的牌号及其化学成分 (摘自 GB/T 1173—1995)

合金牌号	合金代号	主要元素 (质量分数,%)					
		Si	Cu	Mg	Zn	Mn	Ti
ZAlSi7Mg	ZL101	6.5 ~ 7.5	—	0.25 ~ 0.45	—	—	—
ZAlSi7MgA	ZL101A	6.5 ~ 7.5	—	0.25 ~ 0.45	—	—	0.08 ~ 0.20
ZAlSi12	ZL102	10.0 ~ 13.0	—	—	—	—	—
ZAlSi9Mg	ZL104	8.0 ~ 10.5	—	0.17 ~ 0.35	—	0.2 ~ 0.5	—
ZAlSi5Cu1Mg	ZL105	4.5 ~ 5.5	1.0 ~ 1.5	0.4 ~ 0.6	—	—	—
ZAlSi5Cu1MgA	ZL105A	4.5 ~ 5.5	1.0 ~ 1.5	0.4 ~ 0.55	—	—	—
ZAlSi8Cu1Mg	ZL106	7.5 ~ 8.5	1.0 ~ 1.5	0.3 ~ 0.5	—	0.3 ~ 0.5	0.10 ~ 0.25
ZAlSi7Cu4	ZL107	6.5 ~ 7.5	3.5 ~ 4.5	—	—	—	—
ZAlSi12Cu2Mg1	ZL108	11.0 ~ 13.0	1.0 ~ 2.0	0.4 ~ 1.0	—	0.3 ~ 0.9	—
ZAlSi12Cu1Mg1Ni1	ZL109	11.0 ~ 13.0	0.5 ~ 1.5	0.8 ~ 1.3	Ni0.8 ~ 1.5	—	—
ZAlSi5Cu6Mg	ZL110	4.0 ~ 6.0	5.0 ~ 8.0	0.2 ~ 0.5	—	—	—
ZAlSi9Cu2Mg	ZL111	8.0 ~ 10.0	1.3 ~ 1.8	0.4 ~ 0.6	—	0.10 ~ 0.35	0.10 ~ 0.35
ZAlSi7Mg1A	ZL114A	6.5 ~ 7.5	—	0.45 ~ 0.60	Be0.04 ~ 0.07	—	0.10 ~ 0.20
ZAlSi5Zn1Mg	ZL115	4.8 ~ 6.2	—	0.4 ~ 0.65	1.2 ~ 1.8	Sb0.1 ~ 0.25	—
ZAlSi8MgBe	ZL116	6.5 ~ 8.5	—	0.35 ~ 0.55	Be0.15 ~ 0.4	—	0.10 ~ 0.30
ZAlCu5Mn	ZL201	—	4.5 ~ 5.3	—	—	0.6 ~ 1.0	0.15 ~ 0.35
ZAlCu5MnA	ZL201A	—	4.8 ~ 5.3	—	—	0.6 ~ 1.0	0.15 ~ 0.35
ZAlCu4	ZL203	—	4.0 ~ 5.0	—	—	—	—
ZAlCu5MnCdA	ZL204A	—	4.6 ~ 5.3	—	Cd0.15 ~ 0.25	0.6 ~ 0.9	0.15 ~ 0.35
ZAlCu5MnCdVA	ZL205A	—	4.6 ~ 5.3	—	Cd0.15 ~ 0.25 V 0.05 ~ 0.3 Zr 0.05 ~ 0.2	Mn0.3 ~ 0.5 Be0.005 ~ 0.06	0.15 ~ 0.35
ZAlR5Cu3Si2	ZL207	1.6 ~ 2.0	3.0 ~ 3.4	0.15 ~ 0.25	Ni0.2 ~ 0.3 Zr0.15 ~ 0.25 RE4.4 ~ 5.0	0.9 ~ 1.2	—
ZAlMg10	ZL301	—	—	9.5 ~ 11.0	—	—	—
ZAlMg5Si1	ZL303	0.8 ~ 1.3	—	4.5 ~ 5.5	—	0.1 ~ 0.4	—
ZAlMg8Zn1	ZL305	—	—	7.5 ~ 9.0	1.0 ~ 1.5	Be0.03 ~ 0.1	0.1 ~ 0.2
ZAlZn11Si7	ZL401	6.0 ~ 8.0	—	0.1 ~ 0.3	9.0 ~ 13.0	—	—
ZAlZn6Mg	ZL402	—	—	0.5 ~ 0.65	5.0 ~ 6.5	Cr0.4 ~ 0.6	0.15 ~ 0.25