

LÜHEJIN

SHENGCHAN JISUAN YU JIHUA

铝合金 生产计算与计划

■ 梅锦旗 著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

铝合金生产计算与计划

梅锦旗 著

北 京
冶金工业出版社
2014

内 容 提 要

本书系统地介绍了铝合金的分类,变形铝合金和铸造铝合金的配料计算方法和过程,变形铝合金板锭、圆锭生产计划的制定,铸造铝合金生产计划的制定,生产计划的数学建模及优化仿真等内容,并配有大量的插图、例题及讲解。

本书适合于铝合金熔炼与铸造企业从事工艺、技术、质量、配料、计划、生产、管理等工作的相关人员阅读,也可供从事有色金属熔炼与铸造的相关人员以及计算机、自动化、应用数学等工程应用领域的人员阅读参考,同时也可作为大中专院校相关专业的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

铝合金生产计算与计划/梅锦旗著. —北京:冶金工业出版社, 2014. 10

ISBN 978-7-5024-6747-0

I. ①铝… II. ①梅… III. ①铝合金—生产—配料—计算 ②铝合金—工业生产计划—制定 IV. ①TG146. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 237055 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcs@cnmp.com.cn

责任编辑 张熙莹 美术编辑 杨 帆 版式设计 孙跃红

责任校对 李 娜 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-6747-0

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;北京百善印刷厂印刷

2014 年 10 月第 1 版, 2014 年 10 月第 1 次印刷

169mm×239mm; 9.25 印张; 179 千字; 138 页

38.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街 46 号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgy.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

前 言

铝合金是工业中应用最广泛的一类有色金属结构材料，在航空、航天、汽车、机械制造、船舶及化学工业中已大量应用，其应用仅次于钢铁。随着科学技术的发展，现代生产复杂性越来越高，市场竞争也越来越激烈，因此对企业的管理水平提出了更高的要求。在激烈的市场竞争中，企业管理者必须进行科学的生产管理，提高企业的经济效益。

在铝合金熔炼与铸造企业中，铝合金的熔炼、铸造成型、锯切加工等生产过程的相关数理计算以及优化问题是铝合金生产管理的核心内容。如何提高铝合金生产计算的精度和速度、原材料的综合利用率，降低烧损以及如何优化生产计划，对于降低物耗和能耗、提高设备的生产效率、降低生产成本、提高产品质量、缩短产品生产周期和增强企业市场竞争力，具有重要的现实意义和应用价值。

考虑到国内目前尚无一本专门论述铝合金配料计算和生产计划的书出版，在已有的铝合金熔铸书籍中仅把配料计算内容作为简单的一小节，内容显得单薄，不够全面和系统；而在铝合金生产计划方面，国内几乎没有一本铝合金技术书籍有专门的讲解；在铝合金熔铸计划的优化仿真方面，在国内也几乎是空白。为此，作者利用工作之余断断续续花了四年多的时间完成了本书的写作，填补了国内的空白，以飨广大读者。

本书为国内迄今唯一一本比较系统、详尽地介绍有关铝合金熔炼与铸造过程中配料计算、计划制定以及优化仿真的专著。全书共分7章，第1章主要讲解铝合金的一些基本知识，第2~3章主要讲解铝合金配料计算等内容，第4~6章主要讲解铝合金生产计划的制定等内容，第7章主要讲解生产计划的优化仿真等内容。

本书在配料计算方面，归纳和讲解了变形铝和铸造铝配料计算的

方法和理论，完善了换料、减料和加料的概念，提出了化学成分调整的杠杆原理；在生产计划方面，提出了铝合金熔铸中的最优化组合原则，归纳和总结了变形铝合金板锭、圆锭以及铸造铝合金生产计划制定的具体方法及步骤；在优化仿真方面，建立了配料计算模型，开发了基于该模型的软件系统，提出了不均分连接、均分连接、连接率、色散算法、色散次数等概念，建立了整个优化仿真的数学模型，并开发了基于该模型的软件系统。

本书融合了教科书和专业书籍的风格，各章节的重要概念、知识点均精心设计了相关例题和详细的解答过程，例题中数据来源于实际生产，并配有大量生动而形象的插图和表格，全部系作者绘制。由于作者水平所限，书中不妥之处，敬请广大读者批评指正。

本书获得了青海庆丰铝业有限公司的出版资助和支持，在写作过程中获得了很多老领导、同事、朋友的支持和鼓励，在此表示衷心的感谢！

梅锦旗

2014. 5. 15

目 录

1 绪 论	1
1.1 铝合金的分类	1
1.1.1 变形铝合金的分类	2
1.1.2 铸造铝合金的分类	2
1.2 铝合金的成分	3
2 变形铝合金配料计算	4
2.1 炉料及其分类	4
2.2 配料计算	6
2.2.1 实际配料量的确定	6
2.2.2 配料值的确定——最大值原则和中值原则	7
2.2.3 各炉料组成及配料比的确定	9
2.2.4 特殊情况	18
2.3 炉料的调整	20
2.3.1 换料	20
2.3.2 减料	21
2.3.3 加料	22
2.4 化学成分调整	24
2.4.1 补料计算	24
2.4.2 冲淡计算	26
2.4.3 杠杆原理	28
2.5 铝合金配料计算系统	29
2.5.1 系统简介	29
2.5.2 基本原理	30
2.5.3 配料计算实例	30
2.5.4 铸造铝使用说明	32
2.5.5 系统的未来发展	33

3	铸造铝合金配料计算	34
3.1	低铁组的配料计算	34
3.1.1	熔铸过程简介	34
3.1.2	理论配料量、实际配料量以及炉次数的确定	34
3.1.3	配料值的确定	37
3.1.4	各炉料组成及配料比的确定	38
3.2	高铁组的配料计算	38
3.2.1	熔铸过程简介	38
3.2.2	理论配料量、实际配料量以及炉次数的确定	39
3.2.3	配料值的确定	41
3.2.4	各炉料组成及配料比的确定	41
3.2.5	静置炉中炉料质量的确定	52
3.3	化学成分调整	55
3.3.1	补料计算	55
3.3.2	冲淡计算	57
4	板锭生产计划	60
4.1	板锭概述	60
4.1.1	方锭和扁锭	60
4.1.2	板锭的标记	61
4.1.3	板锭的铸造方法	61
4.2	计划制定的原则	62
4.2.1	最优化组合原则的定义	62
4.2.2	具体内容分析	62
4.3	生产计划的制定	67
4.3.1	订单的确认	68
4.3.2	计划的排布	68
4.3.3	出货日期的估算	73
4.3.4	生产计划统计表的填写	74
4.3.5	计划的调整、重排	75
4.4	特殊情况	76
5	圆锭生产计划	78
5.1	圆锭概述	78
5.1.1	实心圆锭和空心圆锭	78

5.1.2 圆锭的标记	78
5.1.3 圆锭的铸造方法	79
5.2 计划制定的原则	80
5.2.1 最优化组合原则的定义	80
5.2.2 具体内容分析	80
5.3 生产计划的制定	83
5.3.1 订单的确认	83
5.3.2 计划的排布	83
5.3.3 出货日期的估算	88
5.3.4 生产计划统计表的填写	88
5.3.5 计划的调整、重排	88
5.4 板锭和圆锭生产计划的对比	89
6 铸造铝合金生产计划	91
6.1 计划制定的原则	91
6.2 生产计划的制定	91
6.2.1 订单的确认	91
6.2.2 计划的排布	92
6.2.3 出货日期的估算	93
6.2.4 生产计划统计表的填写	94
6.2.5 计划的调整、重排	95
6.3 铸造铝和变形铝生产计划的差异	95
7 生产计划的优化仿真	96
7.1 变形铝生产计划的优化仿真	96
7.1.1 国内现状	96
7.1.2 数学模型	97
7.1.3 核心函数及算法	103
7.1.4 计算流程	103
7.2 铸造铝生产计划的优化仿真	109
7.2.1 计划的输入、保存	109
7.2.2 计划的排布	109
7.2.3 计划的输出、保存	110
7.3 生产计划排布系统	110
7.3.1 系统简介	111

7.3.2 板锭生产计划排布实例	111
7.3.3 圆锭生产计划排布实例	115
附 录	117
附录1 中国变形铝及其化学成分表 (GB/T 3190—2008)	117
附录2 中国铸造铝及其化学成分表 (GB/T 8733—2007)	131
附录3 全主元高斯-约当消元法函数 C#代码	135
参考文献	138

1 绪 论

纯铝的密度小 ($\rho = 2.7 \text{ g/cm}^3$), 大约是铁的 $1/3$, 熔点低 (660°C), 具有很高的塑性, 易于加工, 可制成各种型材、板材, 抗腐蚀性能好, 但是纯铝的强度很低, 故不宜作结构材料。在纯铝中可以添加各种合金元素, 制造出满足各种性能、功能和用途的铝合金。

铝合金是指以铝为基体相的合金总称, 其主要合金元素 (简称主元素) 有 Cu、Si、Mg、Zn、Mn 等, 次要合金元素 (也叫杂质元素) 有 Ni、Fe、Ti、Cr、Li 等。

1.1 铝合金的分类

根据加入合金元素的种类、含量及合金的性能, 铝合金可以分为变形铝合金和铸造铝合金, 如图 1.1 所示^[1]。

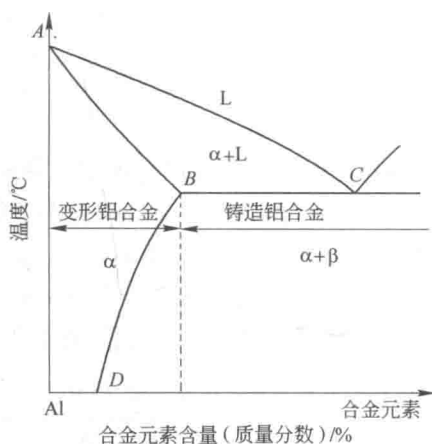


图 1.1 铝合金分类示意图

在变形铝合金中, 合金元素含量比较低, 一般不超过极限溶解度 B 点成分。

铸造铝合金除含有强化元素之外, 还必须含有足够量的共晶型元素 (通常是 Si), 以使合金有相当的流动性, 易于填充铸造时铸件的收缩缝。铸造铝合金中合金元素 Si 的最大含量超过大多数变形铝合金中的 Si 含量, 一般都超过极限溶解度 B 点。

1.1.1 变形铝合金的分类

变形铝合金的分类方法很多,现在工业生产中主要根据所含的主要合金元素,采用四位数字体系将其分为:工业纯铝(1×××系)、Al-Cu合金(2×××系)、Al-Mn合金(3×××系)、Al-Si合金(4×××系)、Al-Mg合金(5×××系)、Al-Mg-Si合金(6×××系)、Al-Zn-Mg-Cu合金(7×××系)、Al-其他元素合金(8×××系)及备用合金组(9×××系)等合金。表1.1列出了各合金系及其对应的组别。

表 1.1 变形铝合金各系及其对应的组别 (GB/T 16474—2011)

牌号系列	组 别
1×××	纯铝(铝含量不小于99.00%)
2×××	以铜为主要合金元素的铝合金
3×××	以锰为主要合金元素的铝合金
4×××	以硅为主要合金元素的铝合金
5×××	以镁为主要合金元素的铝合金
6×××	以镁和硅为主要合金元素,并以Mg ₂ Si相为强化相的铝合金
7×××	以锌为主要合金元素的铝合金
8×××	以其他元素为主要合金元素的铝合金
9×××	备用合金组

1.1.2 铸造铝合金的分类

铸造铝合金的分类方法和变形铝合金类似,现在主要采用三位数字加小数点再加数字的形式将其分为:Al-Cu合金(2××.×)、Al-Cu-Mg合金(3××.×)、Al-Si合金(4××.×)、Al-Mg合金(5××.×)、Al-Zn合金(7××.×)、Al-Ti合金(8××.×)、Al-其他元素合金(9××.×)及备用合金组(6××.×)等合金系。各合金系及其对应的组别见表1.2。

表 1.2 铸造铝合金各系及其对应的组别 (GB/T 8733—2007)

牌号系列	组 别
2××.×	以铜为主要合金元素的铸造铝合金
3××.×	以硅、铜和(或)镁为主要合金元素的铸造铝合金
4××.×	以硅为主要合金元素的铸造铝合金
5××.×	以镁为主要合金元素的铸造铝合金
7××.×	以锌为主要合金元素的铸造铝合金
8××.×	以钛为主要合金元素的铸造铝合金
9××.×	以其他元素为主要合金元素的铸造铝合金
6××.×	备用合金组

1.2 铝合金的成分

按照 GB/T 3190—2008 标准制定的中国变形铝及其化学成分表，见附录 1；按照 GB/T 8733—2007 标准制定的中国铸造铝及其化学成分表，见附录 2。

需要说明的是：在附录 1、2 中铝合金的化学成分含量均指质量分数，其中数量有范围的为主要元素的最小值和最大值含量，无范围的为杂质元素的最大值含量，未标明铝含量的，铝含量为其余。

另外，由于历史原因，实际生产中国内很多铝合金企业仍在沿用较老的牌号或国外牌号，如 383Y.2 对应于老牌号 YLD113，近似日本牌号 ADC12，这里就不一一介绍了，请读者查阅相关资料。

2 变形铝合金配料计算

根据合金本身的工艺性能和该合金加工制备技术条件的要求,在国家标准和有关标准所规定的化学成分范围内,确定合金的配料标准、炉料组成和配料比,并计算出每炉的全部炉料量,进行炉料的过称和准备的工艺过程,称为配料^[2]。与之相关的数学计算过程称为配料计算(也称为狭义的配料计算)。配料的基本流程如图 2.1 所示。

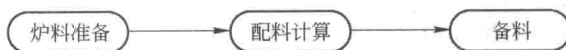


图 2.1 配料的基本流程

由于配料计算是整个配料过程的核心数理计算环节,因此配料又常常特指配料计算。

广义的配料计算,还包括了补料、冲淡、减料、加料、换料等相关的数理计算。

变形铝合金和铸造铝合金的配料计算,其本质是相同的,都是计算出铝合金中各合金元素的具体含量,确定各炉料的种类、质量及其他相关事项。只是在实际生产中,由于两种合金使用的炉料种类、熔炼方式以及订单方式的不同,导致了两种合金的配料计算过程有所差异。本章将讲解变形铝合金的配料计算,在第 3 章将讲解铸造铝合金配料计算的相关知识。

2.1 炉料及其分类

在生产中间合金或成品合金时,引入的基体金属和合金化元素所需要的一切原材料,统称为炉料^[2],主要包含新铝、废料、复化锭、纯金属、中间合金、元素添加剂以及一些化工材料等。其中纯金属、中间合金、元素添加剂以及化工材料,在炉料中所占的质量分数较小,主要作用是为铝合金提供合金化元素,因此常被称做“小金属”。各种炉料具体介绍如下:

(1) 新铝^[2]。新铝是指由铝土矿直接电解出的一次工业纯铝,包括重熔用铝锭和电解铝液。它具有成分标准化、质量较好、价格较贵的特点。熔炼时使用新铝是为了降低炉料中总的杂质含量,提高熔炼金属内部纯净度和制品的最终综合性能,同时弥补成品生产的金属消耗。此外,许多合金直接引用新铝,如 1100 合金。

(2) 废料^[2] (回炉料)。废料是指在熔炼铸造、后续机械加工等生产过程中所产生的几何加工余料、工艺废品和工艺废料。熔炼时使用废料是为了合理利用资源,降低生产成本。原则上,废料应该按照合金牌号或合金系进行分类标识,如 5052 切边即表示该切边废料为 5052 合金产生的。

按照烧损率的高低,一般粗略地把废料分为四个等级,各级废料的烧损特点及常见的废料类型见表 2.1。

表 2.1 各级废料的烧损特点及常见的废料类型

废料等级	烧损特点	常见废料
一级	较小	切头、放废料、放干料、棒材、型材
二级	较大	切边 (小片)、卷材、板材、带材
三级	很大	铣屑、锯屑、铝箔、边卷 (较薄的带状卷材)
四级	最大	掏井渣、灰渣、灰锭

(3) 复化锭 (复化料)。复化锭是指一些成分不明的各种铝合金废料,在炉子中熔化后,分析出化学成分,直接浇铸而成的铝锭。

(4) 纯金属。这里应理解为纯单质,不但包含 Fe、Cu、Mg、Cr 等常规金属单质,还包含 Si 等半金属单质。

(5) 中间合金^[2]。中间合金是指在熔制成品合金之前预先制备好的一种过渡性合金。生产成品合金时使用中间合金的目的是便于加入某些难熔元素或含量很少的合金元素,保证成品合金的冶金质量,减少烧损,提高炉子生产率,改善作业条件^[2]。

(6) 元素添加剂^[2]。元素添加剂是指将适当粒度的纯金属粉末与不含钠的熔剂粉末机械混配后压制成型、密封包装,专供添加合金组元用的饼状非烧结性粉末冶金制品。这是当前铝熔体合金化的发展方向。当采用惰性气体吹入法添加组元时,也可直接采用金属粉末的形式加入。

(7) 化工材料。在配制品合金和中间合金时,对含量较少的稀贵金属元素常采用化工材料^[2]的形式引入,常用的有二氧化钛、铍氟酸钠、锆氟酸钾、硼氟酸钾等。这些化工材料通常均呈粉末状,并有严格的质量标准。

除了上面介绍的一些炉料外,在实际生产中还会用到一些辅助材料,主要包含各种覆盖剂、分离剂、变质剂、精炼剂、精炼气体 (如氮氯混合气体)、晶粒细化剂 (如 Al-5Ti-1B 丝)、结晶器润滑油等。在熔炼时使用这些辅助材料,主要起到降低烧损、造渣、细化晶粒、减小结晶器与铸锭间的摩擦等稳定或改善产品质量的作用。

2.2 配料计算

2.2.1 实际配料量的确定

配料量分为理论配料量和实际配料量，其中理论配料量间接反映到生产卡片上，而实际配料量直接反映到生产卡片上。在变形铝合金配料卡片上所用的配料量指的是实际配料量。

理论配料量指成品铸锭所需的铝水质量。它通常是根椐采购方所提出的锭坯规格要求，考虑熔炼炉的容量、铸造机的最大负荷和最大铸造深度，按铸锭长度和根数而确定的。

理论配料量 $Q_{\text{理论}}$ ，即每炉次中所有铸锭质量的总和，按式 (2.1) 计算：

$$Q_{\text{理论}} = \sum_{i=1}^n l_i \times q_i \quad (2.1)$$

式中 l_i ——第 i 根铸锭的长度，m；

q_i ——第 i 根铸锭每米的质量（该值根椐实际生产测得），kg/m；

n ——每炉次铸锭的根数。

在工业生产中，每炉次的实际配料量是一个很重要的因素，实际配料量过多或过少都将降低车间铸锭成品率。通常，实际配料量 $Q_{\text{实际}}$ 可按式 (2.2) 确定：

$$Q_{\text{实际}} = Q_{\text{理论}} + Q_{\text{烧损}} + Q_{\text{供流量}} = \frac{Q_{\text{理论}}}{1 - \sigma_r} + Q_{\text{供流量}} \quad (2.2)$$

式中 $Q_{\text{烧损}}$ ——在熔炼铸造过程中每炉次的金属烧损量，kg；

$Q_{\text{供流量}}$ ——为保持一定的铸造速度和金属流量，在炉内建立一定的熔体静压头所需的金属量 $Q_{\text{压头}}$ ，一般为 200 ~ 500kg，转合金时，第一炉次由于旋转除气装置（如常见的 DDF）、过滤装置等都已经彻底放干，此时除考虑 $Q_{\text{压头}}$ 外，还应考虑旋转除气装置、过滤装置所需的铝水容量，故此时的供流量较大，kg；

σ_r ——合金熔炼时的烧损率，一些炉料的烧损率见表 2.2。

表 2.2 一些炉料的烧损率^[2]

火焰炉		电阻炉	
炉料类型	烧损率/%	炉料类型	烧损率/%
纯铝锭	1.0 ~ 1.5	软合金液体料	0.5 ~ 0.8
一级废料	1.5 ~ 2.0	硬合金液体料	0.7 ~ 1.0
二级废料	2.0 ~ 3.0	软合金固体料	2.0 ~ 2.5
三级废料	4.0 ~ 6.0	硬合金固体料	2.5 ~ 3.0

影响实际配料量的因素很多,在确定 $Q_{\text{实际}}$ 时,还必须随时掌握生产中发生的情况,如炉内剩料量、补料冲淡量、磅秤系统误差等,随时调整,以尽可能地提高成品率,收到最好的经济效果。

2.2.2 配料值的确定——最大值原则和中值原则

配料值(配料计算值),即配料计算的时候,合金中各成分所使用的具体数值。

由于主元素配料值的确定一般和中值有关,因此把主元素配料值的确定原则称做“中值原则”;而杂质元素配料值的确定一般和最大值有关,所以把杂质元素配料值的确定原则称做“最大值原则”。

2.2.2.1 成品合金配料值的确定

成品合金的配料值,按照如下原则进行确定:

(1) 杂质元素全部取控制标准范围的最大值。

(2) 主元素原则上取控制标准范围的中间值(中值):

1) 对于某些贵重金属,考虑到产品成本问题,主元素常取中值略偏下;

2) 对于某些烧损较大或价格较便宜的合金主元素,常取中值略偏上。

一些主元素的配料取值见表 2.3。

表 2.3 一些主元素的配料取值

合金元素	取值原则	原 因
Si	中偏上	价格较便宜、烧损较大
Fe	中值或中偏下	铁的熔点较高,不易溶解,炉底会积累铁沉淀
Cu	中偏下	价格较贵
Mn	中值	
Mg	中偏上	烧损较大
Cr	中偏下	价格较贵
Be	中偏下	价格较贵
Zn	中值	
Ti	中偏下	由于晶粒细化剂常用 Al-Ti-B 丝,里面含有 Ti

【例 2.1】欲生产 5052 普料,其成分控制标准见表 2.4,试确定其配料值。

表 2.4 某 5052 合金成分控制标准

牌 号	各元素含量/%							
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	其他
5052	≤0.15	0.25~0.35	≤0.10	≤0.10	2.30~2.70	0.15~0.35	≤0.10	—

解：根据最大值原则和中值原则有：

主元素 Fe，考虑到炉底有铁沉淀，取中偏下，即 $\frac{0.25 + 0.35}{2} - 0.01 = 0.29$ 。

主元素 Mg，考虑到其烧损比较大，取中偏上，即 $\frac{2.30 + 2.70}{2} + 0.05 = 2.55$ 。

主元素 Cr，考虑到其价格，取中偏下，即 $\frac{0.15 + 0.35}{2} - 0.07 = 0.18$ 。

其余杂质元素全部取其最大值，该合金配料值见表 2.5。

表 2.5 某 5052 合金的配料值

牌 号	各元素含量/%							
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	其他
5052	0.15	0.29	0.10	0.10	2.55	0.18	0.10	0

注意：对于含量不作要求或含量很低的，如 5052 中的其他元素（即表 2.4 中画“—”的元素含量），其配料值直接取为零。

2.2.2.2 炉料配料值的确定

炉料配料值的确定方法，与成品合金略有差别，其配料值的确定按照如下原则进行：

（1）如果炉料具体成分已知，则直接取该炉料的成分值，如新铝、中间合金、复化料、放废料等；

（2）如果炉料具体成分未知，但知道其牌号或合金系（如切边、切头、铣屑等外购废料），则配料值按照最终成品合金的成分含量进行取值；

（3）如果炉料由多种牌号的废料混合（即混料），则取各自成品合金的成分含量的最大值。

当然，考虑到废料的采购常常是固定的某几家供货单位，其提供的废料实际杂质成分常常偏低，或者是自身厂家生产的料头、放干料等杂质实际成分已知的废料，配料计算时，常常根据实际情况，酌情调低杂质元素的配料值，不过这要求相关的技术人员具有丰富的生产经验。

如根据生产经验，Si 实际含量长期处于 0.1%，于是配料计算时，可以直接取 0.1%。这样有利于避免之后由于成分不足带来的补料等操作，缩短生产周期。不过如果不是很明确炉料成分的情况下，取最大值是最保险的。

【例 2.2】试确定 5052 切边、5083 切边、5052 和 5083 铣屑混料以及 Al99.7 铝锭的配料值，各合金的成分控制标准见表 2.6。