

钢铁企业燃气工程 设计手册

GANGTIE QIYE RANQI GONGCHENG
SHEJI SHOUCHE

岳雷 编著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

钢铁企业燃气工程设计手册

岳雷 编著

北京

冶金工业出版社

2015

内 容 提 要

本手册对钢铁企业冶炼过程中产生的各种有利用价值的可燃性气体的处理工艺及技术进行了详细的介绍,包括高炉煤气、转炉煤气和焦炉煤气的生产及处理方法,集中介绍了钢铁企业近些年来应用比较广泛的燃气处理方法,并给出了设计实例。同时,针对钢铁企业内所需的主要燃气燃料(包括天然气和液化石油气),介绍了辅助性可燃气体的应用方法。

在侧重设计技术论述的前提下,本手册还对燃气设计工艺中的环保、安全和节能问题作了较全面的阐述。同时,根据新的设计概念,本手册也提出了数字工厂设计技术的方法及新计算技术的应用和推荐意见。

本手册主要面向广大冶金设计研究院的工程设计人员,可作为设计及科研人员的一手参考资料;同时,也可作为普通高等院校冶金、动力、热能等相关专业学生的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

钢铁企业燃气工程设计手册/岳雷编著. —北京:冶金工业出版社, 2015. 3

ISBN 978-7-5024-6822-4

I. ①钢… II. ①岳… III. ①钢铁企业—煤气供给系统—系统设计—技术手册 IV. ①TF055-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 004356 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 yjcb@cnmp.com.cn

责任编辑 常国平 美术编辑 彭子赫 版式设计 孙跃红

责任校对 石 静 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-6822-4

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

2015 年 3 月第 1 版, 2015 年 3 月第 1 次印刷

787mm × 1092mm 1/16; 27 印张; 654 千字; 418 页

120.00 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

1978~1986年期间，冶金工业部及其下属设计院相继编写了一些燃气设计参考资料，这些资料主要是针对当时中国钢铁行业发展情况，结合钢铁生产过程中的燃气处理过程进行编撰的。至2014年底，中国的高炉炼铁系统已经达到 4000m^3 以上规模，转炉炼钢系统已经达到300t以上规模，相比较于20世纪70~80年代的生产工艺，单体设备能力增长了30~40倍，与主要炼铁和炼钢设备配套的燃气处理设施也有着质的变化。同时，随着高炉和转炉成套技术的飞速发展，二次能源的利用技术也突飞猛进，特别是近年在工程技术和设备制造上的突破更是令人耳目一新，干法除尘电除尘、干法布袋除尘、余热回收技术、余压发电、大型煤气储气设备的应用、清洁能源技术的应用等在宝钢、包钢、莱钢、马钢、武钢等国内大型钢厂被普遍应用，并作为节能环保项目已经较广泛地取代了20世纪的工程技术方法，而旧的燃气设计参考资料中相关工程设计方法基本上已经不再被提及。

同时，国家在钢铁企业安全生产监管过程中越来越重视工业企业燃气的监督。2000年以后，《建筑设计防火规范》、《工业企业煤气安全规程》、《城镇燃气设计规范》《工业金属管道设计规范》、《压力管道安全技术监察规程——工业管道》等一系列与燃气设计相关的法律和规程规范都做了相当大的调整和条文补充，其意图不仅仅要让工业企业重视煤气的安全生产，还要提高钢铁企业内部的能源利用效率，促进产业结构升级。与此同时，一大批新的管道和设备标准也配套实施。

为适应新形势下钢铁行业及燃气工程领域的发展需求，体现现有钢铁企业主流的燃气生产、净化和利用的方法，积极响应新的规程规范，作者在收集大量相关资料的基础上，结合自己的研究成果，特编撰了本手册。

本手册集合了新设计环境下所涉及的设备技术和工艺方法，并且为广

大读者提供了设计范例，不仅可以使行业内相关人员更加方便地了解燃气工程设计的要点，深入理解条文规范，还可以充分认识主要燃气设备的详细情况和性能参数的确定方法。本手册旨在为燃气设计人员或相关钢铁企业生产人员提供设计参考信息，进一步将安全、环保、节能和循环经济等现代化设计理念进行融合与拓展，积极探索数字化设计方法和 BIM 技术，使国内设计技术真正与国际接轨。

本手册内容主要包括高炉煤气、转炉煤气、焦炉煤气、天然气和液化石油气的处理方法，重点介绍了管道工程和气体输送方法，同时针对安全、环保、节能和数字化工厂技术进行了单独的剖析，而手册的附录部分提供了部分最新的标准数据，供行业内相关人员参考。本手册的目的是在“以人为本”和“节能环保”的设计理念下，让行业内部相关人员可以深刻地理解和认识燃气的产生、处理和综合利用过程，形成整体的概念。

本手册以现行标准、规范及相关的工艺技术应用成果为依据，以设计人员应掌握的专业基本知识和工艺设计方法为重点，紧密联系工程实践，运用设计规范、标准，理论联系实际，力求满足不同层次设计人员的需求，可作为本专业设计人员从事工程咨询、工程建设项目管理、专业技术管理的辅导读本。

本手册写作过程中参考了我国现行的高等学校推荐教材、国家有关的工程建设标准以及燃气专业的设计手册、参考资料等，并引用了一些实际的工程设计范例，在此对上述作者和单位表示感谢。感谢手册编写过程中以强烈的责任感、深厚的学术造诣为本手册进行审查，并提出宝贵意见和建议的专家。同时，各位本书的编校人员对本手册字斟句酌、精心编校，在此表示深切的感谢。

由于作者水平所限，本手册难免会出现纰漏，敬请广大读者提出宝贵意见。

编著者
2014年11月

目 录

第一章 基础理论知识	1
第一节 燃气的物理性质	1
一、单一气体的物理性质	1
二、混合物的质量组成和体积组成	2
三、混合物的密度和相对密度	4
第二节 热平衡、热效率与热能利用率	5
一、热平衡	5
二、热效率	6
三、热能利用率	7
四、热平衡计算	8
第三节 燃气的燃烧	10
一、燃烧反应	10
二、着火	10
三、燃气的热值	11
四、燃烧空气需要量	11
五、完全燃烧烟气量	12
六、不完全燃烧参数	14
七、燃烧温度	15
第二章 高炉煤气	18
第一节 高炉煤气的基本性质	18
一、高炉煤气的发生	18
二、高炉煤气的性质	18
第二节 高炉煤气重力除尘	20
一、重力除尘器区域布置与设备结构及附件	20
二、重力除尘器工艺计算	23
第三节 高炉煤气干法除尘	24
一、高炉煤气干法除尘工艺介绍	24
二、高炉煤气干法除尘设备	25

三、高炉煤气干法除尘工艺计算	27
四、高炉煤气干法除尘设计方法	29
五、高炉煤气干法除尘设计实例	34
第四节 高炉煤气湿法除尘	42
一、主要设备介绍	42
二、文氏管主要结构计算	42
三、文氏管热平衡计算	44
四、脱泥脱水设备	45
五、湿法除尘区域设计方法	47
第五节 高炉煤气透平余压发电与减压放散装置	50
一、高炉煤气透平发电工艺流程	50
二、涡轮发电机输出功率	51
三、涡轮机热平衡计算方法	52
四、TRT 工艺计算实例	52
五、TRT 工艺布置原则	53
六、减压阀组	53
七、高炉煤气放散塔	56
第六节 燃气-蒸汽联合循环	58
第三章 转炉煤气	59
第一节 转炉煤气的基本性质	59
第二节 转炉煤气处理工艺	60
一、工艺概述	60
二、转炉煤气回收与净化区域布置与设备结构	61
第三节 汽化冷却烟道	61
一、转炉余热锅炉系统设备组成	63
二、燃烧计算	65
三、物性参数计算	67
四、烟道结构计算方法	70
五、烟道辐射传热计算方法	76
六、烟道对流传热计算方法	78
七、传热分析计算	81
八、汽化冷却烟道附属设备计算	85
九、汽化冷却烟道布置实例	91

第四节 蒸发冷却器	91
一、蒸发冷却器工作原理	91
二、热平衡计算方法	92
三、设备结构计算方法	93
四、计算实例	94
第五节 电除尘器	95
一、工作原理	95
二、电场及设备计算	96
第六节 风机的选择	97
一、风机能力换算	97
二、风机实际处理风量计算	99
三、风机出口压力的计算	99
第七节 煤气冷却器	100
一、水冷套计算方法	100
二、水冷式热交换器	101
第八节 湿法除尘	102
一、工艺设备概述	102
二、降温文氏管的热平衡计算	103
三、除尘文氏管的热平衡计算	104
四、文氏管结构计算	104
五、文氏管热平衡及结构计算实例	105
第四章 焦炉煤气	108
第一节 焦炉煤气的基本性质	108
第二节 焦炉煤气处理工艺介绍	109
一、焦炉煤气的组成	109
二、焦炉煤气净化流程	109
三、焦炉煤气的初级冷却与输送	109
四、焦炉煤气的除焦油与脱萘	111
第三节 焦炉煤气精净化	112
一、焦炉煤气粗净化	112
二、焦炉煤气精脱萘	113
三、焦炉煤气脱硫	113
第四节 焦炉煤气制氢	114

一、PSA 变压吸附制氢设备·····	114
二、PSA 制氢对比·····	115
第五章 低压煤气的存储与排送·····	116
第一节 煤气柜·····	116
一、高炉煤气柜·····	116
二、转炉煤气柜·····	132
三、煤气柜区布置实例·····	138
第二节 煤气加压站·····	140
一、煤气加压站的主要设备·····	140
二、煤气加压站设计流程与站内布置·····	145
三、煤气加压站设计实例·····	147
第三节 煤气混合·····	152
一、煤气混合的方式·····	152
二、煤气混合设计流程与计算·····	152
三、煤气混合站计算与设计方法·····	153
四、煤气混合计算与设计实例·····	154
第六章 天然气·····	157
第一节 天然气的性质·····	157
一、天然气的来源·····	157
二、天然气的等级·····	157
三、天然气的基本性质·····	158
第二节 液化天然气的储存与气化·····	160
一、液化天然气储罐及保温材料·····	160
二、液化天然气气化·····	174
三、液化天然气场站布置·····	175
四、液化天然气气化场站·····	178
第三节 天然气的调节与排送·····	178
一、低压天然气的压缩·····	178
二、天然气的排送·····	179
三、天然气压缩站设计实例·····	181
第七章 液化石油气·····	184
第一节 液化石油气性质·····	184

一、液化石油气的来源	184
二、液化石油气管道输送	184
三、液化石油气设备	188
第二节 液化石油气存储、气化及混气	189
一、液化石油气存储设备	189
二、液化石油气气化设备	190
三、液化石油气混气设备	193
第三节 液化石油气站	198
一、液化石油气站设计标准与规范	198
二、液化石油气站设计实例	202
第八章 燃气安全、环境保护和能源评估	205
第一节 环境保护措施	205
一、消声与降噪	205
二、粉尘回收与利用	206
三、废水处理	207
第二节 劳动与设计安全措施	207
一、安全通道设计	207
二、压力管道与设备事故位置高发区	208
三、安全设备设置	210
第三节 燃气能源评估	212
一、钢铁工业燃气资源综合利用	212
二、钢铁企业燃气节能设计	214
第四节 压力容器与压力管道的安全设计要求	215
一、容器的主要类型	215
二、有毒、易燃、易爆介质的划分	216
三、管道标准选择	219
四、压力管道用无损检验方法	225
第九章 燃气管道设计	227
第一节 大型低压燃气管道水力学计算	227
第二节 大型低压燃气管道应力计算	229
一、管道膨胀量计算	229
二、L形管道布置	230

三、Z形管道布置	231
四、波形管补偿器	231
五、管道静压力计算	232
六、管道支架布置及固定支架受力分析	233
七、管道跨距及荷载计算	235
八、计算实例	235
第三节 中、低压燃气管道水力学计算	236
一、低压燃气管道的水力学计算	236
二、中压燃气管道的水力学计算	238
三、中、低压燃气管道的局部阻力计算	238
第四节 中、低压燃气管道应力计算	239
一、中、低压燃气管道壁厚的确定	239
二、中、低压燃气管道跨距计算	242
三、中、低压燃气管道L形与Z形管道	242
四、中、低压燃气管道方形胀圈	243
五、中、低压燃气管道简易管道计算方法	244
六、中、低压燃气管道局部应力计算	247
第五节 大型低压燃气管道常用管件与阀门	249
一、搭接板弯头、搭接板三通导向板弯头与搭接板三通	249
二、蝶阀与盲板阀	255
三、管道金属补偿器	256
四、堵板与盲板	256
五、排水与放散附件	262
六、人孔与手孔	262
第六节 中、低压燃气管道常用管件与阀门	264
一、弯头、三通与变径	264
二、常用阀门	265
三、法兰、盲法兰与垫片	265
第七节 燃气管道与设备的喷涂与保温	265
一、燃气管道的除锈	265
二、燃气管道的喷涂	267
三、燃气管道的保温	269
第八节 燃气管道与设备的焊接	269
一、焊接种类和方法	269

二、焊缝强度计算方法	271
三、焊接缺陷	274
第九节 工业管道厂区内布置方法	276
一、架空的管道布置要求	276
二、阀门安装要求	277
三、管件安装要求	281
四、仪表安装要求	282
五、放散、排水装置安装要求	283
第十章 燃气工程设计计算方法	284
第一节 基于数据库平台的计算程序设计	284
一、手册配套软件的开发平台	284
二、手册配套软件的使用	284
第二节 基于数据库平台的设计方法	292
一、数字化工厂设计方法与软件系统	292
二、数字化工厂设计编码制度	293
三、数字化工厂设计方法的实施	294
第三节 流体力学与管道应力分析软件介绍	299
一、流体力学与传热学分析软件的应用	299
二、管道应力分析软件的应用	299
附 录	301
附录 A 重力除尘器	301
附录 B 布袋除尘器箱体及大灰仓常用类型	303
附录 C 电除尘器	308
附录 D 煤气加压风机	309
附录 E 液化天然气气化器	310
附录 F 液化石油气气化器	318
附录 G 常用燃气管道阀门	321
附录 H 大型低压燃气管道局部阻力表	338
附录 I 大型低压燃气管道补偿器样本表	341
附录 J 中低压燃气管道管件表	349
附录 K 保温与防腐蚀材料表	382
附录 L 水蒸气分压	388

附录 M 几种气体的定压平均摩尔热容·····	389
附录 N 常用干式煤气柜设计参数表·····	390
附录 O 常用低压燃气管道设计数据·····	391
附录 P 常用合金钢弹性模量·····	393
附录 Q 中低压燃气管道设计数据·····	394
附录 R 常用管道数据·····	398
附录 S 图例说明·····	416
参考文献 ·····	417

第一章 基础理论知识

本章主要介绍了常见可燃气体的基本物理性质和基于这些物理性质下的燃气热力学性质和燃烧特性，为以后章节提供必要的理论基础。

第一节 燃气的物理性质

一、单一气体的物理性质

单一气体的物理特性是计算各种混合燃气特性的基础数据。燃气中常见的单一气体标准状态下的主要物理热力特性值参考表 1-1-1 与表 1-1-2。

表 1-1-1 某些低级烃的基本性质

气 体	甲烷	乙烷	乙烯	丙烷	丙烯	正丁烷	异丁烷	丁烯	正戊烷
分子式	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₃ H ₈	C ₃ H ₆	C ₄ H ₁₀	C ₄ H ₁₀	C ₄ H ₈	C ₅ H ₁₂
相对分子质量	16.0430	30.0700	28.0540	44.0970	42.0810	58.1240	58.1240	56.1080	72.1510
摩尔容积/m ³ ·mol ⁻¹	22.3621	22.1872	22.2567	21.9362	21.990	21.5036	21.5977	21.6067	20.891
密度/kg·m ⁻³	0.7174	1.3553	1.2605	2.0102	1.9136	2.7030	2.6912	2.5968	3.4537
相对密度	0.5548	1.048	0.9748	1.554	1.479	2.090	2.081	2.008	2.671
气体常数/kJ·(kg·K) ⁻¹	517.1	273.7	294.3	184.5	193.8	137.2	137.8	148.2	107.3
临界参数	临界温度/K	191.05	305.45	282.95	368.85	364.75	425.95	407.15	470.35
	临界压力/MPa	4.6407	4.8839	5.3398	4.3975	4.7623	3.6173	3.6578	3.3437
	临界密度/kg·m ⁻³	162	210	220	226	232	225	221	234
热值	高热值/MJ·m ⁻³	39.842	70.351	63.438	101.266	93.667	133.886	133.048	169.377
	低热值/MJ·m ⁻³	35.902	64.397	59.477	93.240	87.667	123.649	122.853	156.733
爆炸极限	爆炸上限/%	5.0	2.9	2.7	2.1	2.0	1.5	1.8	1.4
	爆炸下限/%	15.0	13.0	34.0	9.5	11.7	8.5	8.5	8.3
黏度	动力黏度/MPa·s	10.393	8.600	9.316	7.502	7.649	6.835	6.875	6.355
	运动黏度/mm ² ·s ⁻¹	14.50	6.41	7.46	3.81	3.99	2.53	2.556	1.85
无因次系数	164	252	225	278	321	377	368	329	383
沸点/°C	-161.49	-88	-103.68	-42.05	-47.72	-0.50	-11.72	-6.25	36.06
定压比热容/kJ·(m ³ ·K) ⁻¹	1.545	2.244	1.888	2.960	2.675	4.130	4.2941	3.871	5.127
绝热指数	1.309	1.198	1.258	1.161	1.170	1.144	1.144	1.146	1.121
导热系数/W·(m·K) ⁻¹	0.03024	0.01861	0.0164	0.01512	0.01467	0.01349	0.01434	0.01742	0.01212

注：表中数据为温度 273.15K、压强 101325Pa 下的值。

表 1-1-2 某些气体的基本性质

气 体	一氧化碳	氢气	氮气	氧气	二氧化碳	硫化氢	空气	水蒸气	
分子式	CO	H ₂	N ₂	O ₂	CO ₂	H ₂ S	—	H ₂ O	
相对分子质量	28.0104	2.0160	28.014	31.9988	44.0098	34.076	28.966	18.0154	
摩尔容积/m ³ ·mol ⁻¹	22.3984	22.427	22.403	22.3923	22.2601	22.1802	22.4003	21.629	
密度/kg·m ⁻³	1.2506	0.0899	1.2504	1.4291	1.9771	1.5363	1.2931	0.833	
气体常数/kJ·(kg·K) ⁻¹	296.63	412.664	296.66	259.585	188.74	241.45	286.867	445.357	
临界参数	临界温度/K	133.0	33.30	126.2	154.8	304.2	373.55	132.5	647.3
	临界压力/MPa	3.4957	1.2970	3.3944	5.0764	7.3866	8.890	3.7663	22.1193
	临界密度/kg·m ⁻³	300.86	31.015	310.91	430.09	468.19	349.00	320.07	321.70
热值	高热值/MJ·m ⁻³	12.636	12.745				25.348		
	低热值/MJ·m ⁻³	12.636	10.786				23.368		
爆炸极限	爆炸上限/%	12.5	4.0				4.3		
	爆炸下限/%	74.2	75.9				45.5		
黏度	动力黏度/μPa·s	16.753	8.355	16.671	19.417	14.023	11.670	17.162	8.434
	运动黏度/mm ² ·s ⁻¹	13.30	93.0	13.30	13.60	7.09	7.63	13.40	10.12
	无因次系数	104	81.7	112	131	266		122	
	沸点/℃	-191.48	-252.75	-195.78	-182.98	-78.20	-60.30	-192.00	
	定压比热容/kJ·(m ³ ·K) ⁻¹	1.302	1.298	1.302	1.315	1.620	1.557	1.306	1.491
	绝热指数	1.403	1.407	1.402	1.400	1.304	1.320	1.401	1.335
	导热系数/W·(m·K) ⁻¹	0.0230	0.2163	0.02489	0.250	0.01372	0.01314	0.02489	0.01617

注：表中数据为温度 273.15K、压强 101325Pa 下的值。

二、混合物的质量组成和体积组成

(一) 混合气体的组分

混合气体的组分有三种表示方法：容积成分（又称体积成分）、质量成分和摩尔成分（又称分子成分）。

1. 容积成分

容积成分是指混合气体中各组分的分容积与混合气体的总容积之比，即：

$$r_1 = \frac{V_1}{V}; \quad r_2 = \frac{V_2}{V}; \quad \dots; \quad r_n = \frac{V_n}{V} \quad (1-1-1)$$

混合气体的总容积等于各组分的容积之和，即：

$$V = V_1 + V_2 + \dots + V_n \quad (1-1-2)$$

$$r_1 + r_2 + \dots + r_n = \sum_1^n r_i = 1 \quad (1-1-3)$$

式中 V_1, V_2, \dots, V_n ——混合气体各组分的分容积，m³；

r_1, r_2, \dots, r_n ——混合气体各组分的容积成分, 以 r_i 表示任一组分;
 n ——混合气体的组分数;
 V ——混合气体总容积, m^3 。

2. 质量成分

质量成分是指混合气体中各组分的质量与混合气体的总质量之比, 即:

$$g_1 = \frac{G_1}{G}; \quad g_2 = \frac{G_2}{G}; \quad \dots; \quad g_n = \frac{G_n}{G} \quad (1-1-4)$$

混合气体的总质量等于各组分质量之和, 即:

$$G = G_1 + G_2 + \dots + G_n \quad (1-1-5)$$

$$g_1 + g_2 + \dots + g_n = \sum_1^n g_i = 1 \quad (1-1-6)$$

式中 G_1, G_2, \dots, G_n ——混合气体各组分的质量, kg ;

g_1, g_2, \dots, g_n ——混合气体各组分的质量, 以 g_i 表示任一组分;

n ——混合气体的组分数;

G ——混合气体总质量, kg 。

3. 摩尔成分

摩尔成分是指混合气体各组分摩尔数与混合气体的总摩尔数之比, 即:

$$m_1 = \frac{N_1}{N}; \quad m_2 = \frac{N_2}{N}; \quad \dots; \quad m_n = \frac{N_n}{N} \quad (1-1-7)$$

气体的摩尔成分在数值上近似等于容积成分, 混合气体的总摩尔数等于各组分摩尔数之和, 即:

$$N = N_1 + N_2 + \dots + N_n \quad (1-1-8)$$

$$m_1 + m_2 + \dots + m_n = \sum_1^n m_i = 1 \quad (1-1-9)$$

式中 N_1, N_2, \dots, N_n ——混合气体各组分的摩尔数, mol ;

n_1, n_2, \dots, n_n ——混合气体各组分的摩尔成分, 以 n_i 表示任一组分;

n ——混合气体的组分数;

N ——混合气体总摩尔数, mol 。

(二) 混合物组分的换算

1. 混合气体组分换算

由混合气体的容积或摩尔成分换算为质量成分的计算方法如下:

$$g_i = \frac{r_i M_i}{\sum_{i=1}^n r_i M_i} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1-1-10)$$

由混合气体的质量成分换算为容积或摩尔成分的计算方法如下:

$$m_i = \frac{g_i/M_i}{\sum_{i=1}^n g_i/M_i} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1-1-11)$$

式中 M_1, M_2, \dots, M_n ——混合气体各组分的相对分子质量。

2. 混合液体组分换算

由混合液体的容积成分换算为质量成分的计算方法如下：

$$g_{yi} = \frac{y_i \rho_i}{\sum_{i=1}^n y_i \rho_i} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1-1-12)$$

由混合液体的质量成分换算为摩尔成分的计算方法如下：

$$x_{yi} = \frac{g_{yi}/M_i}{\sum_{i=1}^n g_{yi}/M_i} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1-1-13)$$

由混合液体的质量成分换算为容积成分的计算方法，如下：

$$y_{yi} = \frac{g_{yi}/\rho_i}{\sum_{i=1}^n g_{yi}/\rho_i} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1-1-14)$$

式中 $y_{y1}, y_{y2}, \dots, y_{yn}$ ——混合液体各组分的容积组分；

$x_{y1}, x_{y2}, \dots, x_{yn}$ ——混合液体各组分的摩尔组分；

$\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$ ——混合液体各组分的密度， kg/m^3 。

三、混合物的密度和相对密度

(一) 平均相对分子质量

混合气体平均相对分子质量的计算方法如下：

$$M = r_1 M_1 + r_2 M_2 + \dots + r_n M_n \quad (1-1-15)$$

混合液体平均相对分子质量的计算方法如下：

$$M = r_1 M_1 + r_2 M_2 + \dots + r_n M_n \quad (1-1-16)$$

(二) 密度

单位体积的物质所具有的质量称为这种物质的密度。气体的相对密度是指气体的密度与标准状态下空气密度的比值（也称为气体的比重）；液体的相对密度是指液体的密度与标准状态下水的密度的比值（也称为液体的比重）。

混合气体的平均密度和相对密度计算方法如下：

$$\rho = \frac{M}{V_M} \quad (1-1-17)$$

$$S = \frac{\rho}{1.293} = \frac{M}{1.293 V_M} \quad (1-1-18)$$

式中 ρ ——混合气体的平均密度， kg/m^3 ；