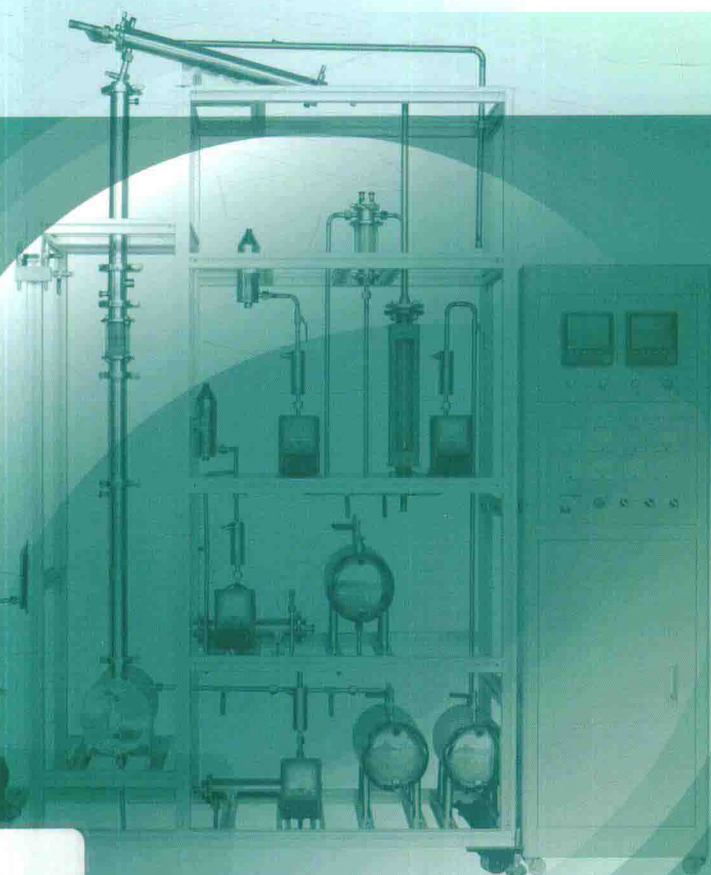


HUAGONG DANYUAN CAOZUO
ZONGHE SHIXUN

化工单元操作 综合实训

◎ 程海涛 编



化学工业出版社

HUAGONG DANYUAN CAOZUO
ZONGHE SHIXUN

化工单元操作 综合实训

◎ 程海涛 编



化学工业出版社

· 北京 ·

本书围绕应用型高级专门人才培养目标,立足于反映化工产业现代化特点的实训装置,强化工程实践能力,促进化工类相关专业教育教学改革编写而成。图书以衡水学院与河北冀衡集团有限公司校企联合实训基地化工单元操作实训装置为基础,选取流体输送、萃取、管路拆装、吸收解吸、干燥、传热、精馏、间歇反应釜、多功能精馏 9 个实训项目,每个实训项目编写了实训目的、实训内容、实训注意事项、思考题等内容。

适合作为普通本科高等学校化学工程与工艺专业及化工类相关专业本科生实践教学用书。

图书在版编目(CIP)数据

化工单元操作综合实训/程海涛编. —北京:

化学工业出版社, 2018.5

ISBN 978-7-122-31806-0

I. ①化… II. ①程… III. ①化工单元操作
IV. ①TQ02

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 054727 号

责任编辑: 李晓红

文字编辑: 陈 雨

责任校对: 宋 夏

装帧设计: 王晓宇

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 装: 中煤 (北京) 印务有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张 16¼ 字数 410 千字 2018 年 6 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 58.00 元

版权所有 违者必究

前言

本书是在普通本科高等学校向应用技术型转型发展的背景下,围绕应用型高级专门人才培养目标,适应地方经济和社会发展的需要,以反映化工产业现代化特点的实训装置为立足点,为了满足普通本科高等学校化学工程与工艺专业及化工类相关专业实践教学,强化工程实践能力,促进化工类相关专业教育教学改革编写而成。紧紧围绕国家中长期教育改革和发展规划纲要的发展目标,进一步合理优化本科高等教育结构布局,高效而合理配置高等教育资源,将有助于推动地方本科高等院校转型发展、办出特色,更好地适应地方经济和社会发展的需要。

应用型高级专门人才培养目标立足于面向地方经济和社会发展一线、基础理论知识扎实、实践操作能力强、综合素质突出的应用技术型人才的培养,工程实践能力是培养应用型高级专门人才的核心能力。化工类专业工程实践能力的培养和其他专业有所不同,相关化工企业要严格遵守安全生产要求,提供充足岗位为学生进行实际生产实训。

顶岗实习的机会满足不了实训的实际需求。因此,有必要建立现代化的实训基地,使用体现现代工厂情景的设备,模拟生产现场,对学生进行实训,培养学生发现问题,并能分析和解决实际问题的能力,尽快适应企业要求。

本书是衡水学院教材建设资助项目(编号:2017jc02)的研究成果。同时也是衡水学院教育教学改革与研究项目(编号:jg2016050)以及衡水学院校级课题(编号:2018LX17)研究成果的一部分。

本书编写力求准确、清晰、务实、拓展,以衡水学院与河北冀衡集团有限公司校企联合实训基地化工单元操作实训装置为基础,选取流体输送、萃取、管路拆装、吸收-解吸、干燥、传热、精馏、间歇反应釜、多功能精馏9个实训项目,每个实训项目编写了实训目的、实训内容、实训注意事项、思考题等内容。

本书由衡水学院程海涛编写,在编写过程中吕海燕、王超、孙瑞祥、范培、冯国琳等对教材内容进行了实践检验,提出了宝贵修改意见,同时,本书编写过程中还得到了陈彦芬、邢广恩、齐双春、申献双、刘娜、王淑琼、赵薇、吴丽丽、赵真等的大力支持和帮助,在此编者一并致以衷心的感谢。

由于编者水平所限,书中难免出现不足和疏漏之处,敬请广大读者给予批评指正。

编者

2017年12月

目 录

绪 论

一、化工实训的意义	1
二、化工实训的基本要求	2
三、化工实训组织与管理	3
四、实训成绩考核方式与评定标准	4
五、化工实训安全	5

化工实训一 UTS-LB 流体输送单元操作实训

一、实训目的	7
二、实训内容	7
(一) 流体基础知识	7
(二) 实训装置简介	23
(三) 流体输送操作实训单元工艺流程	25
(四) 装置联调试车	29
(五) 实训操作步骤	33
(六) 异常现象的处理	42
(七) 故障处置实训	42
(八) 实训安全注意事项	42
(九) 盲板操作管理规程	43
三、流体输送实训数据记录	44
四、流体输送实训考核	45
五、思考题	46

化工实训二 UTS-CQ 萃取单元操作实训

一、实训目的	47
二、实训内容	47
(一) 基础知识	47
(二) 影响萃取操作的因素	50
(三) 实训装置简介	56
(四) 萃取单元操作实训工艺流程	57
(五) 装置联调试车	64
(六) 实训操作步骤	65
(七) 异常现象的处理	70
(八) 故障处置实训	71
(九) 实训安全注意事项	71
(十) 苯甲酸含量的测定	72
三、萃取实训数据记录	73
四、萃取实训考核	74
五、思考题	75

化工实训三 流体输送设备及管路拆装操作实训

一、实训目的	76
二、实训内容	76
(一) 基础知识	76
(二) 装置简介	85
(三) 具体实训步骤	86
(四) 实训安全注意事项	87

化工实训四 UTS-TX 吸收-解吸单元操作实训

一、实训目的	89
二、实训内容	90
(一) 基本原理与基础知识	90
(二) 实训装置简介	95
(三) 吸收-解吸单元操作实训工艺流程	96
(四) 装置联调试车	104
(五) 实训操作步骤	104
(六) 故障设置实训	110
(七) 实训安全注意事项	110
(八) 气相色谱使用方法	112

三、吸收-解吸实训数据记录	113
四、吸收-解吸实训考核	114
五、思考题	116

化工实训五 UTS-GZ 干燥单元操作实训

一、实训目的	117
二、实训内容	117
(一) 基本原理与基础知识	117
(二) UTS-GZ 干燥实训装置简介	126
(三) 干燥单元操作实训工艺流程	127
(四) 装置联调试车	134
(五) 实训操作步骤	135
(六) 异常现象的处理	140
(七) 故障设置实训	140
(八) 实训安全注意事项	141
三、干燥实训数据记录	142
四、干燥实训考核	142
五、思考题	143

化工实训六 UTS-CR 传热单元操作实训

一、实训目的	144
二、实训内容	144
(一) 基础知识	144
(二) 装置简介	154
(三) 传热单元操作实训工艺流程	155
(四) 装置联调试车	162
(五) 实训操作步骤	163
(六) 异常现象的处理	172
(七) 故障设置实训	172
(八) 实训安全注意事项	173
三、传热实训数据记录	174
四、传热实训考核	178
五、思考题	179

化工实训七 UTS-JL-2J 化工总控工培训与 竞赛(精馏)单元操作实训

一、实训目的	180
二、实训内容	180

(一) 基础知识	180
(二) 装置简介	183
(三) 精馏单元操作实训工艺流程	183
(四) 装置联调试车	192
(五) 实训操作步骤	193
(六) 异常现象的处理	199
(七) 正常操作中的故障扰动 (故障设置实训)	199
(八) 实训安全注意事项	200
三、精馏实训数据记录	201
四、精馏实训考核	203
五、思考题	203

化工实训八 UTS-FY 间歇反应单元操作实训

一、实训目的	205
二、实训内容	205
(一) 基础知识	205
(二) 装置简介	209
(三) 间歇反应操作实训单元工艺流程	210
(四) 装置联调试车	215
(五) 实训操作步骤	219
(六) 异常现象的处理	230
(七) 实训安全注意事项	231
三、间歇反应实训数据记录	232
四、间歇反应实训考核	233
五、思考题	234

化工实训九 MARS 多功能精馏塔单元综合实训

一、实训目的	235
二、实训内容	235
(一) 实训原理	235
(二) 装置简介	238
(三) 控制柜面板示意图	241
(四) 实训操作步骤	242
(五) 实训安全注意事项	245
三、实验报告	246
四、思考题	246

附录 C3000 操作说明	247
---------------	-----

绪论

一、化工实训的意义

“化工实训（单元操作实训）”属于化学工程与工艺及化工类相关专业（如制药、生化、轻工、食品、冶金、环保、能源）一门重要的实践课程，主要内容是按化工生产中的物理加工过程、操作原理共性归纳成的若干单元操作，研究各单元操作的基本原理、工艺计算、典型设备及操作控制，实践性、应用性强是其主要特点。

一个化工产品的生产是通过若干个物理操作与若干个化学反应实现的。尽管化工产品千差万别，生产工艺多种多样，但这些产品的生产过程所包含的物理过程并不是很多，很多物理过程是相似的，具有共性的本质、原理和规律。把这些包含在不同化工产品生产过程中发生同样物理变化、遵循共同的物理规律、使用相似设备、具有相同功能的基本物理操作，称为单元操作。

化工实训目的：验证有关的化工单元操作理论，巩固并加强相关理论的认识和理解；熟悉实训装置的结构、性能和流程，并通过实训操作，掌握一定的操作技能；通过对实训数据的分析、整理，培养编写实训报告，处理一般工程技术问题和进行生产操作的能力；树立严肃认真、实事求是的科学态度，养成吃苦耐劳、团结协作的职业素质。

随着现代工业技术的快速发展，生产装置的大型化、生产过程的连续化和自动化程度的提高，为保证生产安全稳定、长周期、满负荷、最优化地运行，岗前的职业技能培训显得越来越重要。但由于行业的特殊性，化工生产工艺过程复杂，工艺条件要求十分严格，常伴有高温、高压、易燃、易爆、有毒、腐蚀等不安全因素，不适宜采用常规的职业培训方法。通过建立现代化的实训基地，使用体现现代工厂情景的化工单元设备，模拟生产现场，对学生进行实训，可以为受训人员提供安全、经济的离线培训条件，培养学生发现故障、分析和解决实际问题的能力，尽快适应企业要求。

化工实训的主要任务是结合化工单元操作的岗位要求，使学生受到化工生产基本操作技能训练，熟悉流体输送、干燥、传热、蒸馏、吸收等典型的化工单元操作规范，理论联系实际，提升工程实践能力；培养遵章守纪、认真工作、严谨求实、团结协作的工作作风，建立安全、环保意识，初步具备工程技术人员的基本工作素养。

二、化工实训的基本要求

化工实训是一门实践性课程，是化学工程与工艺类及相关化学、化工类专业的必修实践课。化工实训主要以常见化工单元操作实训为主，化工实训过程中必须保持严谨求实、认真负责的工作态度，手脑并用，认真思考，理论联系实际，实事求是地整理实训数据，按时完成化工单元实训项目。

(1) 充分预习

化工实训重点突出工程性实践，涉及化工原理（化工单元操作）等相关课程的知识，关于单元操作基础知识的许多问题需要预先思考、分析，做好充分的知识的准备。具体预习要求如下：

① 认真、仔细阅读化工实训教材中各个单元操作的相关内容，明确该化工实训项目的任务、具体内容及注意事项。

② 根据化工实训项目的具体内容，熟悉工艺流程图，思考实训操作步骤、理论依据，分析要测取哪些数据，并估计数据的变化规律。

③ 在现场结合化工实训教材，详细查看实训设备的构造、仪表类型、安装位置、管道连接。

④ 根据化工实训教材中实训任务拟定各自实训方案，明确操作条件及操作顺序，列出实训操作步骤清单。

⑤ 列出该实训任务需要得到的全部原始数据和操作项目清单。

(2) 正常操作过程

化工实训项目实施前，一定要认真检查化工实训设备是否正常，做好开机准备。在确认其完全正常的基础上，向化工实训指导老师报告，经化工实训指导老师同意后方可按照实训步骤和操作规范来实施开机、正常运行等操作，记录完数据后进行正常关机操作。化工实训过程中要仔细观察、善于动脑、准确判断、精准操作。

(3) 数据记录

数据记录要科学、准确、实事求是。具体注意事项如下：

① 准备好完整的原始记录表，准确记录各项物理量的名称、符号和计量单位，要保证数据的完整性、系统性。

② 化工实训操作开车正常运行后，等待现象稳定后开始采集、记录数据。改变操作条件后，也要稳定一定时间后再采集、记录数据，消除因软件、仪表滞后现象导致的数据误差。

③ 相同条件下，至少要采集、记录两次数据，在两次数据相近的情况下才可改变操作条件。

④ 每个数据记录后，应立即复核，以免发生读错或写错数字的情况，注意软件、仪表显示数据单位与数据记录表中相关数据计量单位的一致性。

⑤ 数据记录必须实事求是地反映仪表的精度要求，通常要记录至仪表的最小分度以下一位数。

⑥ 实训过程中若出现异常情况以及数据有明显误差，应该给予标注，并分析原因。

(4) 及时总结

化工实训操作后，应及时总结实训过程的得失，科学地处理原始数据，撰写实训报告。实训报告是按照一定的格式和要求表达化工实训过程和结果的文字材料，是化工实训工作的

总结,也是化工实训工作不可或缺的一部分,要求真实、规范、准确和完整。实训报告包括以下主要内容:

- ① 实训内容简介
- ② 绘制工艺流程图
- ③ 实训步骤
 - i. 开车前准备;
 - ii. 正常开车;
 - iii. 稳定运行;
 - iv. 正常停车。
- ④ 数据记录及讨论分析
- ⑤ 思考题(根据情况选作)
- ⑥ 实训心得

三、化工实训组织与管理

(1) 组织管理

化工实训教学必须严格按照人才培养方案进行,相关教学大纲、教材、实训安排表等教学资料齐全,严格执行化工实训安排表,任何部门、任何个人未经批准,不得随意改动。要消除实训安排的随意性,禁止变更、缩短规定实训学时。

(2) 教师管理

化工实训指导教师是决定化工实训教学效果的重要因素之一。化工实训指导教师应按行为规范严格要求自己,认真履行职责,教书育人,保质保量地完成所承担的化工实训工作任务。

① 坚持安全第一。对学生讲清楚安全注意事项和安全操作规程,全程负责所指导学生的人身安全。

② 坚持教书育人。对学生不仅要传授必要的基本知识和生产技能,还要对学生进行思想作风、工作作风等方面的教育,加强学生的劳动观念、协作精神、法制观念等教育。

③ 执行规范化教学。依据教学大纲、教材等相关教学资料对学生讲解基本知识、传授基本技能。学生实训的内容应按计划进行,指导教师对讲授的内容、学生操作内容和实习时间不得随意增减。

i. 做好实训前的准备工作;

ii. 做好示范讲解,加强巡视,注意观察,认真辅导,及时处理学生实训中发生的问题;

iii. 实训过程中指导教师不能包办代替,要让学生独立操作,培养学生动手能力,独立分析问题、解决问题的能力;

iv. 客观、公正评定学生的项目操作成绩,及时上报;

v. 带领学生搞好实训场地的清洁卫生;

vi. 及时上报仪器设备损坏情况;

vii. 及时总结经验,不断改进实习教学工作。

(3) 学生管理

和理论教学相比,化工实训环节的人力、物力、财力投入是巨大的,学生应珍惜实训机

会, 努力提高岗位技能和综合素质。针对学生的化工实训要求如下:

- ① 实训前必须预习实训内容, 明确实训任务, 阅读教材等相关资料。
- ② 实训时, 应尊敬老师, 认真听讲, 积极思考, 准确操作, 完成全部实训任务。
- ③ 必须遵守安全操作规程, 加强自身安全防护意识。
- ④ 必须思想集中, 严禁在操作设备时聊天, 不得在实训场地打闹奔跑, 不得玩手机, 不做与实训无关的事情。
- ⑤ 未经实训指导教师允许, 不得擅自开动和操作装置。
- ⑥ 操作中若发现设备运转异常或有事故发生, 应及时向指导教师报告。
- ⑦ 操作必须在指定设备上, 严禁串岗。
- ⑧ 不得擅自离开操作岗位, 坚持人走关机, 严禁在装置运转时离开。
- ⑨ 遵守考勤制度, 不迟到、不早退, 病假要有医院的诊断书。
- ⑩ 爱护实训场地的一切设备, 保管好工具; 做好场地的清洁工作, 物件摆放整齐, 做到文明实习; 按时、独立完成实训报告。

学生遵守守则的情况作为成绩考核的依据, 对严重违反管理规定者视其情节给予教育、处理, 直至取消实训资格并报学校给予处分。

四、实训成绩考核方式与评定标准

化工实训考核, 重点以单元操作技能的考核为主, 要对每一个学生应掌握的各项技能的规范、熟练程度、灵活运用程度逐项考核评分, 客观、真实反映学生的实训状态、能力和水平。实训考核方式分为集中考核和实训过程中随机考核, 化工实训综合成绩以两种考核成绩相结合的方式给出。

化工实训综合成绩由实训过程考核成绩、实训操作考核成绩、实训报告考核成绩三部分组成, 实训过程考核成绩 30%, 实训操作考核成绩 50%, 实训报告考核成绩 20%。

① 实训过程考核。过程考核评定等级分 A (90—100 分)、B (80—89 分)、C (70—79 分)、D (60—69 分)、E (50—59 分) 五个等级。五个等级的考核内容包括预习情况、出勤情况、纪律考核、实训场所卫生打扫等方面。凡未预习、缺勤、未按照要求着装、玩手机、未经请假离岗、串岗、不注意听讲、未按要求操作、不听指挥及做与实训内容无关的活动等, 每发现一次降级一等, 直至过程考核环节不合格。

② 实训操作考核。实训操作考核最终成绩由实训考核中选取的实训单元操作所取得的成绩取平均值得到。

考核内容包括实训前的设备检查、操作规范程度、数据处理情况、独立实践能力、工作态度等。具体考核主要内容如下:

- i. 实训开始前的设备检查是否到位, 是否会调试设备使其待运行;
- ii. 实训操作是否规范、准确、熟练, 能否独立完成相应岗位工作;
- iii. 实训进行中的实验记录是否是原始数据, 数据处理是否准确;
- iv. 是否能综合应用所学理论和操作技能判断并排除运行中的故障;
- v. 实训态度是否认真, 与团队成员能否协调配合。

各实训单元操作章节中有具体操作评分标准, 按照标准对考核所进行的实训任务进行具体评分。

③ 实训报告考核。实训报告考核主要考核学生是否按时按要求完成实训报告, 是否有抄袭、严重错误、未完成等情况。评定等级分为 A (90—100 分)、B (80—89 分)、C (70—79 分)、D (60—69 分)、E (50—59 分) 五个等级。

五、化工实训安全

(1) 化工实训安全基本知识

由于化工单元操作实训中涉及水、电、气、易燃化学品等, 因此进入实训室首先要注意安全问题。化工实训前要了解可能发生的事故和发生后采取的安全措施; 实训时要严格遵守安全守则, 按照规定的步骤, 规范操作, 以免发生意外事故。具体注意事项如下:

i. 注意用电安全。为防止发生触电事故, 严禁用湿手去触碰电闸、开关和电气设备, 禁止带电时用湿布擦拭; 尽量不要双手同时接触电气设备的金属外壳, 以防漏电; 严禁超负荷用电; 操作电负荷较大设备时, 尽量穿绝缘的胶底鞋。

ii. 注意防火。精馏实训中使用酒精、煤油等易燃物质, 要防止可燃物的燃烧。禁止在实训室使用明火, 禁止吸烟。

iii. 防止爆炸。传热实训中的水蒸气锅炉、吸收解吸装置中的 CO_2 钢瓶, 在使用中应确保这些高压设备和气瓶的安全, 防止爆炸事故发生。

iv. 防止意外事故。注意防止机械创伤、烫伤、碰伤、摔伤等意外事故的发生。严禁用手接触高温水蒸气或物料; 在二层工作台操作应注意防止摔伤、扭伤等意外事故的发生; 操作阀门等应防止机械创伤、碰伤事故的发生; 长发应盘起, 严禁将手或头发接触正在转动的机器, 如风机叶片、转动中的泵轴等, 以免卷入。

v. 防止药品、废液伤害。实训使用的所有药品严禁吸、嗅和品尝, 严禁药品接触伤口, 严禁在实训室吃零食, 使用过的废液不能随意倒入下水道而污染环境, 实训完毕后应细心洗手。

vi. 注意设备故障。及时发现实训过程中的异常现象 (传热加热管、干燥加热管避免温度过高等), 发生设备故障要及时排除, 避免严重事故发生。

vii. 注意保持实训室的通风。

(2) 化工实训安全基本防护措施

应熟悉安全用具如灭火器材、沙箱以及急救箱的放置地点、使用方法。了解实训室可能发生的意外事故以及相应的急救措施。安全用具要妥善保管, 不准挪作他用。

① 实训室常用的急救工具

i. 消防器材。消防器材包括泡沫灭火器、二氧化碳灭火器、四氯化碳灭火器、灭火毡、细沙等。

ii. 急救药箱。急救药箱中一般配有紫药水、碘伏、红汞、甘油、凡士林、烫伤药膏、70%酒精、3%双氧水、1%乙酸溶液、1%硼酸溶液、1%饱和碳酸钠溶液、绷带、纱布、药棉、药棉签、创可贴、医用镊子、剪刀等。

② 实训室可能发生的意外事故及急救措施

i. 如遇起火, 要保持冷静, 首先应立即熄灭附近火源并移开附近的易燃物质。少量有机溶剂着火, 可用湿布、黄沙扑火, 不可用水灭火。局部溶剂或油类物质着火可用湿布或石棉网盖灭。若火势较大, 一定要用泡沫灭火器灭火。电气设备着火, 应先切断电源, 再用二氧化碳灭火器灭火。如果无法控制火情, 应尽快离开实训室, 打 119 报警。

ii. 衣服着火时，切勿乱跑，否则会使空气量增加，加重火势。一般用厚衣服熄灭，盖毛毯或用水冲淋灭火，或就地打滚。一般不要对人使用灭火器。

iii. 如果被灼伤，轻者可紧握伤处用冷水冲淋，重者需要涂以烫伤膏或请医生处理等。

iv. 如遇触电事故，首先切断电源，必要时进行人工呼吸。

③ 用电安全基本知识

i. 实训前，必须了解室内总电闸与分电闸的位置，出现用电事故时及时切断电源。

ii. 电器设备维修时必须停电作业，如遇换保险丝，一定要先拉下电闸再进行操作。

iii. 电器设备的金属外壳应接地线，并定期检查是否连接良好。

iv. 电热器设备在通电前，一定要熟悉其电加热所需的前提条件是否具备。例如，在精馏分离时，在接通精馏塔釜电热器前，要检查釜中的液位是否符合要求，在接通空气预热器的电热器前，必须先打开空气鼓风机后，才可给预热器通电。

v. 在实训过程中，如发生停电现象，必须切断电闸，以防来电时，无人监视电器设备状态。实训项目结束，切断所有电闸后方可离开。

化工实训一

UTS-LB流体输送单元操作实训

一、实训目的

- (1) 能准确识别、绘制流体输送实训工艺流程图（带仪表控制点）。
- (2) 掌握流体输送实训装置各设备的作用、结构和特点，训练实际化工生产的操作技能。
- (3) 掌握流体输送中离心泵输送、旋涡泵输送、真空输送及压力输送等方式的特点及优缺点。
- (4) 掌握流体输送的基本操作、调节方法、主要影响因素。
- (5) 掌握流体输送中常见异常现象及处理方法。
- (6) 掌握正确使用设备、仪表的方法技能，及时进行设备、仪器、仪表的维护与保养。
- (7) 学会做好开车前的准备工作及停车后的处理工作。
- (8) 熟悉正常开车、正常操作、停车基本方法，按操作要求调节到指定工艺指标。
- (9) 掌握监测设备的运行情况，随时发现、正确判断、及时处理各种异常现象（离心泵汽蚀、气缚），特殊情况能进行紧急停车操作的方法与技能。
- (10) 能掌握现代信息技术管理能力，应用实训软件进行现场数据采集、监控。
- (11) 精确完成流体流动阻力特性测定、离心泵特性曲线测定、流量计校核等实训内容。
- (12) 准确完成离心泵串、并联实训操作。
- (13) 能正确填写生产记录，及时分析各种数据。
- (14) 熟练掌握 DCS 操作系统控制流体输送实训操作的技巧、方法。

二、实训内容

（一）流体基础知识

液体和气体统称为流体。流体具有流动性的特征，即其抗剪切力和抗张力很小，无固定形状，随容器形状而变化；在外力作用下其内部发生相对运动。

1. 流体的主要物理量

流体无论是处于静止还是流动，以及在此过程中所发生的一切现象和表现特征都与流体

的物理量有关。因此,流体的物理量是研究流体的基本出发点。在流体力学中有关流体的物理量有以下几个。

(1) 流体密度

密度是单位体积流体所具有的流体质量,以 ρ 表示,单位为 kg/m^3 。

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1-1)$$

式中 ρ ——流体的密度, kg/m^3 ;

m ——流体质量, kg ;

V ——流体体积, m^3 。

1) 液体密度

一般液体可视为不可压缩性流体,其密度基本上不随压力变化,但随温度变化。对大多数液体而言,温度升高,其密度下降。因此,选用液体的密度时要注意该液体所处的温度。常见液体的密度值可查附录或有关手册。

① 纯液体密度。纯液体的密度可用仪器测量,通常采用相对密度计(比重计)和测压管。

相对密度是相对密度计的读数,以 $d_{277\text{K}}^T$ 表示,是指流体的密度与277K时水的密度之比,无量纲,即:

$$d_{277\text{K}}^T = \frac{\rho}{\rho_{\text{H}_2\text{O}, 277\text{K}}} \quad (1-2)$$

式中, $\rho_{\text{H}_2\text{O}, 277\text{K}}$ 表示水在277K时的密度,其数值为 1000kg/m^3 。故上式可写成:

$$\rho = 1000 d_{277\text{K}}^T \quad (1-3)$$

② 混合液体的密度。对于液体混合物,当混合前后的体积变化不大时,工程计算中其密度可由下式计算,即:

$$\frac{1}{\rho_m} = \sum_{i=1}^n \frac{w_i}{\rho_i} \quad (1-4)$$

式中 ρ_m ——液体混合物的密度, kg/m^3 ;

w_i ——液体混合物中 i 组分的质量分数;

ρ_i ——液体混合物 i 组分的密度, kg/m^3 。

2) 气体的密度

① 纯气体的密度。气体是可压缩性流体,其密度随压强和温度而变化。因此气体的密度必须标明其状态。从手册中查得的气体密度往往是某一指定条件下的数值,这就需要将查得的密度换算成操作条件下的密度,其换算公式为:

$$\rho = \rho_0 \frac{T_0}{T} \times \frac{p}{p_0} \quad (1-5)$$

式中,下标0表示标准状态。一般情况,当压强不太高,温度不太低时,纯气体也可按理想气体来处理,即可用下式计算:

$$\rho = \frac{pM}{RT} \quad (1-6)$$

式中 p ——气体的绝对压强, kPa;

T ——气体的热力学温度, K;

M ——气体的摩尔质量, kg/kmol;

R ——气体通用常数, 其值为 $8.314\text{kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$ 。

② 混合气体的密度。对于混合气体可用平均摩尔质量 M_m 代替 M , 即:

$$\rho_m = \frac{pM_m}{RT} \quad (1-7)$$

$$M_m = \sum_{i=1}^n y_i M_i$$

式中 y_i ——各组分的摩尔分数 (体积分数或压强分数);

M_i ——各组分的摩尔质量, kg/kmol。

(2) 流体压强

1) 静压强

静压强是垂直作用于单位面积上的力, 简称压强或压力, 以 p 表示, 定义式为:

$$p = \frac{F}{A} \quad (1-8)$$

式中 p ——流体的静压强, Pa;

F ——垂直作用于流体表面上的压力, N;

A ——作用面的面积, m^2 。

2) 静压强的单位

在国际单位制 SI 制中, 压强的单位是帕斯卡, 以 Pa 表示, 或 N/m^2 。在工程单位制中, 压力的单位是 atm 或 kgf/cm^2 ; 习惯上还采用其他单位。它们之间的换算关系为:

$$1\text{atm} = 1.013 \times 10^5 \text{Pa} = 1.033 \text{kgf}/\text{cm}^2 = 760\text{mmHg} = 10.33\text{mH}_2\text{O} = 1.0133\text{bar}$$

$$1\text{at} = 9.81 \times 10^4 \text{Pa} = 1 \text{kgf}/\text{cm}^2 = 735.6\text{mmHg} = 10\text{mH}_2\text{O}$$

3) 压强的表达方式

压强在实际应用中可有三种表达方式: 绝对压强、表压强和真空度。

① 绝对压强 (简称绝压)。绝对压力是指流体的真实压强, 更准确地说, 它是以绝对真空为基准测得的流体压强, 用 p 表示。

② 表压强 (简称表压)。表压力是指工程上用测压仪表以当时、当地大气压强为基准测得的流体压强, 用 $p_{(\text{表})}$ 表示。

③ 真空度。当被测流体内的绝对压强小于当地 (外界) 大气压强时, 使用真空表进行测量时, 真空表上的读数称为真空度, 用 $p_{(\text{真})}$ 表示。

绝对压强、表压强、真空度之间的关系为:

$$p_{(\text{表})} = p - p_0 \quad (1-9)$$

$$p_{(\text{真})} = p_0 - p$$

(3) 流量与流速

流量与流速是描述流体流动规律的参数。