

高等学校交流讲义

硅酸盐工业热工设备

天津大学 华南化工学院 南京化工学院合编



中国工业出版社

本书内容包括气体力学，燃料及其燃烧，固体燃料的气化，传热及干燥等方面的理论，以及硅酸盐工业主要热工设备的构造、操作原理与性能以及设计计算方法等。

本书适合于高等工业院校硅酸盐专业作为教材之用。

本书是根据天津大学、华南化工学院、华东化工学院及南京化工学院四个院校讲义及参阅其他参考资料选编而成。选编工作的分工是：绪论及第6、7、9三章——华南化工学院刘振群；第1、2、3、5、10五章——天津大学宋崑；第4、8二章——南京化工学院沈慈贤。

硅酸盐工业热工设备

天津大学 华南化工学院 南京化工学院合编

*

中国工业出版社出版（北京佟麟阁路丙10号）

（北京市书刊出版事业许可证出字第110号）

中国工业出版社第三印刷厂印刷

新华书店科技发行所发行·各地新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092^{1/16}$ · 印张 $28^{1/4}$ · 字数 660,000

1961年9月北京第一版·1961年9月北京第一次印刷

印数 0001—2337 · 定价 (10—6) 3.35元

统一书号 15165·940 (化工—62)

緒 論

硅酸盐工业無論在国民經济和人民生活中,都占有很重要的地位。建造高楼大厦,离不开水泥、玻璃、和陶瓷;发电站需用电瓷;冶金需要耐火材料;无綫电技术及火箭技术等还需要特种的硅酸盐材料。

生产硅酸盐工业产品的一个重要过程是燒成,燒成是在热工設備——窑炉中进行的,而一些原料或半制品在燒成之前要在热工設備——干燥窑中經過干燥。一个硅酸盐工厂热工設備的基建費往往占全厂生产基建費的25~45%,一个現代化窑炉的基建費,經常达数百万元之鉅。在燒成过程中,往往因为設備构造或操作的缺点,使前面各个过程中(粉碎、配料、成型等)所作的工作全部作廢。所以,热工設備在硅酸盐工业中是极其重要的部分。

硅酸盐工业的主要热工設備——窑炉,其发展过程也和其他事物一样,总是由低級到高級,由簡單到复杂,由产量质量低、燃料消耗大、劳动强度大发展到产量质量高、燃料消耗低和机械化自动化。最古老的窑炉为土窑,挖山洞用石块砌成,后来发展为室形窑,再进一步发展为連續生产自动控制的大型窑炉。

原始的窑炉是燒木材的,由于社会生产力的发展,木材用途广了,人們必須找寻另外的燃料来燒窑,就出現了燒煤的窑炉。燒成物料的产量、质量要求高了,燒成溫度要求高了,就要求把自然通风的窑炉改为机械通风,要求預热空气,要求使用气体燃料和液体燃料;生产力进一步发展,生产規模扩大了,要节省燃料,利用廢热,就要求建立大型的連續生产的窑炉。

近几十年来,窑炉的自动化有迅速的发展,苏联很多科学家在硅酸盐工业热工理論研究方面和大型的高温的現代窑炉設計方面都有很大的成就。

硅酸盐工业窑炉的发展和冶金炉的发展是分不开的。其实立窑的作用原理和煉鉄高炉相同,池窑是按平炉的原理設計出来的,各种陶瓷耐火材料工业窑炉都和鋼鉄工厂中所用的加热炉相似,所以冶金炉方面的新成就,对硅酸盐工业窑炉來說,也就有很重要的价值。

我国是創造窑炉最早的国家,从西安半坡遗址的发掘中,証明远在五千年之前,我們勤劳智慧的祖先就能利用升焰式室形窑燒制陶器,至少一千多年前,又进一步創造了依山傾斜建筑的龙窑、阶級窑和景德鎮瓷窑等。这些窑有的能很好地利用廢热;有的在人工操作的条件下,能很容易保持适宜的温度条件、压强制度;有的在砌窑时采用了空气隔热层的先进方法。升焰窑是現代倒焰窑的前身;龙窑及阶級窑是現代輪窑、多室窑及隧道窑的前身。这說明我国劳动人民在和自然斗争的过程中,在窑炉热工技术方面是取得巨大成就的。但由于我国过去长期处于封建的,帝国主义的及买办资产阶级的反动統治下,生产力发展很慢,因而窑炉热工技术也停滯不前。解放前硅酸盐工业窑炉热工技术远远落后于外国。1906年才开始在唐山建立启新洋灰公司,建立两座迴轉窑;1922年在秦皇島耀华玻璃厂建造一座平板玻璃池窑;而隧道窑只有一、二座,也未曾正式投入生产;至于窑炉的理論研究和結構設計方面更談不上了。

解放后,在党和政府的正确領導和在苏联以及其他社会主义国家的帮助下,硅酸盐工业和其他工业一样,有了飞跃的发展。国家設立了专门研究机关和設計机构,創辦了高等和中

等硅酸盐专业学校，培养出了大批能掌握窑炉操作和設計的人材。在总结自己窑炉的优点和研究新式窑炉等方面做了很多工作，使古老的龙窑、阶级窑、景德镇窑由烧柴改为烧煤或煤气，使这些窑炉发挥了更大的作用；各地还建立了不少规模相当大的机械化的现代窑炉；工人们创造了一系列的快速烧窑法，大大提高了窑的生产率，降低了单位产品的燃料消耗。窑炉生产指标达到了很高的水平。

大跃进以来，土洋并举，全国各地建立了很多简易窑炉，这些窑炉投资少，钢材用得少，很快可以建成。目前，这些简易窑炉正在不断改进和提高，逐步实现机械化自动化。总之，解放后，硅酸盐工业窑炉方面呈现了一片欣欣向荣的景象，而有着光明远大的发展前途。

硅酸盐工业窑炉种类甚多，按烧成产品的对象分，有煨烧块状、粒状物料的窑，如迴轉窑，立窑等；有烧制成型制品的窑，如隧道窑、倒焰窑等；有熔制玻璃的窑，如池窑及坩堝窑等。

按作业的性质分，有連續式窑及間歇式窑；按火焰是否与制品接触分，有直接焰式窑及隔焰式窑（馬福炉）；按热源分，有火焰窑及电热窑等；按使用燃料分，有烧固体燃料的窑，烧气体燃料的窑及烧液体燃料的窑等。

窑炉的类型虽多，但其操作控制，结构原理和設計原则是相类似的。

硅酸盐工业产品在烧成过程中，进行着复杂的物理化学变化。在窑内空间进行着燃料燃烧，气体流动和热交换过程。这些变化和过程的很多规律性，一直到現在，我們还没有很好掌握。所以，摆在从事硅酸盐工业热工设备的工作者面前的任务是极其艰巨的。我們既要从生产实践中去掌握技术，总结經驗，又要精通工艺和热工技术的理論，进一步指导生产，为提高产量质量，降低燃料消耗，改善劳动条件作出贡献。在窑炉热工技术方面今后应该做的工作是：

1. 用科学的方法总结工人操作的先进經驗，加以推广；
2. 改进現有的窑炉设备，定型和設計新型窑炉；
3. 从事热工理論研究，来指导操作和設計工作。

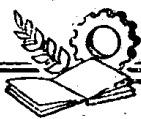
目 录

緒論	5
第一章 气体力学	7
第一节 引言.....	7
第二节 气体力学中的一些基本定律.....	7
第三节 气体流动时的压头损失.....	12
第四节 柏努利方程式在窑炉中的应用.....	15
第五节 高压气体的流出(压缩性气体的流出).....	19
第六节 窑炉内气体的运动.....	20
第七节 引导窑炉内气体流动的方法.....	23
参考资料.....	34
第二章 燃料、燃烧及燃烧设备	35
第一节 燃料的种类与性质.....	35
第二节 燃烧计算.....	41
第三节 燃烧过程的基本理论.....	51
第四节 气体燃料的燃烧及燃烧设备.....	57
第五节 液体燃料的燃烧及燃烧设备.....	63
第六节 煤粉的燃烧及燃烧设备.....	66
第七节 块状固体燃料的燃烧及燃烧设备.....	70
参考资料.....	77
第三章 固体燃料的气化及煤气发生炉	78
第一节 发生炉煤气的种类及其在硅酸盐工业中的应用.....	78
第二节 气化学理论.....	80
第三节 气化用煤.....	89
第四节 煤气发生炉的构造.....	90
第五节 煤气发生炉的操作.....	96
第六节 煤气的净化.....	97
第七节 气化与净化过程的计算.....	99
参考资料.....	103
第四章 传热	104
第一节 传热的基本概念.....	104
第二节 传导传热.....	105
第三节 相似原理.....	111
第四节 对流传热.....	115
第五节 辐射传热.....	119
第六节 综合传热.....	139
第七节 固体的加热和冷却(不稳定传热).....	145

参考资料	163
第五章 热交换器	164
第一节 排出烟气热量利用的方法.....	164
第二节 换热器.....	165
第三节 蓄热室.....	174
第四节 废热锅炉.....	182
第五节 空气加热器.....	183
参考资料.....	185
第六章 干燥与干燥设备	186
第一节 干燥的意义.....	186
第二节 湿空气的参变数.....	187
第三节 干燥过程的物料平衡及热平衡.....	189
第四节 I-d 图.....	195
第五节 粘土物料中水分的类型及其与物料的结合.....	200
第六节 干燥过程与自由表面蒸发速度.....	202
第七节 粘土物料中水分的内扩散(热湿传导现象).....	203
第八节 新的干燥方法.....	205
第九节 物料在干燥过程中的收缩与变形.....	207
第十节 干燥过程中物料的开裂.....	208
第十一节 粘土的干燥敏感性.....	208
第十二节 干燥所需的时间.....	209
第十三节 陶瓷耐火材料半成品干燥器.....	210
第十四节 干燥块状、粒状及泥浆状物料的干燥器.....	222
参考资料.....	227
第七章 玻璃工业窑	228
第一节 引言.....	228
第二节 坩埚窑.....	233
第三节 池窑.....	244
第四节 玻璃熔窑的热工控制与自动调节.....	303
第五节 熔制窑的发展方向.....	306
参考资料.....	306
第八章 胶凝材料工业窑	307
第一节 胶凝材料的煅烧过程.....	307

第二节 胶凝材料工业窑的种类	307	第三节 窑的分类	336
第三节 迴轉窑的結構	308	第四节 間歇式倒焰窑	387
第四节 迴轉窑的工作原理	319	第五节 隧道窑	401
第五节 迴轉窑的操作控制	331	第六节 輪窑	430
第六节 迴轉窑的設計計算	334	第七节 多室窑	439
第七节 其它型式的迴轉窑	349	第八节 中国陶瓷窑(景德镇窑、龙窑及阶級窑)	441
第八节 立窑的結構	357	参考資料	447
第九节 立窑的工作原理	365	第十章 窑炉砌筑	448
第十节 立窑的操作控制	372	第一节 窑基	448
第十一节 立窑的設計計算	374	第二节 窑墙	448
参考資料	377	第三节 窑頂	451
第九章 陶瓷耐火材料工业窑(成型制品燒制窑)	379	第四节 气体管道	451
第一节 合理的燒成制度	379	第五节 筑窑用的建筑材料	452
第二节 窑內傳热过程	382	参考資料	454

高等学校交流讲义



硅酸盐工业热工设备

天津大学 华南化工学院 南京化工学院合編

中国工业出版社

本书内容包括气体力学，燃料及其燃烧，固体燃料的气化，传热及干燥等方面的理论，以及硅酸盐工业主要热工设备的构造、操作原理与性能以及设计计算方法等。

本书适合于高等工业院校硅酸盐专业作为教材之用。

本书是根据天津大学、华南化工学院、华东化工学院及南京化工学院四个院校讲义及参阅其他参考资料选编而成。选编工作的分工是：绪论及第6、7、9三章——华南化工学院刘振群；第1、2、3、5、10五章——天津大学宋崑；第4、8二章——南京化工学院沈慈贤。

硅酸盐工业热工设备

天津大学 华南化工学院 南京化工学院合编

*

中国工业出版社出版（北京佟麟阁路丙10号）

（北京市书刊出版事业许可证出字第110号）

中国工业出版社第三印刷厂印刷

新华书店科技发行所发行·各地新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092^{1/16}$ · 印张 $28^{1/4}$ · 字数 660,000

1961年9月北京第一版·1961年9月北京第一次印刷

印数 0001—2337 · 定价 (10-6) 3.35元

统一书号 15165-940 (化工-62)

目 录

緒論	5
第一章 气体力学	7
第一节 引言.....	7
第二节 气体力学中的一些基本定律.....	7
第三节 气体流动时的压头损失.....	12
第四节 柏努利方程式在窑炉中的应用.....	15
第五节 高压气体的流出(压缩性气体的流出).....	19
第六节 窑炉内气体的运动.....	20
第七节 引导窑炉内气体流动的方法.....	23
参考資料.....	34
第二章 燃料、燃燒及燃燒設備	35
第一节 燃料的种类与性质.....	35
第二节 燃燒計算.....	41
第三节 燃燒过程的基本理論.....	51
第四节 气体燃料的燃燒及燃燒設備.....	57
第五节 液体燃料的燃燒及燃燒設備.....	63
第六节 煤粉的燃燒及燃燒設備.....	66
第七节 块状固体燃料的燃燒及燃燒設備.....	70
参考資料.....	77
第三章 固体燃料的气化及煤气发生炉	78
第一节 发生炉煤气的种类及其在硅酸盐工业中的应用.....	78
第二节 气化学理論.....	80
第三节 气化用煤.....	89
第四节 煤气发生炉的构造.....	90
第五节 煤气发生炉的操作.....	96
第六节 煤气的淨化.....	97
第七节 气化与淨化过程的計算.....	99
参考資料.....	103
第四章 傳热	104
第一节 傳热的基本概念.....	104
第二节 傳导傳热.....	105
第三节 相似原理.....	111
第四节 对流傳热.....	115
第五节 輻射傳热.....	119
第六节 綜合傳热.....	139
第七节 固体的加热和冷却(不稳定傳热).....	145

参考資料	163
第五章 热交換器	164
第一节 排出烟热量利用的方法.....	164
第二节 換热器.....	165
第三节 蓄热室.....	174
第四节 廢热鍋炉.....	182
第五节 空气加热器.....	183
参考資料.....	185
第六章 干燥与干燥設備	186
第一节 干燥的意义.....	186
第二节 湿空气的参变数.....	187
第三节 干燥过程的物料平衡及热平衡.....	189
第四节 I-d 图.....	195
第五节 粘土物料中水分的类型及其与物料的结合.....	200
第六节 干燥过程与自由表面蒸发速度.....	202
第七节 粘土物料中水分的內扩散(热湿傳导現象).....	203
第八节 新的干燥方法.....	205
第九节 物料在干燥过程中的收縮与变形.....	207
第十节 干燥过程中物料的开裂.....	208
第十一节 粘土的干燥敏感性.....	208
第十二节 干燥所需的时间.....	209
第十三节 陶瓷耐火材料半制品干燥器.....	210
第十四节 干燥块状、粒状及泥浆状物料的干燥器.....	222
参考資料.....	227
第七章 玻璃工业窑	228
第一节 引言.....	228
第二节 坩堝窑.....	233
第三节 池窑.....	244
第四节 玻璃熔窑的热工控制与自动調节.....	303
第五节 熔制窑的发展方向.....	306
参考資料.....	306
第八章 胶凝材料工业窑	307
第一节 胶凝材料的煅燒过程.....	307

第二节 胶凝材料工业窑的种类	307	第三节 窑的分类	336
第三节 迴轉窑的結構	308	第四节 間歇式倒焰窑	387
第四节 迴轉窑的工作原理	319	第五节 隧道窑	401
第五节 迴轉窑的操作控制	331	第六节 輪窑	430
第六节 迴轉窑的設計計算	334	第七节 多室窑	439
第七节 其它型式的迴轉窑	349	第八节 中国陶瓷窑(景德镇窑、龙窑及阶級窑)	441
第八节 立窑的結構	357	参考資料	447
第九节 立窑的工作原理	365	第十章 窑炉砌筑	448
第十节 立窑的操作控制	372	第一节 窑基	448
第十一节 立窑的設計計算	374	第二节 窑墙	448
参考資料	377	第三节 窑頂	451
第九章 陶瓷耐火材料工业窑(成型制品燒制窑)	379	第四节 气体管道	451
第一节 合理的燒成制度	379	第五节 筑窑用的建筑材料	452
第二节 窑內傳热过程	382	参考資料	454

緒 論

硅酸盐工业無論在国民經济和人民生活中,都占有很重要的地位。建造高楼大厦,离不开水泥、玻璃、和陶瓷;发电站需用电瓷;冶金需要耐火材料;无綫电技术及火箭技术等还需要特种的硅酸盐材料。

生产硅酸盐工业产品的一个重要过程是燒成,燒成是在热工設備——窑炉中进行的,而一些原料或半制品在燒成之前要在热工設備——干燥窑中經過干燥。一个硅酸盐工厂热工設備的基建費往往占全厂生产基建費的25~45%,一个現代化窑炉的基建費,經常达数百万元之鉅。在燒成过程中,往往因为設備构造或操作的缺点,使前面各个过程中(粉碎、配料、成型等)所作的工作全部作廢。所以,热工設備在硅酸盐工业中是极其重要的部分。

硅酸盐工业的主要热工設備——窑炉,其发展过程也和其他事物一样,总是由低級到高級,由簡單到复杂,由产量质量低、燃料消耗大、劳动强度大发展到产量质量高、燃料消耗低和机械化自动化。最古老的窑炉为土窑,挖山洞用石块砌成,后来发展为室形窑,再进一步发展为連續生产自动控制的大型窑炉。

原始的窑炉是燒木材的,由于社会生产力的发展,木材用途广了,人們必須找寻另外的燃料来燒窑,就出現了燒煤的窑炉。燒成物料的产量、质量要求高了,燒成溫度要求高了,就要求把自然通风的窑炉改为机械通风,要求預热空气,要求使用气体燃料和液体燃料;生产力进一步发展,生产規模扩大了,要节省燃料,利用廢热,就要求建立大型的連續生产的窑炉。

近几十年来,窑炉的自动化有迅速的发展,苏联很多科学家在硅酸盐工业热工理論研究方面和大型的高温的現代窑炉設計方面都有很大的成就。

硅酸盐工业窑炉的发展和冶金炉的发展是分不开的。其实立窑的作用原理和煉鉄高炉相同,池窑是按平炉的原理設計出来的,各种陶瓷耐火材料工业窑炉都和鋼鉄工厂中所用的加热炉相似,所以冶金炉方面的新成就,对硅酸盐工业窑炉來說,也就有很重要的价值。

我国是創造窑炉最早的国家,从西安半坡遗址的发掘中,証明远在五千年之前,我們勤劳智慧的祖先就能利用升焰式室形窑燒制陶器,至少一千多年前,又进一步創造了依山傾斜建筑的龙窑、阶級窑和景德鎮瓷窑等。这些窑有的能很好地利用廢热;有的在人工操作的条件下,能很容易保持适宜的温度条件、压强制度;有的在砌窑时采用了空气隔热层的先进方法。升焰窑是現代倒焰窑的前身;龙窑及阶級窑是現代輪窑、多室窑及隧道窑的前身。这說明我国劳动人民在和自然斗争的过程中,在窑炉热工技术方面是取得巨大成就的。但由于我国过去长期处于封建的,帝国主义的及买办资产阶级的反动統治下,生产力发展很慢,因而窑炉热工技术也停滯不前。解放前硅酸盐工业窑炉热工技术远远落后于外国。1906年才开始在唐山建立启新洋灰公司,建立两座迴轉窑;1922年在秦皇島耀华玻璃厂建造一座平板玻璃池窑;而隧道窑只有一、二座,也未曾正式投入生产;至于窑炉的理論研究和結構設計方面更談不上了。

解放后,在党和政府的正确領導和在苏联以及其他社会主义国家的帮助下,硅酸盐工业和其他工业一样,有了飞跃的发展。国家設立了专门研究机关和設計机构,創辦了高等和中

等硅酸盐专业学校，培养出了大批能掌握窑炉操作和设计的人材。在总结自己窑炉的优点和研究新式窑炉等方面做了很多工作，使古老的龙窑、阶级窑、景德镇窑由烧柴改为烧煤或煤气，使这些窑炉发挥了更大的作用；各地还建立了不少规模相当大的机械化的现代窑炉；工人们创造了一系列的快速烧窑法，大大提高了窑的生产率，降低了单位产品的燃料消耗。窑炉生产指标达到了很高的水平。

大跃进以来，土洋并举，全国各地建立了很多简易窑炉，这些窑炉投资少，钢材用得少，很快可以建成。目前，这些简易窑炉正在不断改进和提高，逐步实现机械化自动化。总之，解放后，硅酸盐工业窑炉方面呈现了一片欣欣向荣的景象，而有着光明远大的发展前途。

硅酸盐工业窑炉种类甚多，按烧成产品的对象分，有煅烧块状、粒状物料的窑，如迴转窑，立窑等；有烧制成型制品的窑，如隧道窑、倒焰窑等；有熔制玻璃的窑，如池窑及坩埚窑等。

按作业的性质分，有连续式窑及间歇式窑；按火焰是否与制品接触分，有直接焰式窑及隔焰式窑（馬福炉）；按热源分，有火焰窑及电热窑等；按使用燃料分，有烧固体燃料的窑，烧气体燃料的窑及烧液体燃料的窑等。

窑炉的类型虽多，但其操作控制，结构原理和设计原则是相类似的。

硅酸盐工业产品在烧成过程中，进行着复杂的物理化学变化。在窑内空间进行着燃料燃烧，气体流动和热交换过程。这些变化和过程的很多规律性，一直到現在，我們还没有很好掌握。所以，摆在从事硅酸盐工业热工设备的工作者面前的任务是极其艰巨的。我們既要从生产实践中去掌握技术，总结经验，又要精通工艺和热工技术的理论，进一步指导生产，为提高产量质量，降低燃料消耗，改善劳动条件作出贡献。在窑炉热工技术方面今后应该做的工作是：

1. 用科学的方法总结工人操作的先进经验，加以推广；
2. 改进现有的窑炉设备，定型和设计新型窑炉；
3. 从事热工理论研究，来指导操作和设计工作。

第一章 气体力学

第一节 引言

硅酸盐工业窑炉内传递热能的媒介是热的气态燃烧产物。因此,窑炉的工作就和气体的流动情况有着密切的关系。

气体力学系研究窑炉内有关气体平衡和流动的各种定律及其条件。

气体力学是热工学的一个重要方面。燃料获得最合理的燃烧,以及均匀地和有效地加热物料,是与气体的流动相关连的。废气出炉后如何经过烟道、废热回收设备并自烟囱排出,空气和煤气或液体燃料的送入炉内,以及炉体的漏气等等都是在生产中经常碰到的问题。这些问题能否得到妥善的解决,影响到产品的质量、产量和成本。气体力学的研究对于窑炉的操作、窑炉的设计以及安全技术等方面都有重要的意义。由此可见,为了正确地掌握窑炉的操作或设计一个完善的窑炉,气体力学的知识是不可缺少的。

气体和液体都是流体,因此有其共同点。例如,液体流动时有二种状态,即层流与湍流。气体也有。对于液体,雷诺数为 2320 时是层流湍流互变的临界值,对于气体也是如此。流体平衡方程式、连续性方程式和柏努利方程式适用于液体也适用于气体。流体阻力的计算公式对于气体和液体也一样可以应用。

我们在研究窑炉中的气体力学问题时可以有这样的看法:即气体虽有很大的压缩性和随温度变化的体积膨胀的收缩性、然而实际上窑炉中各部位的压强往往只相差 0.0002~0.002 大气压 (2~20 毫米水柱)而且窑炉内的压强与大气压强十分相近。窑炉内的温度也是逐渐变化的,就某一小段而言,温度的变化对气体体积的影响也可忽略不计,在这种情形下可以认为气体在窑炉中流动时其重度不变。也就是说:可以把气体看作是非压缩性的。不过,当气体经过燃料层或蓄热室时,温度有很大的改变,在这种情况下应当考虑其体积的变化,不能认为重度不变。

第二节 气体力学中的一些基本定律

一、气体速度、流量、重度与温度的关系

根据盖吕萨克定律,有下列基本公式:

$$w_t = w_0(1 + \beta t) \text{ 米/秒} \quad (1-1)$$

$$V_t = V_0(1 + \beta t) \text{ 米}^3/\text{秒} \quad (1-2)$$

$$\gamma_t = \gamma_0 \left(\frac{1}{1 + \beta t} \right) \text{ 公斤/米}^3 \quad (1-3)$$

式中 w_t 、 V_t 及 γ_t ——各为在 1 物理大气压下、在 $t^\circ\text{C}$ 温度时的速度、流量及重度;

w_0 、 V_0 及 γ_0 ——各为在标准状态下的速度、流量及重度;

$\beta = \frac{1}{273}$ ——气体膨胀的温度系数, $\frac{1}{^\circ\text{C}}$ 。

w_0 我們称为标态速度, w_i 則称为实际速度; V_0 称为标态流量, w_0 和 V_0 在計算中有許多方便的地方, 以后我們將經常用到它們。

二、流体平衡方程式

$$P_1 - P_2 = (H_2 - H_1) \gamma \text{ 毫米水柱} \quad (1-4)$$

其中, H_1 与 H_2 ——流体中两点与基准水平面之距离, 米;

P_1 与 P_2 ——作用于这两点的流体静压强, 毫米水柱。

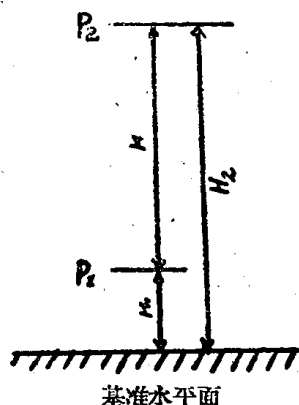


图 1-1 流体平衡方程式
推导附图

如令 H 为由 H_1 平面到其上 H_2 平面的距离 (图 1-1), 則

$$P_2 = P_1 - H \gamma \quad (1-5)$$

最后这个方程式的形式在气体力学中应用最方便。

由流体静力学基本方程式可知, 在大气中, 每升高 10 米, 气压約降低 12 毫米水柱左右 (当大气温度为 20°C 时), 这个压强差在水力学中常忽略不計。但在窑炉气体力学中比压强差在許多情况下有着很重要的作用。

三、流体連續性方程式

流体連續性方程式中所包含的概念, 即当流体 (此时即气体) 在稳定流动时, 单位時間內通过导管任一截面的重量流量皆相等。通常在导管的同一截面上各点的温度, 速度和压强是不同的, 因而連續性方程式中是用速度, 压强和重度的平均值。流体連續性方程式即:

$$G_1 = G_2 = G_3 = \dots = \text{常数} \quad (1-6)$$

或

$$F_1 w_1 \gamma_1 = F_2 w_2 \gamma_2 = F_3 w_3 \gamma_3 = \dots = \text{常数} \quad (1-7)$$

式中 G_1, G_2, G_3 ——每秒通过 1—1、2—2 和 3—3 截面之流体重量, 公斤;

F_1, F_2, F_3 ——导管的截面积, 米²。

在窑炉中, 对于温度变化不大的一段而言, 可认为 $\gamma = \text{常数}$, 此时,

$$F_1 w_1 = F_2 w_2 = F_3 w_3 = \dots = V = \text{常数} \text{ 米}^3/\text{秒} \quad (1-8)$$

但是在窑炉砌筑体上有不严密处和安設的門孔, 因此在应用此方程式时应考虑到空气由外面的吸入和烟气从內面的漏出。那么此时

$$F_1 w_1 \gamma_1 \neq F_2 w_2 \gamma_2 \neq F_3 w_3 \gamma_3$$

而是

$$F_1 w_1 \gamma_1 = F_2 w_2 \gamma_2 \pm \gamma_{(\text{漏})} \Delta V_{1-2} = \dots \quad (1-9)$$

其中, ΔV_{1-2} ——管道 1—1 与 2—2 截面之間, 漏出或吸入气体量, 米³/秒;

$\gamma_{(\text{漏})}$ ——管道 1—1 与 2—2 截面之間, 漏出或吸入气体的平均重度。

四、柏努利方程式

当在流体重度不变的条件下, 解欧拉稳定状态流动微分方程式, 即得柏努利方程式:

$$H + \frac{p}{\gamma} + \frac{w^2}{2g} = \text{常数} \quad (1-10)$$

此方程式适用于“理想流体”, 即沒有粘性的流体, 也就是說沒有能量的損失 (因摩擦而

轉变为热能)。

在窑炉内流动的气体不是“理想流体”，因此流动时有因摩擦力而产生的能量损失，此时柏努利方程式就写成：

$$H + \frac{p}{\gamma} + \frac{w^2}{2g} + \frac{h_{\text{失}}}{\gamma} = \text{常数} \quad (1-11)$$

对于管道中 1—1 截面和 2—2 截面而言，上式则写成：

$$H_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{w_1^2}{2g} = H_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{w_2^2}{2g} + \frac{h_{\text{失}1-2}}{\gamma} \quad (1-12)$$

方程式的这种形式在气体力学计算中颇感不便，因而需要改变其形式。将(1-12)式乘以 γ 则得

$$H_1\gamma + p_1 + \frac{w_1^2}{2g}\gamma = H_2\gamma + p_2 + \frac{w_2^2}{2g}\gamma + h_{\text{失}1-2}\gamma \quad (1-13)$$

对于管道外空气而言，可认为空气是静止的。即 $w=0$ 。故其相应截面上的柏努利方程式为

$$H_1\gamma_{\text{空}} + p_{\text{空}1} = H_2\gamma_{\text{空}} + p_{\text{空}2} \quad (1-14)$$

以(1-13)式减(1-14)式，则得

$$H_1(\gamma - \gamma_{\text{空}}) + (p_1 - p_{\text{空}1}) + \frac{w_1^2}{2g}\gamma = H_2(\gamma - \gamma_{\text{空}}) + (p_2 - p_{\text{空}2}) + \frac{w_2^2}{2g}\gamma + h_{\text{失}1-2}\gamma \quad (1-15)$$

式中 $\gamma, \gamma_{\text{空}}$ ——管道中热气体和外界空气的重度，公斤/米³；

H_1, H_2 ——1—1 截面和 2—2 截面所处的几何高度，米；

p_1, p_2 ——1—1 截面和 2—2 截面处管道中热气体的绝对静压强，公斤/米²；

$p_{\text{空}1}, p_{\text{空}2}$ ——1—1 截面和 2—2 截面处管道外空气的绝对静压强，公斤/米²；

w_1, w_2 ——1—1 截面和 2—2 截面处管道中热气体的流速，米/秒。

在窑炉上所讨论的问题皆为 $\gamma < \gamma_{\text{空}}$ 的情况。为了方便，将基准面取在上面，故 $H(\gamma - \gamma_{\text{空}})$ 应表示为 $-H(\gamma - \gamma_{\text{空}}) = H(\gamma_{\text{空}} - \gamma)$ 。这样可得出下式

$$H_1(\gamma_{\text{空}} - \gamma) + (p_1 - p_{\text{空}1}) + \frac{w_1^2}{2g}\gamma = H_2(\gamma_{\text{空}} - \gamma) + (p_2 - p_{\text{空}2}) + \frac{w_2^2}{2g}\gamma + h_{\text{失}1-2}\gamma \quad (1-16)$$

式中 $H(\gamma_{\text{空}} - \gamma)$ 称为剩余几何压头，通常就称为几何压头以 $h_{\text{几}}$ 表示。 $(p - p_{\text{空}})$ 称为剩余静压头，习称静压头以 $h_{\text{静}}$ 表示。 $\frac{w^2}{2g}\gamma$ 称为动压头或速度压头，以 $h_{\text{动}}$ 表示。方程式可写成：

$$h_{\text{几}1} + h_{\text{静}1} + h_{\text{动}1} = h_{\text{几}2} + h_{\text{静}2} + h_{\text{动}2} + h_{\text{失}1-2} \quad (1-17)$$

或简写成

$$h_{\text{几}} + h_{\text{静}} + h_{\text{动}} + h_{\text{失}} = \text{常数} \quad (1-18)$$

压头是能量不是压强。在这里各压头的单位是公斤·米/米³，即每米³气体带有的能量。 $h_{\text{失}}$ 是每米³气体流动时的能量损失。由公式可以见到柏努利方程式实质上是能量守恒原理在流体流动上的应用。此外，由公式见到气体力学中应用的柏努利方程式形式与水力学中的稍有不同。

静压头一般用压强计测量，压强计的一头与大气相通，另一头与管子相连，管口切面与气流方向平行，如右图 1-2 压强计测量出的表压强 $(p - p_{\text{空}})$ 数值上恰等于静压头，因而通常

我們用毫米水柱的单位(压强的单位)来表示压头;这是为了方便,并非意味压头即是压强。

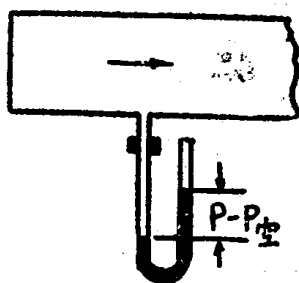


图 1-2 静压头的测量方法

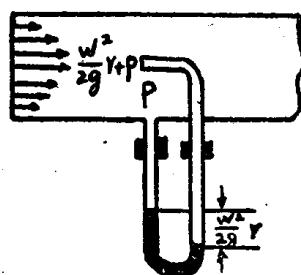


图 1-3 动压头的测量法示意图

动压头用压差計测量。装置示意图 1-3。压差計的一头与管口对着气流方向的管子相連,用它测全压强 $\frac{w^2}{2g} \gamma + p$; 另外一头也与管相連,但管口切面与气流方向平行,用它测静压强 p_0 。压差計直接表示动压头。用测速管(皮托管)测量流速就是根据这个原理的。

几何压头不能直接测量,而是計算出来的。

假如窑炉管道截面变化是逐渐的,那么柏努利方程式可以用于管道的任何一段截面上。

对于截面变化突然的管道中,那么必須这样来选择截面,即截面应离开气流突然扩大或縮小或者方向突然变更的地方要有相当大的距离。

我們知道柏努利方程式是假定气体具有非压缩性而导出的。

在窑炉中,气体压强的变化較小,然而在某些情况下温度变化是很大的,因此上面的公式仅能用于温度变化較小的地区。在研究窑炉中气体流动的問題时,常把窑炉通道按温度变化的情况划分为若干段,分段研究。这样各段温度变化不大,可取重度的平均值。

总之,柏努利方程式应用的条件是:

1. 流动属于稳定流动;
2. 流体的重度不改变;
3. 流动为单向流动(在管道截面逐渐变化的地方)。

由此可知,在窑炉上应用柏努利方程式計算是近似的,而不是很精确的。

柏努利方程式本身不仅包含有能量不灭的概念,而且还包含有另一个很重要的概念,那就是压头可以转变的概念。

压头转变的規律为:几何压头能可逆地转变为静压头;静压头可以变为动压头;动压头也可以变为静压头;只有动压头能转变成压头损失,而动压头則由静压头补充。具体可以这样表示:

$$\begin{aligned} h_{几} &\rightleftharpoons h_{静} \text{ (可逆)} \\ h_{静} &\rightleftharpoons h_{动} \text{ (可逆)} \\ h_{动} &\longrightarrow h_{损} \text{ (不可逆)} \end{aligned}$$

为明确起见,举几个例子說明。

1. $h_{动} \rightleftharpoons h_{静}$

設有某气体在一个逐渐扩张的管道中流动。管子始端断面为 F_1 , 末端断面为 F_2 (图 1-4)。由于 $F_1 < F_2$, 所以 $w_1 > w_2$ 。对 1、2 两截面写出柏努利方程式:

$$h_{几1} + h_{静1} + h_{动1} = h_{几2} + h_{静2} + h_{动2} + h_{损1-2}$$

气体流动是水平的,所以 $h_{\text{几}1} = h_{\text{几}2}$ 。

气体与管壁之间的摩擦略去不计,则上式

改为:

$$h_{\text{静}1} + h_{\text{动}1} = h_{\text{静}2} + h_{\text{动}2}$$

因为 $w_1 > w_2$, 也即 $h_{\text{动}1} > h_{\text{动}2}$, 所以

$$h_{\text{静}1} < h_{\text{静}2}。$$

在这种情况下,流动过程中动压头减小,静压头增加,亦即动压头在向静压头转变。要是气体与管壁之间的摩擦不能略去,那末1,2两截面之间压强差会小些,因为有部分动压头消耗于克服阻力上了。

这种装置叫做“扩散管”。利用扩散管这一性质,可以降低动压头,因而也就可以减少压头损失。但如果扩张角超过 $7 \sim 10^\circ$, 则气流脱离管壁,造成旋涡,则会消耗较多的能量。

2. $h_{\text{几}} \longleftrightarrow h_{\text{静}}$

设有热气体在垂直管道中由下向上流动(如图1-5)。列出1、2两截面的柏努利方程式:

$$h_{\text{几}1} + h_{\text{静}1} + h_{\text{动}1} = h_{\text{几}2} + h_{\text{静}2} + h_{\text{动}2} + h_{\text{失}1-2}$$

因为 $w_1 = w_2$, 所以 $h_{\text{动}1} = h_{\text{动}2}$, 则得

$$h_{\text{几}1} + h_{\text{静}1} = h_{\text{几}2} + h_{\text{静}2} + h_{\text{失}1-2}$$

或

$$(h_{\text{静}2} - h_{\text{静}1}) = (h_{\text{几}1} - h_{\text{几}2}) - h_{\text{失}1-2}$$

由上式可知热气体向上流动时,几何压头逐渐减小,一部分耗用于摩擦损失上(通过静压头以致动压头转变的),其余皆转变为静压头,使静压头逐渐增大。

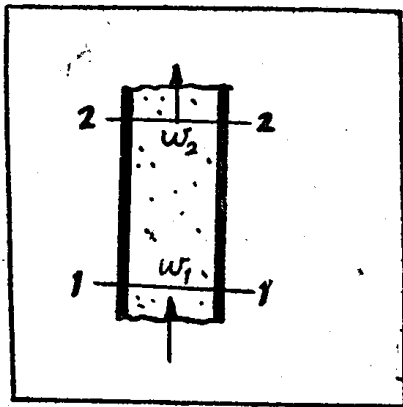


图1-5 热气体在垂直管中向上的流动

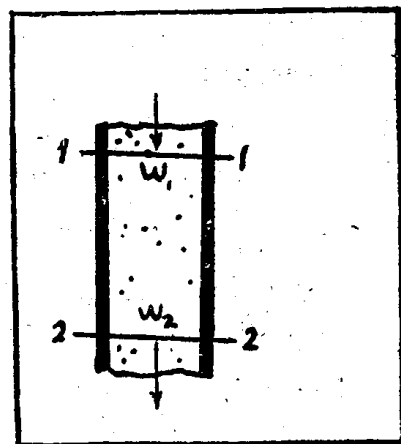


图1-6 热气体在垂直管中向下的流动

如果热气体流动方向相反,即向下流动的话(如图1-6),那么列出柏努利方程式:

$$h_{\text{几}1} + h_{\text{静}1} + h_{\text{动}1} = h_{\text{几}2} + h_{\text{静}2} + h_{\text{动}2} + h_{\text{失}1-2}$$

因 $h_{\text{动}1} = h_{\text{动}2}$, 所以

$$h_{\text{几}1} + h_{\text{静}1} = h_{\text{几}2} + h_{\text{静}2} + h_{\text{失}1-2}$$

或

$$(h_{\text{静}1} - h_{\text{静}2}) = (h_{\text{几}2} - h_{\text{几}1}) + h_{\text{失}1-2}$$

由上式可知,热气体向下流动时,几何压头逐渐增加,也即是逐渐吸收能量,此能量来自静压头的减小。应注意的是,几何压头的增量和压头的损失相加的,因此在热工计算中,往