



“十二五”国家重点图书出版规划项目
材料科学研究与工程技术系列(应用型院校用书)

热处理设备

Heat Treatment Installation

主 编 王淑花
副主编 刘爱莲
钱兵羽

院士专家著书 体现先进性 前瞻性 反映材料领域的研究成果

学科融合贯通 注重交叉性 学术性 立足材料科学的人才培养

内容丰富翔实 追求研究性 实用性 促进材料工程的创新发展

哈尔滨工业大学出版社

材料科学研究与工程技术系列(应用型院校用书)

材料科学研究与工程技术系列(应用型院校用书)

主 编 王淑花
副主编 刘爱莲 钱兵羽

主 编 王淑花
副主编 刘爱莲 钱兵羽

哈爾濱工業大學出版社

“十二五”国家重点图书出版规划项目

内 容 提 要

本书注重各种热处理设备的结构特点、应用特性、应用领域和常用热处理炉的设计内容和设计方法的讲解。主要内容包括:传热理论,筑炉材料,热处理电阻炉,热处理浴炉及流动粒子炉,可控气氛热处理炉,真空热处理炉,感应加热设备,热处理冷却设备,热处理辅助设备,热处理炉温度测量与控制装置,热处理炉设计计算实例。

本书适用于高职高专及相关专业本科生使用,还可作为科研人员、教师和技术人员的参考书。

热 处 理 设 备

图书在版编目(CIP)数据

热处理设备/王淑花主编. —哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2010.10

ISBN 978-7-5603-3103-4

I. ①热… II. ①王… III. ①热处理设备—高等学校—教材 IV. ①TG155

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 211233 号

策划编辑 张秀华 杨 桦

责任编辑 刘 瑶

出版发行 哈尔滨工业大学出版社

社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006

传 真 0451-86414749

网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>

印 刷 黑龙江省委党校印刷厂

开 本 787mm×1092mm 1/16 印张 12.25 字数 291 千字

版 次 2011 年 2 月第 1 版 2011 年 2 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5603-3103-4

定 价 23.80 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

哈尔滨工业大学出版社

前 言

《热处理设备》是为金属材料工程专业本科学生编写的教材。本书在编写过程中主要注重于各种热处理设备的结构特点、应用特性、应用领域和一些常用热处理炉的设计内容和设计方法的讲解。

本书共分11章。第1章介绍了传热基本原理,在热处理设备中存在的传热形式及其传热量的计算方法。第2章介绍了制造热处理炉所用的各种耐热材料、保温材料和金属材料。第3章介绍了热处理电阻炉的基本分类、结构特点、应用及设计内容和设计方法。第4章介绍了热处理浴炉的特点、分类、设计内容及设计方法。第5章介绍了各种控制气氛的特点、制备方法及其应用领域,碳势的控制原理,各种控制气氛炉的结构特点及生产特点。第6章介绍了真空热处理炉的分类、特点和简单的设计内容。第7章介绍了感应加热装置的加热原理、设备频率、功率的选取,不同加热设备的特点及应用。第8章介绍了各种类型热处理用冷却设备的结构特点及应用。第9章介绍了各种辅助设备的用途及工作原理。第10章介绍了温度测量与控制装置的工作原理、结构组成及性能特点。第11章介绍了热处理电阻炉和热处理盐浴炉的设计实例,通过实例讲解,让学生掌握其基本的设计方法。

本书由王淑花担任主编,并负责全书统稿和修改工作,由刘爱莲和钱兵羽担任副主编。其中绪论、第1章至第3章由王淑花编写,第4章至第6章由刘爱莲编写,第7章至第11章由钱兵羽编写。王振廷审阅了本书并提出宝贵意见。此外,本书在编写过程中还得到了黑龙江科技学院的王振玲、徐家文老师的大力支持并付出许多辛勤的劳动。书中引用的一些资料、图样取自各书刊、手册和有关设计单位编写的工程师培训指导书,在此特向引用各种资料的原著者表示感谢。

由于作者水平有限,书中难免有不妥之处,希望读者给予批评指正。

编者

2010年10月

目 录

绪论	1
第1章 传热理论	3
1.1 概述	3
1.2 传导传热	5
1.3 对流传热	9
1.4 辐射传热	11
1.5 综合传热	17
思考题	20
第2章 筑炉材料	21
2.1 炉衬材料	21
2.2 炉用金属材料	28
思考题	29
第3章 热处理电阻炉	30
3.1 热处理电阻炉的类型及结构	30
3.2 热处理电阻炉的设计步骤	42
3.3 炉型的选择与炉膛尺寸的确定	42
3.4 炉体结构设计及材料选择	45
3.5 热处理电阻炉功率的计算	47
3.6 电热元件材料及其性能	52
3.7 电热元件的设计计算及安装	55
3.8 热处理电阻炉的性能试验	63
3.9 热处理电阻炉的安全操作与维护	65
思考题	66
第4章 热处理浴炉及流动粒子炉	67
4.1 浴炉的特点及类型	67
4.2 电极盐浴炉的设计	70
4.3 电极的设计	74
4.4 盐炉变压器的选用、抽风装置及盐炉启动	78
4.5 浴炉的使用、维修和安全操作	82
4.6 流动粒子炉	84
思考题	85
第5章 可控气氛热处理炉	86
5.1 可控气氛的类型及制备	86

5.2	碳势的控制和氧势的控制	92
5.3	可控气氛热处理炉综述	98
5.4	可控气氛炉的安全操作与维护	102
	思考题	104
第6章	真空热处理炉	105
6.1	概述	105
6.2	真空热处理炉的分类	107
6.3	电热元件材料及设计简介	114
6.4	真空炉主要部件的设计	116
6.5	真空炉的真空系统	119
6.6	真空炉的使用与维护	121
	思考题	124
第7章	感应加热设备	125
7.1	概述	125
7.2	感应加热的基本原理	126
7.3	感应加热电源	127
7.4	感应淬火机床	129
7.5	感应器	131
	思考题	135
第8章	热处理冷却设备	136
8.1	淬火槽及淬火介质的循环冷却系统	136
8.2	冷处理设备	145
	思考题	147
第9章	热处理辅助设备	148
9.1	清理设备	148
9.2	清洗设备	150
9.3	校正与校直设备	151
	思考题	152
第10章	热处理炉温度测量与控制装置	153
10.1	热电偶	153
10.2	常用温度显示与调节仪表	157
10.3	炉温的自动控制	162
	思考题	166
第11章	热处理炉设计计算实例	167
11.1	热处理电阻炉的设计计算实例	167
11.2	热处理盐浴炉的设计实例	177
	附录	180
	参考文献	187

绪 论

随着科技的不断进步,对机械制造、冶金等行业中需要热处理的工件数量也不断增加,并且其质量要求也不断提高,为此先进的热处理技术也不断涌现。要想实现先进的热处理技术则必须有先进的热处理设备来保证。热处理设备是完成热处理工艺的重要保证,能够设计或选用先进合理的热处理设备,充分满足热处理工艺参数的要求,是提高产品质量的关键。

在实际生产车间中使用的热处理设备有很多种,根据其在热处理生产过程中所完成的任务不同,通常分为加热设备、冷却设备、辅助设备和温度控制设备。

热处理加热设备主要包括各种加热炉和加热装置(如感应加热装置、火焰加热装置等)。其中热处理炉是热处理车间普遍使用的加热设备,不同生产车间所具备的加热炉种类各不相同,对于产品品种较多,工艺方法也比较多,但生产量比较少的车间,一般采用周期作业加热设备,主要炉型有箱式电阻炉、井式电阻炉、周期式控制气氛炉、盐浴炉、感应加热装置等。如果有大型工件的车间,还要设有台车炉。对于产品类型比较少,生产批量较大、热处理工艺种类较少的车间,大多采用连续作业炉,如推杆炉、输送带炉、滚动底式炉等,同时配有一些周期作业的普通作业炉。对于生产工具、模具类的热处理生产车间,主要具备的热处理设备应为各种浴炉,同时配有一些普通热处理加热设备。对于渗碳、渗氮以及要求无氧化的热处理工件,其车间应具备各种连续或周期的渗碳炉、渗氮炉和真空炉等。

总之,不同热处理车间生产的产品类型不同,完成的热处理工艺也不同,要根据其实际情况适当购置和选用相应的热处理加热设备,以保证所处理产品的质量。

热处理冷却设备主要包括各种淬火设备、缓冷设备和冷处理设备。其中淬火设备包括各种淬火槽,主要有一般淬火槽、机械化淬火槽,其中机械化淬火槽又包括周期作业和连续作业。具体采用哪种类型的淬火槽取决于所处理产品的批量的大小。对于薄壁类零件,为了防止在淬火过程中产生变形,一般采用淬火机床,即在淬火的同时加压,然后及时进行回火,对于精度要求较高的工件,回火加热及冷却时也要采用回火机床进行。

缓冷设备主要用于退火冷却、正火冷却及渗碳后缓冷,这些工艺要求工件冷却速度较慢。采用的缓冷设备主要有热处理炉和缓冷室(或坑)。有时为了防止工件在缓冷过程中发生氧化或脱碳,需要在缓冷设备内通入保护气氛进行保护加热。

有些淬火工件需要冷至室温以下,使钢中的残余奥氏体继续转变为马氏体,进一步提高钢件的硬度,稳定组织,对于这类零件要达到其热处理的目的,需要采用冷处理设备来实现。常用的冷处理设备有干冰冷处理设备、冷冻机式冷处理设备和使用液化气体的冷处理设备。其中在热处理车间应用最普遍的是采用液氮气化降低温度来实现对工件的冷处理。

要完成热处理工件的整个热处理工序,除了需要热处理加热、冷却设备外,还需要一些辅助设备的协助才能完成,比如装卸料用的起重运输设备,清理热处理后工件表面的氧化皮、盐渣、油污等污物使用的清理设备和清洗设备以及对于在淬火过程中发生变形的工件进行校正的校正设备等。在热处理车间常用的辅助设备由喷砂或喷丸机、机械滚筒、抛丸机、清洗机,各种酸洗槽、手动及机动校正机、起重运输设备等。

“热处理设备”是金属材料工程专业的一门专业课程,通过对这门课程的学习使学生掌握有关热处理设备的工作原理、设备的结构特点、应用领域等方面的知识。结合实习和本课程的课程设计等实践教学环节,掌握简单热处理设备的设计内容及设计方法,为今后从事热处理方面的技术工作打下坚实的基础。

第1章 传热理论

1.1 概 述

(1) 热处理炉的主要任务是加热金属工件,完成热处理工艺过程,使工件性能达到使用的技术要求,保证生产率,并且在热处理过程中具有低的散热损失、加热速度快、降低生产成本的能力。热处理炉对工件的加热是通过传热来实现的,而在热处理炉内的传热过程是很复杂的,因此有必要掌握传热的基本规律,对于炉子的设计及其操作是很重要的。

热量传递有三种基本形式,即传导、对流和辐射。在炉内实际进行的热交换过程也是由这三种基本形式组成的综合传热过程。

1.1.1 传热的三种基本形式

1. 传导传热

热量直接由物体的一部分传至另一部分,或由一个物体传向另一个与它直接接触的物体,而无需宏观的质点移动的传热现象,叫做传导传热。传导传热所进行的热量传递过程是通过物体内部做热运动的微观粒子在相互碰撞时进行动能传递来实现的,宏观上表现为热量从高温部分传至低温部分。工件在炉内加热时的均温以及炉墙散热等均属于传导传热过程。

传导传热在固体、液体和气体中都可进行,其中在液体和非金属固体中热量的传导依靠分子的振动,在气体中则依靠原子或分子的扩散,在金属中则主要依靠自由电子的运动。

2. 对流传热

当流体(气体和液体)中存在温度差时,流体的各部分之间发生相对位移,冷热流体相互掺混所引起的热量传递方式,称为对流。

对流仅能发生在流体中,在对流的同时必然伴随着导热。在传热过程中,既有流体质点的导热作用,又有流体质点位移产生的对流作用。因此在工程上常遇到的不是单纯的对流方式,而是对流和导热联合作用方式,为区别于对流,常称之为对流传热。因此,对流传热同时受导热规律和流体流动规律的支配。例如,炽热的炉气将热量传递给工件的表面,或工件在盐浴炉中被加热均属于对流传热。

3. 辐射传热

具有一定温度的任意物体都会通过电磁波向外传递能量,这种能量传递的方式称之为辐射。

当物体受热后会向各方向发出辐射能,当辐射能投射到另一物体上时将有一部分被吸收而转化为热能使其温度升高。这种热量传递的过程称为辐射传热。辐射传热与前两种传热方式有很大的不同,它不仅产生能量的转移,而且在热量交换时伴随着能量形式的转

化。热辐射不需任何介质,而传导和对流需要传热物体间的直接接触。例如,工件在高温炉中加热时,辐射传热就占有主要地位。

在实际生产中,上述三种传热方式并不是单独存在的,大多数传热过程是同时存在两种或三种传热方式的综合传热过程。

1.1.2 温度场和温度梯度

1. 温度场

传热过程与温度的分布密切相关,因此,研究传热必须了解物体的温度变化情况。正如重力场一样,在传热过程中,物体或传热体系内温度在空间和时间上的分布情况称之为温度场。在一般情况下,物体内某点的温度 t 是空间坐标和时间坐标的函数,即

$$t = f(x, y, z, \tau) \quad (1.1)$$

式中 x, y, z ——该点的空间坐标;

τ ——时间坐标。

这个函数称为温度场函数。如果物体各点温度不随时间变化,此时的温度场称为稳定态温度场。这时温度分布函数简化为

$$t = f(x, y, z) \quad (1.2)$$

这种传热过程叫做稳定态传热,如长时间保温状态下通过炉壁的传热。

如果物体各点的温度随时间的变化而变化,此时的温度场称为不稳定态温度场,这种传热过程叫做不稳定态传热,如升温状态下炉壁的传热。

2. 温度梯度

只要物体内部存在温度差或物体温度不同,传热过程就会存在。在物体内部或物体之间沿着等温面上任意点的法线方向上的温度变化率称为温度梯度。也就是物体内部相邻两等温面间的温度差 Δt 与两等温面法线方向上的距离 Δn 的比例极限。其表示式为

$$\text{grad}t = \lim_{\Delta n \rightarrow 0} \frac{\Delta t}{\Delta n} = \frac{\partial t}{\partial n} \quad (1.3)$$

温度梯度(单位为 $^{\circ}\text{C}/\text{m}$)是表示温度变化强度的一个向量,其数值等于和传热面相垂直的单位距离上温度的变化值,并规定由低温到高温为正,反之为负。对于稳定态温度场,各点的温度梯度不随时间而变化。

1.1.3 热流密度、热流和总热量

只要物体之间存在温度差,热量就会从高温物体传向低温物体,所传递的热量多少分别用热流密度、热流和总热量来表示。

热流密度(q)表示单位时间内通过单位面积所传递的热量,其单位为 W/m^2 。

热流(Q)表示单位时间内通过一定传热面积 A 所传递的热量,其单位为 W 。即

$$Q = qA \quad (1.4)$$

总热量($Q_{\text{总}}$)表示在 τ 时间内通过一定传热面积 A 所传递的总热量,其单位为 J 。即

$$Q_{\text{总}} = qA\tau \quad (1.5)$$

以上三个量都是向量,正负方向与温度梯度方向相反。

1.2 传导传热

1.2.1 傅里叶定律

1822 年法国科学家傅里叶在综合实验数据的基础上指出:在导热过程中,单位时间内通过单位面积截面所传导的热量(即热流密度),与该截面法线方向上的温度梯度成正比。这就是傅里叶定律。其数学表达式为

$$q = -\lambda \frac{dT}{dn} \quad (1.6)$$

式中 q ——热流密度, W/m^2 ;

λ ——热导率, $W/(m \cdot K)$;

$\frac{dT}{dn}$ ——温度梯度, K/m 。

1.2.2 热导率

热导率也叫做导热系数,它代表物体导热能力的大小。它的物理意义为:当截面的温度梯度为一个单位时,在单位时间内通过单位面积所传递的热流量,用 λ 表示,单位为 $W/(m \cdot K)$ 。

热导率的大小与材料的种类、物质结构、杂质含量、密度、气孔、温度和湿度等因素有关,而与几何形状无关。

绝大多数材料的热导率都随着温度的变化而变化,对于大多数金属材料的热导率均随温度的升高而减小;固体非金属材料的热导率低于金属材料的热导率,但对于大多数非金属材料来说,当温度升高时,热导率随之增加。对于相同的材料,其体积密度不同,热导率也有很大的差异,密度小的材料,热导率也小。保温材料属于多孔材料,由于其小孔内空气的热导率很小,阻碍热量的传递,从而使其具有较小的热导率。工程上常把 λ 小于 $0.25 W/(m \cdot K)$ 的材料称为保温材料。

温度对材料热导率的影响很大。材料的热导率与温度的变化一般近似呈线性关系,即

$$\lambda = \lambda_0 + bT \quad (1.7)$$

式中 λ —— $t^\circ C$ 时材料的热导率;

λ_0 —— $0^\circ C$ 时材料的热导率;

b ——材料的热导率温度系数,因材料而异。

在工程实践的计算中,为了简化计算,一般取物体算术平均温度下的热导率代表物体热导率的平均值 λ_m 。其计算公式为

$$\lambda_m = \lambda_0 + b \frac{T_1 + T_2}{2} = \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2} \quad (1.8)$$

1.2.3 平壁炉墙的导热

1. 单层平壁炉墙的导热

图 1.1 为一单层平壁炉墙,其壁厚为 s ,材料的热导率 λ 与温度的关系式已知,平壁内、外表面温度分别为 t_1 和 t_2 ($t_1 > t_2$),并保持恒定。若平壁面积很大,则可忽略端面导热的影响,误差不大于 1%。因而平壁温度只沿垂直于壁面 x 轴方向变化,所以它是单向稳定态导

热问题。为了求出通过这一平壁炉墙的热流密度,在平壁内取一厚度为 dx 的单元薄层,设其两侧的温度差为 dt ,根据导热基本定律,可求得通过这一单元薄层的热流密度 q 为

$$q = -\lambda \frac{dt}{dx} = -\lambda \frac{d(T-273)}{dx} = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad (1.9)$$

又

$$\lambda = \lambda_0 + bT \quad (1.10)$$

将式(1.10)代入式(1.9),进行分离变量积分后得

$$q = \frac{T_1 - T_2}{\frac{s}{\lambda_m}} \quad (1.11)$$

若平壁炉墙的面积为 A ,而且内外表面积相等,则在单位时间内通过 A 面积所传导的热量

$$Q = qA = \frac{T_1 - T_2}{\frac{s}{\lambda_m A}} \quad (1.12)$$

在式(1.11)和式(1.12)中, $\frac{s}{\lambda}$ 为单位面积的平壁热阻; $\frac{s}{\lambda A}$ 是面积为 A 的平壁热阻。由此可见,热流量与温度 $(T_1 - T_2)$ 成正比,与热阻 $\frac{s}{\lambda A}$ 成反比。

但实际的平壁炉墙如箱式炉的炉墙,表面积并不是很大,而且内外表面积也不相等,所以其导热面积是变化的。这时式(1.12)中的导热面积应该用平均面积代替。一般按式(1.13)近似计算。

当 $\frac{A_{\text{外}}}{A_{\text{内}}} \leq 2$ 时,用算术平均面积,即

$$A_m \approx \frac{A_{\text{外}} + A_{\text{内}}}{2} \quad (1.13)$$

当 $\frac{A_{\text{外}}}{A_{\text{内}}} > 2$ 时,用几何平均面积,即

$$A_m \approx \sqrt{A_{\text{内}} A_{\text{外}}} \quad (1.14)$$

式中 $A_{\text{内}}, A_{\text{外}}$ ——单层平壁炉墙的内外表面积, m^2 。

2. 多层平壁炉墙的导热

一般热处理炉的炉墙,大多数为两层或三层的多层炉墙。现有一个三层的平壁炉墙,各层炉墙的材料已知,炉墙内外表面温度分别为 t_1, t_4 ($t_1 > t_4$),并保持恒定不变;各层炉墙的厚度分别为 s_1, s_2, s_3 。假定各层之间紧密接触,各层的平均热导率分别用 $\lambda_{m1}, \lambda_{m2}, \lambda_{m3}$ 表示。试计算通过三层平壁炉墙的热流密度及各层的交界面温度 t_2 和 t_3 。

在稳定态导热时,通过各层炉墙的热流是相等的,如果不等,则各层炉墙内任意一点的温度都是不恒定的,要随时间发生变化。

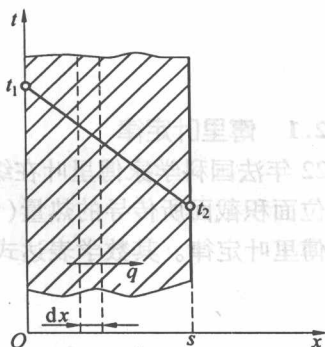


图 1.1 单层平壁炉墙的导热

根据单层平壁炉墙导热公式可知

$$\text{第一层} \quad q = \frac{\lambda_{m1}}{s_1}(T_1 - T_2) \quad (1)$$

$$\text{第二层} \quad q = \frac{\lambda_{m2}}{s_2}(T_2 - T_3) \quad (2)$$

$$\text{第三层} \quad q = \frac{\lambda_{m3}}{s_3}(T_3 - T_4) \quad (3)$$

由上述三个方程,可以求出三个未知量 q, T_2, T_3 (其中 T 为开氏温度),进而求得 t_2, t_3 (t 为摄氏温度)的计算值。由于 λ 是温度的函数,所以上述三个方程式组成一个三元二次方程组,一般用迭代法计算较为简单。由式(1)~(3)可得到热流密度 q 的计算表达式

$$q = \frac{T_1 - T_4}{\frac{s_1}{\lambda_{m1}} + \frac{s_2}{\lambda_{m2}} + \frac{s_3}{\lambda_{m3}}} \quad (1.15)$$

未知界面温度的计算可通过将式(1.15)代入式(1)~式(3)计算求得

$$T_2 = T_1 - q \frac{s_1}{\lambda_{m1}} \quad (1.16)$$

$$T_3 = T_2 - q \frac{s_2}{\lambda_{m2}} \quad (1.17)$$

或

$$T_3 = T_4 + q \frac{s_3}{\lambda_{m3}} \quad (1.18)$$

迭代法的计算过程:首先假设未知界面的温度 t_2, t_3 为某一具体值,然后先计算出各层炉墙平均热导率的第一次近似值,再由式(1.15)计算求得通过炉墙的热流密度,再将热流密度值代入式(1)~(3)中计算求得各未知界面温度的第一次计算值,如果各界面的第一次计算值与假设值之间的误差率大于5%,则再将各界面温度的第一次计算值作为假设值,重复上述计算过程,直到各界面温度前后两次计算值的误差率小于5%时为止。

同理,可推导出 n 层面积不同平壁炉墙的导热公式为

$$Q = \frac{T_1 - T_{n+1}}{\sum_{i=1}^n \frac{s_i}{\lambda_{mi} A_{mi}}} \quad (1.19)$$

界面温度为

$$T_n = T_1 - Q \sum_{i=1}^{n-1} \frac{s_i}{\lambda_{mi} A_{mi}} \quad (1.20)$$

式中 A_{mi} ——各层炉墙的平均面积。

平均面积的具体值按式(1.13)、式(1.14)近似计算求得。

1.2.4 圆筒壁炉墙的导热

1. 单层圆筒壁炉墙导热

由于圆筒壁炉墙的传热面积沿半径方向变化,半径不同的地方其热流密度也不相同。这时平壁炉墙的导热计算公式就不适合于圆筒壁炉墙。

设单层圆筒壁炉墙的内外半径分别为 r_1, r_2 , 高度为 $L (L \gg r_2)$, 这时可以忽略炉墙端头导热的影响, 此时单层圆筒壁炉墙导热是沿半径方向的单向导热问题, 内外表面温度分别为 t_1 和 t_2 , 且 $t_1 > t_2$ (图 1.2), 炉墙温度保持恒定不变。炉墙材料的热导率 λ 的关系式为已知。在圆筒壁炉墙半径为 r 处, 根据傅里叶定律, 在单位时间内通过此单层圆筒壁炉墙传导的热流量为

$$(1.20) \quad Q = -\lambda \frac{dT}{dr} A = -\lambda \frac{dT}{dr} 2\pi r L \quad (1.21)$$

$$Q = -(\lambda_0 + bT) \frac{dT}{dr} A = -(\lambda_0 + bT) \frac{dT}{dr} 2\pi r L$$

因为 Q, L, λ 为常数 (不随 r 变化), 分离变量后积分

$$(1.21) \quad \int_{t_1}^{t_2} (\lambda_0 + bT) dT = -\frac{Q}{2\pi L} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r}$$

积分后得

$$(1.21) \quad Q = \frac{2\pi L (T_1 - T_2)}{\frac{1}{\lambda_m} \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (1.22)$$

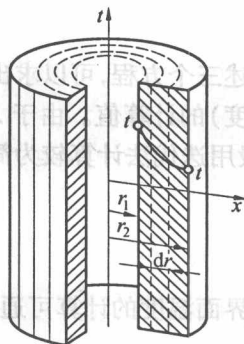


图 1.2 单层圆筒壁炉墙的导热

为了便于与传热一般方程和平壁炉墙的导热公式进行比较, 式 (1.22) 可改写为

$$(1.21) \quad Q = \frac{T_1 - T_2}{\frac{s}{\lambda_m A_m}} \quad (1.23)$$

式中, $A_m = (A_2 - A_1) / \ln \frac{A_2}{A_1}$, 是圆筒壁炉墙的对数平均面积, 其中 A_1 和 A_2 分别为内、外表面积, s 为单层圆筒炉墙的厚度。

2. 多层圆筒壁炉墙的导热

对于井式炉一般都采用两层或三层圆筒壁炉墙。假设有一台由 n 层炉墙组成的多层圆筒壁炉墙, 若已知其内、外表面的温度分别为 t_1 和 t_{n+1} ($t_1 > t_{n+1}$), 并保持恒定。各层的内、外半径以及各层的材料和圆筒壁炉墙的高度 L 也已知, 并假定各层间紧密接触。求通过此多层圆筒壁炉墙的导热热流及各界面温度。根据单层圆筒壁炉墙的计算公式及迭代法可求出通过多层圆筒壁炉墙的导热热流量, 即

$$(1.21) \quad Q = \frac{2\pi L (T_1 - T_{n+1})}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_{mi}} \ln \frac{r_{i+1}}{r_i}} \quad (1.24)$$

如果圆筒壁炉墙各层的内、外高度不等, 则热流量用式 (1.25) 计算

$$(1.21) \quad Q = \frac{T_1 - T_{n+1}}{\sum_{i=1}^n \frac{s_i}{\lambda_{mi} A_{mi}}} \quad (1.25)$$

式中 $s_i / (\lambda_{mi} A_{mi})$ ——第 i 层圆筒壁炉墙的热阻, 其计算方法与单层圆筒壁炉墙相同。

同 各层的界面温度按式 (1.20) 计算, 但这时公式中各层的热阻为圆筒壁炉墙各层的热阻。其迭代方法和要求与多层平壁炉墙相同。

1.3 对流传热

对流传热不仅在流体中发生,在流体与固体表面相接触时也会产生对流传热。例如,在热处理炉内,炉气、盐浴炉中的盐浴或流动粒子炉中流动粒子与工件表面和炉子内表面之间的传热,以及炉墙外表面与车间空气之间的传热等均属于对流传热。在热处理工艺操作过程中,淬火工件在淬火时与淬火介质之间的传热也属于对流传热。

1.3.1 对流传热量的计算

1701年,英国科学家牛顿提出了对流传热量的计算公式(即牛顿公式),即对流传热所传递的热量正比于流体和固体表面间的温度差以及两者的接触面积。其数学表达式为

$$Q = \alpha(T_1 - T_2)A \quad (1.26)$$

或

$$q = \alpha(T_1 - T_2) \quad (1.27)$$

式中 Q ——单位时间内对流传热量,即热流量, W ;

q ——单位时间内,在单位传热面积上的对流传热量,即热流密度, W/m^2 ;

$T_1 - T_2$ ——流体与固体表面的温度差, K ;

A ——流体与固体的接触面积, m^2 ;

α ——对流传热系数,表示当流体与固体表面之间的温度差为 $1 K$ 时,每秒钟通过 $1 m^2$ 面积所传递的热量, $W/(m^2 \cdot K)$ 。

牛顿公式在形式上似乎很简单,但它并没有提供任何实质性的简化,只是将影响对流传热的各因素都集中在对流传热系数上。因此,对流传热量的计算关键是要求出各种具体条件下的对流传热系数 α 的计算公式。

1.3.2 影响对流传热的因素

计算对流传热量的关键在于确定不同对流条件下的对流传热系数的大小,而对流传热系数的大小与流体流动产生的原因,流体的流动状态,流体的物理性质,流体与固体接触表面的几何形状、大小、放置位置、粗糙程度以及固体表面与流体的温度等因素有关。下面对其进行简单分析。

1. 流体流动产生的原因

按引起流体流动的不同原因,流体流动可分为自然流动和强制流动(或强迫流动)。自然流动是由于流体内部不同部位的温度不同,从而使各部位密度不同而引起的流动。在自然流动下进行的对流传热称为自然对流传热,其传热强度主要取决于流体内部的温度差。由于自然对流时流体的流动速度一般都很小,所以自然对流传热强度比较低。

而流体受外力(如风机或泵等)作用时产生的流动称为强制流动。在强制流动下所进行的对流传热称为强制对流传热。

2. 流体的流动状态

按流体流动的状态不同可将其分为层流和紊流(或湍流)两种(图 1.3)。当流体流动的状态是层流时,流体内部的各个质点都平行于固体表面而流动,没有垂直于壁面的分速度,这时流体与固体表面之间的热量传递主要靠层流的导热来实现,热流方向垂直于流体

的流动方向。由于气体与液体的导热性都很差,所以在层流状态时对流传热强度很小,并且换热量主要取决于流体的性质,而与流速无关。

紊流流动时流体质点不仅沿前进方向流动,而且还向其他方向做不规则的曲线运动(图 1.3(b)),这时,流体内部各质点产生急剧混合但流体在宏观上还是向前流动着的。流体在管道中成紊流流动时,只有在紧靠近壁面的薄层中仍然是层流流动,称为层流底层。在此层中热量的传递是靠传导传热来实现的。此层流底层以外的部分是紊流核心。在紊流核心内热量传递主要靠流体质点的急剧混合作用来实现,所以它是传导传热和流体质点混合作用共同作用的结果。但传热的快慢主要受层流底层的控制。由于层流底层很薄,故紊流时的对流传热系数比层流时要大得多。

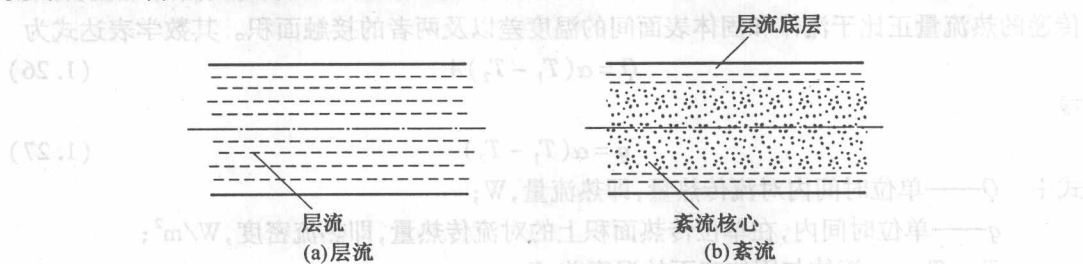


图 1.3 流体的流动状态

3. 流体的物理性质

流体的物理性质不同,其对流传热过程也不相同。直接影响对流传热的流体物理参数主要是导热系数、比热容、密度和黏度。其中导热系数影响边界层的导热,比热容影响热交换量,黏度影响边界层厚度(黏度越大边界层越厚),密度大有利于减少边界层厚度。所以密度大,对流传热系数大,黏度大,对流传热系数小。另外,流体的密度和黏度还会影响流体的流动状态。

4. 固体的表面形状、大小和放置位置

固体表面的形状、大小不同或放置位置的改变,都会使流体的流动情况发生变化,从而改变对流传热条件。例如,炉底、炉顶和侧墙,由于它们的位置不同,其自然对流的传热系数 α 值是不同的。当固体表面垂直放置时(图 1.4(a)),沿固体表面即炉墙高度的对流传热系数 α 值是不同的。在炉墙下部由于气流边界层刚刚形成,并且很薄,所以此处的对流传热系数 α 值较大。沿着炉墙往上边界层逐渐加厚, α 值也随着减少。当边界层厚度达到最大值后,空气的流动性质发生了变化,由层流转变为紊流, α 值也开始增加。最后流动性质变为紊流时, α 值保持不变。水平放置的固体表面(如炉顶)与空气自然对流传热时,固体表面附近的气体被加热后上升,上升的气体与补充的冷气相遇,它们相互作用形成一个上升的气流(图 1.4(b)),此时的对流传热系数 α 值显然比垂直炉墙与空气自然对流时大。若水平放置的平壁,其传热面向下(如炉底)时,除了在固体表面上有一薄层气体流动外,其他部分的气体基本保持静止不动(图 1.4(c)),此时 α 值显然是比较小的,从而使其散热损失也是最小的。

1.3.3 强化热处理炉内对流传热的措施

(1) 适当提高热处理加热温度,加大传热温差,可以增加对流传热量,缩短加热时间。

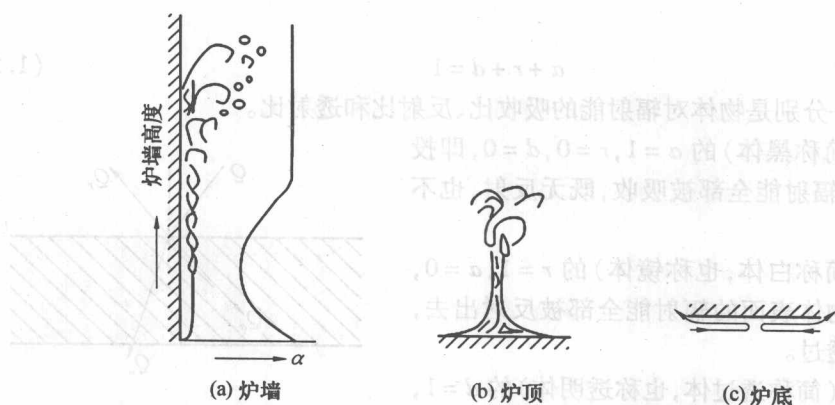


图 1.4 炉墙的自然对流散热

但是由于受热处理工艺限制,温度不能提高太大,否则容易造成废品。

(2) 提高流体的流动速度,使其处于强制流动状态,增大对流传热系数,从而增大其换热量。

1.4 辐射传热

1.4.1 辐射传热的基本概念

物体通过电磁波传递能量的方式称为辐射。当物体受热后引起物体内部的分子、原子或离子振动或电子激发时向周围各个方向发射辐射能并以电磁波的形式向外放射,当它落到其他物体上时,有一部分被吸收并转变为热能而使物体加热。辐射传热与传导和对流传热有本质的不同。传导和对流传热必须通过中间介质才能进行。而辐射传热不需要任何中间介质,而且在热量交换的同时,还伴随着能量形式的转化。

电磁波是辐射能的载体,并且电磁波的波长从 $1\ \mu\text{m}$ 到若干米,它包括可见光、紫外线、X 射线、红外线和无线电波等。波长不同的电磁波具有不同的性质,并且各种电磁波都能被物体吸收并转化为热能,这种因为热的原因而发出辐射能的现象称为热辐射。

热辐射的强度主要取决于温度,在自然界中存在的物体,不论是高温物体还是低温物体都会发出辐射能,只是物体温度不同其辐射热量不同。如果两物体温度不同并与外界隔绝,这样高温物体由于辐射出的热量大于低温物体辐射出的热量,而低温物体吸收的热量大于高温物体吸收的热量,从而使高温物体的温度降低,低温物体的温度升高,最后两物体达到相同的温度。即使两物体的温度相同,热辐射也仍在进行,只不过处于相对平衡状态而已。

投射到物体表面上的热辐射和可见光一样,也有吸收、反射和透过现象。

设落到物体表面上的总辐射能为 Q , 其中一部分 Q_a 被吸收, 一部分 Q_r 被反射, 另一部分 Q_d 透过该物体(图 1.5), 按能量平衡关系, 则有

$$Q_a + Q_r + Q_d = Q$$

或

$$\frac{Q_a}{Q} + \frac{Q_r}{Q} + \frac{Q_d}{Q} = 1$$