

金属热处理技术 现状②趋势研究

JINSHU RECHULI JISHU XIANZHUANG JI QUSHI YANJIU

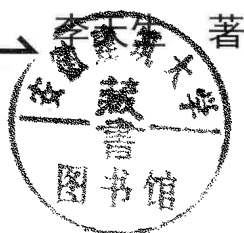
李天生 著

 电子科技大学出版社
University of Electronic Science and Technology of China Press

金属热处理技术

现状及趋势研究

JINSHU RECHULI JISHU XIANZHUANG JI QUSHI YANJIU



图书在版编目(CIP)数据

金属热处理技术现状及趋势研究 / 李天生著. -- 成都: 电子科技大学出版社, 2018.3
ISBN 978-7-5647-6553-8

I. ①金… II. ①李… III. ①热处理-研究 IV.
①TG15

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第175031号

金属热处理技术现状及趋势研究

李天生 著

策划编辑 李述娜

责任编辑 谭炜麟

出版发行 电子科技大学出版社

成都市一环路东一段159号电子信息产业大厦九楼 邮编 610051

主 页 www.uestcp.com.cn

服务电话 028-83203399

邮购电话 028-83201495

印 刷 定州启航印刷有限公司

成品尺寸 170mm × 240mm

印 张 15

字 数 330千字

版 次 2018年8月第一版

印 次 2018年8月第一次印刷

书 号 ISBN 978-7-5647-6553-8

定 价 60.00元

版权所有，侵权必究



李天生，男，博士，副教授，湖南省青年骨干教师，1999年毕业于西南工学院（现西南科技大学），2014年获北京科技大学工学博士学位；主要从事金属材料热处理及强韧化机理和机械设计方面的教学与科研工作。

主持湖南省教育厅科学研究项目2项，主持衡阳市科技计划项目1项，主要参与国家自然科学基金面上项目和国家自然科学基金青年项目各1项，获全国大学生机械创新设计大赛二等奖1项，已获授权实用新型专利7项。先后在JOURNAL OF IRON AND STEEL RESEARCH (INTERNATIONAL)、材料热处理学报、金属热处理等知名学术刊物上发表相关论文15篇，其中SCI、EI收录5篇。



金属热处理是机械制造中的重要工艺之一，与其他加工工艺相比，热处理一般不改变工件的形状和整体的化学成分，而是通过改变工件内部的显微组织，或改变工件表面的化学成分，赋予或改善工件的使用性能。其特点是改善工件的内在质量，而这一般不是肉眼所能看到的。所以，它是机械制造中的特殊工艺过程，也是质量管理的重要环节。

为使金属工件具有所需要的力学性能、物理性能和化学性能，除合理选用材料和各种成形工艺外，热处理工艺往往是必不可少的。钢铁是机械工业中应用最广的材料，钢铁显微组织复杂，可以通过热处理予以控制，所以钢铁的热处理是金属热处理的主要内容。另外，铝、铜、镁、钛等及其合金也都可以通过热处理改变其力学、物理和化学性能，以获得不同的使用性能。

20 世纪以来，金属物理的发展和其他新技术的移植应用，使金属热处理工艺得到更大发展。一个显著的进展是 1901—1925 年，在工业生产中应用转筒炉进行气体渗碳；20 世纪 30 年代出现露点电位差计，使炉内气氛的碳势达到可控，以后又研究出用二氧化碳红外仪、氧探头等进一步控制炉内气氛碳势的方法；60 年代，热处理技术运用了等离子场的作用，发展了离子渗氮、渗碳工艺；激光、电子束技术的应用，又使金属获得了新的表面热处理和化学热处理方法。近年来，随着新技术的不断涌现，以及新加热源、新加热方式的不断出现，使金属热处理技术朝着节能、高效的方向发展。

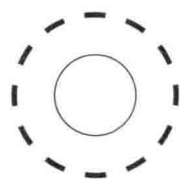
笔者在参考看大量相关文献的基础上，结合自身经验完成了本著

作。全书共 8 章，分别对金属热处理技术的发展、热处理设备、热处理准备工作、热处理相关技术、热处理缺陷分析及防治，热处理炉的炉温控制及设计以及热处理节能技术进行了较为全面的分析。希望能够为热处理技术的发展贡献绵薄之力，为相关技术人员提供借鉴。

由于时间仓促，笔者能力有限，书中难免存在不足之处，还望广大读者批评指正。

李天生

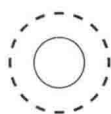
2018 年 7 月



目 录

第一章	绪论	/	001
第一节	金属热处理技术的发展历程	/	001
第二节	金属热处理工艺简介	/	004
第三节	金属加热的物理过程及其影响因素	/	008
第四节	加热介质对金属加热的影响	/	016
第二章	金属热处理的工艺准备	/	025
第一节	热处理工艺文件的编制	/	025
第二节	热处理生产管理规范	/	034
第三章	常见的金属热处理设备和装置	/	058
第一节	热处理加热设备和装置	/	059
第二节	冷却及辅助设备	/	079
第三节	控制气氛制备设备	/	084
第四节	常用的热处理工装	/	087
第四章	常用的金属热处理技术	/	090
第一节	退火与正火简介	/	090
第二节	淬火与回火简介	/	095
第三节	表面淬火与化学热处理简介	/	101
第五章	金属热处理缺陷分析	/	111
第一节	金属热处理缺陷分类及分析方法	/	111
第二节	常见的金属热处理缺陷分析	/	118

第三节	热处理缺陷预防与全面质量控制	/	150
第六章	基于模糊控制理论的热处理炉温控制系统研究	/	190
第一节	国内外发展概述	/	191
第二节	模糊控制理论分析	/	194
第三节	基于加热炉的模糊控制器设计	/	198
第七章	热处理电阻炉控制系统整体设计与实现	/	210
第一节	热处理电阻炉的发展现状	/	210
第二节	自抗扰控制算法简介	/	213
第三节	热处理电阻炉控制系统平台的搭建	/	216
第八章	金属热处理技术的发展与展望	/	224
第一节	金属材料热处理技术的发展趋势	/	224
第二节	金属材料热处理节能技术研究	/	229
参考文献		/	234



第一章 绪 论

金属热处理工艺学是金属材料及热处理专业的一门必修课。其任务是通过学习来掌握各种基本的热处理工艺原理及热处理工艺对金属合金组织与性能的影响规律，熟悉主要的热处理工艺，了解我国发展热处理技术的方向、任务和当代热处理工艺科学的最新成就，为分析、制定热处理工艺和探索发展新的工艺打下基础。金属热处理工艺学是从一般相变原理到解决具体热处理工艺技术之间的桥梁。下面对金属热处理技术的发展历程，金属加热的物理过程及其影响因素以及加热介质对金属加热的影响进行介绍。

第一节 金属热处理技术的发展历程

金属热处理是将金属工件放在一定的介质中加热到适宜的温度，并在此温度中保持一定的时间后，又以不同速度冷的一种工艺。

金属热处理是机械制造中的重要工艺之一，与其他加工工艺相比，热处理一般不改变工件形状和整体的化学成分，而是通过改变工件内部的显微组织，或改变工件表面的化学成分，赋予或改善工件的使用性能，其特点是改善工件的内在质量，而这一一般不是肉眼所能看到的。

为使金属工件具有所需要的力学性能、物理性能和化学性能，除合理选用材料和各种成形工艺外，热处理工艺往往是必不可少的。钢铁是机械工业中应用最广的材料，钢铁显微组织复杂，可以通过热处理予以控制，所以钢铁的热处理是金属热处理的主要内容，另外，铝、铜、镁、钛等及其合金也都可以通过热处理改变其力学性质、物理和性质化学性能，以获得不同的使用性能。

金属热处理工艺学和其他自然科学相同，是随着生产力的发展而发展的，同时和其他科学技术的发展紧密相关。热处理工艺是古代冶金技术发展的结果，是作为冶金

技术的一部分,逐渐发展而形成一门学科的。

在我国历史上,热处理工艺出现于铁器时代。当铸铁一出现,就出现了如何提高其韧性的问题。铸铁的柔化处理就是根据这一要求最早出现的热处理工艺,它包括石墨化退火及脱碳退火。这种处理方法出现于春秋时期(前 770—前 470 年),至西汉已发展比较成熟。例如 1974 年在洛阳出土的战国早期的几件铁器,经分析,发现其中一件铁簪、一件铁铲都是生铁铸成的,其表面脱碳,稍向内为相当于黑心可锻铸铁的组织。

我国古代的炼钢是采用铸铁脱碳退火及反复锻打方法进行的,即所谓“百炼成钢”。随着炼钢技术的发展,热处理技术也得到发展。1974 年河北省易县燕下都出土了一批战国中、晚期钢铁兵器,据分析,其中的两把剑和一把戟都经过淬火处理,金相组织中有马氏体存在,这说明在战国中、晚期,我国已发明了淬火技术,在这些兵器中也发现曾进行过正火处理及淬火钢的回火处理。至西汉,我国的热处理技术已发展到相当水平,不仅能进行一般热处理,而且还能进行局部热处理。当时,化学热处理主要是渗碳和碳氮共渗两个方面,例如出土的西汉中期刘胜(中山靖王)的佩剑和错金书刀内层碳的质量分数最低处为 0.05%,而表面碳的质量分数却高达 0.6% 以上,有一定的碳浓度梯度,说明那时已有渗碳技术。

从汉代开始,我国的热处理技术已有文字记载,内容包括一般淬火技术、淬火介质及渗碳工艺等,几乎涉及热处理技术的各个方面。例如《史记·天官书》中载有:“火与水合为淬”,《汉书·王褒传》中载有:“巧冶铸干将之璞,清水淬其锋”,其中“淬”“淬”同义,均为淬火的意思。在《晋书》中所载“大夏龙雀”是被称为“名冠神都”和“威服九区”的利器,与西汉中期的刀剑相比,其组织均匀,含碳适中(均为 0.6% ~ 0.7%),经淬火,刀口锋利,表面经氧化处理,抗腐蚀性能良好。在淬火介质方面,三国(222 ~ 265)的蒲元和南北朝的綦母怀文都做出了较大贡献。据《蒲元别传》所载,蒲元在今陕西眉县一带的斜谷为诸葛亮制剑三千把,他说“汉中的水钝弱,不任淬;蜀水爽烈”,于是派人到成都取水,淬之果然锋利。削装铁珠的竹筒“应手虚落,若雉生雏,称绝当世,因曰神刀”。《北史·艺术烈传》中记载了綦母怀文用牲畜之尿或脂(油)作淬火介质的史实;在《新唐书》卷 222 中谈到了用马血淬火;元朝《格致粗谈》中记有用地洩(可能是石油)淬火;清朝《续广博物志》第八卷谈到用一种硝黄、盐卤、人尿合成淬剂,这些都说明我国在使用淬火介质方面已经积累了丰富的经验。在化学热处理方面也有记载。明代宋应星在《天工开物》卷十中谈到一种制针的渗碳工艺,渗碳在釜中进行,有消除应力过程,采用“松木”“火矢”“豆豉”作渗碳剂,用试验针指示渗碳程度等,记载相当详细,已是成熟的工艺。明《便民图纂》卷十五制造类,清陈克怒《篆刻针度》卷七“炼刀法”等分别介绍了几种膏

剂渗碳法。此外还使用一些含氮渗剂，实际上是进行了碳氮共渗。

从上面出土文物的考证及一些文字的记载可以清楚地看出，我国热处理工艺历史悠久，其技艺曾发展到非常高超的程度，这是当时其他国家所不及的，作为中国的热处理工作者应当引以为荣。但是长期的封建统治，阻碍着我国科学技术的发展，也阻碍着热处理技术的发展，在以后相当长的一段时间内，我国的热处理技术的发展处于停滞状态，有的技术甚至失传。直到 20 世纪 50 年代，由于社会主义制度解放了生产力，热处理技术在我国才又重新迅速发展起来。今天热处理技术已遍及各个生产部门，形成了一支庞大的专业队伍，并有相应的各级学术研究团体，每年均有热处理专业的研究生、大学生和中专毕业生参加工作。广大的热处理工作者正为祖国的现代化做出重大贡献。

在国外，历史上出现热处理技术较我国晚；但是在产业革命以后，资本主义发展时期，热处理技术却得到迅速发展，特别是光学显微镜的出现，使借助显微镜来观察钢和铸铁的组织成为可能。例如 19 世纪中期，英国的索拜（H.C.Sorby）和德国的马登斯（A.Martens）等采用抛光、腐蚀等方法，并用光学显微镜成功地显示钢的显微组织，大大推动了热处理技术的发展。与此同时，俄国的切尔诺夫（Д.К.Чернов）发现了钢的组织影响它本身的性质，并发现了钢在加热和冷却过程中存在着组织变化的临界点，为钢的热处理技术奠定了理论基础。不久，英国的奥斯汀（O.Robert Austen）和法国的奥斯摩特（F.Osmord）应用相律建立了 Fe-C 平衡图，使得钢的热处理有了依据。1930 年贝茵（E.C.Bain）研究了过冷奥氏体的等温变化，建立了钢的过冷奥氏体等温转变曲线，创立了等温淬火工艺，为以后制订各种热处理工艺提供了科学依据。至此，热处理才真正形成了一门较完整的科学。

此后随着其他科学技术的发展，热处理技术也得到迅速的发展。从热处理技术的发展过程中我们看到有如下特点：

（1）实验手段和技术的不断完善，对金属中的组织转变规律及组织与性能之间的关系得以不断加深了解，从而发展了不少新的热处理工艺。例如，电子显微技术的发展，使我们不仅可以看到一般组织，而且可以看到组织内部微细结构，如马氏体内的亚结构等；从而了解到更细微的问题，发展了新的热处理工艺，如板条马氏体的应用、高温淬火、复相热处理等。

（2）由于在基础理论方面不断取得成就，才能从本质上来认识金属组织与性能之间的关系，从而能动地发展热处理工艺。例如断裂物理和位错理论的成就，对发展金属的强韧化热处理工艺起着指导作用。而位错理论目前不仅是强度理论的基础，也是相变理论的基础。

（3）工业机械化、自动化的成就及表面化学的研究，发展了各种表面防护热处理及

金属热处理技术现状及趋势研究

表面强化热处理。例如保护气氛热处理、真空热处理及渗碳、渗氮等可控化学热处理。

4. 电子计算机、自动控制技术的发展,以及热处理工艺过程的数学模式和数值模拟的研究,使热处理工艺过程得以用计算机自适应控制和智能控制。

5. 其他新能源、新技术的开发,使热处理工艺发展成为许多复合的工艺。如高频及超高频热处理、激光束热处理、电子束热处理、形变热处理、等离子体基化学热处理等。

到目前为止,我们可以把热处理工艺分成如下 4 大类。

1. 普通热处理。即退火、正火、淬火和回火,以及固溶处理和时效处理等。这类热处理根据其处理过程中是否采取防护及所采取的防护方法,又分为无保护热处理、保护气氛热处理及真空热处理等。

2. 化学热处理。目前根据钢在处理过程中所具有的组织状态而分为奥氏体化学热处理及铁素体化学热处理。

3. 表面热处理。指仅在工件表面一定深度范围内进行热处理的一类处理工艺,如各种表面淬火方法。

4. 复合热处理。

当前金属及合金热处理发展的总趋势如下:在金属及合金的总产量中,经热处理的部分所占比例不断增加;成品、半成品零件热处理比率进一步增加;降低热处理能耗及热处理成本;减少排污,发展绿色热处理;发展数字化的热处理智能技术。

为了适应新世纪科学技术和工业发展的需要,热处理技术水平也需相应提升。因此美国能源部提出的有关热处理工业 2020 年远景报告中提出了以下目标:(1) 保证热处理质量、热处理质量分散度为零;(2) 热处理畸变率为零;(3) 热处理能源利用率达到 80%;(4) 热处理对环境的影响为零;(5) 工艺时间减少 50%,成本降低 75%。为了达到这些目标,对热处理生产过程实现全面精确控制,并广泛采用热处理计算机模拟技术。

第二节 金属热处理工艺简介

一、金属热处理工艺过程

热处理的工艺一般包括加热、保温、冷却三个过程,有时只有加热和冷却两个过程。这些过程互相衔接,不可间断。加热是热处理的重要工序之一。金属热处理的加热方法很多,早是采用木炭和煤作为热源,进而应用液体和气体燃料。电的应用使加

热易于控制,且无环境污染。利用这些热源可以直接加热,也可以通过熔融的盐或金属,以至浮动粒子进行间接加热。

金属加热时,工件暴露在空气中,常常发生氧化、脱碳(即钢铁零件表面碳含量降低),这对于热处理后零件的表面性能有很不利的影响。因而金属通常应要可控气氛或保护气氛中、熔融盐中和真空中加热,也可用涂料或装方法进行保护加热。

加热温度是热处理工艺的重要工艺参数之一,选择和控制加热温度,是保证热处理质量的问题。加热温度随被处理的金属材料 and 热处理的目的不同而异,但一般都是加热到相变温度以上,以获得高温组织。另外转变需要一定的时间,因此当金属工件表面达到要求的加热温度时,还须在此温度保持一定时间,使内外温度一致,使显微组织转变完全,这段时间称为保温时间。采用高能密度加热和表面热处理时,加热速度极快,一般就没有保温时间,而化学热处理的保温时间往往较长。

冷却也是热处理工艺过程中不可缺少的步骤,冷却方法因工艺不同而同,主要是控制冷却速度。一般退火的冷却速度较慢,正火的冷却速度较快,淬火的冷却速度更快。但还因钢种不同而有不同的要求,例如空硬钢就可以用正火一样的冷却速度进行淬硬。

二、金属热处理工艺分类

金属热处理工艺大体可分为整体热处理、表面热处理和化学热处理 3 大类。根据加热介质、加热温度和冷却方法的不同,每一大类又可区分为若干不同的热处理工艺。同一种金属采用不同的热处理工艺,可获得不同的组织,从而具有不同性能。钢铁是工业上应用最广金属,而且钢铁显微组织也最为复杂,因此钢铁热处理工艺种类繁多。

(一) 整体热处理

整体热处理是对工件整体加热,然后以适当的速度冷却,以改变其整体力学性能的金属热处理工艺。钢铁整体热处理大致有退火、正火、淬火和回火四种基本工艺。

退火是将工件加热到适当温度,根据材料和工件尺寸采用不同的保温时间,然后进行缓慢冷却,目的是使金属内部组织达到或接近平衡状态,获得更好的工艺性能和使用性能,或者为进一步淬火作组织准备。正火是将工件加热到适宜的温度后在空气中冷却,正火的效果同退火相似,只是得到的组织更细,常用于改善材料的切削性能,也有时用于对一些要求不高的零件作为最终热处理。

淬火是将工件加热保温后,在水、油或其他无机盐、有机水溶液等淬冷介质中快速冷却。淬火后钢件变硬,但同时变脆。为了降低钢件的脆性,将淬火后钢件在高于室温而低于 650°C 的某一适当温度进行长时间的保温,再进行冷却,这种工艺称为回火。

退火、正火、淬火、回火是整体热处理中的“四把火”,其中的淬火与回火关系密切,常常配合使用,缺一不可。

金属热处理技术现状及趋势研究

“四把火”随着加热温度和冷却方式的不同，又演变出不同的热处理工艺。为了获最一定的强度和韧性，把淬火和高温回火结合起来的工艺，称为调质。某些合金淬火形成过饱和固溶体后，将其置于室温或稍高的适当温度下保持较长时间，以提高合金的硬度、强度或电性磁性等。这样的热处理工艺称为时效处理。

把压力加工形变与热处理效而紧密地结合起来进行，使工件获得很好的强度、韧性配合的方法称为形变热处理；在负压气氛或真空中进行的热处理称为真空热处理，它不仅能使工件不氧化，不脱碳，保持处理后工件表面光洁，提高工件的性能，还可能通入渗剂进行化学热处理。

（二）表面热处理

表面热处理是只加热工件表层，以改变其表层力学性能的金属热处理工艺。为了只加热工件表层而不使过多的热量传入工件内部，使用的热源须具有高的能量密度，即在单位面积的工件上给予较大的热能，使工件表层或局部能短时或瞬时达到高温。表面热处理的主要方法有火焰淬火和感应加热热处理，常用的热源有氧乙炔或氧丙烷等火焰、感应电流、激光和电子束等。

（三）化学热处理

化学热处理是通过改变工件表层化学成分、组织和性能的金属热处理工艺。化学热处理与表面热处理不同之处是前者改变了工件表层的化学成分。化学热处理是将工件放在含碳、盐类介质或其他合金元素的介质（气体、液体、固体）中加热，保温较长时间，从而使工件表层渗入碳、氮、硼和铬等元素。渗入元素后，有时还要进行其他热处理工艺如淬火及回火。化学热处理的主要方法有渗碳、渗氮、渗金属。

三、金属热处理的作用

热处理是机械零件和工模具制造过程中的重要工序之一。一般来说，它可以保证和提高工件的各种性能，如耐磨、耐腐蚀等。还可以改善毛坯的组织和应力状态，以利于进行各种冷、热加工。例如白口铸铁经过长时间退火处理可以获得可锻铸铁，提高塑性；齿轮采用正确的热处理工艺，使用寿命可以比不经热处理的齿轮成倍或几十倍地提高；另外，价廉的碳钢通过渗入某些合金元素就具有某些价昂的合金钢性能，可以代替某些耐热钢、不锈钢；工模具则几乎全部需要经过热处理方可使用。

四、金属热处理过程中常见的问题

（一）过热

从轴承零件粗糙口上可观察到淬火后的显微组织过热。但要确切判断其过热的程

度必须观察显微组织。若在 GCr15 钢的淬火组织中出现粗针状马氏体,则为淬火过热组织。形成原因可能是淬火加热温度过高或加热保温时间太长造成的全面过热;也可能是因原始组织带状碳化物严重,在两带之间的低碳区形成局部马氏体针状粗大,造成的局部过热。过热组织中残留奥氏体增多,尺寸稳定性下降。由于淬火组织过热,钢的晶体粗大,会导致零件的韧性下降,抗冲击性能降低,轴承的寿命也降低。过热严重甚至会造成淬火裂纹。

(二) 欠热

淬火温度偏低或冷却不良则会在显微组织中产生超过标准规定的托氏体组织,称为欠热组织,它使硬度下降,耐磨性急剧降低,影响托辊配件轴承寿命。

(三) 淬火裂纹

高温或冷却太急,热应力和金属质量体积变化时的组织应力大于钢材的抗断裂强度;工作表面的原有缺陷(如表面微细裂纹或划痕)或是钢材内部缺陷(如夹渣、严重的非金属夹杂物、白点、缩孔残余等)在淬火时形成应力集中;严重的表面脱碳和碳化物偏析;零件淬火后回火不足或未及时回火;前面工序造成的冷冲应力过大、锻造折叠、深的车削刀痕、油沟尖锐棱角等。总之,造成淬火裂纹的原因可能是上述因素的一种或多种,内应力的存在是形成淬火裂纹的主要原因。淬火裂纹深而细长,断口平直,破断面无氧化色。它在轴承套圈上往往是纵向的平直裂纹或环形开裂;在轴承钢球上的形状有 S 形、T 形或环型。淬火裂纹的组织特征是裂纹两侧无脱碳现象,明显区别与锻造裂纹和材料裂纹。

(四) 热处理变形

NACHI 轴承零件在热处理时,存在有热应力和组织应力,这种内应力能相互叠加或部分抵消,是复杂多变的,因为它能随着加热温度、加热速度、冷却方式、冷却速度、零件形状和大小的变化而变化,所以热处理变形是难免的。认识和掌握它的变化规律可以使轴承零件的变形(如套圈的椭圆、尺寸涨大等)置于可控的范围,有利于生产的进行。当然在热处理过程中的机械碰撞也会使零件产生变形,但这种变形是可以改进操作加以减少和避免的。

(五) 表面脱碳

轴承零件在热处理过程中,如果是在氧化性介质中加热,表面会发生氧化作用使零件表面碳的质量分数减,造成表面脱碳。表面脱碳层的深度超过最后加工的留量就会使零件报废。表面脱碳层深度的测定在金相检验中可用金相法和显微硬度法。以表面层显微硬度分布曲线测量法为准,可做仲裁判据。软点加热不足,冷却不良,淬火操作不当等原因造成的托辊轴承零件表面局部硬度不够的现象称为淬火软点。它像表面脱碳一样可以造成表面耐磨性和疲劳强度的严重下降。

第三节 金属加热的物理过程及其影响因素

金属制品在热处理加热时,其热量的来源可以从邻近的发热体以一定的方式进行热交换而获得,如一般加热炉加热;也可以工件自身作为发热体,把别种形式的能量转变为热能而使工件加热,如直接通电加热、感应加热、离子轰击加热等。工件加热时是在一定的环境中进行,因而除了与周围环境进行热交换外,还将发生其他物理化学过程。

金属工件在加热炉内加热时,由炉内热源传给工件表面,工件表面得到热量并向工件内部传播。由炉内热源把热量传给工件表面的过程,可以借辐射、对流及传导等方式来实现;工件表面获得热量以后向内部的传递过程,则靠热传导方式。下面分别介绍这些相关问题。

一、加热介质与工件表面的传热过程

(一) 对流传热

对流传热时,热量的传递靠发热体与工件之间流体的流动进行。流体质点在发热体表面靠热传导获得热量,然后流动至工件表面时把其热量又借热传导给工件表面(当然,相互对流的粒子相遇时也要发生热交换)。因此,对流传热和流体的转移密切相关。实验证明,对流传热时单位时间内加热介质传递给工件表面的热量有如下关系

$$Q_c = \alpha_c F (t_{\text{介}} - t_{\text{工}})$$

式中, Q_c ——单位时间内通过热交换面对流传热给工件的热量, J/h;

$t_{\text{介}}$ ——介质温度, $^{\circ}\text{C}$;

$t_{\text{工}}$ ——工件表面温度, $^{\circ}\text{C}$;

α_c ——对流传热系数, $\text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^{\circ}\text{C})$;

F ——热交换面积(工件与流体接触面积), m^2 。

从对流传热的物理过程可以看出,影响传热系数的因素很复杂,包括流体运动的情况、流体的物理性质、工件表面形状及其在炉内放置位置等多个因素。

1. 流体运动的情况

作为传递热量的流体,其运动状态可分为静止和强迫流动两种状态。

(1) 静止状态的液体或气体在加热过程中由于近热源与远离热源(工件附近)处的温度不同,其密度也不同,因而发生自然对流,其热量的传递就靠此种对流进行,因此其传热系数 α_c 较小。例如在气体炉中加热,其传热系数 $\alpha_c = (6.12 \sim 10.8) \times 10^4 \text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^{\circ}\text{C})$; 长度和直径相等的圆柱在盐浴中加热时 $\alpha_c = 296 \times 10^4 \text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^{\circ}\text{C})$ 。

(2) 强迫流动是指用外加动力强制流体运动, 如气体炉用风扇强制气体循环等。由于此时流体运动速度快, 因此传热系数较大。强迫流动时, 如果流体沿着工件表面一层层有规则地流动, 这种流动称为层流, 它使流体质点与工件表面热交换后不能及时离开, 影响传热。当流体不规则地流过工件表面时, 使流体质点能在热交换后较快地离开工件表面, 因而有利于传热。流体的不规则运动, 称为紊流。可见紊流的传热系数大于层流的传热系数。当以空气作为加热介质并沿着单个的圆柱方向流动时, 其对流传热系数为

$$\alpha_c = (4.64 + 3.49 \times 10^{-3} \Delta T) - \frac{\omega^{0.61}}{D^{0.39}} \times 3600$$

式中, D ——圆柱体直径, m ;

ΔT ——空气和圆柱体的温差, $^{\circ}C$;

ω ——空气流动速度, m/s 。

2. 流体的物理性质

流体的导热系数 λ 、比热容 c 及密度 γ 越大, 传热系数 α_c 越大; 黏度系数越大, 越不易流动, 传热系数则越小。

3. 工件表面形状及其在炉内放置位置

工件表面形状及其在炉内放置位置 (或方式) 不同, 传热系数也不同。工件形状和放置位置对流体流动越有利, 则传热系数越大。

(二) 辐射传热

任何物体, 只要其温度大于绝对零度, 就能从表面放出辐射能。辐射能的载体是电磁波。在波长为 $(0.4 \sim 40) \times 10^{-6}m$ 范围内的辐射能被物体吸收后变为热能, 波长在此范围内的电磁波称为热射线。热射线的传播过程称为热辐射。物体在单位时间内由单位表面积辐射的能量为

$$E = c \left(\frac{T}{100} \right)^4$$

式中, E ——物体在单位时间内由单位表面积辐射的能量, $J/(m^2 \cdot h)$;

T ——物体的绝对温度, K ;

c ——辐射系数, $J/(m^2 \cdot h \cdot K^4)$ 。

c 值为 $20.52 kJ/(m^2 \cdot h \cdot K^4)$ 的物体称为绝对黑体, 常以 c_0 表示。在相同温度下, 一切物体的辐射能以黑体为最大, 即 $c < c_0$ 。

$$\frac{c}{c_0} = \varepsilon$$

ε 称为黑度系数, 简称黑度, 它说明一物体的辐射能力接近黑体的程度。黑度的数