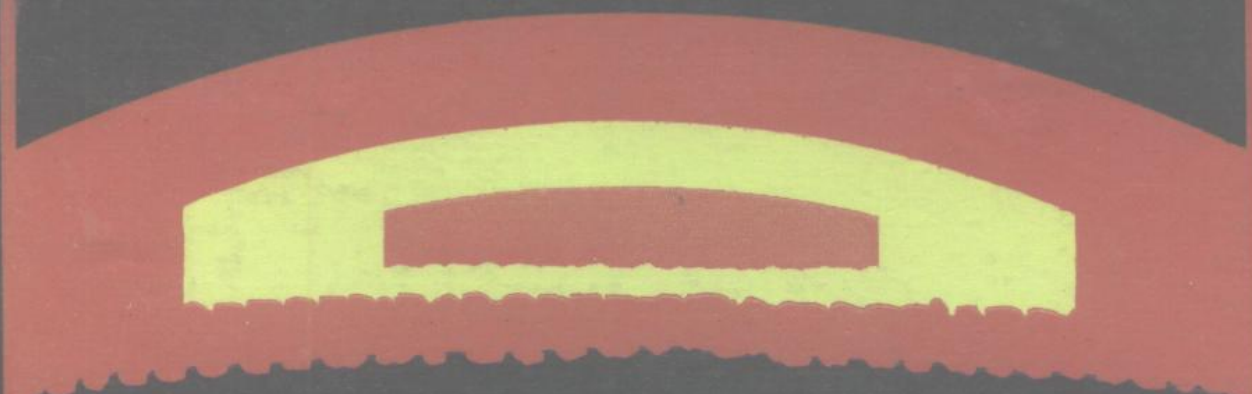


(苏) В. М. 蒂姆恰克 合著
В. Л. 古索夫斯基

加热炉与热处理炉 计算手册



机械工业出版社

加热炉与热处理炉计算手册

〔苏〕B·M·蒂姆恰克 合著
B·П·古索夫斯基

于凤仁 蔡玉德 译

罗廷俊 校订

王秉銓 审校



机械工业出版社

本书是根据苏联国家冶金出版社(Издательство «Металлургия») 1983年出版的蒂姆恰克(В.М.ТЫМЧАК)等所著的“加热炉与热处理炉计算手册”[РАСЧЕТ НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ И ТЕРМИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ СПРАВОЧНИК]第一版进行翻译的。

书中提供了以科学技术的现代成果为基础的各种不同型式加热炉和热处理炉的综合计算方法。给出了燃料燃烧计算和烟气余热利用装置的计算,对炉内气体运动,以及金属的加热和冷却都做了较详尽的叙述。

本书可供冶金、机械各部门科研设计单位的工程技术人员使用。

本书有插图294幅,212个表格及参阅文献125条。

РАСЧЕТ НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ И ТЕРМИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ СПРАВОЧНИК

Под редакцией

докт. техн. наук В.М.ТЫМЧАКА
и канд. техн. наук В.Л.ГУСОВСКОГО
МОСКВА «МЕТАЛЛУРГИЯ» 1983

加热炉与热处理炉计算手册

[苏] В.М.蒂姆恰克 合著

В.Л.古索夫斯基

于凤仁 蔡玉德 译

罗廷俊 校订

王秉铨 审校

责任编辑: 韩会民 责任校对: 丁丽丽

封面设计: 姚毅 版式设计: 张世琴

责任印制: 卢子祥

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南里一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

中国农业机械出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 787×1092¹/₁₆·印张35¹/₄·插页2·字数840千字

1989年6月北京第一版·1989年6月北京第一次印刷

印数 0,001—3,200·定价: 30.30元

ISBN 7-111-00640-2/TG·160

译 者 的 话

我国机械行业和冶金行业有各种类型的加热炉与热处理炉。对于这些炉型的设计、制造、操作、维修以及在科学研究方面我们都做了大量的工作，积累了很多经验，推动了我国工业的发展。我们翻译本书的目的是在总结国内几十年经验的基础上，进一步掌握国外同行业的先进技术，做到取长补短，完善我们的设计方法和改进我们的设计思维，更好地为我国现代化建设服务。

本书介绍了一系列独特的炉子设计计算方法。根据计算结果选择炉子的基本参数，再结合实际使用经验可以确定出炉子的最佳系列尺寸，同时又给出了为完成炉子热工计算和流体动力学计算所需要的全部资料。本书提供了以科学技术现代成果为基础的各种不同型式加热炉和热处理炉的综合计算方法，这在以往的同类设计手册中是不多见的。这是一本资料比较充实，内容新颖，理论与实践相结合的实用性设计手册。

本书在翻译过程中，邀请鞍山钢铁公司钢铁研究所高级工程师罗廷俊同志担任本书的译校。序言、第1章至第8章和第18章由于凤仁同志翻译，第9章至第17章由蔡玉德同志翻译；书中附录的图表、曲线由两人共同负责翻译和整理，并相互对译文作了初校；书末还增加了原书中所使用“苏联钢号化学成分表”，由蔡玉德同志编制，便于使用本手册的人员参考。翻译过程中保留了原文的参阅文献，删掉了内容索引。

特别感谢的是在译稿完成后请机械电子工业部设计研究院王秉铨同志对译文作了全面的审查，并提出了许多宝贵意见。

本书原文错误之处，我们在翻译过程中对已发现的问题都作了更改或加了说明。由于我们的水平有限，又缺乏经验，错误在所难免。我们热切希望广大读者给以批评指正。

译 者

绪 言

В.Е.格鲁姆——格尔日麦洛在世界范围内首先确立炉子的严密科学理论。他在1905~1912年对炉子流体力学的理论进行过研究，并且在1924年出版问世的《火焰炉》一书中完整地进行了论述。同年他在莫斯科建立了直属于最高国民经济会议科学技术学会（НТО ВСНХ «Стальпроект»——国立黑色冶金铸钢与轧钢设备设计院）的冶金和热工设计院。

设计院建立后，在最初的10~12年内，各个工业部门的炉子设计实际上都统一划归苏维埃机构，目前该设计院是设计黑色冶金轧钢生产中各种加热炉和热处理炉的主要设计院。

为了研制新型的炉子设备，必须进一步发展炉子设计的理论基础，因此该设计院的研究工作同大量的设计工作并行，而且在炉子流体力学模拟化和火焰模拟化、喷射理论、金属的加热和冷却、炉内热交换、炉子气氛与被加热金属的相互作用、炉内介质流动过程的数学模拟化等方面进行过大量的理论和试验研究工作，并编制出炉子计算及使用电子计算机控制炉子工作情况的算法和程序。

此外，在设计院本职工作中，研究并引用同其它机构共同获得的研究成果，以及苏联和国外学者的成果。

1931年，为了进一步发展炉子设计的科学原理，以科学院院士**М.А.巴甫洛夫**为首的该设计院工作者作为发起人组成《火焰炉》第三次修改版的编辑委员会。在该版内打算增补由本书所用的对内外热交换问题研究的传热学，论述热传导转向内外热交换问题的研究内容；确定燃料消耗的热平衡，并在此基础上确定炉子的尺寸；采用类比法等等。可惜这些基础工作没有完成。

为了满足设计师在炉子设计中对科学原理方面的需求，从1927年开始，该设计院建立《炉子设计师记事簿》，在这本记事簿中囊括设计院的所有标准，每种标准均可作为适用于炉子任何设计和计算问题的专著。

1933年，重工业人民委员会科技出版社（ОНТИ НКТП）出版了石印版该设计院的328种标准。同时，这些专题论文集还作为莫斯科钢铁研究所教师和学生的教科书而问世。

1935年，在**Ю.В.格鲁姆—格尔麦洛**编写的《炉子设计师手册》一书中公布了原来的387种标准。这本手册多年来成为炉子设计专家的必备书。

该设计院的全体工作人员继续在制定标准方面进行工作。这些标准得到广泛的应用。由于对这些标准的需求量越来越大，这就启发炉子设计师去出版新的手册。

1970年，冶金出版社出版了由**В.М.蒂姆恰克**主编的《轧钢生产炉子设计手册》上下卷。这本手册总结了该设计院在炉子设计和计算方面四十多年的工作经验，对手册所涉及的很多重大问题作了专门的研究和补充修改。在这部手册中还对炉子设计提供了完整的计算，进一步发展和完善了炉子热量计算和空气动力学计算，以及新型炉子设备的研究与应用，编写这些内容是本手册的主要成就。

本手册不同于最初的两种版本，它完整地阐明了加热炉和热处理炉热量计算和空气动力学计算的方法，这些计算是选择炉子设备尺寸和其它参数的基础。本手册未考虑进行炉子设计的其它形式的计算方法，因为目前参阅相应专业手册中的资料也可以进行计算。手册中也不包括有关炉子系统和部件方案的资料，因为在科学技术革命时期这些方案很快就会过时。

本手册具有一系列专业特点。首先，定型炉子的计算方法从按生产规模确定炉子所需生产率，直到炉子数量、尺寸和基本参数的选择都与工艺设计十分接近。

其次，列举计算方法和示例时都有以计算结果为基础，进而提出炉子基本参数的建议，包括：炉子尺寸、金属通过炉子的速度、功率等等。例如，推荐了关于炉子尺寸的参数或金属在炉内移动速度的大小，炉子及其部件的全苏标准化和标准系列化尺寸，根据炉子设计和使用经验给出了确定炉膛形状和系列尺寸的最佳值。此外，还介绍了实际达到的炉子性能参数和以使用经验为基础的原始计算数据。

第三，手册中包括对炉子设备进行热工计算和空气动力学计算所需的全部资料。因此，在完成这些计算时，不必采用任何辅助指导。

手册引用了黑色冶金轧钢和轧管生产中加热炉和热处理炉的计算方法和示例。但是手册也给出了按普通途径进行计算的方法和大量的参考数据，对那些使用加热炉、热处理炉或金属热加工和其它工业部门中的很多专家、工程技术人员都是有益的。

在手册出版中，除作者外，该设计院参与撰稿的人有：В.Н.阿普捷尔曼，Т.А.阿发娜谢娃，И.С.沃洛维克，Л.И.戈尔玛施，Л.И.高利德布尔格，М.М.考洛塔也夫，Г.А.考丘仁斯基，А.Б.考舍列夫，А.Д.考利沃申，А.А.利夫申茨，Э.М.玛麦多夫，Л.Г.奥尔金，Б.С.潘费洛夫，Е.И.帕布申娜，Л.А.毕裴斯，А.Ф.鲍甫特尼柯夫，С.В.鲍鲍娃，А.Н.鲍黑列维奇，Ф.Д.索考林斯基，Ю.И.斯朵雅诺夫，Г.А.乌瓦洛娃等。

作者及全体工作人员特别感谢所有的专家们，对手册的内容和材料的叙述方面提供了自己的宝贵建议。

前 言

炉子计算的基本原理

1. 加热炉和热处理炉是用于完成一定工艺过程的热工设备。这些炉子的基本任务是把热量传给被加热的金属或者按照金属加热或热处理工艺要求，从被加热的金属上除去热量。这样一来，向承受热加工的金属传导热量是炉子设备固有的工作过程，也就是说这种热传导计算是加热炉和热处理炉计算的基础。

炉子向金属传热是以辐射和对流方式进行的，而金属内部的热传递——导热性，通过这些形式的热传导所阐明的基本规律，以及热传导系数的确定方法均列入第13章和附录I内。

通过热传导的基本计算，可以求出炉子的生产率和必要的炉膛尺寸，以及加热或冷却介质的热工性能。为了确定炉子的其它尺寸，还必须进行一系列的辅助计算：热量计算、空气动力学计算、力学计算和强度计算等。

在本手册的辅助计算中，热量计算和空气动力学计算只考虑炉子的供热系统和排烟系统，其中最重要的是燃料燃烧计算；热平衡和燃料消耗量的计算；煤气、空气和烟气动力学计算；燃烧装置和加热器的计算；换热器中热交换的计算。

上述所有这些计算方法均列入第14章至第18章内。计算的目的是确定炉内和各区段内的燃料消耗量，选择燃烧装置、引风设备和加热器，确定换热器和管路的尺寸。

当设计炉子机械设备及其自动化系统、钢筋混凝土和金属结构时，应利用相应技术部门的手册，并结合这些设备的结构现状和使用特性进行必要的计算。

2. 加热炉的基本工艺要求是保证把被加热的金属加热到给定的温度和保证给定的温差范围。加热过程可能有某些限制，比如：给定的加热速度，金属在加热时间内的最大温差，金属表面在最高温度下最短的停留时间等。

热处理炉的基本工艺要求是保证限定的或不限定的条件下加热，在给定温度下的保温，以及在给定速度下的冷却等。

为了实现规定的工艺，采取各种不同的加热和冷却方式。主要的加热、冷却方法列入表1，而采用何种方法则取决于加热和冷却的气氛。借助表1列举的各种加热和冷却方式，可查出气氛对性能（温度、热强度）的影响，从而确定加热和冷却的强烈程度。

进行炉子计算时，摆在设计师面前的可以是三个基本问题中的一个：

1) 已知金属初始和终了的温度状态，以及热交换情况。

要求确定加热工艺的保温时间。这类问题产生于设计师已知加热和冷却工艺均非限定，而要求确定炉子设备的尺寸。

2) 已知金属初始和终了的温度状态，以及工艺要求的保温时间。

要求确定热交换条件。这类问题产生于设计师已知加热和冷却工艺均被限定，而必须

选择加热或冷却的设备并确定其特性。

3) 已知金属初始的温度状态, 热交换条件和加热工艺的保温时间。

要求确定金属的最终温度状态。当在炉子的单独区段内或计算段上计算金属的加热和冷却时间时, 就会产生这类问题。

由于通常都按炉子的区段或计算段进行计算, 前两个问题可归结为第三个问题。在这种情况下, 未知量(第一个问题是保温时间, 第二个问题是热交换条件)预先给定, 然后检验其计算结果。

在解决第三个问题的同时, 不得不预先给定金属的最终温度, 然后进行验算。用这样的计算方法确定计算方程中所包含的量值之间的相互联系, 特别是对复杂的问题在用这些一目了然的方程而不能求得其中任何一个量值时更是如此。

3. 在分批装料的炉子中进行金属的热传导计算时, 金属是固定不动的物体, 在它的外表面上作用着随时间而变化的热流, 在金属表面和加热介质或冷却介质之间, 以及参与热交换的其它物体(砌体、内罩、辊子、炉底轨道等)之间以辐射和对流方式所进行的热交换都随热流如何变化而定。

为了计算连续式炉中金属的热传导, 把温度和热强度沿炉子长度的变化值用金属通过炉子向前移动的时间来描述。此时, 只有当炉子的工作规范固定, 以及炉子每个断面上的温度和热强度并不随时间变化时计算才是正确的。

在连续式炉中, 当被加热金属的参数或炉子的生产率变化时, 应经历一个不固定的过渡过程, 此后炉子就可以转为可按新的固定规范进行工作。按这种规范在炉底长度方向上不论是热量分布还是温度分布都与旧制度不同, 但他们仍旧保持着热量和温度分布不随时间变化的特点。

为了确定炉子的参数, 只能按固定的工艺规程计算, 因为恰恰是炉子固定的常用规程才可能保证炉子最好的工作指标。规程多变的炉子其工作指标最差, 平均指标下降。如果炉内被加热金属的品种和生产率经常变化时, 应预先考虑上述问题。

计算规程多变的炉子时, 可采用以电子计算机为基础的特殊方法, 但本手册未考虑这个问题。设计时通常使用与保温时间有关的实践性资料。

4. 为了采用金属内温度场的物理模型, 当原始和边界条件为已知时, 用与加热和冷却条件相适应的傅里叶热传导方程来求解。

求解热传导方程, 对于所谓薄料和厚料来说原则上是不同的。薄料是指加热或冷却过程中温差相当小, 以致可以忽略的那种物体。因此, 可以认为薄料沿断面均匀受热; 厚料沿断面有足够大的温差, 以致于计算时必须加以考虑。确定是否为厚料的计算方法列入13.3.3节内。

计算炉膛内热交换时, 采用的边界条件可用三种方法确定: **第一类**边界条件是已知金属在受热空间内温度沿表面的分布情况; **第二类**边界条件是已知热流为时间的函数; **第三类**边界条件是已知加热或冷却介质的温度以及它们和金属表面之间的热交换规律。

对于热交换的基本计算最合适的方法是第三类边界条件。

加热或冷却介质的温度是可以选择的, 也可以改变其特性(见表1)。

加热或冷却介质与表面之间的辐射热交换和对流热交换的规律(见13.1和13.2节)是人所共知的。

表1 金属加热和冷却的主要介质及其控制方法

生产过程	加热和冷却介质	控 制 方 法
在燃烧产物或空气中		
加热	燃烧产物	按时间和空间调节燃料燃烧或控制燃料供给量
冷却	在空气中	—
	在水中	—
	洒水	水的用量
	吹风	流速和气流系统的几何形状
	随炉冷却	向炉内送入常压空气
	水、空气混合物	混合物的速度和水量
在 可 控 气 氛 中		
加热	用辐射管	辐射管的布置方式和尺寸, 送入辐射管的燃料量
	用电加热器	加热器的布置方式和尺寸, 电流、电压的调节
	在马弗炉内	按时间和空间调节燃料的送进和燃烧
	在薄炉衬的炉室内	炉衬的材料和厚度
	在带空气冷却器的炉室内	空气冷却器的直径和布置方式、空气速度
	在带水套的炉室内	—
	控制大气气流	流速和气流系统的几何形状
	随炉冷却(马弗炉)	炉外表面冷却法(马弗炉)

应该指出, 加热和冷却介质的温度(燃烧产物、辐射管、空气等)与完全固定在炉膛内的热电偶或高温计所指示出来的温度是存在一定差距的。例如: 热电偶的工作端“监视”着参与热交换的所有物体, 那么热电偶的温度是这些物体的平均温度。而且热电偶指示的温度实际上与安装点靠近这个物体或那个物体有关, 以及其它物体对热电偶起屏蔽气流和火焰的作用。因此, 热电偶指示的温度在很大程度上是试验值, 应在炉子调整过程中确定它的精确值以及它的变化特性。

5. 表2表明的情况是在物体给热系数不变和热物理性能稳定的情况下, 对于形状简单的物体(平板或圆柱体)及其交贯形体为已知, 按第三类边界条件求得的热传导方程的相似解。

表2 第三类边界条件时, 热传导方程的某种近似解为已知的情况

物体的厚重程度	物体表面的放热方式	加热和冷却介质温度	物体的初始温度
薄料物体	辐射	不 变	均 匀
厚料物体	对流 混合流	不 变	均 匀
		随时间推移而作线性变化	按抛物线规律分布
			均 匀
			按抛物线规律分布

13.3.5节列举薄料物体以判别形式提供的所有解, 而在13.3.6节则列举简单形状的厚料物体以判别形式提供的所有解。图 I-23~I-54是以列入方程解中的函数值绘成的许用曲线。

在解决双解问题时, 使用温度场的连乘法(由简单形状物体交贯而成的复杂物体)或

温度场叠加法（局部热流或热源起作用时）。在13.3.7~13.3.10节中谈到双解问题的解决方法。

根据函数论和分析方程的解所获得的条件进行工程计算，但在作这种计算之前，尚须作如下考虑：1) 把被加热或冷却的金属物体看作是简单形状的物体（板、圆柱体或其贯穿物体）；2) 把加热介质或冷却介质的温度看作是不变的或随时间作线性变化的；3) 被加热金属或被冷却金属的物理性能取平均值；4) 确定符合热传导定律的给热系数（对薄料物体来说占首要地位的是热传导的方式，对于厚料物体则按热传导的对流规律；确定的方法可参阅13.3.4节）；5) 加热和冷却过程中的给热系数取平均值。

如加热或冷却介质的温度有复杂的变化，以及为了增加计算精度，把温度变化曲线划分成若干计算段，每一计算段内加热或冷却介质的温度均可视为恒温或随时间作线性变化。

分段计算时，金属在前段内的最终温度状态将是下一段的起始温度。如果金属的最终温度状态是不均匀的，那么为了下一段的计算可把温度的分布看成是符合抛物线规律。

热物理性能和给热系数的平均值可以分段进行计算。

在整个计算中，化学过程的影响（氧化、脱碳等）可忽略不计，把参与热交换的物体看成为灰体或扩散体。

在连续式炉中，加热介质和冷却介质的温度沿炉子宽度的变化以及热量沿炉料或炉子部件在分布上的变化均可忽略。

6. 近年来，借助于电子计算机用终端差值法计算热传导得到广泛应用，在一些专业文献中曾阐述过借助于电子计算机可以计算热传导的基本原理和方法。计算时，可以用终端差值法求出比较精确的结果，因为没有必要把加热和冷却介质的温度变化特征置于十分严格的界限之下。就物质的初始温度和它的形状来说，并不要求选用性能和给热系数均为恒定的金属。

为了在电子计算机上进行计算，必须编制热传导的数学模型和相应程序。其实上机计算金属加热和冷却的时间并不长，但是建立繁杂而重复的热传导数学模型的输入和调试却要占用相当长的时间。如果必须改变任何输入参数，而数学模型中又没有预先规定某些变数，那就需要建立新程序的调试和改编，而这项工作量是特别大的。

绝大多数冶金炉都是单体设备，因此一般在电子计算机上花费的时间、劳动量和经费比用小型计算机的工程计算要大得多。此外，在电子计算机上计算时，通常应保证高的精确度，但由于设计师打算输入的那些信息有其不精确性，其计算结果多数似乎是无用的。

由于这些原因，从实用目的出发，优先借助于工程分析法和使用小型计算机来完成计算。

在现阶段，建议在下述情况下使用计算机计算：1) 如果工艺的复杂性和加热或冷却的条件用工程计算所使用的简化方式不可能准确地描述时（如金属的轮廓复杂、加热或冷却不均匀、考虑化学过程、工艺规程不稳定等）；2) 对于炉子的工艺规程或炉子结构部件的选定通常要求作出几个计算方案时；3) 为了掌握炉子的工艺规程，要求在短时间内进行大规模的计算时。

目 录

序言

前言 炉子计算的基本原理

第一篇 连续式加热炉的计算

1. 连续式加热炉的计算特点	1	2.7 炉膛的基本尺寸	12
1.1 加热炉的用途	1	2.8 热平衡	13
1.2 推荐的加热温度	1	2.9 推钢式加热炉计算示例	13
1.3 对流计算的特点	2	3. 步进式加热炉和步进梁式加	
1.4 二段和三段式加热的热工制度	2	热炉	31
1.5 计算段的选择	3	3.1 炉子的特征	31
1.6 炉气砌体的温度以及单位加热		3.2 金属加热的计算方案	31
时间	3	3.3 金属加热计算的方法和程序	31
1.7 炉子生产能力和装载量的计算	4	3.4 金属填充系数、金属移动速度、	
1.8 有效炉底长度、炉底宽度、炉底面		炉底长度	34
积及炉底强度	5	3.5 热平衡	36
1.9 炉子热强度和燃料单耗	7	3.6 步进式炉的计算示例	36
1.10 炉子在非计算条件下的工作	7	4. 环形炉	51
2. 推钢式加热炉	8	4.1 炉子的特征	51
2.1 推钢式加热炉的特征	8	4.2 金属加热的计算方案	51
2.2 炉子的分类和金属加热条件	8	4.3 金属加热的温度制度和计算顺序	
2.3 金属加热的计算方案	10		52
2.4 金属加热的计算顺序	10	4.4 装载量和炉膛的基本尺寸	52
2.5 核算炉底管影响的程序	11	4.5 热平衡	54
2.6 金属加热的计算方法和计算结果		4.6 金属加热计算	54
的修正顺序	11	4.7 环形炉的计算示例	54

第二篇 连续式热处理炉的计算

5. 热处理炉计算的特点	65	5.9 热平衡	71
5.1 热处理炉的特征	65	6. 快速加热的分段式炉	73
5.2 加热的温度、条件、方法和加热		6.1 分段式炉的特征	73
与冷却的介质	65	6.2 传热特点	73
5.3 金属加热和冷却的特点以及计算		6.3 金属加热计算的特点	73
段的选择	66	6.4 金属加热计算的方法	73
5.4 传热计算的特点	67	6.5 炉子通道内坯料温度变化的计算	
5.5 金属加热和冷却计算的特点	68		74
5.6 用雾化水冷却的炉室计算	68	6.6 炉子的长度、坯料的移动速度和	
5.7 干燥室的计算	68	单位加热时间	76
5.8 生产能力的确定和炉子的长度	69	6.7 热平衡	76

6.8 快速加热分段式炉的计算示例	76	8. 牵引式炉	94
7. 辊底式炉	82	8.1 牵引式炉的特征	94
7.1 辊底式炉的特征	82	8.2 传热计算	94
7.2 原始数据和计算程序	82	8.3 金属加热计算的特点	94
7.3 热交换计算的特点	82	8.4 金属的移动速度和有效长度	95
7.4 加热不对称性系数	83	8.5 热平衡	96
7.5 热平衡	83	8.6 立式牵引炉的计算示例	96
7.6 辊底式炉的计算示例	83		

第三篇 间歇式炉的计算

9. 间歇式炉的计算特点	115	10.7 热强度和热耗量	149
9.1 炉子的用途	115	10.8 工段内均热炉组数计算示例	149
9.2 金属加热温度及加热和冷却的计算程序	115	11. 室式炉	150
9.3 装载量和炉子生产能力以及工段内炉子的数量	115	11.1 炉子的特征	150
9.4 热平衡和燃料单耗	116	11.2 炉子分类和供热方式	150
10. 均热炉	116	11.3 热交换计算特点	150
10.1 均热炉的特点	116	11.4 炉子生产能力及生产周期	151
10.2 均热炉的分类	117	11.5 热平衡	151
10.3 钢锭加热温度和炉坑温度	117	11.6 台车式炉的计算示例	151
10.4 钢锭加热制度, 炉坑温度和热工制度	117	12. 罩式炉	161
10.5 关于钢锭加热时间的经验数据	117	12.1 炉子的特征	161
10.6 炉子装载量、炉组的生产能力、生产周期、工段内的炉组数和操作特点	117	12.2 热交换特点	162
		12.3 卷板内温度场的计算	165
		12.4 工段炉子台数(台)和炉膛尺寸的确定	166
		12.5 热平衡	166
		12.6 罩式炉计算示例	167

第四篇 炉子部件及其工艺要素的计算方法

13. 物体的加热和冷却计算	180	15. 炉子热平衡的编制	251
13.1 辐射热交换	180	15.1 热量收入	252
13.2 对流热交换	189	15.2 热量支出	252
13.3 物体的加热和冷却	204	15.3 热平衡方程	260
14. 燃料燃烧和炉气成分的计算	221	15.4 连续式炉的区段热平衡	260
14.1 燃料的完全燃烧计算	221	15.5 冷却区段的热平衡	260
14.2 气体燃料在富氧空气中的燃烧计算	231	16. 炉内气体的流动计算	260
14.3 气体燃料的不完全燃烧计算	234	16.1 管道流体力学计算	260
14.4 炉内可控气氛的计算	238	16.2 喷射器的计算	268
14.5 气体燃料的着火和炉膛防爆计算	243	16.3 确定气垫式炉内输入气体的流量和压力	275
		17. 燃烧器和加热装置的计算	278
		17.1 不预先混合的燃烧器计算	278

17.2 喷射式燃烧器计算.....	280
17.3 高压喷嘴的计算.....	288
17.4 电阻加热元件的计算.....	291
17.5 辐射管的计算.....	297
18. 换热器计算	298
18.1 换热器计算的基本原理.....	298
18.2 陶瓷换热器的计算.....	302
18.3 金属换热器的计算.....	315
附录 I 热交换计算图表	335
附录 II 燃料及其燃烧	391

附录 III 通过砌体的热损失.....	450
附录 IV 气体力学	466
附录 V 物质的热物理性能.....	497
参考文献	536
国家黑色冶金铸钢与轧钢设备设计 院加热炉和热处理炉计算的标准 资料索引	539
附表 本书引用的苏联钢号化学 成分	546

第一篇 连续式加热炉的计算

1. 连续式加热炉的计算特点

1.1 加热炉的用途

连续式加热炉的用途是在热压加工前用以加热金属。在黑色冶金 的 轧 钢 和 轧 管 生 产 中，推钢式炉、步进式炉、步进梁式炉、环形炉是连续式加热炉的基本型式。

在这些炉子中通常为型钢轧机加热矩形（方形）钢坯，坯厚 60~400mm，宽 60~400mm，长 1~12m；为薄板轧机加热的钢坯厚度为 90~350mm，宽 400~2000mm，长 1~12m；为轧管机加热圆坯或钢锭直径为 40~600mm，长 1~12m。此外，还加热钢管和管坯。

1.2 推荐的加热温度

轧钢时金属的加热温度首先与被加热金属的材质有关。合金钢和优质钢的加热温度为 1060~1200℃，普通钢为 1200~1250℃，连铸钢坯为 1250~1280℃，硫化物变态情况下的硅钢需加热到 1280~1300℃。对于合金钢和优质钢轧制时的加热温度按表 1-1 选用，它来源于苏联冶金厂的工艺规程。

表 1-1 轧制合金钢和优质钢时的加热温度

合 金 或 钢 的 牌 号	加 热 温 度 (℃)
У12, У13, У12А, 60ХГ, 95Х18, 12МХ, Х12М	1060~1120
70—85, 65Г, 70Г, У7—У10, У7А, У8ГА, У10А, Х, 13Х, 7Х3, ХВГ, 4ХВ2С, 5ХВ2С, 15Х12ВНМФ, 18Х2Н4МА, 5ХНМ, 15Х5М, 9ХС, ЕХ3, ШХ4, ШХ15, ШХ15СГ, 20Х13Н4Г9 (ЭИ109), 13Х11Н2В2МФ (ЭИ961), 09Х16Н4Б (ЭП56), 25Х13Н2 (ЭИ474), 20Х17Н2, 15Х5М	1120~1160
А12—А35, А40Г, 45—65, 40Г—60Г, 50Г2, 09Г2, 09Г2С, 25Г2С, 12ГС, 35ГС, 55ГС, Р9, Р18, 55С2, 60С2, 60С2Н2А, 60С2ХА, 9Х1, 50Х, 08Х13, 12Х13, 20Х13, 30Х13, 40Х13, 18ХГ, 30ХГСА, 35ХГСА, 18ХГТ, Х03ГТ, 15ХМ—38ХМ, 30ХМА, 15Х5М, 38ХМЮА, 20ХН—50ХН, 12ХН2, 12ХН3А, 20ХН3А, 30ХН3А, 12Х2Н4А, 20Х2Н4А, 40ХН2МА, 94Х18Н10, 12Х18Н9, 12Х18Н9Т, 17Х18Н9, 08Х18Н10, 08Х18Н10Т, Х15Н60, Х20Н80, Х25Н20, 20Х23Н13, 36Х18Н25С2, 20Х25Н20С2, 40ХС, 16ХСН, 40Х10С2М, 9ХФ, 15ХФ, 40ХФА, 30Х3МФ, 45Х14Н14В2М (ЭИ69), 20Х20Н14С2, (ЭИ211), 95Х18 (Х18, ЭИ229), 20Х17Н2 (ЭИ268), 20Х23Н13 (ЭИ319), 0Х18Н12Б (ЭИ402), 20Х3МВФ (ЭИ415), 20Х23Н18 (ЭИ417), 15Х6СЮ (ЭИ428), 10Х17Н13М3Т (ЭИ432), ХН78Т (ЭИ435), ХН77ТЮР (ЭИ437Б), 10Х17Н13М2Т (ЭИ448), 37Х12Н—8Г8МФБ (ЭИ481), ХН75МБТЮ (ЭИ602), 06ХН28МТ, 0Х23Н28М2Т (ЭИ628), ХН70Ю (ЭИ652), 09Х14Н16Б (ЭИ694), 09Х14Н18В2БР (ЭИ695Р), ХН38ВТ (ЭИ703), 10Х14Г14Н4Т (ЭИ711), 12Х2НВФА (ЭИ712), 12Х25Н16Г7АР (ЭИ835), ХН60ВТ (ЭИ868), 12Х17Г9АН4 (ЭИ878), 09Х18Н8Ю (ЭИ904), 08Х17Н5М3 (ЭИ925), 11Х11Н2В2МФ (ЭИ962), 08Х22Н6Т (ЭП53), 08Х21Н6М2Т (ЭП54), 15Х17АГ14 (ЭП213), 07Х21Г7АН5	1160~1200
05—40, 15Г—40Г, 10ХСНД, 15ХСНД, Л53, 20ХГСА, 09Г2, 10Г2—45Г2, 15Х—40Х	1200~1250

对于每种具体情况下的加热温度值,应根据轧钢工艺、轧机特性、压延量、炉子到轧机的距离而定。因而,在薄板轧机上轧制钢材时,要求的加热温度要比型钢轧机上高出 $25\sim 30^{\circ}\text{C}$ 。

至于断面最终温度差,同样与金属的形状和它们的轧制条件有关,这应由工艺来确定。当被加热金属的计算厚度为 100mm 时,金属内部的温差可选用 $15\sim 20^{\circ}\text{C}$ 。

1.3 对流计算的特点

为了在连续式加热炉内实现加热工艺要求,在加热的最终区段内炉气温度达到 $1300\sim 1400^{\circ}\text{C}$ 时,金属即能在燃料燃烧产物中完成高温加热。

在高温情况下,传向金属的热量基本上是辐射热,而对流给热部分仅占 $2\sim 10\%$ 。而且由于炉子的形状复杂、温度的不均匀性、金属的布料特点、燃烧装置的作用、炉内气体的运动方式等均具有极其复杂的特点,因而对流给热系数的确定是颇为困难的。因此,通常不考虑对流给热,而是考虑到对流给热的影响而将辐射给热系数加以修正,或者对辐射给热可能具有的计算不准确性采用增加裕量的方法。

1.4 二段和三段式加热的热工制度

在加热炉内,金属加热的工艺制度分为二段或三段式加热(图1-1)。在二段式加热制度中,沿金属的行进路程(按加热规定)有两个工艺段:温度逐渐升高的预热段和温度恒定的高温段,即加热段。通常预热段是炉子的非供热段,在该段内利用燃烧产物的废热升温,而高温段则是供热段,具有燃烧区或高温火焰区。但是,通过适当选择燃烧装置的能量,供热段,特别是在供热分散的区域中(炉顶、侧墙),也能处于预热状态。

在二段式加热制度下,高温段的炉温应当这样选择:金属表面只要达到给定的最终温度的那一瞬间,沿金属表面的温差就不会超过允许值。此时,形成的温差愈小,高温段的温度愈应接近金属表面给定的最终温度。因此,在二段式温度制度下,金属的加热强度受到限制。除此之外,为了避免金属过热,不允许金属在炉内超过必需的加热时间。

在三段式加热状态下,沿金属的行进方向(按加热规定)在预热段和高温段之外补充第三个热工段——恒温均热段,它接近于金属表面给定的最终温度。在三段式加热状态下高温段的温度可以取高一些,从而使加热速度较二段式加热制度为快。因为强化加热时,沿被加热金属断面的温差较大,使金属由高温段在其表面达到的给定温度下降到均热段的温度。由于在均热段中金属接近于燃烧产物的温度,因而当金属在炉内保温时,使金属表面过热的危险性降低。被加热金属愈厚,要求沿断面的温差愈小,使用三段式加热制度就愈合理。

炉内的供热段(可调的)与其它的工艺区段有所不同,因为高温段通常是由几个供热段组成的。炉内的这些区段按金属移动的方向加以编号:第一高温段、第二高温段等。但

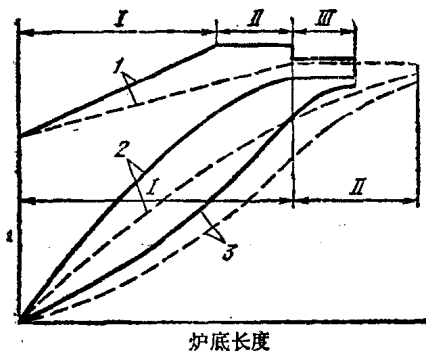


图 1-1 在二段（----）或三段式（——）加热制度下、金属和燃烧产物的温度分布图

1—燃烧产物温度 2、3—金属表面和中心的温度

热工区段：I—预热段 II—高温段 III—均热段

是,首先在金属沿高温段行进的方向上,就会发现燃烧产物的温度有所升高,也就是说,热工上把这些高温段看成是预热段。当供热段的尺寸受炉子结构的限制不能改变时,在炉子工作制度变化的情况下,炉子的边界区移动,使工艺段变化,可能由一个区段转到另一个区段,比如,由均热段和预热段转到高温段,或反之。

1.5 计算段的选择

在炉子划分计算段时,应当注意到:它们的边界必须同热工区段的边界相吻合。这可由求得分析解的条件得出(参阅前言的表2)。为了提高计算的精确性,热工区段可分成若干个计算段,在这种情况下,希望这些段同供热段(可调段)相结合,因为这能使炉子其它尺寸的计算和区段热强度的计算均可简化。

确定计算段中热工区段的段数时,同样也应考虑到恒温段上的计算要比温度作线性变化的其它段要得出更精确的计算结果。在这样的区段上,燃烧产物的温度变化愈小,计算的精确度就愈高。因此,燃烧产物变化极大的区段,应划分成更多的计算段。

1.6 炉气砌体的温度以及单位加热时间

按照计算金属加热的一般原理(见前言第二节),在加热炉的每个计算段上,金属的初始温度状态,燃烧产物的温度和加热时间均为已知。

在高温段中,燃烧产物的温度应比金属表面给定的最终温度高出 $80\sim 130^{\circ}\text{C}$,而在均热段内则比金属表面的最终温度要高出 $30\sim 50^{\circ}\text{C}$ 。燃烧产物的温度不希望超过 $1350\sim 400^{\circ}\text{C}$,因为这会造成金属的氧化和脱碳,降低炉子耐火材料和部件的使用寿命。在表1-2中列出了普通钢加热时,在加热炉供热段中燃烧产物温度的推荐值。

表 1-2 普通钢加热时,加热炉供热段中燃烧产物的温度

供热段数	炉 子 区 段	金属加热到下列温度时, 区段的温度($^{\circ}\text{C}$)	
		1200~1220	1230~1250
2	均 热 段	1200~1260	—
	高 温 段	1300~1350	—
	炉子初始温度	800~1000	—
3	均 热 段	1200~1260	1260~1320
	上部高温段	1300~1350	1320~1380
	下部高温段	1260~1300	1280~1320
	炉子初始温度	700~950	800~1000
4	均 热 段	1200~1260	1260~1320
	上部Ⅰ高温段	1220~1280	1260~1320
	上部Ⅱ高温段	1300~1350	1320~1380
	下部高温段	1260~1300	1280~1320
	炉子初始温度	900~1050	950~1100
5	均 热 段	1200~1260	1260~1320
	上部Ⅰ高温段	1220~1280	1260~1320
	上部Ⅱ高温段	1300~1350	1320~1380
	下部Ⅰ高温段	1200~1240	1220~1260
	下部Ⅱ高温段	1260~1300	1280~1320
	炉子初始温度	900~1050	950~1100

对于某些钢号来说,侧装料起始端燃烧产物的温度应加以限制,因为金属中应力的危

害与过高的温度有关。在表1-3中给出了某些牌号的钢材冷装炉时，炉子起始端允许的燃烧产物最高温度。

表 1-3 允许冷装炉时，炉子装料端的最高温度

钢 号	温度(℃)
30XГТ, 20X17H2, 1X13, 20X13, 30X13, 40X13, 08X18H10, 08X18H10T, 08X13 (ЭИ496), 12X18H10T, 12X18H12T, 10X17H13M2T, 10X17H13M3 T, 20X23-H18 (ЭИ417), 20X13H4Г9	800~900
35-60, 09Г2, 10Г2, 40-60, Г2, 15Г-70Г, 12ГС, 35ГС, 55ГС, 17ГС, 25Г2С, 40X-50X, 40XΦА, 18XГ, 20XГР, 35XГ2, 30XГС, 25XГМ, 20XГР-40XГР, 30XГТ, 40XГТР, 20XГСА-30XГСА, 38X2MЮА, X12, 7X3, 8X3, 20XH-50XH, 30XH3A, 12XH3A, 20XH3A, 20XH4ΦА, 5XHB, 12XH2, 30XH-2MA, 20XH2M, 5XHM, 38X2H2MA, 40XH2MA, 38XH3MΦА, 30XH2MΦА, 45XH2MΦА, 20XH4ΦА, 25X2M1Φ, 18X2H4MA, 15X5M, 15X5BΦ, 15X5, 20X3MBΦ, 38X2Ю, 14X2H3MA, 36X2H2MΦА, 15X5BΦ, 12X1MΦ, 12X2H4A, 20X2H4A, 15H2M, 20H2M, 12MX, 20XM, 33XC, 40XC, 38XC, 50C2, 55C2, 60C2, 70C3A, 60C2XA, 70C2XA, 60C2XΦА	700~800
70-85, У7-У13, У7А, У8ГА, У10, У12А, X, 9X1, 6XBГ, 4XB2C-6XB2C, 38XГГ, 26XГМ, XГС, 35XГСА, 30XГСН2M, 38X2MЮА, 5XHBC, 8XΦ, 40XC, X12, X12M, 12X18H9, 17X18H9, 12X18H9T, 40X10C2M, X13Ю4, X15Ю5, X23Ю5, P9, P18, 60C2H2A, 35ГС, EX3, ШХ4, ШХ15, ШХ15CF	600~700

当计算炉内金属加热时，对那些燃烧产物层厚度不大的炉子（辊底式炉、分段式炉），以及间接辐射加热的反射炉（炉顶供热），可把被加热的物体视为砌体。当选择砌体温度时，应考虑的是金属温度高的区段中，砌体接近于燃烧产物的温度，而金属较冷的区段，砌体温度可能低于燃烧产物的温度100~150℃。公式（13-22）和（13-23）表示的是燃烧产物和砌体温度之间的关系式。

对后续各段金属的初始温度，正如前言第五点所说的取其等于前段中的最终温度。

为了预先确定金属的加热时间可引用实测数据。金属总的加热时间 h ，按照实测数据按下式确定。

$$\tau = zS/0.6 \quad (1-1)$$

式中 S ——被加热金属的厚度 (m)；

z ——单位加热时间 (min/cm)。

单位加热时间与加热炉的型式、钢号及被加热金属的厚度有关，一些实测数据列入表1-4和表1-5内。

1.7 炉子生产能力和装载量的计算

为了计算炉子或炉组的尺寸，需要知道加热已知牌号金属时炉子的小时生产能力。炉子小时生产能力等于轧机轧制这种牌号金属给定的小时产量（换算为装载量）。

按照算出的小时生产能力和已知牌号金属加热的计算时间即可确定炉子或炉组的装载量 (t)：

$$G = P\tau \quad (1-2)$$

式中 P ——计算的小时生产能力 (t/h)；