

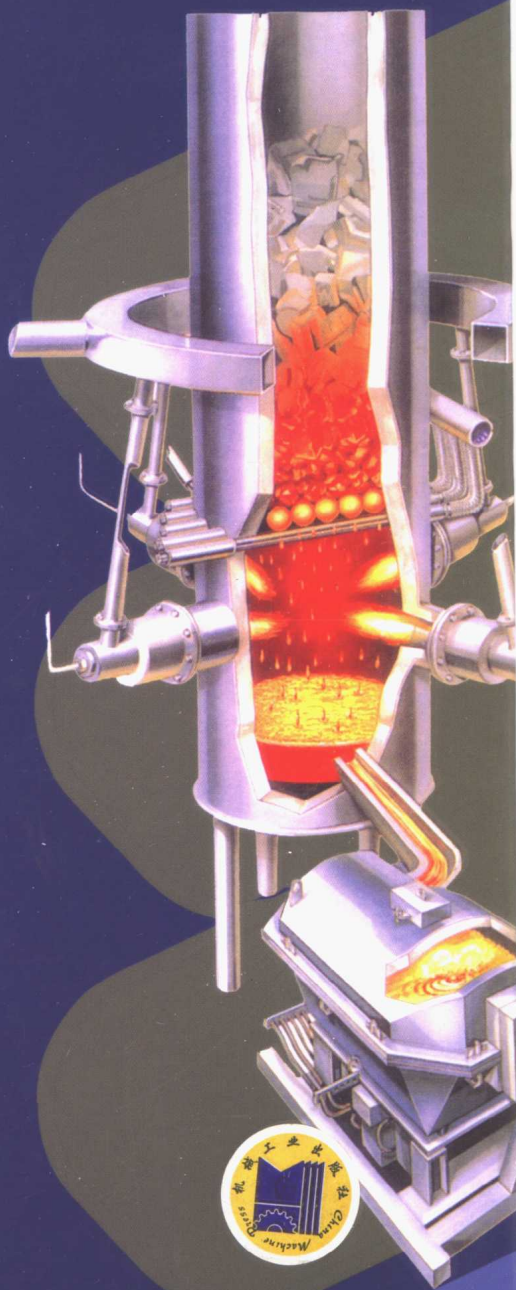
机械工业出版社高水平著作出版基金资助项目

先 / 进 / 铸 / 造 / 技 / 术 / 丛 / 书

丛书主编 张武城

铸造 熔炼技术

张武城 编 著
李传斌 主 审



 **机械工业出版社**
CHINA MACHINE PRESS



机械工业出版社高水平著作出版基金资助项目

先进铸造技术丛书

丛书主编 张武城

铸 造 熔 炼 技 术

张武城 编著

李传斌 主审



机械工业出版社

本书为先进铸造技术丛书之一，全书共4章，主要包括：冲天炉熔炼技术及其发展；坩埚式感应电炉熔炼技术；沟槽式感应电炉、浇注电炉和双联熔炼作业；电弧炉和炉外精炼装置。书中系统介绍了近年来国内外铸造熔炼技术的新技术、新工艺及其与传统熔炼技术的科学结合，对提高我国铸造产品质量、降低成本、节约能源、减轻环境污染，都将起到推动作用。

图书在版编目 (CIP) 数据

铸造熔炼技术/张武城编著. —北京：机械工业出版社，2004.5

(先进铸造技术丛书)

ISBN 7-111-14093-1

I. 铸… II. 张… III. 铸造—熔炼 IV. TF762 ②TF593

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 015648 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑：邝 鸥 崔世荣 版式设计：冉晓华

责任校对：申春香 封面设计：鞠 杨 责任印制：施 红

北京铭成印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2004 年 5 月第 1 版·第 1 次印刷

890mm × 1240mm A5·12.375 印张·365 千字

定价：24.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

本社购书热线电话 (010) 68993821、88379646

封面无防伪标均为盗版

丛书编委会

丛书主编 张武城

丛书副主编 李传栻

丛书顾问 柳百成 陈蕴博

丛书编委 黄天佑 姜不居 李传栻 毛卫民

谢成木 熊守美 颜永年 张伯明

张武城 张乃蕴

丛书策划 卞 鸥

序

铸造是机械工业重要的基础工艺与技术，广泛地应用于机械制造、航空航天、能源、交通、化工、建筑以及社会生活的各个领域，并随着各相关技术领域的发展自身不断更新、发展和完善，是我们生产和生活中时时不可或缺的一项重要工艺技术。

今天，铸造作为一种传统工艺与技术又面临着新的挑战。高速发展的社会，对铸造的精密性、质量与可靠性、经济、环保等要求越来越高。铸造已从单一的加工工艺发展成为新兴的综合性的先进工艺技术。它涉及到工艺方法、设备及工装、成型、生产过程的自动化与机械化、材料、环保等众多领域。不同学科之间的交叉、渗透及融合，高新技术对传统技术的不断影响，是当代科技发展的重要趋势。

为了解决广大铸造科技人员迫切需要了解和掌握铸造领域各学科的国内外先进技术及发展趋势的要求，以便指导他们的生产、科研及教学工作，北京市机械工程学会组织了铸造行业有较快进步和较新发展的数个重要领域中有突出贡献的著名专家、学者编写、出版了这套先进铸造技术丛书。同时，邀请我国铸造、材料业界德高望重的著名专家柳百成院士、陈蕴博院士作为丛书的编写顾问。

本丛书旨在全面地、系统地介绍国内外先进铸造技术的发展趋势，对我国铸造技术的发展起指导作用。本丛书是高层次的普及型丛书，深层次地介绍铸造相关领域的高新技术和基本规律，并兼顾知识性和实用性，面向广大铸造工作者、研究人员、高等院校师生及相关领域技术人员等。

本丛书的特点是突出“高、新”二字，有较宽的知识覆盖面，注意相关学科的相互渗透，博采国际、国内最新研究和发展成果。

本丛书愿为广大铸造技术人员适应国际大环境、大市场的要求，使我国铸造界迅速加入国际经济市场，从铸造大国向铸造强国迈进的过程中作出重要贡献。

北京市发展和改革委员会及机械工业出版社高水平著作出版基金资助项目对本丛书的出版提供了经济支持，中国机械工程学会副理事长宋天虎对丛书的出版给予了关心和支持，在此一并表示衷心的感谢。

丛书主编 张武城

前 言

本书为北京市机械工程学会组织编写的“先进铸造技术丛书”之一，全书共分4章。

在第1章冲天炉熔炼技术及其发展中，除了讲述相关基础理论外，还介绍了国内外最近的研究应用成果，如现代热风水冷无炉衬冲天炉、富氧送风冲天炉、等离子强化冲天炉、塔夫托炉（Taft）、法尔炉（FAR）、纯氧回转炉及陶粒热交换器等。有关冲天炉熔炼过程的计算机控制技术目前尚不甚完善，在此仅将国内外研究的动态介绍给读者。

在第2章坩埚式感应电炉熔炼技术中，简要说明感应加热的基本概念和发展趋势，介绍并联谐振和串联谐振中频电源的性能和应用范围。在无芯感应电炉原理基础上，开发的水冷铜坩埚感应炉、等离子感应炉、磁悬浮感应炉及各种类型的真空感应炉，本书也作了简要介绍。感应电炉熔炼过程的计算机控制技术，目前已基本成熟，本书介绍了一些典型方案。液压技术、水冷技术及酸性耐火材料技术是与坩埚式感应电炉密切相关的技术，本书中都作了必要的阐述。

在第3章沟槽式感应电炉、浇注电炉和双联熔炼作业中，对沟槽式感应电炉的工作原理、炉型、功率和感应体数量的选择等作了介绍。沟槽炉能否正常安全工作的关键是耐火材料、对熔沟部位炉衬蚀损状况的判断及炉体的防漏技术，本书中都作了重点介绍。

在第4章电弧炉和炉外精炼装置中，除了介绍有关交流、直流电弧炉的基础理论外，还重点介绍了生产超级合金用的电弧炉，包括真空电弧炉、真空自耗凝壳电弧炉、真空非自耗电弧炉、等离子炉、电子束炉及电渣熔炉等。此外，还介绍了系列炉外脱硫、除气和熔炼纯净钢的技术。

本书重点分析了现代铸造熔炼技术的发展动向、新技术，介绍了有关的新工艺及其与传统熔炼技术的科学结合，着意于促进我国铸造

熔炼技术水平的持续发展，从而提高合金内在质量，降低生产成本，减少能耗，并减少对环境的污染。随着广大铸造工作者对现代铸造熔炼技术的掌握，将会大力推动我国从铸造大国向铸造强国的转变。

在本书编写过程中，得到了黄惠松、李传栋、张广华、殷经星、颜文菲、李恩琪、赵刚、丁方心等专家、教授的帮助，并为本书提供了大量新的研究成果以及各种相关信息和资料，在此表示衷心感谢。

由于编者的水平所限，谬误之处敬请读者不吝指正。

编 者

目 录

前言

第 1 章 冲天炉熔炼技术及其发展	1
1.1 冲天炉熔炼的要点及冲天炉的基本结构	1
1.1.1 冲天炉的分类	1
1.1.2 冲天炉的基本结构	2
1.1.3 冲天炉内焦炭的燃烧	2
1.1.4 冲天炉内炉气成分及炉温的分布特征	7
1.1.5 冲天炉内铸铁熔炼过程的热交换特点	9
1.1.6 对冲天炉熔炼的基本要求和影响铁液质量的因素分析	12
1.2 冲天炉熔炼过程的强化措施	18
1.2.1 预热送风	18
1.2.2 富氧送风	25
1.2.3 除湿送风	35
1.2.4 喷煤粉技术	37
1.2.5 向冲天炉内吹入其他物料	38
1.3 冲天炉熔炼过程化学成分变化规律	40
1.3.1 冲天炉内冶金反应的基本规律	40
1.3.2 冲天炉内炉渣的形成及其成分	41
1.3.3 冲天炉熔炼过程中铁液化学成分的变化	43
1.4 铁液的脱硫	49
1.4.1 炉内脱硫	49
1.4.2 炉外脱硫	50
1.4.3 炉外脱硫法	51
1.5 冲天炉熔炼过程的参数选择及测量技术	55
1.5.1 冲天炉操作参数的选择与计算	55
1.5.2 冲天炉配料计算	59

1.5.3 冲天炉熔炼过程的测量	62
1.5.4 冲天炉熔炼过程的计算机控制	70
1.6 冲天炉熔炼技术的发展动态和特种熔铁炉	78
1.6.1 现代冲天炉	79
1.6.2 等离子强化冲天炉	89
1.6.3 法尔炉 (FAR)	91
1.6.4 特种熔铁炉	92
1.6.5 冲天炉熔炼技术的发展方向	103
参考文献	106
第2章 坩埚式感应电炉熔炼技术	108
2.1 感应加热的基本概念及发展趋势	108
2.1.1 电磁感应与感应加热的基本概念	108
2.1.2 电流分布和交流电效应	109
2.1.3 坩埚式感应电炉的分类和用途	111
2.1.4 感应电炉的特点	111
2.1.5 感应电炉的发展趋势	112
2.2 坩埚式感应电炉	114
2.2.1 坩埚式感应电炉的工作原理及特点	114
2.2.2 坩埚式感应电炉主要参数的确定	117
2.2.3 炉型和机械结构	125
2.2.4 冷却水系统及设计计算	163
2.2.5 坩埚式感应电炉耐火材料和筑炉	175
2.3 感应电炉电气设备	199
2.3.1 工频感应电炉电源系统	199
2.3.2 漏炉报警和地漏监视装置	204
2.3.3 固态中频电源	206
2.4 计算机在坩埚式感应电炉熔炼过程的应用	223
2.4.1 计算机应用的必要性和基本条件	223
2.4.2 熔化工序中的计算机过程控制	225
参考文献	230

第3章 沟槽式感应电炉、浇注电炉和双联熔炼作业	233
3.1 沟槽式感应电炉	233
3.1.1 沟槽式感应电炉的工作原理	233
3.1.2 沟槽式感应电炉的输入功率及感应体数量的选择	239
3.1.3 沟槽式感应电炉的炉型及机械结构	241
3.1.4 熔沟部位炉衬蚀损状况的判断	253
3.1.5 沟槽式感应电炉的炉衬材料及其筑炉	263
3.2 感应电炉在浇注作业方面的应用	272
3.2.1 气压式及气压—塞杆式浇注电炉	273
3.2.2 塞杆底注式浇注电炉	295
3.3 双联熔炼作业	307
3.3.1 双联熔炼及其经济性	307
3.3.2 双联熔炼的形式	309
3.3.3 感应保温电炉	312
3.3.4 双联作业的熔炼特点	314
3.3.5 保温电炉容量和功率的选择	317
3.3.6 双联作业中金属液防漏	318
参考文献	321
第4章 电弧炉和炉外精炼装置	322
4.1 直流电弧炉	323
4.1.1 直流电弧的形成	323
4.1.2 直流电弧炼钢炉的构造	327
4.2 交流电弧炉	331
4.2.1 交流电弧	332
4.2.2 三相电弧炉的构造	338
4.2.3 供电与电器设备	343
4.2.4 炼钢电弧炉系列与技术指标	347
4.3 真空电弧炉	349
4.3.1 真空的作用及其应用	349
4.3.2 真空系统	350
4.3.3 真空电弧炉的主要形式	354

4.3.4 等离子熔炼炉	357
4.3.5 电子束炉	363
4.3.6 几种真空熔炼炉的技术特性比较	369
4.4 钢的炉外精炼	370
4.4.1 概述	370
4.4.2 氩氧脱碳精炼法	373
4.4.3 真空氧氩脱碳精炼法	377
4.4.4 钢包精炼法	378
4.4.5 真空氧氩脱碳转炉精炼法	380
4.4.6 等离子钢包精炼炉	381
4.4.7 电渣炉精炼熔铸	381
4.4.8 喂线精炼技术	382
参考文献	384

第 1 章 冲天炉熔炼技术及其发展

1.1 冲天炉熔炼的要点及冲天炉的基本结构

1.1.1 冲天炉的分类

冲天炉广泛应用于铸铁熔炼。冲天炉熔炼过程中，有底焦燃烧、热量传递和冶金反应等三个重要过程。冲天炉的优点很多，如设备费较低、占地面积小、能连续供应铁液、因有冶金反应而易于得到品质优良的铁液以及废钢表面的镀层对铁液品质影响不大等。冲天炉的主要缺点是铁液的化学成分和温度波动较大，且铁液的供应量不易改变、柔性不足，这类问题可由配置大容量保温电炉得以解决。因此，燃焦冲天炉迄今一直是铸铁熔炼的主要手段。近几年，以天然气、煤粉为燃料的所谓无焦冲天炉出现，由于其基本不具备冶金功能，实际上属于反射式的重熔性炉型，严格意义上的冲天炉系专指燃焦冲天炉，其分类如图 1-1 所示。

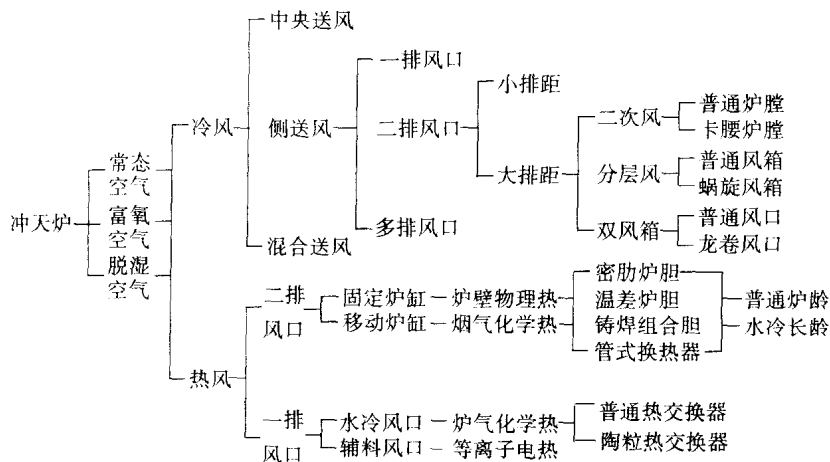


图 1-1 冲天炉的分类

1.1.2 冲天炉的基本结构

传统冲天炉结构为大家熟知，至今仍在中小铸造企业广泛的应用。但对于大批量连续生产的铸造企业，大型热风水冷无炉衬的现代冲天炉的优越性更得到充分的发挥，现代冲天炉的典型结构如图 1-2 所示。

1.1.3 冲天炉内焦炭的燃烧

冲天炉熔炼所用燃料是以焦炭为主，应该采用适合冲天炉熔炼特点的铸造焦或成形焦，由于铸造焦供应方面的问题，我国目前还有不少铸造厂采用冶金焦。焦炭的主要组成有固定碳、挥发物、含硫量、灰分和水分。我国目前铸造生产用焦炭固定碳质量分数为 80% ~ 90%，灰分质量分数为 7% ~ 13%，挥发物质量分数为 0.7% ~ 1.0%。

1.1.3.1 焦炭燃烧的热力分析

焦炭的燃烧，主要是焦炭中固定碳与空气中氧发生的化学反应。其化学反应在不同的条件下，将以不同的方式进行，见表 1-1。燃烧时进行的四种反应的自由焓、平衡常数与温度的关系，见表 1-2（表中 T 的单位为 K）。

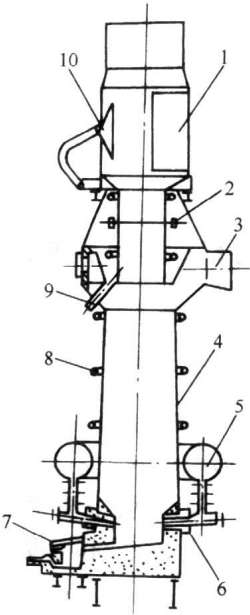


图 1-2 热风水冷无炉衬的冲天炉

- 1—加料口 2—料位计
- 3—炉气引出口 4—炉壳
- 5—风箱 6—水冷风口
- 7—虹吸式分渣器
- 8—炉壁冷却喷水
- 9—排水管 10—炉盖

表 1-1 碳的化学反应

序 号	反应方程式	热效应/ (kJ/kg)	反应条件
1	$C + O_2 = CO_2$	+ 34070	氧气充足
2	$C + (1/2) O_2 = CO$	+ 10268	氧气不足
3	$CO + (1/2) O_2 = CO_2$	+ 23802	再次供氧
4	$C + CO_2 = 2CO$	- 13534	高温缺氧

表 1-2 碳燃烧反应的自由焓、平衡常数与温度的关系

反应式	标准自由焓 ΔG° / (kJ/kmol 氧)	平衡常数 $\lg K_p$
$C + O_2 = CO_2$	$- 394648 - 4.19 T$	$(20598.8/T) + 0.059$
$2C + O_2 = 2CO$	$- 224077 - 175.7 T$	$(11695.8/T) + 9.170$

(续)

反应式	标准自由焓 $\Delta G^\circ / (\text{kJ}/\text{kmol 氧})$	平衡常数 $\lg K_p$
$2\text{CO} + \text{O}_2 = 2\text{CO}_2$	$-565218 + 173.4T$	$(29501.8/T) - 9.052$
$\text{C} + \text{CO}_2 = 2\text{CO}$	$+170821 - 174.6T$	$(8916.1/T) + 9.113$

在同一温度条件下, 反应自由焓 (ΔG°) 变化的负值越大, 则反应能够进行的可能性也就越大。而在同一温度条件下, 平衡常数 (K_p) 值越大的反应, 其进行的完全程度也越大。图 1-3 为碳—氧系各种反应的 ΔG° 、 K_p 与温度的关系:

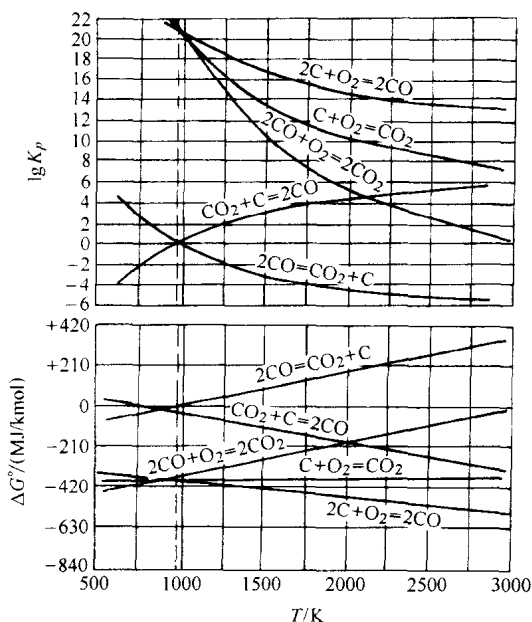


图 1-3 碳—氧系各反应的 ΔG° 、 K_p 与温度关系

(1) 当温度为 705°C (978K) 时, 燃烧的三种氧化反应的自由焓变化值相同, 即具有相同的反应趋势。

(2) 当温度低于 705°C (978K) 时, $2\text{CO} + \text{O}_2 = 2\text{CO}_2$ 反应具有最小自由焓变化值与最大的平衡常数值。因此, 在低温下 (705°C 以下) CO_2 比 CO 具有更大的稳定性。

(3) 当温度高于 705°C (978K) 时, 随着温度的升高, 还原反应

的自由焓值在不断降低，而平衡常数不断升高，这表明在高温条件下（高于 705℃），由于还原反应而生成的 CO 较 CO₂ 具有最大的热力学稳定性。

冲天炉内焦炭中固定碳的完全燃烧程度，一般总是以碳燃烧产物 CO₂ 与 CO 的体积分数的燃烧比（ η_V ）来表示，即

$$\eta_V = \frac{\varphi(\text{CO}_2)}{\varphi(\text{CO}_2) + \varphi(\text{CO})} \times 100\% \quad (1-1)$$

燃烧比（ η_V ）越高，则表示碳燃烧的完全程度越大，获得热量越多，焦炭的利用率越高。但是从碳燃烧热力学特性来看，燃烧产物中存在着 CO 是不可避免的。更重要的是在冲天炉熔炼过程中，为减少合金元素氧化，要求炉内为弱氧化性气氛，燃烧比通常应控制在 40% ~ 60% 的范围内。

1.1.3.2 燃烧的动力学分析

碳的燃烧反应是一个多相反应，例如



式中 下标 (s) ——固相；

下标 (g) ——气相。

多相反应的结果是固相碳消失，生成了新的气相。一个多相反应可分解为：扩散、吸附、反应、脱附、扩散五个环节。其中最慢的环节将决定和控制碳的燃烧速度。一般吸附速度比较快，而化学反应速度很有可能成为决定和控制碳燃烧速度的环节。气流中氧在碳表面的扩散过程如图 1-4 所示。

氧通过扩散层扩散到碳燃烧表面的流量 Q [即燃烧速度， $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$] 为

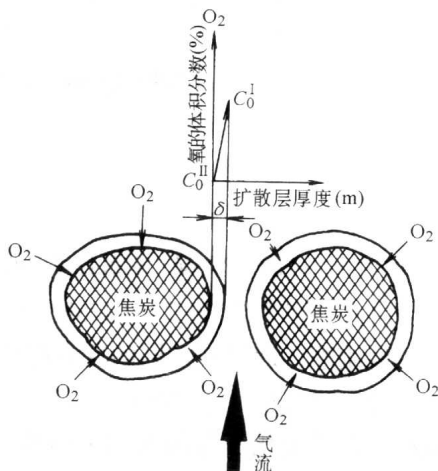


图 1-4 气流中氧在碳表面扩散过程

$$Q = \frac{C_0^I}{\frac{1}{\alpha_z} + \frac{1}{k}} \quad (1-4)$$

式中

α_z ——质量交换系数 (m/s);

C_0^I ——扩散层外氧浓度 (kg/m³);

k ——化学反应常数 (m/s)。

当 $\alpha_z \gg k$ 时, 式中 $1/\alpha_z$ 可忽略, 碳的燃烧速度受化学反应速度所限制, 可得到下式

$$Q = kC_0^I \quad (1-5)$$

式中, 化学反应常数 k 服从于阿累尼乌斯定律

$$k = k_0 e^{-\frac{E}{RT}} \quad (1-6)$$

式中 k_0 ——频率因子 (m/s);

E ——活化能 (J/mol);

R ——气体常数 (J/mol·K);

T ——碳燃烧表面温度 (K)。

此时, 碳的燃烧速度决定于化学反应速度, 称为动力燃烧。动力燃烧时, 碳燃烧的化学反应速度与氧的浓度成正比, 并随温度的提高而增加, 化学反应速度与绝对温度成指数关系。

如果 $k \gg \alpha_z$, 则式中 $1/k$ 可忽略, 碳的燃烧速度受到扩散速度限制, 可得到下式

$$Q = \alpha_z C_0^I \quad (1-7)$$

$$\alpha_z = D/\delta$$

式中 D ——质量扩散系数 (m²/s);

δ ——扩散层厚度 (m)。

根据实验, 质量扩散系数 D 与 T 的关系由下式决定

$$D = D_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^{1.7} \quad (1-8)$$

式中 D_0 ——常数。

扩散层厚度是无因次的雷诺数的函数