

流动粒子电炉概论

张培寅 编

内 容 简 介

本书根据流动粒子电炉在国内研制过程中的实践经验,对有关固体粒子流态化的基础理论应用在加热炉中的特点,炉体、供电、除尘系统的设计,筑炉和生产的操作工艺,高温作业中抗渗碳、防熔蚀的措施,以及流动粒子电炉的使用效果和展望等,作了探索性叙述。并提供了一些研制、生产中积累的有关试验、应用数据。

本书可供热处理专业、加热炉研究设计人员参考。

流动粒子电炉概论

张培寅 编

人民铁道出版社出版

责任编辑 徐仁杰

封面设计 翟 达

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

人民铁道出版社印刷厂印

开本: $787 \times 1092 \frac{1}{32}$ 印张: 5.5 字数: 122 千

1979年9月第1版 1979年9月第1次印刷

印数: 0001—7,000册

统一书号: 15043·5133 定价: 0.59 元

前 言

流动粒子电炉是一种新型金属加热炉，在近二十年来，引起了许多电炉设计人员和热处理工作者的重视，使这种运用流态化技术的加热炉得到逐步推广。它的理论研究工作逐日展开，研制和使用经验的资料搜集，渐渐成为同业人员所热望。为此，编者在参考了部分单位宝贵研究成果的基础上，将自己的学习、试验和使用心得，整理成文，想通过这册书的出版，能在我国流动粒子电炉的研究推广中起到抛砖引玉的作用，为早日实现社会主义祖国的四个现代化，作出一点贡献。

在研制工作中，罗烈保、张智钦、方寿年、苏祥钦、张正经等同志提出了宝贵意见；周秀娣、倪巧珍、朱春芳、何光华等同志协助完成了试验工作，张一鹤、张方平、金钟屏等同志详细审校了全稿，编者顺此谨向上述同志表示衷心感谢。限于编者的水平，书中一定存在着不少错误之处，诚恳地希望读者提出批评指正。

编 者

1978年11月

目 录

绪论	1
第一章 固体粒子流态化的一般概念	7
第一节 流态化技术应用的发展过程	7
第二节 流态化理想状态的形成过程	9
第二章 流化质量及影响因素	13
第一节 流化床压降的稳定性	13
第二节 影响流化床稳定性的因素	17
第三节 流化质量对传热速度的影响	19
第四节 部分术语简介	21
第三章 温度控制及流态化加热特点	28
第一节 控温质量	28
第二节 升温特性及保温温差	28
第三节 影响控温效果的因素	34
第四节 炉气	54
第四章 供电	62
第一节 流动粒子电炉电源的选择	62
第二节 电在流化床内的表现	63
第三节 供电方案简介	68
第四节 可控硅调功器的运用	77
第五章 炉体的设计	84
第一节 炉体类型简介	84
第二节 炉膛尺寸的确定	87
第三节 电极的布置和选择	89
第四节 用电功率的确定	93
第五节 流化气的选配	97
第六节 风室形式和尺寸	100

第六章 45k W 炉的设计和施工实例	103
第一节 技术指标和选型说明	103
第二节 炉体各部位尺寸的确定	105
第三节 筑炉	108
第四节 供风和用电	111
第七章 除尘	121
第一节 石墨粒子的烧损	121
第二节 石墨粉尘的飞出货量	122
第三节 除尘方式及性能简介	123
第四节 脉冲袋式除尘器	125
第八章 电炉操作过程及部分参数的测试	134
第一节 使用前的准备工作	134
第二节 耐热砂的铺放和调整	135
第三节 生产操作	137
第四节 流动粒子电炉部分理化参数的测试	138
第九章 使用效果及存在问题	149
第一节 一般效果	149
第二节 提高零件的表面质量	149
第三节 发掘材料性能延长工件寿命	151
第四节 高温熔蚀现象的探讨	154
展望	167
参考文献	169

绪 论

机械零件、刀具、工具等在制造过程中，如果放在接触空气的加热条件下加热，工件经常会发生氧化、脱碳以及变形等缺点。因此，为了提高产品质量，充分发挥钢材的成分所能提供的潜在性能，避免上述不利因素的影响，如何改进、研制更理想的加热设备，就成为热加工专业人员所关心的一项重要课题。在加热设备的改进发展过程中，真空炉、可控气氛炉、盐浴炉等加热炉，领先地受到了重视、研究和运用。直到本世纪五十年代间，一种新型、少氧化、升温快、省电、生产效率高、工件处理后质量好的无公害加热设备——流动粒子电炉，以它这些优点吸引着广大专业人员的关注。

流动粒子电炉的炉膛内，不是用熔盐或熔化了的金属作为加热介质，也不是在真空状态下加热，而是在炉膛内装上一定数量的固体小粒子（如石英砂、刚玉砂、锆砂、金属微粒、石墨粒子等粒子），从炉体底部向炉膛内供予一定流量的气体（如图1），造成固体粒子悬浮翻腾，形成类似液体沸腾一样的假液态的加热炉，在金属加热设备系列型谱中称为流动粒子炉。

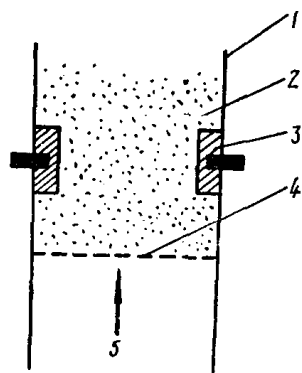


图1 流动粒子炉原理示意图
1 —— 炉壁；2 —— 固体粒子；3 —— 电极；4 —— 透气元件；5 —— 气体入口处。

流动粒子炉与其他类型浴炉一样，也分为内热式和外热式二种。图 2 a 是利用设置在炉内的电极将电能供给导电石墨粒子，石墨粒子在电场作用下，既依靠自身的电热效应发热，又依靠其本身部分燃烧所产生的热量对炉内物体加热，这种流动粒子炉，称为内热式流动粒子电炉，简称为流动粒子电炉。图 2 b 为利用加热元件间接加热于非导电体介质(如砂子、玻璃球等)的外热式流动粒子炉。

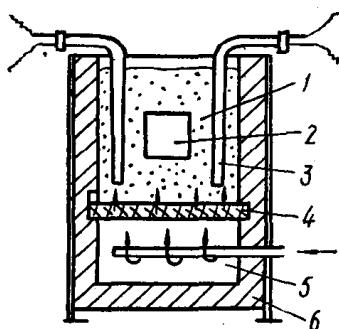
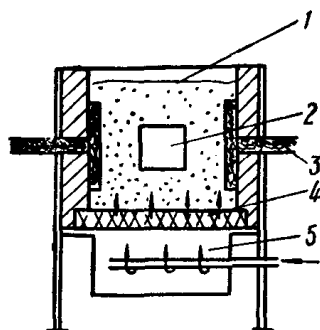


图 2-a 内热式流动粒子炉

图 2-b 外热式流动粒子炉

1 —— 固体粒子，2 —— 工件，3 —— 加热器，4 —— 透气元件，
5 —— 风室，6 —— 炉体。

除了用电作为热能以外，也有用可燃气体作为加热炉热源的，这种炉称为燃气流动粒子炉，也分为内热式与外热式两类，如图 3 a、b 所示。

此外，由于炉内供气流态化后，粒子层面形成如同水沸腾一样的状态，因而也被称之为沸腾炉、流粒炉、火云炉、电云炉。当固体粒子选用砂粒或石墨粒子物料时，也有命名为浮砂炉、石墨粒子炉的。

六十年代以来，日、英、美、法、德、瑞典、荷兰等国先后在工业生产上研究运用这类设备，多为外热式流动粒子

炉。本书将要论及的主要是类似于日本以及我国六十年代初也引起广泛重视的、利用电极供电、使粒子发热的内热式流动粒子电炉，即简称的流动粒子电炉。

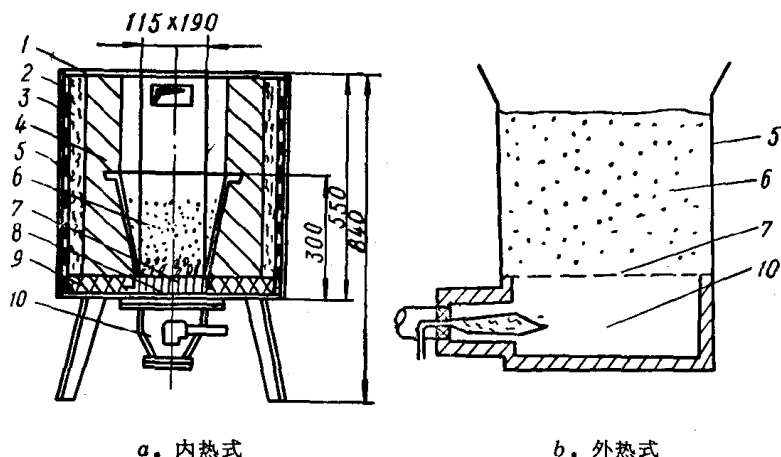


图3 燃气流动粒子炉

- 1 — 炉面板； 2 — 石棉板； 3 — 蛭石粉； 4 — 耐火砖；
5 — 炉体； 6 — 固体粒子； 7 — 透气元件； 8 — 炉底板；
9 — 耐火水泥； 10 — 燃料气混合风室。

流动粒子电炉与盐浴电炉主要参数的比较从表1中可以看出它的一些特点。

诚然，假液态作业的流动粒子电炉，与常见熔液炉相比，也有会产生溢流的缺点，而且操作电压多在32伏特以上。但是，由于这种炉子处理后的工件表面质量较好，而且具有炉膛升温快、炉龄长、操作方便、节电等长处，所以近年来，研制者甚为踊跃。戚墅堰机车车辆工厂设计投产后的（如图4）三台流动粒子电炉，进一步证明这种炉子具有污染小、控温方便精度高、高温（1300°C）寿命长等特点。

戚墅堰机车车辆工厂的流动粒子电炉采用独管单风室对透气砖均匀供气的结构（见图5），炉膛上部砌有局部小倾



图4 三台100kW流动粒子电炉高温生产使用实况

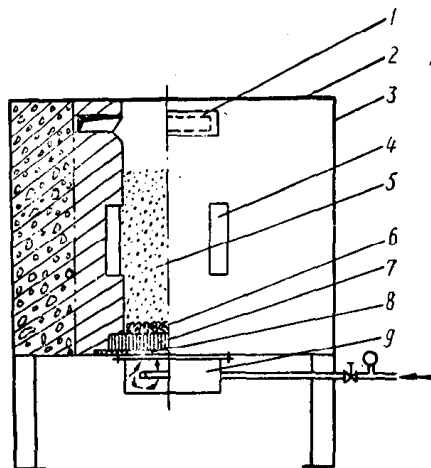


图5 威厂研制的流动粒子电炉炉体示意图

- 1 —— 吸风罩；2 —— 炉面板；3 —— 炉体；4 —— 石墨电极；
5 —— 石墨粒子；6 —— 刚玉砂；7 —— 透气砖；8 —— 炉缝泥
浆；9 —— 风室。

角扩展式安息角，两电极侧壁上安装着除尘抽风罩；使用三相桥式半波整流可控硅调功器直流供电，(带PID调节器)；除尘采用脉冲反吹袋式可回收石墨粒子再用的干式除尘器。

这种炉的具体设计、筑炉、运用等情况将在本书各章中分别予以讨论。

流动粒子电炉与盐浴炉对比

表 1

项 目 \ 炉 别	盐 浴 炉 (工作炉膛300× 300×450毫米)	流动粒子电炉 (工作炉膛300× 300×450毫米)
炉体造价 (元)	1500	900
最高工作温度 (℃)	1300	1300
设备灵活性	高、中、低温分设	150~1300℃ 任意
从室温升温至1280℃所需时间 (min)	300~400	35~75
升温过程总用电量(kW·h)	352	37.7
在1300℃时保温平均耗电量 (kW)	27.5	22.10
对工件的影响	粘盐、有侵蚀	表面光洁、少侵蚀
在900℃保温时的平均耗电功率 (kW)	15~17	8~10
介质损耗 (kg/h)	0.6~0.8	(在1300℃时)2±0.5
操 作 情 况	1. 要启动电极、工件要烘干 2. 盐浴要脱氧 3. 淬火后要去盐 4. 炉墙电极腐蚀大 5. 盐汽有毒、劳动条件差	1. 工件带水入炉不会爆炸 2. 淬火后表面光洁 3. 可任意调节温度 4. 开、关炉方便、劳动条件好 5. 炉墙及电极寿命长

本书常见物理量的换算

量的中文含义	单 位 名 称	代 号	进 位
长 度	米	m	1
	厘米	cm	1×10^2
	毫米	mm	1×10^3
	微米	μ	1×10^6

续上表

量的中文含义	单 位 名 称	代 号	进 位
重 量	公斤	kg	1
	克	g	1×10^3
	毫克	mg	1×10^6
容 量	升	l	1
	毫升	ml	1×10^3
时 间	小时	h	1
	分	min (m)	60
	秒	sec(s)	36×10^2
流 量	米 ³ /小时	m ³ /h	1
	米 ³ /秒	m ³ /s	0.278×10^{-3}
	升/秒	l/s	0.2778
压 力	大气压	atm	0.9678
	工程气压	kg/cm ²	1
	水柱高	mmH ₂ O	10334
	汞柱高	mmHg	760
能 量	千瓦·小时	kW·h	1
	千卡	kcal	860
电 流	安培	A	1
	微安	μA	10^6
电 压	伏特	V	1
	毫伏	mV	10^3
电 阻	欧姆	Ω	1
	微欧	$\mu \Omega$	10^6

第一章 固体粒子流态化的一般概念

第一节 流态化技术的发展过程

“流态化”，是指固体粒子受到流体浮力的作用后，悬浮起来，粒子在流体推力的携带下作相互分离、上下、左右碰撞运动的过程。又叫作流化、假液化、沸腾过程等。

我国劳动人民对于自然界的流化现象，在公元前三十年代就懂得了，并研制出专用设备用于鼓风筛选谷物、浮选法淘金等，形成了利用风力、水力流化固体粒子的古典流态化技术。

但是，流态化技术在工业上的大规模应用，是二十世纪初才开始的。1921年，德国第一台流化床煤气发生炉——温克勒气体发生炉问世。1948年，美国建立的大型浮砂床干燥器，显示出了流化床设备生产力大、效率高等优点（这台干燥器直径1.73米，每小时可处理50吨矿石。）。

因为流态化设备生产能力大、效率高、可控因素多，很快在化工、石油、机电、塑料、航空、食品、原子能和冶金工业部门引起重视。美国通用电气公司与波音航空公司（——1961年），英国的梅特威公司与大卫联合公司（——1967年），西德的西罗曼公司和日本神户钢铁公司（——1967年），先后发表外热式流动粒子炉的研究报导。1961年，日本国际电气株式会社发表内热式流动粒子电炉（又称火云炉）的研究成果，它是较早的以石墨等含碳导电粒子作为发热体兼作传热介质的，用于金属热处理的工业加热炉。苏联杂志《金属学与热处理》1971年第六期选载了一些有关

流态化技术在热处理方面应用的文章，报导了小型内热式流动粒子电炉试验情况。法国在1973年第7期《科学技术》杂志上还综合性地介绍了流动粒子炉在淬火、回火、化学热处理等方面的运用实例。

我国流动粒子炉的研究工作，在1963年中国机械工程学会热处理学会成立大会上被介绍出来之后，1970年，戚墅堰机车车辆工厂发表了“电云炉”的研制成果报导。尔后，这个厂研制的我国第一台内热式流动粒子电炉，于1974年8月获得交通部科学技术委员会的技术鉴定证书。

随着现代化生产的需要，我国工业上相继出现采用三相交流、低电压交流、液化石油气、金属气帽、玻璃丝布、焦宝石耐火纤维、多层砂砾等各式各样的流动粒子炉；使流态化技术在金属热处理中的应用，犹如百花迎春，茁壮成长。

图6，即为我国一个生产厂于1975年10月开始供货的一种商品炉——RL系列流动粒子电炉炉体及气泵的照片。

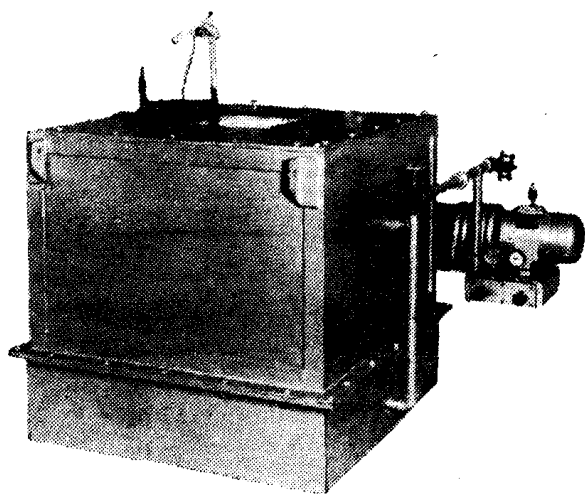


图6 RL系列商品流动粒子电炉炉体及气泵外形

第二节 流态化理想状态的形成过程

水烧开了的翻滚沸腾现象，在流态化技术上叫做流态化，只是习惯上称其为沸腾。同理，在流态化技术上，不仅液、气体翻滚沸腾的运动现象被叫做流化，对于固体粒子被气体、液体喷吹时呈现悬浮运动的状态，也称为流化。这种悬浮运动着的固体-气体混合物相层，也被叫作假液化、流化床、沸腾层等等。相对于流化床来说，在供气中止后形成的下沉堆积的固体粒子料层（当然，料层中仍含有一定的气体），就命名为固定床。

为了便于掌握流态化的机理，先须了解固定床与流化床在流态化中的理想实验形成过程，以便介绍它们的特性。

一、固定床

当气流经过透气元件进入炉膛后，对石墨粒子产生浮力 F_1 和推力 F_2 （图 7）。浮力 F_1 较小可忽略不计。推力 F_2 ，则随气体流速的增大而增大。当进入炉膛的气体流速不大，所产生的推力还不足以使石墨粒子发生运动，仍处于静止状态；而气流则穿过石墨粒子间的空隙逸出。这时出现的现象如图 8a 所示，床面并不发生膨胀现象，床层深度 h_0 也不增高。这时气体流速 (ω) 和气体压降 (ΔP) 的变化关系如图 9 中 A-B 线段所示。炉膛

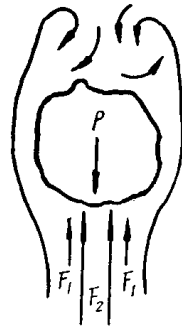


图 7 粒子受力情况

中石墨粒子与气流的相对关系处于上述范围内的粒子料层状态，统称为固定床。

在固定床内，粒子床料中的每一颗粒子都占有一定的容积，粒子与粒子之间形成的空隙，也占有一定的空间。空隙

所占有的床层空间与粒子料层所占床层的容积之比的百分数

($\varepsilon\%$)，叫做空隙率， $\varepsilon = \frac{\text{粒子间空隙体积}}{\text{粒子床料层总体积}}\%$ 。固定床的

空隙率随粒子的大小、排列、形状系数等的不同而异。

二、流化床

随着送入床层的气体流速增大，推力 F_2 也逐步增大。当流速增大到 ω_1 时(图9)， $F_2 = P$ ，石墨粒子将被气流托起，这时可以观测到粒子料层与炉墙发生相对移动，床面上升，床层厚度微微增加，出现膨胀现象。床层膨胀程度的大小，随各种粒子的性质、大小、粒度均匀性的不同而变化。在 $300 \times 300 \times 450$ 毫米的炉膛内用50目石墨粒子试验的结果，石墨粒子流化床能见的膨胀度为 $5 \sim 11.8\%$ (图8b)。

当气体流速超过 ω_1 继续提高到 ω_f 时， ΔP 稍有下降(图9相应点C)， $F_2 > P$ ，石墨粒子被流体吹成悬浮状态，

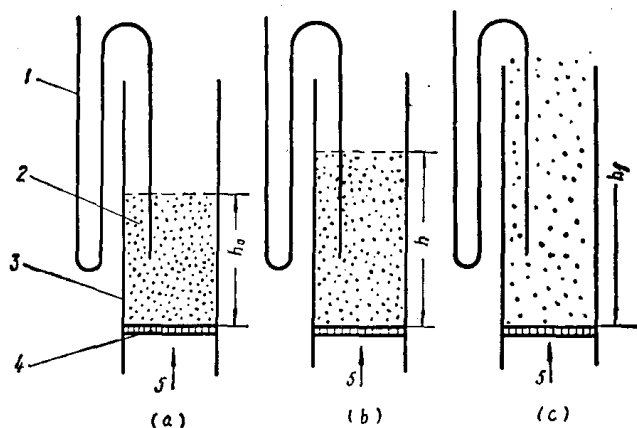


图8 粒子床随气流变化的示意图

a——固定床 b——流化床 c——飞散床

1——压力计；2——固体粒子；3——炉池；4——透气元件，
5——流化气体。

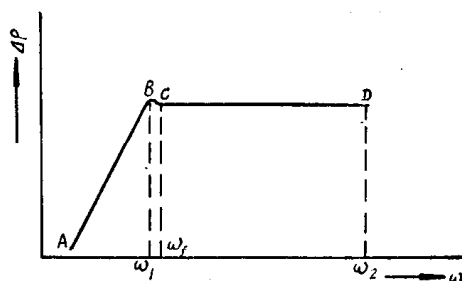


图9 理想的粒子层流化过程 $\Delta p - \omega$ 关系

粒子开始互相冲击、混合、自由流动，整个床层呈现流态化状态。图9中B点是固定床的终点，C点是流化床的起点。在实际的宏观状态中，B、C两点的界线是不明显的。因此，一般可将B点作为流态化的临界点。相应于B点的供气流速叫作临界流速；气体流量叫作临界流量；粒子料层空隙率叫作临界空隙率。

气体流速继续加大，超过临界流速以后，除膨胀程度稍有增加外，压降和流化状态均保持不变，如图9中CD线段所示。流速进一步增加超过 ω_2 时（相应点D）石墨粒子将被气流吹出炉膛（图8c）。可见，为使石墨粒子从固定床变为流动床，供气的流速应在 ω_1 至 ω_2 之间。

将炉膛内固体粒子层全部托起所需的压降（ $\Delta P_{\text{总}}$ ）可从下式求出：

$$\Delta P_{\text{总}} = \frac{\text{固体粒子层总重量}}{\text{床层截面积}} \quad (1-1)$$

因此，床层截面上单位面积的力平衡关系，可用下式表达：

$$\Delta P = h \cdot (1 - \varepsilon) \cdot (\gamma_s - \gamma) \quad (1-2)$$

式中 ΔP ——床层流化所需之气体压降〔公斤/米²〕；

- h —— 床层深度[米]；
 ε —— 床层临界空隙率；
 γ_s —— 固体粒子重度[公斤/米³]；
 γ —— 供气重度[公斤/米³]。

临界流速可直接用实验装置（图12）测出外，也可用下述经验公式推算：

$$\omega_{\text{临}} = 0.00923 \frac{d_p^{1.82} (\gamma_s - \gamma)^{0.94}}{\mu^{0.88} \cdot \gamma^{0.06}} \quad (1-3)$$

- 式中 $\omega_{\text{临}}$ —— 临界流速[米/秒]；
 d_p —— 粒子平均直径[米]；
 μ —— 气体动力粘度 [公斤·秒/米²]；
 γ_s —— 粒子重度 [公斤/米³]；
 γ —— 气体重度 [公斤/米³]；

上式的平均偏差为 $\pm 22\%$ 。

图10是用压降—流速的关系表达了上述流化床的形成过程和特性关系的形象。通过以上固定床、流化床形成过程的分析，可以掌握固体粒子流态化机理的基本概念。

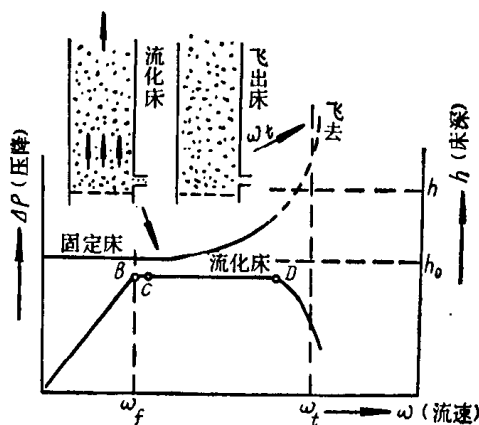


图10 流态化特性关系