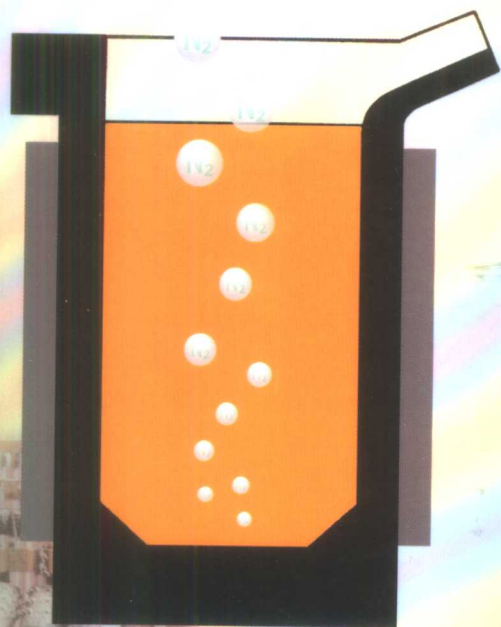


感应炉熔炼与 特种铸造技术

唱鹤鸣 杨晓平 张德惠 等著



冶金工业出版社

1024990

感应炉熔炼与特种铸造技术

唱鹤鸣 杨晓平 张德惠 等著

北 京

冶 金 工 业 出 版 社

2002

内 容 简 介

本书简要介绍了感应炉的熔炼原理及各种感应炉熔炼设备,所用各种原材料及铸造操作过程。重点讨论了感应炉熔炼过程中的钢液脱氮,包括真空感应炉脱氮,非真空感应炉脱氮,熔渣脱氮,脱氮剂脱氮;金属型离心铸管原理及设备,离心半连续铸管机设计原理、设备及操作过程;熔模精铸技术,铸型的设计、制作,特别是新型黏结剂的开发,仿古艺术品的制作技术及成型过程。本书可供从事感应炉冶炼和特种铸造的科技人员、操作人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

感应炉熔炼与特种铸造技术/唱鹤鸣等著 — 北京:
冶金工业出版社,2002.1
ISBN 7-5024-2913-1

I. 感… II. 唱… III. ①感应熔炼 ②感应加热
熔铸成型 IV. TF111.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 080211 号

出版人 曹胜利(北京沙滩嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009)
责任编辑 赵培德 美术编辑 王耀忠 责任校对 白 迅 责任印制 李玉山
北京印刷一厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销
2002 年 1 月第 1 版,2002 年 1 月第 1 次印刷
850mm×1168mm 1/32;10.5 印张;281 千字;326 页;1-2000 册
24.80 元
冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893
冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100711) 电话:(010)65289081
(本社图书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

前 言

特种冶炼是生产不锈钢、高温合金、精密合金等高级合金的特殊而有效的方法。感应炉冶炼是特种冶金中最常用的一种冶炼工艺。感应炉在实验室、机械厂、冶金厂、材料厂应用非常广泛,从十几名职工的小工厂,到几万名职工的大工厂,都可见到感应炉。感应炉一般除实验冶炼外,多数是和特种铸造工艺联系在一起的。有先进的造型工艺,才能最大限度地发挥感应炉的作用。特种铸造是除砂型以外的铸造工艺,是生产高附加值合金铸件的先进加工技术。离心铸造、熔模精铸是特种铸造中较常用的方法。感应炉特种熔铸是较复杂的一种材料加工技术。它需要多方面的理论知识,如冶金学,金属凝固学,机械学,材料学和无机化学等,更需要实践中总结出的各种经验,这样才能不断提高生产合金铸件的成品率及质量。

根据我们多年在感应炉特种熔铸过程中的实践体会,在重点介绍最新研究成果的同时,有必要介绍一些感应炉的基本知识,这样对阅读本书的人在生产实践中大有益处。本书第1章介绍了感应炉的工作原理,设计原则,各种类型的感应炉熔炼设备及设备的特点,特别是介绍了感应炉冶炼设备中最新炉型。第2章介绍了感应炉熔炼的一般原理,对合金原料、配料、筑炉技术、各种感应炉熔炼的操作要点等作了较为详细的介绍。这些数据是非常有实用

2 Apr 1964

价值的。第3章详细介绍了铁液、钢液的脱氮过程及结果。电炉钢脱氮是一个较难的课题。真空感应炉脱氮技术现已成熟,但非真空感应炉脱氮技术不十分成熟,效果不十分理想,有待深入研究。本章重点介绍了近十年来的研究成果,主要包括在有渣条件下真空脱氮、真空下吹气脱氮、熔渣下真空吹气脱氮、熔渣脱氮、大气条件下新生CO气泡脱氮等多种脱氮方法、原理和结果。在钢液脱氮理论及实践研究过程中,自始至终得到北京科技大学傅杰教授具体指导。第4章介绍了多种离心铸管工艺中的一种——金属型铸管。重点介绍了离心铸管、离心半连续铸管工艺。我们从1990年开始研究离心半连续铸管工艺,已设计出第三代机型。第5章介绍了熔模精铸。熔模精铸工艺是特种铸造中最复杂的工艺之一。新型黏结剂的开发,并在生产中获得了应用,仿古艺术品的研制和制作成功,给我们带来了许多快乐。

本书1、3章由唱鹤鸣撰写,第2章由邹开云撰写,第4章由张德惠撰写,第5章由杨晓平撰写。本书中的研究项目得到国家自然科学基金委员会(项目号59774013)、教育部(2000年高等学校骨干教师资助计划)、辽宁省教育厅(重点资助项目号9710121006)的资助,在此表示感谢。

由于作者学识有限,书中不妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

作 者

2001年12月1日

目 录

1 感应炉工作原理及设备	1
1.1 感应加热基础	1
1.1.1 感应加热原理	1
1.1.2 感应电流的分布	2
1.1.3 感应加热的电流频率	6
1.1.4 电磁力的作用	7
1.2 晶闸管变频原理及线路	9
1.2.1 晶闸管	9
1.2.2 晶闸管变频原理	12
1.3 中频发电机工作原理	15
1.4 感应加热装置的设计规则	17
1.5 感应炉的设计	18
1.5.1 感应器的设计	19
1.5.2 磁轭的设计	20
1.5.3 炉体倾侧力矩的计算	20
1.5.4 冷却水系统的设计	23
1.6 工频感应炉熔炼设备	26
1.6.1 炉体部分	26
1.6.2 电气部分	26
1.6.3 液压传动系统	29

1.6.4	水冷系统	30
1.7	中频感应炉熔炼设备	31
1.7.1	中频感应炉的主电路及其电源	31
1.7.2	中频感应炉的炉体结构	33
1.8	高频感应炉熔炼设备	34
1.9	真空感应炉熔炼设备	36
1.9.1	真空感应炉的电源	36
1.9.2	真空感应炉的炉体结构	37
1.9.3	真空感应炉的真空系统	39
1.10	等离子感应炉熔炼设备	42
1.10.1	等离子感应炉的工作原理	43
1.10.2	等离子感应炉的结构	44
1.11	电渣感应炉熔炼设备	48
1.11.1	电极升降机构	48
1.11.2	电渣熔炼的电源	51
2	感应炉熔炼原理及工艺	53
2.1	感应炉熔炼特点	53
2.2	感应炉熔炼的物理化学过程	55
2.2.1	元素的氧化与脱氧	55
2.2.2	合金的脱硫	59
2.2.3	非金属夹杂物的去除	63
2.3	感应炉熔炼合金的原料及配料	64
2.3.1	钢铁原料和返回料	64
2.3.2	常用合金元素及其铁合金	65
2.3.3	造渣材料	73
2.3.4	感应炉熔炼配料计算方法	74
2.4	感应炉坩埚制备	79
2.4.1	感应炉坩埚的材质	79
2.4.2	感应炉坩埚的成型	81
2.4.3	感应炉坩埚的烧结	87
2.5	工频感应炉熔炼	92
2.5.1	工频感应炉熔炼铸铁的基本工艺	92

2.5.2 工频感应炉熔炼的节能措施	97
2.6 中频感应炉熔炼	99
2.6.1 碱性坩埚熔化法熔炼工艺	99
2.6.2 碱性坩埚氧化法熔炼工艺	102
2.6.3 酸性坩埚熔炼工艺	103
2.6.4 中频感应炉熔炼用渣	105
2.7 高频感应炉熔炼	106
2.8 真空感应炉熔炼	107
2.8.1 真空感应炉熔炼工艺	108
2.8.2 真空感应炉熔炼过程中元素的挥发	111
2.9 等离子感应炉熔炼	113
2.9.1 等离子感应炉的冶金特点	114
2.9.2 等离子感应炉熔炼工艺	115
2.10 电渣感应炉熔炼	118
3 感应炉钢液脱氮的研究	121
3.1 氮在钢及合金中的作用	122
3.1.1 氮的有益作用	122
3.1.2 氮在钢及合金中的有害作用	123
3.2 氮在钢及合金中的溶解度	126
3.2.1 氮在纯铁中的溶解度	126
3.2.2 氮在钢及合金中的溶解度	128
3.3 钢及合金脱氮方法及物理化学原理	132
3.3.1 原材料中除氮	132
3.3.2 熔渣脱氮	133
3.3.3 真空脱氮	143
3.3.4 气泡携带法脱氮	146
3.4 真空感应炉脱氮	147
3.4.1 熔渣下钢液真空脱氮	147
3.4.2 对几个问题的讨论	154
3.4.3 钢液真空吹气脱氮动力学	164
3.4.4 熔渣下钢液真空吹氩脱氮动力学	188
3.5 非真空感应炉脱氮	195

3.5.1	熔渣脱氮	195
3.5.2	吹气产生 CO 气泡脱氮	195
3.5.3	脱氮剂脱氮	199
4	感应炉离心铸管	200
4.1	离心铸管原理	201
4.1.1	作用于液体金属的离心力和压力	201
4.1.2	液体金属中非金属夹杂物的去除	203
4.1.3	离心铸管时金属凝固的特点	204
4.1.4	铸型转速的选择	206
4.2	水冷金属型离心铸管工艺及设备	209
4.2.1	水冷金属型离心铸管机	210
4.2.2	水冷金属型离心铸管机的操作过程	217
4.2.3	水冷金属型离心铸造球墨铸铁管工艺流程	221
4.2.4	金属型使用寿命的影响因素及延长寿命的措施	222
4.3	离心连续铸造	228
4.3.1	管坯的离心连铸	228
4.3.2	离心半连续铸管	236
4.4	感应炉熔炼对离心铸管工艺和产品性能的影响	246
4.4.1	利用感应炉熔炼使铁水达到离心铸管的要求	246
4.4.2	温度对感应炉炉衬和铁水化学成分的影响	248
5	感应炉熔模铸造	251
5.1	压型与软模具	253
5.1.1	压型与软模具的分类和选择	253
5.1.2	压型的主要结构	257
5.1.3	压型的型腔尺寸与表面粗糙度	259
5.2	模料与制模工艺	261
5.2.1	对模料的性能要求	261
5.2.2	常用的模料原材料	262
5.2.3	模料的种类	263
5.2.4	常用模料的配制	266
5.2.5	制模工艺	268
5.3	制壳与制型工艺	269

5.3.1 制壳与制型耐火材料	270
5.3.2 水玻璃黏结剂及制壳工艺	273
5.3.3 硅酸乙酯黏结剂及制壳工艺	277
5.3.4 硅溶胶黏结剂及制壳工艺	283
5.3.5 石膏型制型工艺	285
5.3.6 磷酸铝黏结剂及制型工艺	288
5.3.7 脱模	290
5.3.8 焙烧	291
5.4 熔模铸件的工艺设计	294
5.4.1 铸件结构工艺性的分析	294
5.4.2 工艺参数的确定	295
5.4.3 浇冒口系统的设计	298
5.5 真空感应炉熔模精铸高温合金件	301
5.5.1 高温合金件的型壳制作	302
5.5.2 高温合金件的真空感应炉熔炼	303
5.5.3 铸件的质量控制	305
5.6 感应炉熔模精铸艺术品	310
5.6.1 工艺方案的确定	310
5.6.2 铜及铜合金的感应炉熔炼	315
5.6.3 艺术品的表面着色处理	323
参考文献	326

1 感应炉工作原理及设备

1.1 感应加热基础

1.1.1 感应加热原理

感应加热原理主要是根据法拉第电磁感应定律和电流热效应的焦耳—楞茨定律。

当任一导体通过交流电时,电流在它的周围空间和导体内部激发出交变磁场。在空间所有各点,只要有变化的磁场,都有电场存在。在充满交变磁场的空间,同时也充满交变电场,这两种场总是相互联系共同生存,形成电磁场。法拉第在 1831 年就发现了电磁感应现象:当通过导电回路所包围的面积 of 的磁场发生变化时,此回路中就会产生电势,此种电势称为感应电势,当回路闭合时,则产生电流。在闭合回路中所产生的感应电动势的大小和穿过该回路的磁通量的变化率成正比。

法拉第电磁感应定律的数学表达式为:

$$E = - \frac{d\varphi}{dt} \quad (1-1)$$

式中 E ——闭合回路中的感应电动势瞬时值, V;

φ ——磁通量数, Wb;

t ——时间, s。

如果感应回路是串联 N 匝时,并且通过每匝的磁通量是相同的,则有 $\varphi = N\Phi$ 。其中 Φ 为磁通量,单位是 Wb。

当感应电流在闭合回路内流动时,自由电子要克服各种阻力。于是,必须消耗一部分能量做功即克服导体的电阻,使一部分电能转换成热能。焦耳—楞茨定律表述为:电流通过导体所散发的热

量与电流的平方、导体的电阻和通电时间成正比。其数学计算公式为：

$$Q = I^2 R t \quad (1-2)$$

式中 Q ——导体的发热量；

I ——感应电流；

t ——电流通过导体的时间。

电磁感应现象和电流的热效应为感应加热方法提供了物理基础。

1.1.2 感应电流的分布

感应电流在炉料中的分布特征,对冶炼时电源频率的选择、炉料块度的选择、炉料熔化速度等都有非常重要的意义。电流在炉料中的分布主要有集肤效应、邻近效应和圆环效应。

交变频率的电流通过导体时,电流沿导体的横断面分布是不均匀的。电流密度由表面向中心依次减弱,即电流有趋于导体表面的现象,这种现象称为电流的集肤效应。

被加热物体中除了电源所建立的电场外,它本身流过的感应电流所建立的交变磁场又产生一个方向相反的电场,即被加热物体中产生与外加电势方向相反的反电势。在被加热物体的内部几层,穿透的磁通最多,感应出的反电势也最大;在外面几层,穿透的磁通较少,感应出的反电势也较小。因此,在加热物体表面的合成电势要比最里面几层的电势大得多,这就是引起表面效应的根本原因。

感应电流绝大部分集中于表面,电流密度从表面向里近似按指数曲线迅速衰减,如图 1-1 所示。在与表面距离为 x 处的电流密度可用下式表示:

$$I_x = I_0 e^{-x/\delta} \quad (1-3)$$

式中 I_x ——距物体表面 x 处的电流密度, A/cm^2 ;

I_0 ——导体表面的电流密度, A/cm^2 ;

x ——表面到测量处的距离, cm ;

δ ——电流透入深度, cm ;

e —自然对数的底。

当 $x = \delta$ 时, $I_x = I_0 e^{-1} = 0.368 I_0$ 。由此可知, 电流透入深度就是从电流降低到表面电流的 36.8% 的那一点到导体表面的距离。从图 1-1 中看出距表面 5 倍透入深度处的电流接近于 0。

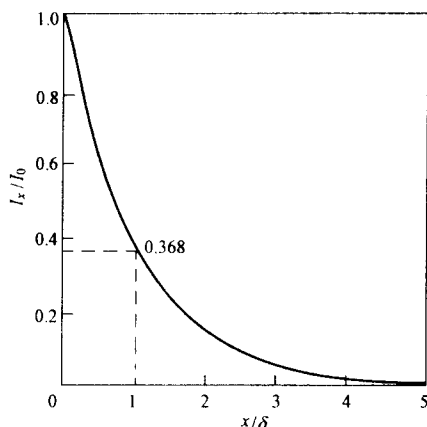


图 1-1 感应电流的分布曲线

电流透入深度用下式计算：

$$\delta = 5030 \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}} \quad (1-4)$$

式中 ρ ——被加热物体电阻率, $\Omega \cdot \text{cm}$;

μ ——被加热物体的相对磁导率;

f ——电流频率, Hz。

根据理论计算, 在感应加热时, 86.5% 的功率是在电流透入深度内转化为热能的。表 1-1 列出了几种常用材料的电流透入深度。

炉料的最佳尺寸范围和电流透入深度有一定关系。因为炉料中的感应电流主要集中在透入深度层内, 加热炉料的热量主要由表面层供给。为使炉料整个横断面得到相同的温度, 需要靠热传导来实现。这就需一定的时间, 随加热时间的延长, 炉料向周围介质散失的热量增多, 从而热效率下降。如果透入深度和炉料几何

尺寸配合得当,则加热需要的时间短,热效率高。对圆柱形金属材料,当直径 d 和透入深度 δ 的比值为 3.5 时总效率最高,见图 1-2。以 45 钢为例,表 1-2 给出了不同频率下透入深度与最佳炉料直径的关系。一般来说,当炉料直径为电流透入深度的 3~6 倍时可得到较高的总效率。

表 1-1 几种材料的电流透入深度

频率 f/Hz		电流透入深度 δ/cm				
		50	500	1000	3000	10000
碳钢(磁性区)	21℃	0.64	0.14	0.084	0.042	0.019
	300℃	0.86	0.19	0.122	0.058	0.026
	600℃	1.30	0.29	0.180	0.090	0.040
碳钢(非磁性区)	800℃	7.46	2.37	1.67	0.96	0.53
	1250℃	7.98	2.53	1.97	1.03	0.56
	1550℃(熔化)	9.00	2.85	2.01	1.16	0.64
铜	50℃	1.01	0.32	0.23	0.13	0.071
	850℃	1.95	0.62	0.44	0.25	0.14
	1250℃(熔化)	3.30	1.04	0.74	0.43	0.23
黄铜(铜含量为 65%)	650℃	2.52	0.79	0.56	0.33	0.18
	1000℃(熔化)	4.57	1.44	1.02	0.59	0.32
铝	常温	1.07	0.37	0.26	0.14	0.08
	450℃	2.01	0.64	0.45	0.26	0.14
	750℃(熔化)	3.70	1.17	0.83	0.48	0.26

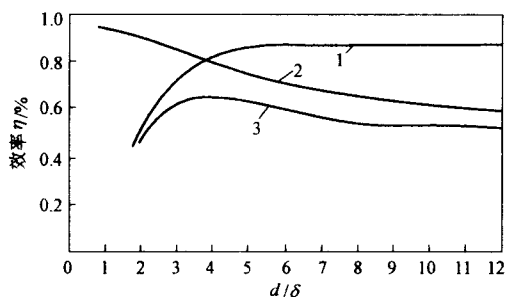


图 1-2 感应加热总效率和 d/δ 的关系

1—电效率;2—热效率;3—总效率

表 1-2 45 钢最佳炉料尺寸与电流频率的关系

项 目	电流频率 f/Hz					
	50	150	1000	2500	4000	8000
透入深度 δ/mm	73	42	16	10	8	6
最佳炉料直径 d/mm	219~438	126~252	48~96	30~60	24~48	18~36

当两根有交流电的导体相互靠近时,两导体中的电流要做重新分布,这种现象叫邻近效应。邻近效应的结果,使两个方向相反的电流通过两平行的导体时,导体外侧的电流密度较内侧小(图 1-3a)。当两个方向相同的电流通过两平行导体时,导体内侧的电流密度较外侧的小(图 1-3b)。

当交流电通过螺线管线圈时,则最大电流密度出现在线圈导体的内侧,如图 1-4 所示,这种现象叫圆环效应。

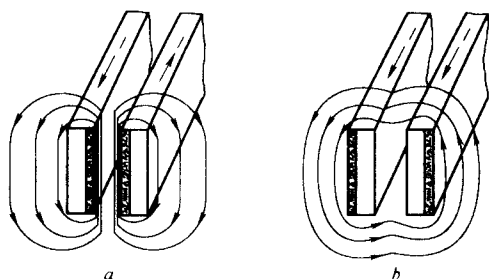


图 1-3 高频电流在平行放置的导体中的分布
a—导体中的电流方向相反;b—导体中的电流方向相同

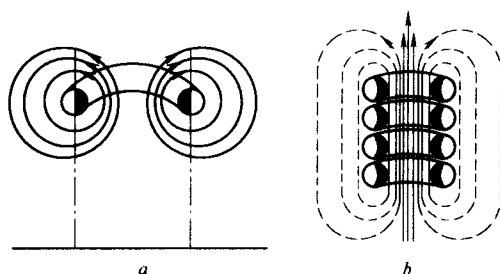


图 1-4 高频电流在线圈中的分布
a—圆截面导体的环形效应;b—绕成线圈的情况

感应电炉加热是这 3 种效应的综合,感应器两端施以交流电后,产生交变磁场,感应器本身表现为圆环效应,感应器与金属间为邻近效应,被加热金属表现为集肤效应。

1.1.3 感应加热的电流频率

用于感应加热的电流频率可在 50Hz~10MHz 范围。选择频率的重要依据是加热效率和温度分布。熔炼工艺要求加热温度均匀,同时考虑功率密度和搅拌力。频率高的电源设备价格较贵。因此,选择电源频率最终需考虑综合经济技术指标。

感应线圈加热坩埚中金属,金属得到的单位有功功率用下式表示:

$$P = 2 \times 10^{-4} k (I\omega)^2 \sqrt{\rho\mu f} \quad (1-5)$$

式中 P ——被加热金属物体单位表面接收的功率, W/cm^2 ;

I ——感应器中的电流, A;

ω ——感应器 1cm 长度上的匝数;

k ——小于 1 的修正系数。

从公式 1-5 看出,感应器内电流保持不变时,电流频率越大,单位面积的金属接收功率越高,即热效率高。 k 与 $\frac{D}{2\delta}$ 成正比关系, $\frac{D}{2\delta}$ 增大, k 值增大,其中 D 为被加热物体直径;当 $D/\delta = 8$, $k = 0.65$;当 $D/\delta \geq 20$ 时, $k = 1$;当 $D/\delta < 8$ 时, k 值迅速减小。

在考虑热效率同时,也要考虑加热时的温度分布。当感应加热圆柱形导体时,由于集肤效应,只有表面会快速升温,而中心部分则需靠热传导,从表面高温区向内部低温区传导热量。表面与中心的温差 ΔT ,可用下式表示:

$$\Delta T = 25 \times \frac{D}{K_c} K_t (P_0 - P_r) \quad (1-6)$$

式中 K_c ——被加热物体的热导率, $W/(m \cdot K)$;

K_t ——小于 1 的修正系数;

P_0 ——被加热物体的表面功率, W/cm^2 ;

P_r ——被加热物体的散热损失, W/cm^2 。

从式 1-6 中可知, ΔT 与 K_t 有关, K_t 与 $\frac{D}{2\delta}$ 有关, 当 $\frac{D}{2\delta}$ 增大, K_t 值迅速增大。当 $\frac{D}{2\delta} = 8$ 时, 仅与 $(P_0 - P_r)$ 有关。 ΔT 越小, 工作温度趋于均匀, 有利于提高电效率。

因为 $\frac{D}{2\delta}$ 与热效率成正比, 与电效率成反比, δ 与 f 有关, 所以, 为提高感应加热的总效率, 频率与炉容有个合适的关系。这种关系列于表 1-3。

表 1-3 感应炉频率与炉子容量关系

频率/Hz	50~60	150~180	500	1000	3000	10000
炉子容量/t	0.7~450	0.18~120	0.04~22	0.015~8	0.003~1.60	0.001~0.3

1.1.4 电磁力的作用

感应加热金属时, 强大的变频电流经感应线圈产生很强的磁场, 产生电磁力。被熔化的金属受到电磁力的作用产生强烈搅拌。根据电流通过两导体产生的邻近效应, 感应线圈中电流与熔化金属中的感应电流方向相反, 线圈与铁液之间有斥力, 线圈受到向外推力, 熔化金属则受到坩埚中心的径向作用力, 如图 1-5 所示。熔化金属之间, 可以看成很多同方向平行载流导线, 相互间有压缩力, 力的方向如图 1-5 所示。铁液受斥力和压缩力合成作用结果, 使熔化金属产生如图 1-5 所示的方向运动, 这种运动称电磁搅拌。

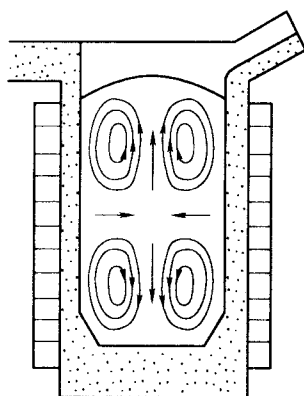


图 1-5 感应炉内液态金属运动方向