

↑
新材料新工艺丛书

TG174.44
Z36

高效快速感应熔涂技术

张增志 著

北 京

冶金工业出版社

2001

内 容 提 要

本书讨论了高频感应熔涂工艺及涂层特性。所讨论的预涂层是采用无机黏结剂将自熔性合金粉末直接黏结在基体上。

本书从电磁学和热传导的角度讨论了熔涂过程中的涡流和温度分布。通过分析感应器的电磁效应以及涂层熔化的特定要求,得出了感应器优化设计所应遵循的原则,设计了外圆和内圆感应器。通过理论分析和试验研究,得出了优化的工艺参数,制备了质量良好的涂层。

在涂层特性部分,介绍了用 SEM 分析的涂层显微组织,并与氧-乙炔喷焊涂层和激光熔涂涂层进行了比较。介绍了作者所做的涂层磨损和腐蚀试验,也与氧-乙炔喷焊涂层和激光熔涂涂层进行了比较。

图书在版编目(CIP)数据

高效快速感应熔涂技术/张增志著. —北京:冶金工业出版社,2001.12.14
(新材料新工艺丛书)

ISBN 7-5024-2925-5

I. 高… II. 张… III. 金属表面保护—表面合金化
IV. TG174.445

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 081880 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 郭庚辰 美术编辑 王耀忠 责任校对 栾雅谦 责任印制 刘 静

北京兴华印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2001 年 12 月第 1 版,2001 年 12 月第 1 次印刷

850mm×1168mm 1/32;5.625 印张;150 千字;170 页;1-3000 册

14.80 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

表面工程技术在近 20 年有了突飞猛进的发展,出现了许多新技术,并逐渐形成一门综合性学科。从整体上看,这些年表面工程技术的发展主要表现在:针对关键机械零配件表面的腐蚀或磨损破坏问题,由原来已广泛工业应用的电镀硬铬、火焰喷涂喷焊、渗氮、渗碳等技术向高新技术发展,如超音速火焰喷涂、等离子喷涂、物理或化学气相沉积、真空熔烧、激光熔覆等。某些高新技术的日臻成熟为航空、航天、军工等工业做出了重要贡献。但是,在一般的基础工业中,高新技术由于成本上的原因还没有得到大面积应用。而现代工业中,电镀硬铬还受到因微裂纹导致脱皮的困扰,火焰喷涂喷焊难以解决孔隙问题,渗氮、渗碳受真空设备限制且防腐能力较差,更令人遗憾的是,目前这些技术仍难以满足各个行业中对关键零配件进行表面处理的需求。高效快速感应熔涂技术是一项性能能够与高新技术相媲美,成本又能为众多工业领域所接受的表面新技术。

高效快速感应熔涂技术是通过专门的设备,利用感应快速集肤致热原理将各种自熔性合金及金属陶瓷原料熔涂于零件表面,形成优质涂层。与以往技术相比,该技术的基体受热小、涂层充分熔制、生产效率高。其主要特点如下:

- (1) 涂层与基体是融熔态化学结合,结合力强,不脱落。
- (2) 预涂层经充分熔化再结晶,形成优质的抗蚀耐磨显微组织。
- (3) 利用感应快速集肤加热,工件热影响深度极浅,制作效率高,可进行批量化生产,生产工艺可自动控制。
- (4) 涂层材料可以变换。根据不同环境工况,设计不同防腐

耐磨材料涂层,且涂层寿命可以设计。

(5) 熔涂涂层厚度均匀,加工余量小,材料浪费少,且涂层厚度可根据需要调整。

(6) 成本低。

(7) 适合于规则零件的表面处理。

在石油、冶金、矿山、石化、电力、化工、汽车、航空、造船、军工、工业锅炉、制药等工业领域中,机械装备中关键零配件由于腐蚀或磨损破坏,需要经常进行维修、更换。除了汽车、航空、造船、军工等工业外,其他基础工业还存在着标准关键零配件的供应不足、制造和维修很不完善、现场浪费严重、市场空缺较大等问题。而关键零配件的造价往往很高,如油田抽油泵关键配件——抽油柱塞的造价要占整个抽油泵造价的 50% 左右。产业化实践证明,采用高效快速感应熔涂技术在性能价格比上具有一定的竞争优势,在我国基础性工业中的关键零配件的防腐耐磨处理领域应该有所作为。我们希望高效快速感应熔涂技术的发展能为民族工业的发展做出贡献。鉴于作者的水平有限,加之时间仓促,有错误和不当之处,恳请读者指正。

在本书编写过程中,得到了付耀文、邹仲元、张国祥、邵俊杰、孟保华、秦小卫、王卫川等同志的帮助,在此一并表示感谢。

作 者

2001 年 10 月 21 日

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 金属表面涂层强化发展现状	1
1.2 高频感应熔涂技术的发展状况	3
1.2.1 感应熔涂简介	3
1.2.2 感应熔涂发展现状	4
1.3 主要研究内容	5
1.3.1 感应熔涂理论探讨	5
1.3.2 高频感应熔涂的工艺及优化	5
1.3.3 高频感应熔涂涂层的特性分析	6
第 2 章 设备及材料特性	7
2.1 设备	7
2.1.1 主体设备	7
2.1.2 附属设备	21
2.2 实验所用材料	23
2.2.1 自熔性合金粉末	23
2.2.2 实验所用粉末特性简介	24
2.2.3 镍铬硼硅系自熔性合金粉末	26
2.2.4 实验所用粉末的电磁学特性测量	29
2.2.5 涂层所用的黏结剂材料	32
2.2.6 基体材料	33
2.3 本章小结	33

第3章 感应熔涂工艺理论分析	34
3.1 电磁转换与感应加热	34
3.2 感应电流在金属表面层中的分布	37
3.2.1 涡流在金属中的分布规律	38
3.2.2 板材中的功率消耗分配	41
3.2.3 热态与冷态的涡流透入深度	42
3.3 感应加热的一般物理过程	43
3.3.1 电磁场在金属中的建立时间	43
3.3.2 材料加热的一般规律	43
3.4 加热比功率	46
3.5 高频感应加热的有效功率	47
3.6 涂层感应熔涂的特殊规律	52
3.7 本章小结	54
第4章 感应器设计原理及试验结果	56
4.1 感应器设计涉及的电磁效应	56
4.1.1 邻近效应	56
4.1.2 圆环效应	58
4.1.3 导磁体的槽口效应及驱流作用	59
4.2 感应器设计涉及的涂层熔化特性因素	60
4.3 感应器的设计及实际使用效果	60
4.3.1 外圆加热感应器的设计	60
4.3.2 内圆熔涂感应器的设计	63
4.3.3 平面感应器设计	64
4.4 本章小结	64
第5章 感应熔涂工艺实践	66
5.1 涂层感应熔涂基本要求	66
5.2 预处理工艺和涂层的预制备	67

5.2.1 预处理	67
5.2.2 涂层的制备	69
5.3 感应熔涂加热过程工艺参数	72
5.3.1 涂层材料的特性及频率的选择	72
5.3.2 涂层熔化后的流动性问题	75
5.3.3 加热比功率、加热时间、热传导	76
5.4 感应熔涂加热参数的控制方法	78
5.5 感应熔涂涂层的机加工	80
5.5.1 硬质合金刀具	80
5.5.2 复合立方氮化硼刀具	82
5.5.3 绿色碳化硅砂轮	82
5.5.4 人造金刚石砂轮	85
5.6 感应熔涂的残余应力及零件变形	86
5.7 本章小结	89
第 6 章 感应熔涂涂层的组织结构	91
6.1 镍基合金粉末感应熔涂涂层的组织结构	91
6.1.1 组织结构分析	91
6.1.2 基体组织状况及比较	96
6.1.3 不同条件下的组织结构比较	96
6.2 其他工艺涂层的组织	99
6.3 本章小结	101
第 7 章 感应熔涂涂层的性能	104
7.1 感应熔涂涂层的表面形貌	104
7.2 感应熔涂涂层的硬度分布	105
7.2.1 测试方法	105
7.2.2 测试数据	105
7.3 感应熔涂涂层的磨损试验	107
7.3.1 磨损试验	107

7.3.2 磨损试验分析	110
7.4 感应熔涂涂层的腐蚀试验	111
7.5 本章小结	113
第8章 感应熔涂技术的工业应用	115
8.1 感应熔涂技术的特点及适用范围	115
8.2 感应熔涂技术的应用实例	115
第9章 结论	119
附录1 GP100 型高频感应加热设备电原理图	120
附录2 GP100 型高频感应加热设备电原理图明细表	121
附录3 自熔性合金粉末	124
(1) Ni-B-Si 系自熔性合金粉末	124
(2) Ni-Cr-B-Si 系自熔性合金粉末	125
(3) Ni-Cr-B-Si-Mo-Cu 自熔性合金粉末	130
(4) 高钼镍基自熔性合金粉末	131
(5) 高铬钼镍基自熔性合金粉末	132
(6) Ni-Cr-W-C 系自熔性合金粉末	132
(7) 高铜镍基自熔性合金粉末	134
(8) 碳化钨弥散型镍基自熔性合金粉末	134
(9) Co-Cr-W-C-B-Si 自熔性合金粉末	137
(10) 部分镍代钴的钴基自熔性合金粉末	138
(11) 以钼代钨的钴基自熔性合金粉末	141
(12) 高耐蚀性钴基自熔性合金粉末	141
(13) 碳化钨弥散型钴基自熔性合金粉末	143
(14) 高镍耐冲击疲劳磨损的铁基自熔性合金粉末	144
(15) 不锈钢型铁基自熔性合金粉末	146
(16) 高镍铬不锈钢型铁基自熔性合金粉末	148
(17) 含钼不锈钢型铁基自熔性合金粉末	149
(18) 耐热不锈钢型铁基自熔性合金粉末	150

(19) 高镍低铬铁基自熔性合金粉末	152
(20) 高铬铸铁型铁基自熔性合金粉末	153
(21) 合金钢型自熔性合金粉末	154
(22) 含碳化物铁基自熔性合金粉末	156
(23) 高铬铸铁型铁基自熔性合金粉末	156
(24) 低碳不锈钢型自熔性合金粉末	156
(25) Cr-Mn 不锈钢型自熔性合金粉末	162
(26) 低铬不锈钢型自熔性合金粉末	164
(27) 高碳中铬型铁基自熔性合金粉末	165
(28) 耐热不锈钢型自熔性合金粉末	165
(29) 硅锰青铜型自熔性合金粉末	167
(30) 磷青铜型自熔性合金粉末	167
参考文献	169

第 1 章 绪 论

本章介绍感应熔涂技术发展的有关情况。

1.1 金属表面涂层强化发展现状

表面工程技术是适应工业生产当中对于机件表面的特殊需求而产生的。因为对于在各种条件下使用的机械构件,无论是磨损还是腐蚀,大都是从机件的表面开始的,有的甚至仅表现在机件的表面上,所以,对机件表面进行必要的强化以防止磨损,对机件表面进行必要的防护以防止腐蚀,就成为一件有重大意义的工作。据发达国家统计,每年因腐蚀磨损损失的钢材约占钢材总产量的 10%,损失金额相当于国民经济总产值的 2%~4%,因此表面工程技术的意义是很重大的。

近 20 年来,表面工程技术获得了飞速发展。表面工程涵盖的领域十分广泛,概括地讲,可以分为以下 3 类:

- (1) 化学热处理表面强化:如渗碳、渗氮、离子注入等。
- (2) 不改变表面化学成分的表面强化:如表面高频淬火、表面形变强化、激光热处理强化。
- (3) 表面涂层强化:如电镀、化学镀、喷涂、喷焊、激光熔涂、真空熔烧等。

金属表面涂层的各项强化技术,依据涂层与基体金属的结合力,大致可以分为两大类。

一类结合力比较弱,如电镀和化学镀,其涂层与基体之间的结合力不是很强;再如各种喷涂方法,涂层与基体之间均属于机械结合,尽管结合力有强有弱,但终归为物理结合,在生产中许多要求

承受较高载荷的场合不能使用。

另一类结合力比较强,通常形成了冶金结合。在进行涂覆时,涂层熔化,涂层和基体之间有元素的相互扩散。喷焊(等离子喷焊、氧乙炔喷焊)、激光熔涂和真空熔烧均属于这一类。

第一类方法对工件基体的影响较小,因而在强化过程中不会引起或不易引起工件变形,但由于这类涂层与基体的结合力比较弱,因而不能承受载荷、不耐磨粒磨损和冲蚀磨损;另外,涂层也不能太厚,涂层越厚,结合力越弱,越容易在使用中脱落,涂层厚度的这种限制使之不能满足生产中许多情况下的需要;而且,由于喷涂涂层的孔隙率高,还使得涂层耐腐蚀性受到影响。

第二类方法当中,氧-乙炔喷焊在工厂当中使用最为广泛。氧-乙炔火焰喷焊设备简单,宜现场操作。但是,第一,氧-乙炔火焰喷焊对基体的热影响非常大,因而不能用于对组织变化和形变要求很小的场合,尤其不适合精确构件的磨损修复。第二,其对涂层材料的氧化烧损大,降低了涂层的使用性能。第三,由于其为手工操作,且操作条件差,因而受人为的因素影响大,质量不够稳定,往往会发生熔化不足、熔化不均或是过熔产生波纹甚至流动的情况,并且在大批量生产时生产效率低下,生产环境恶劣。第四,氧-乙炔喷焊很难处理圆柱形构件上厚度在 1mm 以上的涂层,在这种情况下,效率低下且质量难以保证。这些都是氧-乙炔喷焊的缺点。

激光熔涂技术是激光强化技术的一种。激光熔涂涂层有许多优良的性能,包括良好的冶金结合、细晶组织以及对基体的热影响小等。但由于激光设备造价高,且大功率设备现在还很难做到光束非常均匀和稳定;熔涂过程的自动控制程度低;熔涂涂层表面不够平整,后续加工量大;涂层易出现裂纹和孔洞等原因,使得激光熔涂还不能在工业上形成范围广泛的工业应用。现在,激光熔涂主要用于一些高成本关键性部件的小面积处理上^[1,2]。

真空熔烧技术与基体也具有比较强的结合力,但也存在着其对基体的热影响大等问题。

在涂层强化当中,成本问题也很重要。如等离子喷涂、爆炸喷

涂、超音速火焰喷涂、真空熔烧、激光熔涂等技术,尽管其在航空、航天等领域应用广泛,但是经过多年研究之后,其成本还一直未能下降到为一般工业领域所能接受的程度,因而很难在一般工业领域进行推广。而在成本较低的技术中,或是由于热影响大(如喷焊)、或是由于结合力过低(如氧乙炔喷涂、电镀、化学镀),很难同时满足成本不高、热影响不大、结合力又强 3 个方面的要求。但是,近年来出于节约成本和减少维修、提高生产效率的需要,人们对于普通工件也要求提供质量高而成本不高的涂层。

感应熔涂技术就是在这种背景下考虑的。

1.2 高频感应熔涂技术的发展状况

1.2.1 感应熔涂简介

涂层感应熔涂技术是在工件基体上预先制备合金涂层,然后利用感应线圈中的交变电磁场在工件当中产生涡流,利用涡流产生的热量来达到使涂层熔化的目的。涡流强度随深度呈指数下降。由于热量与涡流平方成正比,所以热量下降比电流更快,有 86.5% 的热量发生在深度为 δ 的薄层内。其中^[3]

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\mu\omega}}$$

$$\mu = \mu_r \mu_0, \omega = 2\pi f$$

式中 ρ ——电阻率, $\Omega \cdot \text{m}$;

f ——频率, Hz;

μ_r ——相对磁导率;

μ_0 ——真空磁导率。

涡流的趋肤效应构成了感应加热的主要优势,使得热量可以集中在要求加热的区域内。由于可以使涂层熔化,所以涂层与基体的结合力强,可以用于需要承受载荷的场合;又由于热量集中在

表层,所以对基体的热影响小,从而达到了热影响小、结合力强两个要求。感应设备及其在生产中消耗的成本与激光熔涂技术等相比,也处于较低水平。

1.2.2 感应熔涂发展现状

笔者对感应熔涂方面的资料进行了广泛的查询,国内外目前研究这一领域的人还较少,资料发表的也不多且不全面。

文献[4]研究了 METCO16C 粉末经氧乙炔喷涂后再进行感应(所用感应频率为 2kHz)熔涂的温度控制情况以及涂层特性,并与氧乙炔重熔涂层以及炉内重熔涂层进行了比较。该文献所得结果是,从表面粗糙度来看,虽然氧乙炔喷焊有时也和感应熔涂一样好,但是其波动范围大,不稳定;且炉内重熔的粗糙度也不如感应熔涂好,其粗糙度相差大约为 2~3 倍。就显微硬度来讲,感应熔涂明显优于后两者。孔隙率也明显优于后两者。

文献[5]研究了 WC-Co-Ni 等离子喷涂层用感应(所用感应频率为 7kHz)熔涂后处理的结果。其研究表明,处理之后,表面粗糙度减小,耐磨性显著提高(在试验中的失重为未喷涂者的 1/20),并且其耐磨性优于 HVOF 喷涂同种材料的结果。在感应熔涂后的涂层中出现了 5~10 μm 的扩散转移层。

文献[6]探讨了在感应熔涂中出现的扩散转移层形成机制,认为其属于基体,并研究了其组成。

文献[7]研究了镍基合金粉末首先用火焰喷涂,其次用感应(所用感应频率为 2kHz)熔涂的结果。涂层厚度较厚,为 1~3mm。文献[7]的研究结果表明,感应熔涂有处理厚涂层的良好能力,并且处理后的涂层与基体结合紧密,质量稳定,生产效率比氧乙炔火焰要高得多,生产环境也好得多。

文献[8]也指出,在镍基合金的等离子喷涂层经过感应重熔处理后,涂层更致密,在涂层与基体的界面形成了冶金结合从而结合牢固,同时涂层还具有更高的硬度。

上述文献均未涉及具体的工艺细节,而且其涂层的预涂方法

均采用热喷涂方法。并且,对熔涂工艺,也未见有资料从电磁学、传热学及流体特性等方面进行探讨。频率均为 10kHz 量级。

然而,预涂方法采用直接将合金粉末冷涂在工件上,然后采用高频率(200kHz 量级)加热的高频感应熔涂技术,目前国内外未见有研究资料发表。

本文的主要目的就是以冷预涂下的高频感应熔涂技术为主,确定其基本工艺,对其工艺参数进行优化,制备合格的涂层,并研究其涂层特性。

1.3 主要研究内容

在本课题的研究中,涂层材料使用在涂层制备中使用最为广泛且被证明性能良好的镍基自熔性合金粉末,主要任务集中在以下几个方面。

1.3.1 感应熔涂理论探讨

从电磁学、热传导等角度以及涂层本身的特性出发,分析感应加热中涡流在涂层当中的分布以及涂层的温度分布,分析影响工艺参数的因素。从感应器所涉及的电磁效应以及涂层的特定要求出发,分析感应器应该具有的合理设计。

1.3.2 高频感应熔涂的工艺及优化

由于高频感应熔涂技术尚无专门的技术资料可作为依据,因此必须对其工艺规律进行研究,以便确定其基本工艺,并对工艺过程进行优化。对工艺的优化主要从下列几个方面进行:

(1) 预制涂层前工件的预处理及其对熔涂的影响。

(2) 涂层的预涂方法。主要是采用黏结剂进行预涂的方法来预制涂层并考察其熔涂效果。

(3) 感应器的设计及优化。感应器是熔涂工艺中的最重要环节之一,感应器的形状尺寸以及导磁体等因素影响加热比功率,从

而影响加热速度以及均匀性等,应对感应器设计的一般原则进行分析,并通过实验确定感应器的形状及参数。

(4) 工艺参数的确定准则、确定及优化。功率参数、工件走动速度、工件尺寸、涂层厚度、线圈离工件的距离等均影响加热状况。应保证涂层既熔化良好,又不过熔流动,同时对基体的热影响要小。对于工艺过程,要从材料、电磁、热传导等角度进行探讨并通过试验进行总结,归纳出规律,为生产中确定工艺参数提供依据。

1.3.3 高频感应熔涂涂层的特性分析

高频感应熔涂涂层的特性分析包括:

(1) 涂层显微组织分析。利用扫描电子显微镜对涂层的金相组织进行分析,利用 X 射线衍射技术对涂层成分进行分析,分析其组织及成分,并就一些结果与氧-乙炔喷焊层、激光熔涂层进行对比。

(2) 涂层在垂直截面上的显微硬度分布状况,并与氧-乙炔喷焊层、激光熔涂涂层进行对比,以帮助分析其耐磨性。

(3) 高频熔涂涂层的摩擦磨损特性。选取应用广泛的典型合金粉末涂层,将高频熔涂涂层与氧-乙炔喷焊层、激光熔涂涂层做黏着磨损对比试验。

(4) 涂层腐蚀试验。将感应熔涂涂层和同类粉末的氧-乙炔喷焊层、激光熔涂涂层做腐蚀性能对比试验,分析其结果。

第 2 章 设备及材料特性

本章主要是介绍感应熔涂设备的选用、设计,所用材料及其特性,作为后面工艺分析的基础。

2.1 设 备

2.1.1 主体设备

本实验所用的主要设备为电子管式高频感应加热设备(GP100 型)和自行设计的熔涂机床。

感应加热设备主要技术参数如下:

振荡频率	200~250kHz
振荡功率	100kW
输出加热功率	85kW
电源	3 相交流 380V 50Hz
电源容量	180kV·A

设备的频率和功率的选用是根据基体、涂层特性及加热速度需要而定的,具体讨论见 5.3。

2.1.1.1 高频感应设备

高频感应加热设备主要由三相可控整流器、电子管振荡器和控制电路 3 大部分组成。其结构原理示意图如图 2-1 所示(GP100 型高频感应加热设备的电原理图参见附录 1)。

A 三相可控整流器

三相可控整流器的作用是将线电压为 380V 的工频交流电先经过阳极变压器升压(如升高到 10kV),然后再由三相可控整流器

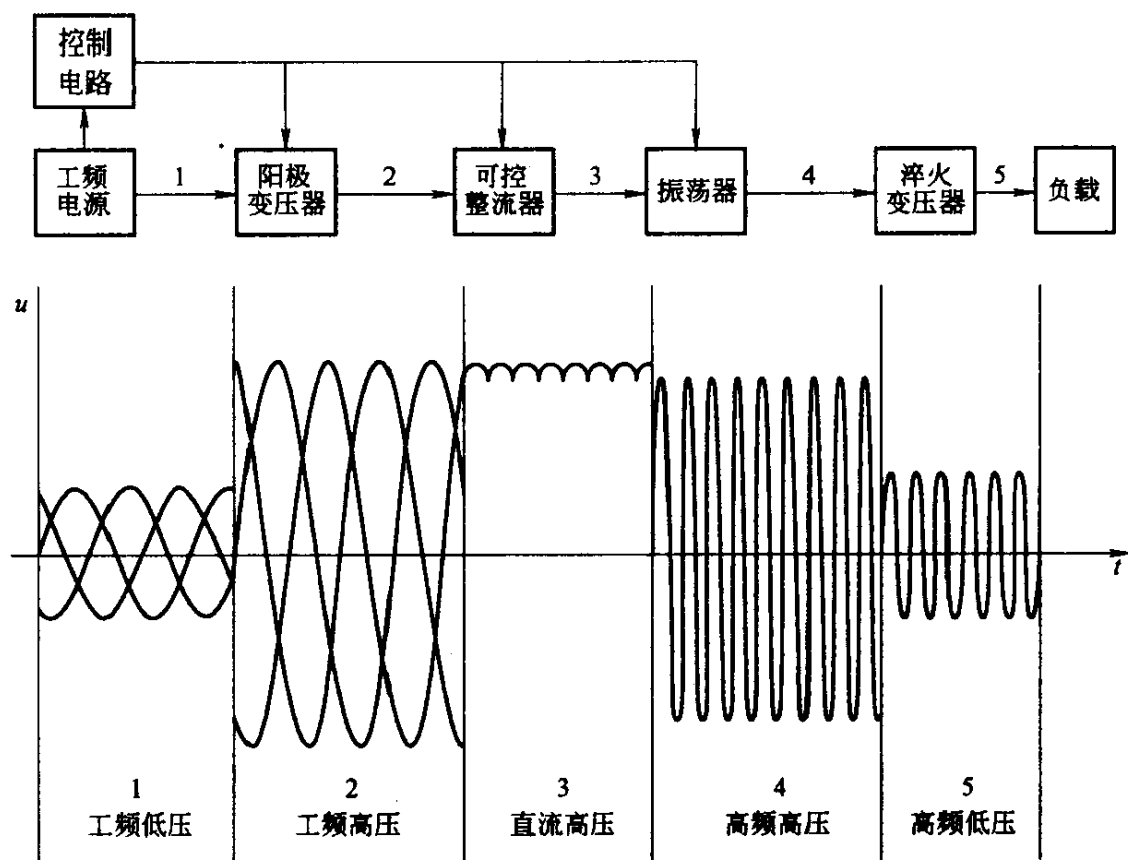


图 2-1 高频感应加热设备结构原理示意图

整流成连续可变的直流高电压(如 $6.75 \sim 13.5\text{kV}$),并供电给振荡器。

图 2-2 是 GP100 型高频感应加热设备的可控整流电路。阳极变压器采用 $Y_0/\Delta-1$ 接法,闸流管 $G_2 \sim G_4$ 和 G_8 的栅极与阴极相连接,可控闸流管 $G_5 \sim G_7$ 的栅极电压采用交、直流叠加控制法。由 R_8 、 C_6 和 R_9 、 C_7 分别与 B_4 次级组成阻容移相桥。 B_4 的 a 、 d 两端的交流电压及半导体二极管 D_1 、 D_2 及电阻 R_{10} 、 R_{11} 组成负压 U_g^- 整流器。由单相自耦调压器 B_7 、变压器 B_5 、半导体二极管 $D_3 \sim D_6$ 组成正压 U_g^+ 整流器。 B_2 是闸流管 $G_2 \sim G_8$ 的灯丝变压器。电阻 $R_5 \sim R_7$ 是闸流管栅极电阻。电容 $C_3 \sim C_5$ 是高频旁路电容器,防止闸流管栅极受高频电磁场影响而发生失控。 kV_1 是阳极电压表, R_{25} 是它的分压电阻, C_{30} 是 kV_1 表的旁路电容器。 GJ 是直流过流继电器,是用来防止整流器过载的。图 2-3