

# 真空热处理技术的新近进展及其发展趋势

阎承沛

(北京机电研究所 北京 100083)

**摘要:** 近年来,国内外真空热处理设备和技术在迅速发展。国内研发了WZDGQ30型单室高压气淬真空炉、WZGQ型对流加热高压气淬真空炉和WZLQH型铝钎焊真空炉,国外研发了燃气真空炉,半连续和连续式真空炉,流态化真空炉,多用途真空炉,高温超高压真空炉,真空烧结炉和真空炉生产线等。本文简单介绍了上述设备,并提出了真空热处理技术的发展趋势。

**关键词:** 真空热处理;真空炉;发展

中图分类号: TG155.1+6 文献标识码: A 文章编号: 1008-1690(2006)03-0007-07

## Recent Progress of Vacuum Heat Treatment Technology and Its Development Trend

YAN Cheng-pei

(Beijing Research Institute of Mechanical & Electrical Technology, Beijing 100083)

**Abstract:** Vacuum heat treatment equipment and technology at home and abroad have been speedily developing in recent years. WZDGQ30 single chamber high pressure gas quenching vacuum furnace, WZGQ convection heating high pressure gas quenching vacuum furnace and WZLQH aluminium brazing vacuum furnace have been developed at home, while gas-fired vacuum furnace, semi-continuous and continuous vacuum furnaces, fluidized vacuum furnace, multi-purpose vacuum furnace, high temperature and superhigh pressure vacuum furnace, sintering vacuum furnace and vacuum furnace production line and so forth have been developed at abroad. Above mentioned equipments have been simply introduced, and development trend of vacuum heat treatment technology has been put forward in this paper.

**Key Words:** vacuum heat treatment; vacuum furnace; development

### 1 前言

与在普通箱式炉、盐浴炉等常规设备中进行的热处理相比,真空处理的特点是明显的,早已得到广大热处理工作者的认可。有鉴于此,五十年来,真空热处理始终是国际热处理技术发展的热点。我国在近二十余年来,亦得到了迅速的发展<sup>[1,2]</sup>,真空

热处理工艺的研究和应用已遍及退火、油(气)淬、高压气淬、渗碳、渗氮、渗金属、回火、烧结、钎焊、涂敷、清洗等多个领域<sup>[1,2,12-14]</sup>,取得了长足的进展。根据资料统计估算<sup>[2]</sup>,我国现有各类真空热处理设备约4500台套,占我国热处理设备的3.75%左右<sup>[6]</sup>,有专业真空热处理设备生产企业50余家,

收稿日期: 2005-11-14

作者简介: 阎承沛(1941.9 -),男,北京人,教授级高级工程师,长期从事热处理工艺和设备研究,发表论文70余篇、专著3本。联系电话: 010-62071675

### 3.10 激光表面合金化

TPTC和Alion Science and Technology合作开展船舶零件激光涂覆的研究。其中包括工艺的建模和模拟以及激光涂覆层的性能测试和模型的验证。用Sysweld+软件模拟了薄板的温度场。激光是作为施加的热源来计算的。利用连续转变曲线(CCT)和Sysweld+软件计算相变过程和薄板上的残余应力分布。在开式组织结构、依赖于温度的热性能以及复杂边界条件的基础上建立的用户子程序很容易用

Sysweld+进行操作。

### 3.11 铸锭的凝固

TPTC的铸锭课题用ESI集团的PamCast软件对铸锭凝固过程进行了模拟。钢锭完全凝固时间的长短对提高生产效率意义重大。用PamCast软件在各种边界条件下进行的计算,可以优化冶炼铸锭工艺,以缩短铸锭凝固时间。利用快速有限差分法(FDM)解算器可以在短时期内优化工艺、提高铸锭生产率。

主要产品有真空油(气)淬火炉、高压气淬真空炉、真空退火炉、真空回火炉、真空钎焊炉、真空烧结炉、真空化学热处理炉,全国从事真空热处理技术研究、开发、设计、制造和应用的职工总数约6000人,真空热处理技术已迈入应用领域不断扩展,工艺水平迅速提高,设备不断完善和多样化、智能化,新技术新产品不断涌现的蓬勃发展的阶段。

有关真空热处理工艺,我国真空热处理关键技术的研究开发,我国真空热处理设备的技术特点等,作者已于前几年在一篇专文中作过介绍<sup>[2]</sup>,本文着重介绍国内外真空热处理设备及技术研究开发的新进展。

## 2 国产新型真空热处理设备的研制与开发

### 2.1 WZDGQ30型单室高压气淬真空炉<sup>[7]</sup>

WZDGQ30型单室高压气淬真空炉由北京机电研究所研制,具有 $6 \times 10^5$ Pa气淬功能,如图1所示。主要用于高速钢、高合金钢、工模具钢的高压气淬以及退火、钎焊等多种工艺。采用计算机控制,可靠性及自动化程度高,技术水平先进。高压气淬可显著提高工件的淬透性,并减少环境污染。

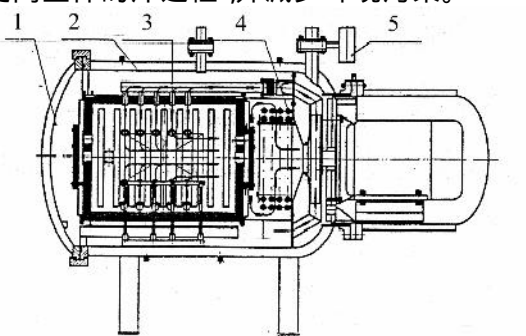


图1 WZDGQ30型单室真空高压气淬炉  
1炉门 2炉壳 3炉胆 4风冷系统 5充气系统

Fig.1 WZDGQ30 single chamber high pressure gas quenching vacuum furnace

1 door 2 furnace shell 3 furnace pot  
4 wind cooling system 5 charging system

### 2.2 WZGQ型对流加热高压气淬真空炉<sup>[8]</sup>

炉内强制对流加热及连续高压气淬是真空高压气淬炉的关键技术,国产WZGQ型对流加热高压气淬真空炉完全达到了设计指标。试验证明,在200时,对流加热速度为 $1.44 / \text{min}$ ,在500时,则可达 $4.5 / \text{min}$ 。对 $\phi 110\text{mm} \times 120\text{mm}$ 高速钢试样充压至 $3 \times 10^5$ Pa进行试验,工件心部硬度达60HRC以上,其冷却性能与从国外进口的 $5 \times 10^5$ Pa单室高压气淬炉相当,但成本却低得多,而且其加热速度更高,从而节约了工作气体,降低了运行成本。

WZGQ型高压气淬真空炉主体结构见图2。

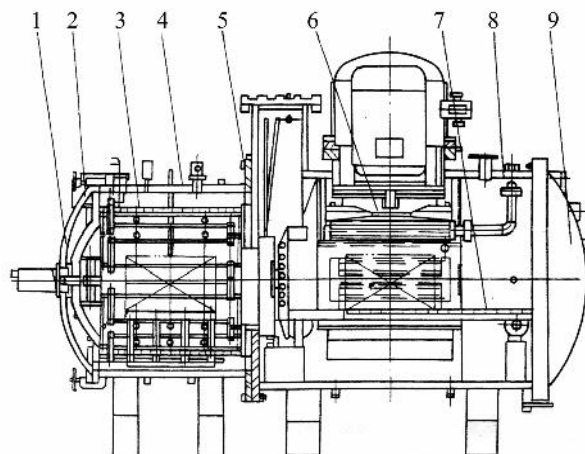


图2 WZGQ45型高压气淬真空炉主体结构  
1加热室门 2热循环风机 3炉胆 4加热室炉壳  
5热闸阀 6风冷装置 7送料机构  
8冷却室炉壳 9冷却室门

Fig.2 Scheme of main part of WZGQ45 high pressure gas quenching vacuum furnace

1 door of heating chamber 2 heat cycle blower 3 furnace pot  
4 shell of heating chamber 5 hot gate 6 wind cooling unit  
7 feeder 8 shell of cooling chamber  
9 door of cooling chamber

### 2.3 WZDLQH型真空铝钎焊炉<sup>[9]</sup>

国产WZ系列真空铝钎焊炉于1999年投放市场以来,由于其技术性能优异而获得用户的青睐,目前已批量生产,广泛用于航空航天、电子、石化、车辆、船舶、冷冻、冷藏等工业部门。

WZDLQH型真空铝钎焊炉的主要技术指标:

- (1)有效加热区  $500\text{mm} \times 300\text{mm} \times 300\text{mm}$  ;
- (2)额定装炉量 80kg ;
- (3)最高温度 800 ,1320 ;
- (4)加热功率 80kW ;
- (5)炉温均匀性  $\pm 3$  ;
- (6)极限真空度  $6.6 \times 10^{-4}\text{Pa}$  ;
- (7)工作真空度  $6.6 \times 10^{-3}\text{Pa}$ (400 ~700 ) ;
- (8)压升率  $5.0 \times 10^{-1}\text{Pa/h}$  ;
- (9)充气压力  $2.0 \times 10^5\text{Pa}$  ;
- (10)冷却时间 30min (650 ~150 )。

WZDLQH30型真空铝钎焊炉的主体结构简图如图3所示。

## 3 国外真空热处理设备及工艺技术的发展

### 3.1 燃气式真空炉<sup>[10,11]</sup>

20世纪70年代的石油危机使西方国家的经济受到很大的打击,自此欧、美和日本等发达国家十分重视热处理能源的有效利用和热效率的提高。由于电是二次能源,一般燃料的发电效率为30%~35%,

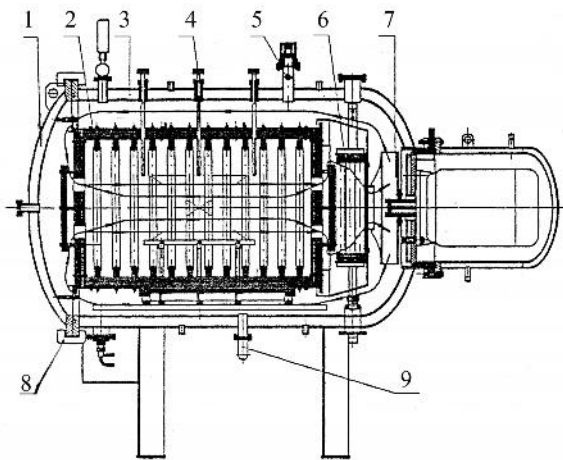


图3 WZDLQH30型真空铝钎焊炉主体示意图

1 炉门 2 炉胆 3 炉壳 4 控温热电偶 5 安全阀 6 热交换器 7 风扇 8 炉门卡环 9 自动充放气装置

Fig.3 Scheme of main part of WZDLQH30 aluminium brazing vacuum furnace

1 door 2 furnace pot 3 furnace shell 4 thermocouple  
5 safety valve 6 heat exchanger 7 fan  
8 tightening ring for furnace door  
9 automatic charging-discharging unit

电能的热效率为80%~85% ,因而实际燃料电能的热效率约为24.0%~29.8%。故采用一次能源如天然气加热具有热效率高、成本低的优势。由图4可知,电能成本是天然气能源成本的4倍多。正因为如此,1986年德国研制生产了第一台燃气真空炉,十几年来,先后已有几百至上千台燃气真空炉应用于生产。

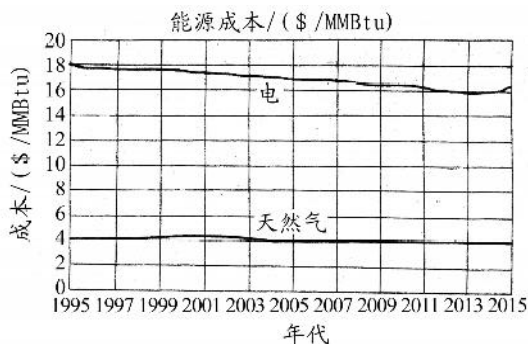


图4 电能和天然气单位能量成本比较

注:: MMBtu—1月×252cal ,Btu—英热单位,  
1Btu=252cal=1.05kJ

Fig.4 Comparison of casts of electric energy and natural gas

与电加热真空炉相比,燃气真空炉的优点:

- (1) 较高的生产率和高的热效率;
- (2) 较低的运行成本;
- (3) 维护保养简便;
- (4) 具有电加热真空炉的全部特点。

表1列出了欧洲主要燃气真空炉生产厂商的生产需求计划,可以看出2002年燃气真空炉的产量是1997年的6.5倍。图5、图6分别为燃气真空炉的全貌和燃气辐射管加热真空炉的结构图。

表1 燃气真空炉生产需求计划

Table 1 Project of requirement for gas-fired vacuum furnace

年份	1997	1998	1999	2000	2001	2002	总计
数量	10	21	31	45	54	65	226

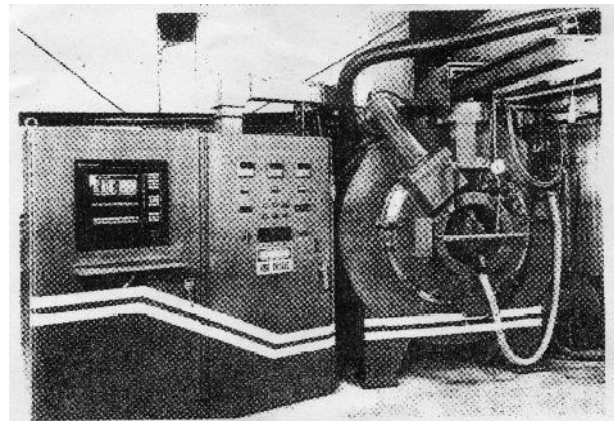


图5 卧式955 燃气真空炉

Fig.5 Horizontal gas-fired vacuum furnace operating at 955

### 3.2 半连续式和连续式真空炉<sup>[11]</sup>

与间歇式真空炉相比,半连续式真空炉的生产效率可提高25%~30%,连续式真空炉生产效率可以提高40%~50%。此外半连续式和连续式真空炉热损失少,热效率高,节能节材(气体、油等),生产成本低。半连续式和连续式真空炉的结构和外观,分别示于图7、图8。

### 3.3 流态化真空炉<sup>[11]</sup>

机械流态化单室真空炉结构独特,由计算机控制。该装置由Kemp Development Corp, Houston, TX 共同开发,兼具流态床传热系数高和真空炉清洁性好的特点。机械流态化真空炉可以完成渗碳、渗氮、氧化、渗硼、奥氏体化等多种热处理工艺过程,自动化程度高,其改型产品还可用于粉末冶金产品的加工。

图9为机械流态化真空炉的剖视图,可以看出其内部结构和驱动装置。一种用于粉末冶金加工的改型机械流态化真空炉的结构如图10所示。

### 3.4 热壁式真空渗碳炉<sup>[11]</sup>

传统的冷壁式真空渗碳炉的许多问题在热壁式真空炉上已得到解决,热壁式真空渗碳炉的特点:

- (1) 热壁结构,加热元件的能耗约降低60%,可

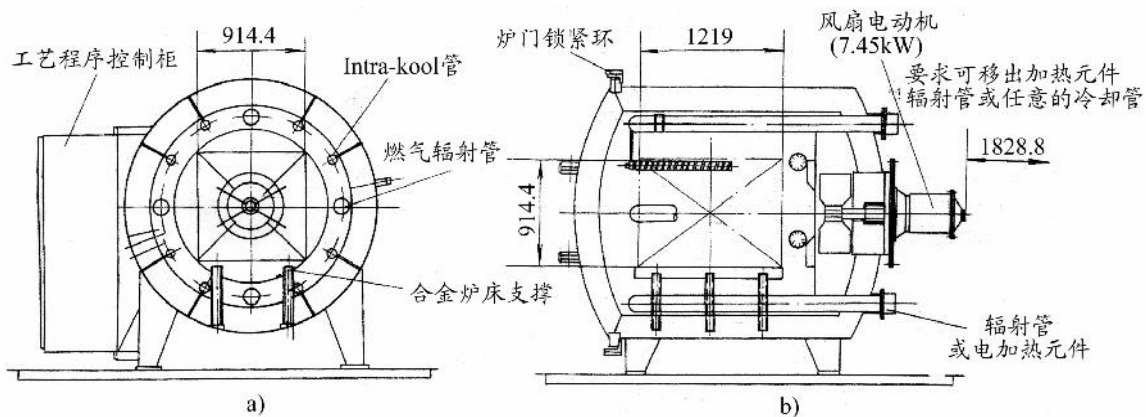


图6 辐射管加热真空回火炉结构图

a)横截面图 b)纵向视图

Fig.6 Structure of vacuum tempering furnace heating with radiant tube

a) cross section diagram b) longitudinal view

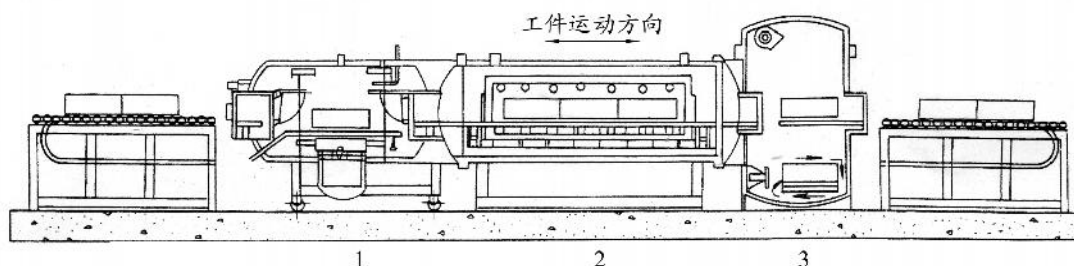


图7 半连续式油气(高压气淬)淬火真空炉

1 高压气淬室 2 加热室 3 油淬室

Fig.7 Semi-continuous vacuum oil-gas quenching furnace

1 high pressure gas quenching chamber 2 heating chamber 3 oil quenching chamber

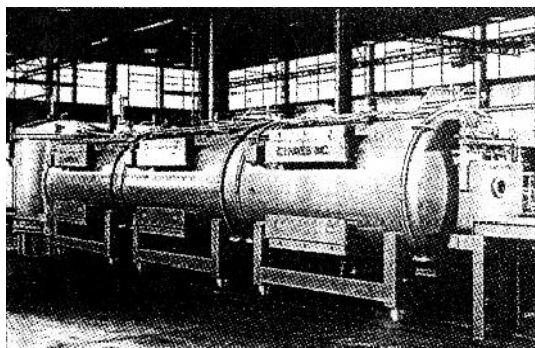


图8 Hayes 公司的VBQ 型连续式气冷真空炉生产线

Fig.8 VBQ continuous production line of gas cooling vacuum furnace in the Hayes Co.

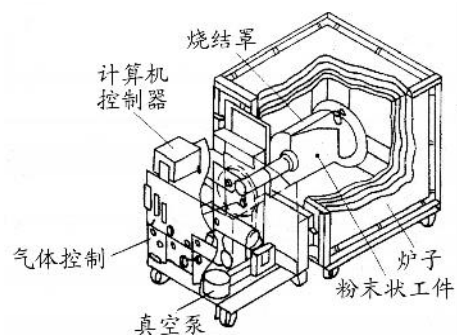


图9 金属热处理用流态化真空炉剖视图

(可看出不同构件 驱动装置和控制部分)

Fig.9 Cutaway view of fluidized vacuum furnace for heat treating metals

获得均匀的渗碳层深度；

(2)采用封闭式辐射管加热元件和陶瓷纤维隔热材料；

(3)具备自动烧炭黑系统。

### 3.5 真空烧结炉<sup>[11]</sup>

近年来,真空烧结炉在加工范围、工作温度和装炉量以及控制技术诸方面均有了新的进展,可用于不锈钢、工具钢、硬质合金、陶瓷、钨铁硼等材料的烧结处理,工业应用前景广阔。

美国CVI Co. 研制开发了系列化高性能粉末烧结真空炉,主要类型有4种,工作温度为1400, 1650, 2300, 充入惰性气体,用于不锈钢、工具钢、陶瓷等材料的烧结和热处理。图11为CVI型真空烧结炉概貌。德国TTGmbH公司 ALDTVGmbH公司和PVAGmbH公司研发的新型高温(~1750)、高压(~10MPa)真空烧结炉控温精度高,技术指标先进,性能优良。

### 3.6 ICBP系列低压渗碳技术及低压渗碳多用炉<sup>[11]</sup>

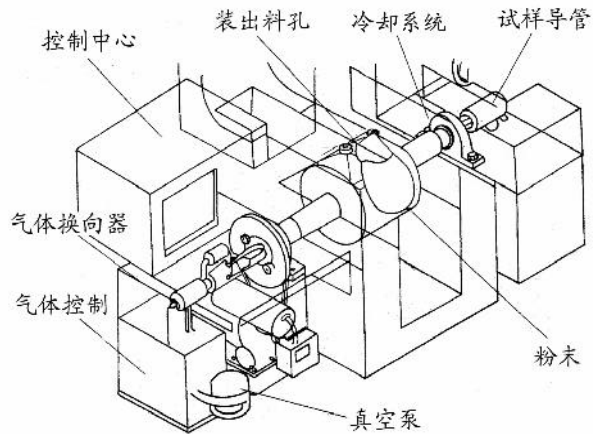


图10 粉末冶金加热工艺改型的机械流态化真空炉结构示意图

(可以看出驱动轴和冷却系统前的活动轴)

Fig.10 Scheme of structure of mechanically fluidized vacuum furnace modified for powder metalurgy

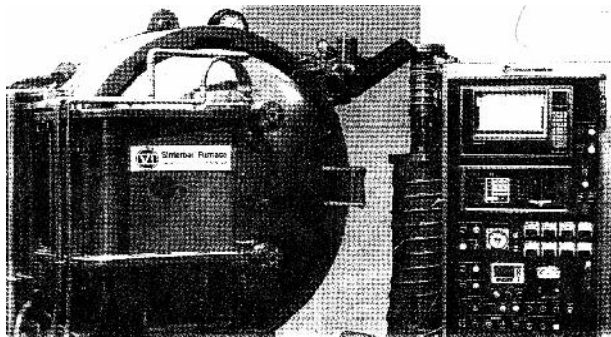


图11 CVI 型真空烧结炉

Fig.11 CVI vacuum furnace for sintering

常规气体渗碳由于气氛中有氧及氧化物,难免会产生氧化,对零件的疲劳性能极为不利。近十年来,法国ECM公司发明的低压渗碳专利技术和ICBP系列低压渗碳多用炉较好地解决了这一问题,并已应用于汽车工业,前景看好。ICBP系列低压渗碳高压气淬炉简图示于图12。

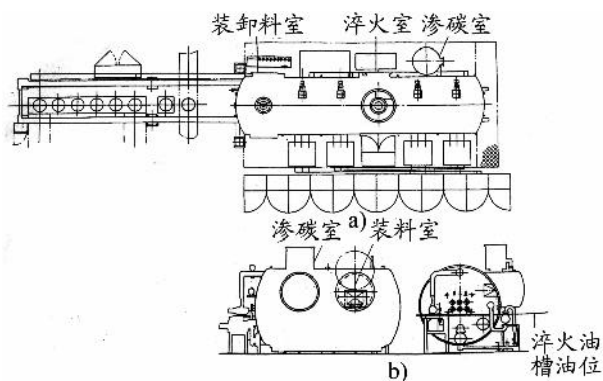


图12 ICBP系列低压渗碳高压气淬炉

a) ICBP<sub>TG</sub>系列 b) ICBP<sub>TH</sub>系列

Fig12 ICBP series low pressure carburizing-high pressure gas quenching furnace

a) ICBP<sub>TG</sub> series b) ICBP<sub>TH</sub> series

### 3.7 VZKQ型多用途真空炉<sup>[12,13]</sup>

轴承钢等低合金工具钢要求淬火气体具有更好的热传导性能,不宜在单室真空炉中处理,只有在冷淬火室中处理才能获得满意的淬火效果。为此开发了多用途真空炉、连续式多室真空炉和Moudul Therm 型往复模块化真空炉等。多用途真空炉除用于淬火外,还可进行表面硬化处理如真空渗碳等。

VZKQ型多用途真空炉的结构简图见图13。

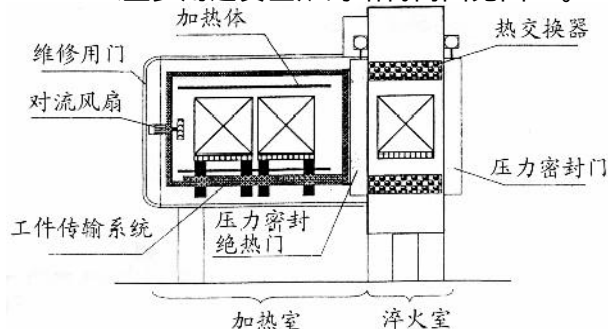


图13 VZKQ 型多用途真空热处理炉结构简图

Fig.13 Scheme of structure of VZKQ multi-purpose vacuum heat treatment furnace

### 3.8 高温超高压真空热处理炉<sup>[11]</sup>

高温超高压真空炉是现代冶金技术、现代真空炉技术和计算机与微电子技术进步的产物,主要用于高温烧结、晶体生长、物理试验和宝石制作等方面。美国MFR Inc. (材料与炉子公司)研制的E2200型顶部装料立式高温超高压真空热处理炉系上世纪90年代产品,其总体结构示于图14,主要技术性能指标为:

- (1)有效加热区尺寸  $\phi 450\text{mm} \times 600\text{mm}$ ;
- (2)加热速率 50 /min;
- (3)最高工作温度 2200 ;
- (4)温度均匀性  $\pm 10$  (在1200 ~2200、从真空到加压10MPa时有效加热区内);
- (5)最大工作压力 10MPa;
- (6)工作气体 氮或氩气 283L/min;
- (7)冷却速率 空载时从2200 冷至200 为6h,即333 /h; 采用热交换器冷却,负载45.36kg则冷却时间为2h,即1000 /h;
- (8)真空系统 Leybold Co. 的D90A型机械真空泵,1500 L/min;
- (9)电源 250kVA~275kVA, 380V~480V, 3相, 50Hz~60Hz;

### 3.9 具有双对流循环系统的高压气淬真空炉

图15 为Hobwagen VRK 型底装料立式双气流高压高流率气淬炉结构图,其特点是设置双气流循环(加热和冷却)装置,可以在高真空下处理工件,也可加压(0.6MPa)淬火冷却,有效尺寸为 $\phi 1500\text{mm} \times$

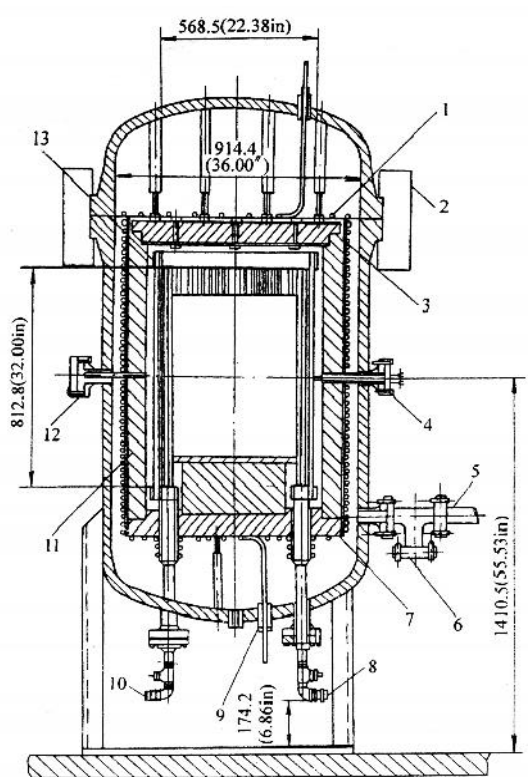


图14 E2200型顶装料立式高温超高压真空炉总体结构图

- 1顶部冷却器 2快速炉门夹紧器(10MPa)
  - 3隔热层侧水冷套 4高压温度控制器孔
  - 5真空泵管路 6减压阀接口 7底部铜水冷却器
  - 8电源接口装置 9专用水冷却器支座装置
  - 10铜制电源连接装置 11刚性石墨纤维隔热层
  - 12高压观察孔装置 13石墨加热元件(2200 工作)
- Fig.14 Structure of top-charging vertical high temperature-superhigh pressure vacuum furnace
- 1 top cooler 2 rapid fixture for furnace door
  - 3 sidewater-cooling jacket for heat-insulating layer
  - 4 high pressure temperature controller hole
  - 5 vacuum pump pipeline 6 pressure reducing valve joint
  - 7 bottom water-cooler of copper 8 power source joint
  - 9 pedestal of special water-cooler
  - 10 power source joint of copper
  - 11 rigid graphite heat-insulating layer
  - 12 peep-hole under high pressure
  - 13 graphite heater operating at 2200

1800mm。VRK型气淬炉可用于气轮机零部件的均匀化退火和时效硬化处理,飞机起落架零件的淬火,细长轴类件如挤压机蜗杆及拉刀的瞬时延迟淬火,压铸模、挤压模具等的热处理。

### 3.10 VMKQ型连续式多室真空炉生产线<sup>[12,13]</sup>

连续式多室真空炉生产线可进行真空渗碳和高压气淬连续生产,并根据生产工艺要求进行多种组合,以实施不同的工艺过程。工件通过活动梁式自动传送装置运行,各工作室之间设有密封隔热闸门,适时启闭,工件在工作室的运行状态(温度、压力、

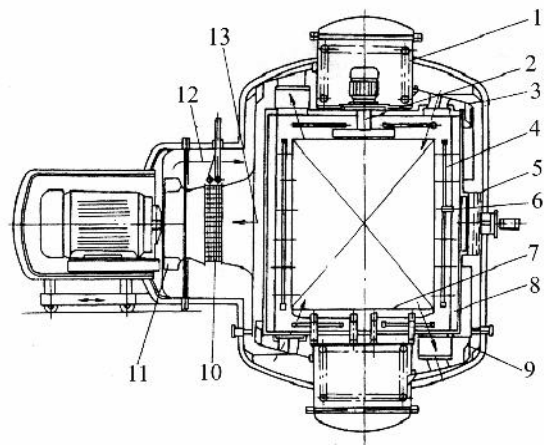


图15 VRK型立式底装料双气流循环真空炉结构图

(Ipsen Ind. Int. GmbH)

- 1冷却气体导风罩提升装置 2对流换热的热气体风扇
- 3冷却气体导风罩顶部 4加热元件 5径向冷却气体进口
- 6喷嘴 7炉床 8喷嘴加压力气流冷却
- 9冷却气体导风罩底部 10热交换器 11冷却气体风扇
- 12冷却气体流 13热气流

Fig.15 Structure of bottom-charging vertical double air flow circulating vacuum furnace

- 1 hoist for cooling-gas guide cover
- 2 hot gas fan for convection heat exchange
- 3 top of cooling-gas guide cover 4 heater
- 5 inlet of radial cooling-gas 6 spray nozzle 7 furnace bed
- 8 nozzle forced gas cooling
- 9 bottom of cooling-gas guide cover 10 heat exchanger
- 11 cooling-gas fan 12 cooling-gas current
- 13 hot gas current

气氛等)不受干扰。VMKQ型连续式多室真空炉生产线及工艺过程示意地示于图16。

此外还有Modul Therm型往复式(梭式)模块多用真空炉生产线<sup>[12,13]</sup>(图略)。

### 3.11 真空热处理生产线计算机集成系统

英国Alan J.Hick介绍了迈向21世纪的热处理技术,其中有采用最新计算机集成技术的真空热处理生产线计算机集成系统,如图17所示。

### 4 真空热处理技术发展展望

鉴于真空热处理是一种高效、优质、节能、清洁无污染的先进热处理技术,在工业发达国家,真空热处理生产量占热处理生产总量的20%~25%,有着广阔的发展前景,主要的发展趋势为:

(1)自上世纪80年代以来,国外广泛采用高压气淬代替油淬,以免除清洗工序,提高工件表面质量。上世纪90年代初,国外已在开发(20~40) × 10<sup>5</sup>Pa的高压气淬炉,如上所述,业已开发出工作压力达100 × 10<sup>5</sup>Pa,工作温度达2200 的高温高压真空炉,向高温高压发展的趋势还将持续。

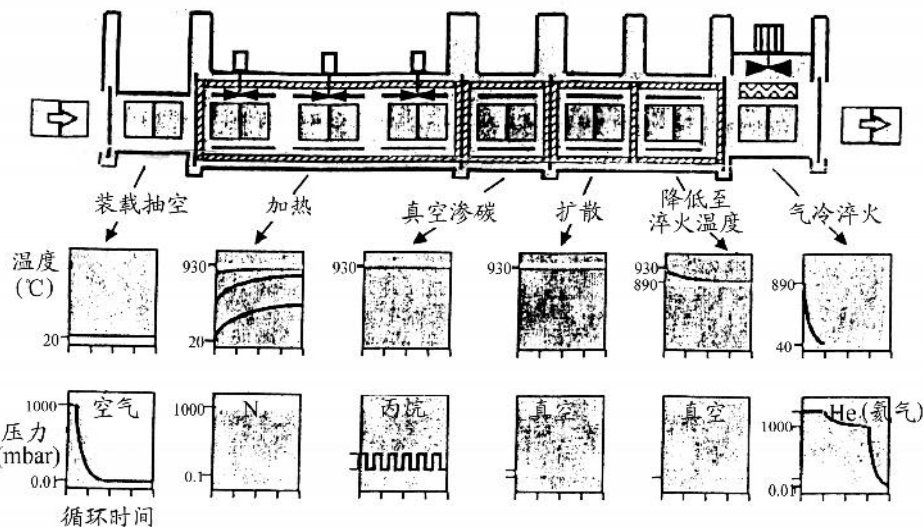


图 16 VMKQ 型连续式多室真空热处理生产线及工艺过程示意图

Fig. 16 Scheme of VMKQ continuous multichamber vacuum heat treatment production line and operating process

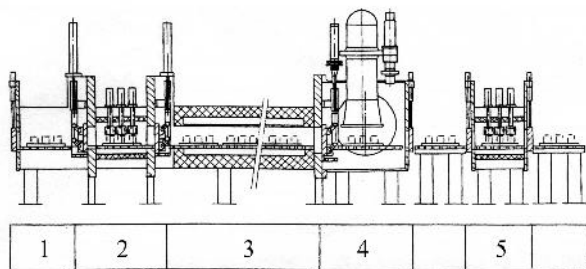


图 17 混合式计算机集成真空热处理设备系统

1真空前室 2快速感应加热室 3真空离子渗碳区  
4气体淬火设备 5非等温回火(感应加热)

Fig. 17 Mix-type computer integrated vacuum heat treatment assembly

1 front chamber 2 rapid induction heating chamber  
3 ionic carburizing zone 4 gas quenching unit  
5 non-isothermal tempering (induction heating)

(2)广泛采用计算机微电子技术及网络技术,研制开发智能控制系统和网络管理系统,实现真空热处理工艺和设备的柔性化和连续作业。

(3)进一步提高自动化程度和控制精度,主要技术指标:

炉温均匀性  $\pm 3$  ;

充气压力  $5 \times 10^5 \text{Pa} \sim 20 \times 10^5 \text{Pa}$  氩+氢混合  
气体控制冷却并回收;

最高加热温度 2500 ;

压升率  $< 6.67 \times 10^{-1} \text{Pa/h}$ ;

真空度  $10^{-2} \text{Pa} \sim 10^{-4} \text{Pa}$ 。

(4)开发真空等温热处理技术、设备及智能控制系统。

(5)开发真空感应加热技术。

(6)研发真空脱脂清洗技术与设备及推广应用。

(7)真空离子注入、真空离子涂覆技术和设备的开发和应用。

(8)在计算机技术的推动下,广泛应用真空热处理工艺CAD和真空炉设计CAD技术,实现真空热处理工艺最佳化和真空炉结构的优化设计。

### 参考文献

- [1] 阎承沛. 真空热处理工艺与装备设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
- [2] 阎承沛. 我国真空热处理技术的现状和未来[J]. 热处理, 2000, 17(2):1-8.
- [3] 林光磊, 徐剑银. 4Cr5MoSiV1 钢热挤压模真空渗氮工艺探讨[A]. 首届中国热处理活动周论文集[C]. 大连, 2002.
- [4] 郭剑, 陆建明. 真空脉冲渗氮工艺研究[A]. 首届中国热处理活动周论文集[C]. 大连, 2002.
- [5] 王琦. H13、3Cr2W8V 模具钢真空脉冲渗氮层的显微结构和性能[A]. 首届中国热处理活动周论文集[C]. 大连, 2002.
- [6] 刘道. 关于我国热处理生产技术改造的思考[R]. 全国热处理协会会议. 北京, 1996.
- [7] 戴芳, 等. 单室真空高压气淬炉的研制与开发[A]. 第六届全国工业炉学术年会论文集[C]. 北京, 2002.
- [8] 周有臣, 戴芳, 等. 真空炉内强制对流加热及连续高压气冷技术[A]. 中国热处理行业协会和机械工业技术交易中心. 当代热处理技术工艺装备精品集[C]. 北京: 机械工业出版社, 2002, 163-167.
- [9] 周有臣. WZ系列真空铝钎焊炉的研制[A]. 第六届全国工业炉学术年会论文集[C]. 北京, 2002.
- [10] 阎承沛. 燃气式真空炉研究与开发评述[J]. 国外金属热处理, 2000, (2).
- [11] 陈再良, 阎承沛, 等. 先进热处理制造技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [12] Third ALD-Symposium China [R]. Sanya Hainan Island, November 2003.
- [13] ALD Vacuum Technology AG. Third ALD-Symposium China [R]. Sanya Hainan Island, November 2003.