

国外真空热处理最新研究和发展

北京航空材料研究所 王广生

本文介绍了国外真空热处理最新研究和发展情况,着重分析了真空加压气淬和石墨构件真空炉加热增碳问题。

The Latest Foreign Research and Development of Vacuum Heat Treatment

Wang Guangsheng

(Institute of Aeronautical Materials, Beijing)

This paper gives an introduction to latest researches and developments of vacuum heat treating in foreign countries, concentrates on vacuum high pressure atmosphere quenching and the problem of carbon pick-up during heating in vacuum furnaces which construction components are made of graphites.

真空热处理具有无氧化、无脱碳、热处理变形小、表面光亮、真空化学热处理速度快等优点,可以提高零件热处理质量和使用寿命,还能减少环境污染,改善劳动条件,是热处理技术的重要方向之一。由于航空工业对热处理要求严格,所以真空热处理处于优先发展地位。

近年来我国真空热处理技术发展很快。在工艺方面,真空退火、真空气淬、真空油淬等工艺已用于生产;在设备方面,各种类型卧式、立式真空炉已能生产供应。但与国外最新一代真空炉相比,我国还有一定差距。根据航空工业发展和国际合作的需要,决定从国外引进大型立式多用途真空炉,具有真空油淬和真空加压气淬功能,适用于超高强度钢、高温合金及钛合金热处理,为此,航空航天部组织了专门考察组,对国外真空炉主要生产厂家和热处理生产厂生产情况进行考察。先后考察了法国 ECM 公司、美国 Abar-Ipsen 公司和 Hayes 公司、加

拿大 Vac-Aero 公司等。综合各方面情况,国外真空热处理最新研究和发展主要是:真空炉设计和制造向高效率、低成本、节能和多功能方向发展,在真空热处理工艺方面重点发展超高强度钢真空油淬、真空加压气淬和真空化学热处理,此外对真空热处理加热时增碳问题进行了研究。

1. 真空炉设计和制造向高效率、低成本、节能和多功能方向发展

(1) 组件积木式设计

为了适应用户多用途、多类型的要求,美国 Hayes 公司发展了组件积木式设计,以满足不同需求,并迅速做出设计方案。组件积木式设计就是把炉体分解成前炉、后炉、中段等大组件,并预先设计好大组件的图纸和资料,当设计新炉子时选用这些标准组合件组合而成。Hayes 公司的组件积木式设计案例如图 1 所示。

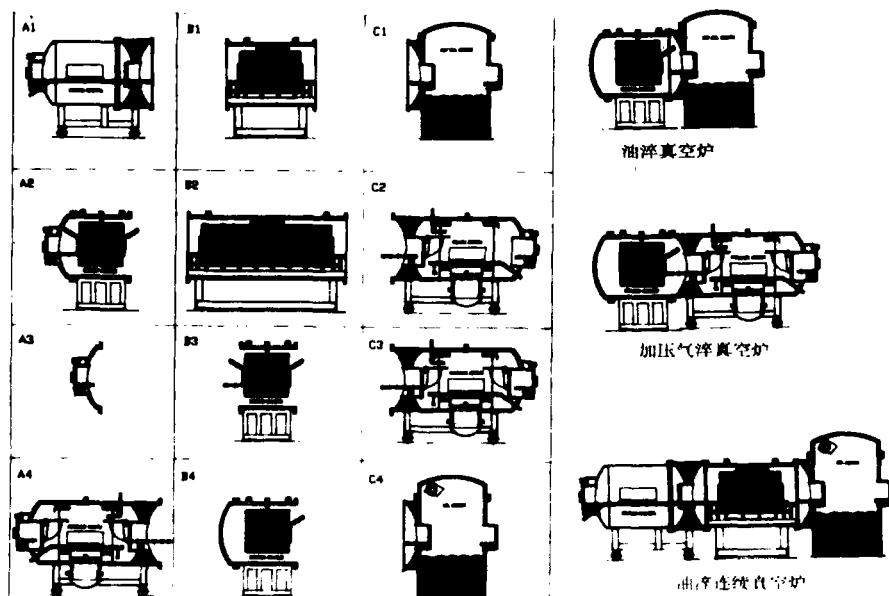


图 1 Hayes 公司组件积木式设计案例示意图

(2) 具有对流加热和回火功能的高压气淬真空炉

为了提高真空加热速率并实现一炉多用目的, 美国 Abar-Ipsen 公司研究和生产了具有对流加热和回火功能的高压气淬真空炉 VTTC-K (见图 2), 这种炉型有两个风扇, 纵向风扇是高压气淬风扇, 横向风扇是对流加热和回火用风扇。有活动风门挡板来调整适应不同风扇, 形成不同循环气流通路。试验表明, 当充氮 2bar 对流循环加热时, 可减少加热时间 50% (如图 3 所示), 也可减少回火周期 50%。此外, 高压气淬采用全自动可控的双排摆动喷嘴, 使冷却更均匀, 冷速更快, 可缩短冷却周期 25%。

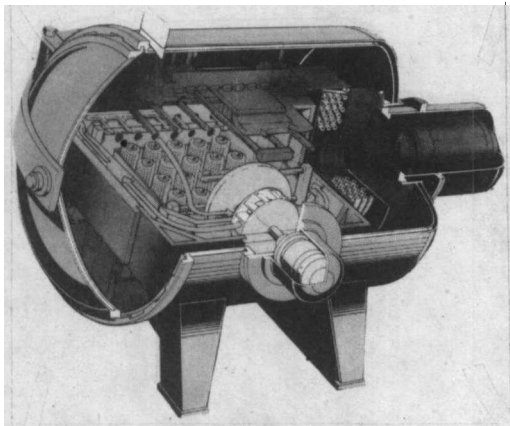


图 2 VTTC-K 型真空炉示意图

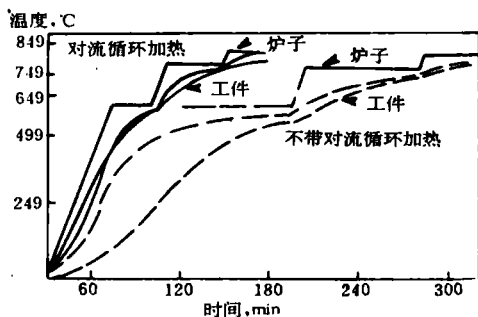


图 3 带对流循环真空炉加热曲线

(3) 具有两套真空机组的真空炉

为了提高抽气速率, 把加热过程的氧化影响降低到最低程度, 法国 ECM 公司设计的真空炉采用一台真空炉配二台扩散泵或两套真空机组。这种炉型特别适合大型零件、或不易清洗的零组件, 并且可以把真空热处理炉与真空钎焊炉合二为一。一般真空热处理时, 污染较小, 开一套机组即可; 真空钎焊或热处理大型零组件时, 可以两套真空机组同时开。ECM 公司的 PFSE1500×2000 立式真空加压气淬炉, 两套真空机组同时开时, 可以在 4min 内抽至 $6.3 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ ($4.7 \times 10^{-6} \text{ torr}$); 放入零件后, 在保持 10^{-6} torr 级别的真空度情况下, 可以在 50min 内加热至 754℃。

(4) 立式真空炉工件加热装夹的改进

立式真空炉多采用底装式, 工件装夹可以采用链条

吊挂、横杠卡挂、炉底顶撑等方式。链条吊挂结构简单, 但吊挂载荷重量有限, 炉底顶撑支撑重量大, 但在随后油淬时支撑组件也要浸油, 清洗工作量大, 而横杠卡挂兼有撑重大、随零件油淬托架简单且易清洗。

2. 不断改进真空油淬

近年来随着真空炉改进和工艺研究进展, 美国军标、宇航标准、波音公司标准都已列入真空热处理, 麦道公司还制订了专门真空热处理工艺标准。加拿大 Vac-Aero 公司从 1975 年就采用真空炉进行高强度钢制航空重要受力件的热处理, 并进行了一系列试验研究。现在该公司有一条真空油淬生产线, 包括一台立式真空炉 ($\phi 1829 \text{ mm} \times 2286 \text{ mm}$)、一个清洗槽和二台空气井式回火炉。真空热处理的钢种有 4340、300M、4330V、Hy-Tuff、D6AC 等, 真空热处理零件包括飞机起落架、梁、各种接头等。

(1) 真空加热室与油槽之间增加真空密封门

早期的立式真空油淬炉真空加热室与油槽是贯通的, 由于淬火时油蒸汽上升进入加热室, 污染了加热室, 并影响热处理零件表面光洁度。

Vac-Aero 公司研究了不同情况下加热室炉气成分。当真空密封门关闭时加热, 真空度为 4 Pa ($3 \times 10^{-2} \text{ torr}$) 情况下, 氧分压在 $1 \mu \text{ Pa}$ ($1 \times 10^{-8} \text{ torr}$) 以下, 水蒸汽分压在 0.09 mPa ($7 \times 10^{-7} \text{ torr}$) 以下。300M 钢试样真空油淬后表面光亮, 无脱碳和晶间腐蚀, 力学性能均满足技术要求, 并且数据分散度小, 如表 1 所示。

表 1 300M 钢真空热处理后力学性能

性能指标	平均值	分散度 (标准方差)	技术条件要求
σ_b , MPa	2015	26.9	1900~2100
$\sigma_{0.2}$, MPa	1673	31.7	≥ 1590
δ , %	11.7	1.37	≥ 7
ψ , %	42.8	3.4	≥ 25
夏氏冲击值, J/cm ²	49	4.9	≥ 35

注: ①300M 钢热处理工艺为 870℃真空油淬, 288℃空气炉回火两次;

②试验结果是 117 个试样的结果。

(2) 真空炉自动控制的安全可靠性增加

现代真空炉设计都采取很多措施, 保证安全可靠地运行。一般在加热突然断电 30s 后真空泵自动关闭, 并自动向加热室回充氮气至 85 kPa (650 torr), 工件可以不受损伤情况下缓冷。Vac-Aero 公司做了模拟试验。将 300M 钢试件真空加热至 870℃, 然后回充氮气缓冷至 150℃以下, 试件表面没有发现脱碳。另外, 为了防止较大泄漏, 真空炉限制最大压力, 该公司做了模拟漏气的试验, 空气通过精确控制的针孔漏入真空炉内, 炉压升至 13 Pa (0.1 torr), 并在 300M 钢真空热处理过程中保持, 试验结果如表 2 所示, 由此可见, 漏气的最大安全炉压定为

13Pa 是可行的。

表 2 安全试验对 300M 钢表面的影响

试验条件	局部脱碳层深度, mm	高温氧化层厚度, mm
模拟突然断电	0.00	0.00
模拟漏气至 13Pa (0.1torr)	0.00	0.004
技术条件要求	0.08	0.013

注：①300M 钢真空热处理工艺为：以 8℃/min 速度加热至 595℃，保持 90min；再以 8℃/min 速度加热至 870°，保持 90min；淬油。

②模拟漏气试样均为重复淬火试样，预先经模拟突然断电试验。

3. 真空加压气淬广泛应用

真空加压气淬是以大流量高压气体对真空加热后的工件进行强制冷却，以提高气淬冷却速度，同时可以通过调整冷却气体的流量或压强来达到不同冷速或实现等温处理（见图 4），以适应不同材料和不同工件对冷速的要

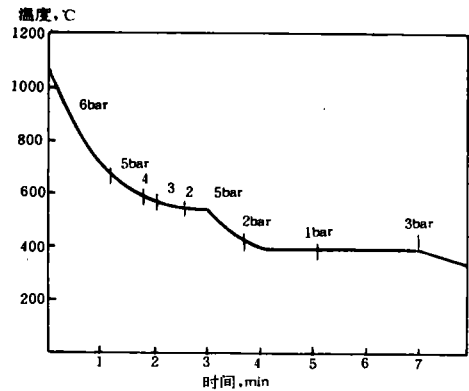


图 4 通过控制淬火压强来控制冷却的例子

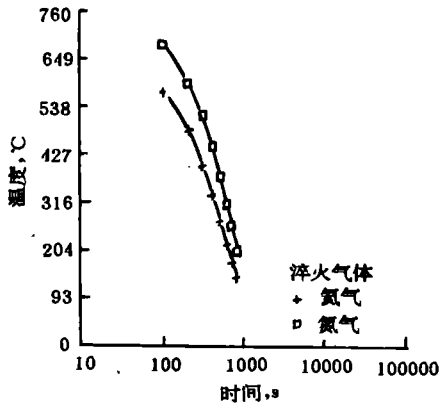
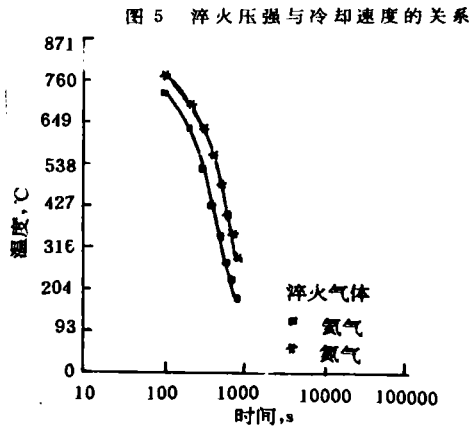


图 6 氮气和氩气真空气淬的冷却速度对比
(a) 最快冷却速度



(b) 最慢冷却速度

(2) 超高强度钢 300M 的真空加压气淬

Abar-Ipsen 公司研究了 300M 钢真空加压气淬，300M 钢 $\phi 50.8\text{mm}$ 试件在 5bar 充氮气淬时，从 870℃ 冷却到 370℃ 需 4min，30min 时可冷却到 66℃。300M 钢经

材料工程

求，具有广泛应用前景。

(1) 真空加压气淬冷却速度的影响因素

美国 Abar-Ipsen 公司、Hayes 公司、加拿大 Vac-Aero 公司等研究了真空加压气淬的压力和气体种类对冷速的影响。由于试样和试验条件不同，其结果不尽相同，但规律相似。Abar-Ipsen 公司提供的淬火压强与冷速关系数据如图 5 所示。淬火压强从 1bar 增加至 2bar，冷速提高 1 倍，6bar 淬火压强的冷速是 2bar 的两倍，18bar 淬火压强的冷速是 6bar 的两倍。美国 Hayes 公司对比了氮气和氩气加压气淬冷却速度，在装载 272kg 的相同条件下，分别以 1bar 的氮气和氩气进行气淬，从 1093℃ 冷却到 204℃ 氮气冷却用了 1470s，氩气冷却则用了 1590s，这就是说氮气的冷却速度大约是氩气的 1.36 倍。加拿大 Vac-Aero 公司对比了氮气和氩气气淬的冷却速度，结果如图 6 所示。可见氩气的冷却速度比氮气要快。综上所述，氩气冷却速度最快，氮气冷却速度较慢，而通常用的冷却气体氮气居中。

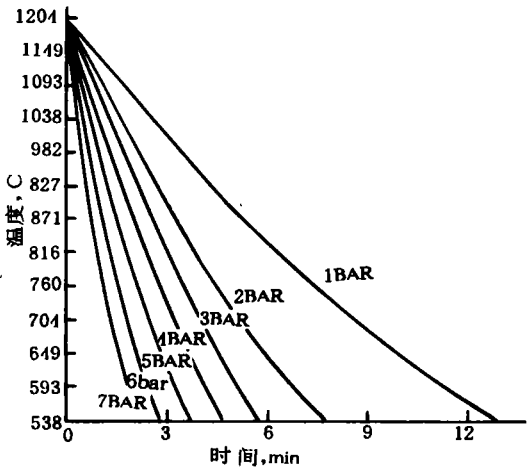


图 5 淬火压强与冷却速度的关系

5bar 和 6bar 充氮气淬后心部取样的拉伸性能如表 3 所示。试验结果表明，300M 钢 $\phi 50.8\text{mm}$ 试件经 5bar 充氮气淬和 $\phi 76\text{mm}$ 试件经 6bar 充氮气淬后的拉伸性能均能满足技术条件要求，这就是说，5bar 氮气真空加压气淬

能淬透 300M 钢中 50.8mm,而 6bar 氮气能淬透 ϕ 76mm。这些数据为低合金超高强度钢采用真空加压气淬提供了重要技术资料,但要实际应用还需进行深入研究。

表 3 300M 钢真空加压气淬力学性能试验结果

试验条件	σ_b (MPa)	σ_s (MPa)	δ (%)	ψ (%)	HRC
ϕ 50.8mm 试件 5bar 氮气气淬①	2090	1828	6	34	53~54
ϕ 76mm 试件 6bar 氮气气淬②	1998 1993	1668 1682	12 12	34 33	51~53
技术条件要求	1900~2100	≥ 1590	≥ 7	≥ 25	—

注:①试验时装有 ϕ 76.2mm \times 76.2mm 钢件陪材料,试件心部到温后透烧 30min 气淬,288℃ 4h 回火两次。
②试验时装有 ϕ 76mm \times 229mm 钢件陪材料,试件心部到温后透烧 150min 气淬,302℃ 6h 回火两次。

(3) 结构钢和不锈钢的真空加压气淬

Abar-Ipsen 公司对 300M 钢及德国钢种 32NiCrMo125

(相当 32CrNi4Mo)、45SiCrV6 (相当 45CrSi2Mo)、X90CrMoV18 (相当 Cr17)、X22CrNi17 (相当 Cr17Ni2) 钢进行了真空加压气淬试验。炉中装满陪材料,额定载荷重 150kg,试件放在陪材料中间。真空加热后进行 6bar 氮气加压气淬,然后测试心部和表面维氏硬度,其结果如表 4 所示。由此可以看出,6bar 氮气真空加压气淬时,除 45SiCrV6 外其他钢种均可淬透 ϕ 40mm,而 45SiCrV6 钢连 ϕ 20mm 都淬不透。

(4) 真空加压气淬应用

由于真空加压气淬具有冷速范围宽、污染小、可实现冷速可调和等温冷却,所以虽然研究发展时间不长,但很快广泛应用起来,据这次考察统计,国外先进热处理专业化厂或车间,真空加压气淬炉约占真空炉的一半至三分之一。目前应用对象主要是高温合金、不锈钢、钛合金零件及工模具、轴承的热处理,也正在研究发展合金结构钢的真空加压气淬。在美国,真空加压气淬已用于 30CrSiMoV 钢制民航飞机刹车盘的热处理,但尚未见用于航空重要受力件。

表 4 结构钢和不锈钢真空加压气淬试验结果

材 料	淬火温度 ℃	技术条件要求 HV	ϕ 20mm 试件的硬度, HV		ϕ 40mm 试件硬度, HV	
			心 部	表 面	心 部	表 面
300M	870	≥ 575	509~620	593~627	613~636	551~634
32NiCrMo125	870	535~590	549~555	549~569	551~581	551~581
45SiCrV6	890	550~590	542~591	571~643	-	-
X90CrMoV18	1050	≥ 660	643~699	673~688	659~700	642~704
X22CrNi17	1020	420~465	426~444	426~453	439~450	436~453

4. 研究发展真空化学热处理

真空化学热处理主要包括真空渗碳、离子氮化、离子渗金属等。与普通化学热处理相比,具有渗速快、成本低、质量好、环境污染小等优点,所以具有广阔的发展前景。

这次考察中注意到,国外真空渗碳已发展到工业实用阶段。每一个真空炉生产厂家都有数台真空渗碳炉在生产线上生产,并正在研制把真空渗碳与真空淬火合二为一的多功能真空炉,法国 ECM 公司的联合真空渗碳炉由 1~4 个渗碳单元、1 个油淬单元或加压气淬单元以及一个装卸单元组成,均装在一个大真空容器中,渗碳和淬火都在其中完成。在热处理生产专业化厂或车间,我们看到正在生产的真空渗碳的实际情况,渗碳后零件表面光亮,无需再加工即可直接装机使用。

5. 真空热处理加热时钛合金和不锈钢增碳问题

为了降低成本,真空热处理炉重要改进是采用石墨作真空炉构件,但人们担心在热处理加热时会产生增碳而影响使用性能。Abar-Ipsen 公司研究了钛合金和不锈钢在石墨构件真空炉中热处理加热的增碳问题。

试验结果如表 5~8 所示,试验结果表明:

(1) 钛合金与石墨高压接触真空热处理时,有不很明显的增碳现象,钛合金表层出现 0.4mm 深的针状 α 相择优取向排列;而低压接触真空热处理没有发现增碳。钛合金与石墨不接触时,在真空度 1.33×10^{-2} Pa (1×10^{-4} torr) 下真空热处理没有发现增碳;但回充 267Pa (2torr) 氮气情况下表层产生 α 硬化层,所以钛合金真空热处理不能用氮作回充气体,一般用氩气作为回充气体。

(2) 不锈钢与石墨高压接触真空热处理时,会产生明显增碳现象,而且纤维增强石墨 (CFC) 影响更大,低压接触时也会产生局部增碳。不锈钢与石墨不接触时,在

表 5 在 1.33×10^{-2} Pa 真空度下 Ti-6Al-4V 与石墨接触增碳试验结果

石墨类型	温度 (℃)	时间 (min)	增 碳 情 况	
			高压接触	低压接触
ATS, CFC	1040	180	针状 α 相择优 方向排列, 深度为 0.4mm	检测不出

注:①ATS 为细粒度、高密度石墨板,CFC 为碳纤维增强石墨板(以下同)。

表 6 Ti-6Al-4V 与石墨间距 25.4mm

时真空或充氮的增碳试验结果

石墨类型	温度 (℃)	时间 (min)	增 碳 情 况	
			$1.33 \times 10^{-2} \text{Pa}$	267Pa, N ₂
ATS, CFC	870	180	检测不出	α 层深 12 μm
ATS, CFC	980	180	检测不出	α 层深 25 μm
ATS, CFC	1040	180	检测不出	α 层深 40 μm

真空度 $1.33 \times 10^{-2} \text{Pa}$ ($1 \times 10^{-4} \text{torr}$) 下真空加热没有发现增碳; 回充氮气至 1333Pa (10 torr) 情况下, 在 1260℃

以上真空热处理时出现很小局部增碳, 而采用氢气回充时没有增碳。如果在石墨表面等离子喷涂 0.25mm 厚氧化铝, 在高压接触时加热 20h 以上也没有发现不锈钢增碳, 由此可见, 在石墨构件表面上喷涂氧化铝层能防止增碳。

(3) 为了避免石墨构件的真空炉热处理时增碳, 应采取措施避免热处理工件与石墨直接接触, 方法有: ①在石墨支撑导轨上垫上氧化铝材料板或嵌上氧化铝陶瓷衬套; ②在石墨支撑导轨表面上喷涂氧化铝层; ③采用非石墨夹具把工件与石墨支撑隔开; ④对于钛合金或不锈钢真空热处理, 应避免使用氮气回充, 可用氢气或氩气作回充气体。

表 7 在 $1.33 \times 10^{-2} \text{Pa}$ 真空度下 347 不锈钢与石墨接触增碳试验结果

石墨类型	温度, ℃	时间, min	接触压力		增碳情况	增碳深度, mm
			高	低		
ATS	1070	120	✓	—	连续碳化物	0.45
CFC	1070	120	✓	—	严重连续碳化物	0.80
ATS	1070	120	—	✓	局部不连续碳化物	0.15
CFC	1070	120	—	✓	检测不出	—
ATS	950	120	✓	—	局部不连续碳化物	0.05
ATS	950	120	—	✓	检测不出	—
ATS	900	120	✓	—	局部微小碳化物	0.015
ATS	850	120	—	✓	检测不出	—

表 8 347 不锈钢与石墨间距 25.4mm 情况下充气增碳试验结果

石墨类型	温度, ℃	时间, min	充气至 1333Pa		增碳情况	增碳深度, μm
			N ₂	H ₂		
ATS	1205	180	✓	—	检测不出	—
ATS	1205	180	—	✓	检测不出	—
ATS	1260	180	✓	—	不连续少量晶界碳化物	50
ATS	1260	180	—	✓	检测不出	—
ATS	1315	180	✓	—	少量晶界碳化物	15
ATS	1315	180	—	✓	检测不出	—
CFC	1315	180	✓	—	极少量不连续晶界碳化物	25

目前, 国内外热处理生产厂家采用各种不同防止增碳措施, 用石墨构件的真空炉对钛合金、不锈钢及高温合金零件成功地进行了真空热处理, 质量良好。

结 束 语

国外真空热处理, 无论在设备方面还是工艺方面都在迅速发展, 在不断改进完善真空油淬、气淬等工艺基础上, 重

点发展真空加压气淬和真空化学热处理, 真空热处理已成为热处理的重要组成部分。相比之下, 我国现在还有不少差距, 今后应充分发挥设计、制造和使用相结合的优势, 通力合作, 在消化吸收国外先进技术基础上, 发展我国真空热处理设备体系和真空热处理新工艺, 为提高我国热处理水平而努力奋斗。

参考文献 (略)