

## 航空热处理新技术发展

王广生

北京航空材料研究院，北京 100095

近年来，为了适应建立现代化国防需要，加快了航空工业的建设和发展，加大了航空热处理技术改造力度，新建和扩建热处理厂房，面积增加近一倍，设备更新在50%以上，同时也推动了航空热处理新技术研究和采用。在真空热处理、可控气氛热处理、热处理冷却技术、热处理节能减排技术和标准与管理等方面都有了长足进步和发展。

### 1 真空热处理技术

#### 1.1 真空油淬技术

真空油淬是目前真空热处理的主要工艺。真空油淬技术发展过程中曾遇到的技术难点是真空油淬增碳问题。上世纪七十年代的实验研究表明，真空油淬可能产生增碳，使疲劳性能降低。近三十年解决了真空淬火油和真空油淬表面增碳等技术关键，除在工模具热处理方面应用外，已成功用于飞机起落架等重要结构件的精密热处理。

总结真空热处理研究成果和生产经验，1991年编制了HB/Z191-91“航空结构钢不锈钢真空热处理书”，用于指导航空工业中真空热处理生产。

航空超高强度钢制起落架等重要受力件大都是长杆件，一般要求采用立式真空油淬炉进行垂直加热和淬火，给真空热处理带来不少困难，成为航空真空热处理的关键。

为了防止油淬时油烟上升污染加热室，真空立式油淬炉一般有三个室：加热室、中间室、淬火槽。淬火时，现将加热的工件放到中间室，关闭炉门后再淬入油中，这样淬火转移时间长，很难达到结构钢淬火转移时间 $\leq 25s$ 要求。通过良好紧凑结构设计和精密协调的控制，较好解决了立式真空油淬炉淬火时防止污染加热室和缩短淬火转移时间的技术关键，成功用于起落架等长杆件的真空油淬。

真空立式油淬炉还有一个没有中间室的方案，真空加热室直接连着淬火油槽，淬火时，通过向炉内通入大量氮气压制淬火时油烟对加热室的污染。

#### 1.2 真空加压气淬

真空加压气淬具有工件表面光洁、无需清洗、避免环境污染等很多优点，是近年来真空热处理重要和迅速发展领域。主要问题是淬透性和淬硬性及与传统的气淬、油淬、分级淬火或等温淬火对比和衔接，应从冷速测定和临界直径测定去研究。目前航空工业中真空加压气淬已成功用于不锈钢、高温合金、钛合金、精密合金和部分结构钢等零件的热处理，发挥了重要作用。

##### (1) 真空加压气淬的冷速测定

真空加压气冷，提高了冷却速度，可以代替传统的气冷、部分油冷或分级淬火，可以实现控制冷却，达到合理冷却的目的。所以研究真空加压气冷的冷却特性，并与常规的炉冷、气冷、油冷、硝酸盐浴等冷却方式对比是制定真空加压气冷工艺的重要依据。

我们用KHR-01便携式冷却介质性能测定仪，采用内装热电偶的镍基合金探头实验法，测试了美国Abar-Ipsen公司H3636的各种压力气冷的冷却速度，并与气冷、吹风冷却、油淬进行对比，实现了真空加压气冷的冷速与通常的冷却介质冷却的对比衔接。普通气冷的冷却速度介于0.1Mpa和0.2Mpa加压气淬之间，吹风冷却冷速介于0.3Mpa~0.4Mpa之间。

##### (2) 真空加压气淬的淬透性

目前，对于真空加压气淬技术的关键是对主要的合金结构钢、工模具钢和不锈钢等测试和确定不同淬火压强的临界淬透直径，以指导真空加压气淬热处理生产。我们的试验表明， $5 \times 10^5$ pa压力下气淬，可将 $\phi 80$ mm的40CrMnSiMoVA钢淬透；40CrNi2Si2MoVA钢可淬透 $\phi 60$ mm，2Cr13钢可淬透 $\phi 130$ mm，9Cr18钢可淬透 $\phi 50$ mm。也可借鉴的临界淬透直径国外资料的数据。

#### 1.3 真空渗碳

真空渗碳多采用真空-充气脉冲式渗碳工艺，以避免渗碳过程中产生内氧化等缺陷。该工艺具有工件表面光亮、生产效率高、成本低、可进行盲孔或小孔渗碳等优点，但工件表面碳黑多、尖角过渗等问题突出，应予以防止。

我们采用国产双室真空渗碳炉进行了不锈钢真空渗碳研究，圆满解决了不锈钢由于存在钝化膜而不易进行渗碳和渗碳温度过高的问题。采用丙烷作渗碳剂、氮气作载气，合理控制两种气体混合比例及流量压力，有效控制了真空渗碳过程中碳黑的产生及其影响。1Cr11Ni2W2MoV不锈钢真空渗碳已用于航空零件的生产。

## 1.4 真空磁场热处理

磁场热处理可以提高磁性材料的电磁性能，也可以提高结构材料的力学性能。真空磁场热处理把真空热处理技术与电磁场技术结合起来，形成真空热处理的又一个分支。

我们研制成功可控制加热和冷却的真空磁场热处理设备，对软磁材料49K2ΦA（相当于1J22）和电机转子进行了真空磁场热处理，样件和产品的磁性有很大提高，与普通真空热处理相比，真空磁场热处理在磁感应强度（B）和屈服强度（σ<sub>S</sub>）相同情况下，矫顽力（HC）明显降低。

## 2 可控气氛热处理

### 2.1 氮基气氛保护热处理

氮基气氛是一种很有发展前途的可控气氛，用于保护热处理和化学热处理。氮基气氛用于保护处理可以达到少无氧化脱碳和光亮热处理，氮基气氛化学热处理可以减少内氧化等缺陷，提高化学热处理质量。氮基气氛还具有气源丰富、节约能源、成本低廉、安全性好、适应性强、污染少、不会产生氢脆，还可等温淬火等优点，目前成为热处理的重要分支。

氮基气氛保护热处理可以采用箱式多用途炉、底装料立式多用途炉，也可采用井式多用炉。氮基气氛保护热处理可以满足脱碳层≤0.075mm的要求。

氮基气氛保护热处理气氛炉气中主要是氮气，含氢在6%左右。由于氮基气氛保护淬火时炉气中氢含量较低，对钢件不会产生增氢。淬火试样氢含量比原材料有所下降，但仍有氢脆危险，只要及时回火即可避免氢脆危险，不必增加专门除氢处理工艺。另外氮基气氛热处理使用温度应控制在1050℃以下。

### 2.2 可控渗碳

#### （1）碳势控制的精确度

在保证炉温均匀性和温度精确控制前提下，采用碳势传感器和碳控仪进行碳势控制。

但在滴注式气氛和直生式氧气条件下，还需要红外仪对CH<sub>4</sub>和CO进行控制。可控渗碳采取的控制方案主要有氧探头控制、红外仪控制、电阻探头控制等。常用的是氧探头控制，从单一参数控制逐渐发展到氧势—CO—温度三参数控制，碳势控制精度±（0.025～0.05）%C。

#### （2）底装料立式多用炉

底装料立式多用炉具有如下特点：

①炉子升温快，炉内气氛可迅速转换，该设备从室温（冷炉状态）升至900℃渗碳温度的总计时间仅需1.5h，从炉内某一种气氛转换为另一种气氛在几分钟内即可完成。可以实现薄渗层和表面碳势（或硬度）同时要求的渗碳或碳氮共渗。

例如北京长空机械有限公司来用SOL0多用炉解决了0.05～0.10mm超浅层碳氮共渗。

零件热处理质量长期不稳定问题，某型号航空产品中有一项操纵杆类零件，其材料为ZG35CrMnSi，要求碳氮共渗层深度0.05～0.10mm，要求渗层表面硬度688～766HV。

②底线料立式多用炉生产线可根据需要配置火炉、清洗机、传动机构，适应不同生产批量。配置灵活多样，冷却部分可配油槽、水槽、等温槽和加压气冷室，可以实现油淬、水淬、有机淬火介质淬火、等温淬火、加压气淬等多种工艺。特别适合航空热处理小批量、多品种的特点，是代替盐浴最佳方案。目前，航空工厂已有近10台底装料立式多用炉。

#### （3）高温渗碳

今年在渗碳工艺方面重要发展之一是高温渗碳，一方面高温渗碳可以缩短渗碳时间，提高生产效率，另一方面高温渗碳可以解决不锈钢渗碳要求。随着航空工业发展，很多零件要求抗蚀耐温性能又要求耐磨，必须采用不锈钢渗碳，可以使用真空渗碳工艺，也可使用气体高温渗碳工艺。

普通渗碳炉最高使用温度为950℃，不锈钢渗碳要求在1000℃左右，为此要求使用高温渗碳炉，国内外已出现高温井式渗碳炉、高温箱式渗碳炉、高温底装料立式多用炉等，采用耐高温氧探头进行碳势控制。

不锈钢高温渗碳还有一个技术关键，就是要采用特殊方法去除钝化膜，可以通入氯化铵或其他介质。

### 2.3 可控渗碳

提高渗碳控制精度，改善渗氮层质量和稳定性是当前化学热处理另一个重要方向。精密渗氮基本要求是炉子有良好密封，保证炉内正压，炉温均匀 $\pm 3^{\circ}\text{C}\sim\pm 5^{\circ}\text{C}$ ，气氛均匀达到渗氮层偏差 $\leq 0.05\sim 0.1\text{mm}$ ，渗氮层组织在1~4级，波动范围2级，白亮层 $\leq 0.01\text{mm}$ ，氨分解率波动 $\pm 1\%\sim 1.5\%$ 。一种方案是采用氨分析仪（或氮分析仪）控制，另一种是采用氨探头控制。

渗氮炉最新进展：①采用氨高温裂解作为载气，有助于炉内氨势精确调整，又可以在少量工件渗氮时，不用填加陪衬料情况下实现可控渗氮。②实现氨势精确控制，通过传感器、精密流量阀和氮控仪实现闭路控制。③渗氮数据库和专家系统，可制定渗氮工艺和仿真控制。④去除不锈钢钝化膜的专利技术，较好解决了不锈钢渗氮工艺，有通入 $\text{NH}_3\text{Cl}$ 、 $\text{C}_2\text{H}_2\text{Cl}_4$ 及预氧化法等。

## 3 热处理冷却技术

### 3.1 冷却特性测试标准

为了对各种介质冷却特性进行比较，必须对测定方法，包括探头材料、几何形状和尺寸、加热和冷却条件等进行标准化。由国际热处理联合会（IFHT）淬火冷却委员会制订，在1995年颁布了ISO/DIS 9950《用镍合金探头测定工业淬火油冷却特性的试验室测定方法》。该方法对淬火油冷却特性测定采用尺寸为 $\Phi 12.5\text{mm}\times 60\text{mm}$ 的Inconel600探头。我国机械工业标准JB/T7951-2004“测定工业淬火油冷却性能的镍合金探头实验方法”等效采用了国际标准ISO/DIS 9950，采用镍基合金探头。

在冷却介质评定和冷却过程研究中都采用镍基合金探头和冷速测定仪，航空热处理应重视冷却技术，不断配置必要的研究和测试条件。

### 3.2 淬火介质的选择

热处理生产中常用的淬火介质是油、水、空气，有机淬火介质已发展成熟，应用越来越广泛，特别是由于热处理节能环保要求，有机淬火介质是发展方向。

在航空热处理中应积极采用有机淬火介质，减少热处理变形和减少环境污染。

成都某厂在4M空气循环电炉上已成功使用UconA代替水，大大减少了铝合金热处理变形和钣金件校正工时（50%以上）。

①7075模锻件，长 $\times$ 宽约 $500\text{mm}\times 400\text{mm}$ ，最大厚度为2mm。此锻件粗加工后采用硝盐炉加热，再热水中淬火后，测型面畸变量为 $1.0\sim 1.8\text{mm}$ ；采用新4m空气炉加热，在UconA水溶液中淬火，测型面畸变量为 $0.3\sim 0.6\text{mm}$ ，可见聚合物溶液淬火明显减少了畸变量。

②镜面化铣蒙皮7075材料毛料，尺寸 $2.45\text{mm}\times 1302\text{mm}\times 4991\text{mm}$ 。该项蒙皮板淬火后，周边翘曲，并有马蹄印和折痕，后续中工种难以消除，零件报废率达到100%；在UconA水溶液中淬火后，表面平整，消除了畸变现象。

③型材7075材料，最大厚度15mm，长度1500mm，该项零件淬火后，产生弯曲变形，与模具间隙超过2.5mm，校正周期长；在UconA溶液中淬火后，无畸形，不需校正。

### 3.3 淬火槽更新改造

航空工厂热处理车间传统的淬火油槽循环冷却大都采用室外大油库和泵循环自然冷却，油库较大，管路较长，由于年久失修都面临大修；也有的小型淬火槽采用压缩空气冷却，不符合质量控制要求，急需改善；还有很多新建厂房，也有设计布置淬火槽问题。

近年淬火冷却倍受重视，引进和开发了新型淬火槽技术，主要有空气换热器和真空热管换热器技术、涡轮循环和泵循环技术，使新型淬火槽系统紧凑，先进、符合热处理质量控制要求。另外真空炉、多用炉冷却系统也都采用空气换热器和双循环冷却系统，大大提高可靠性。

### 3.4 冷处理设备

近年航空工业发展要求使用高合金超高强度钢AF1410、Aermet100等、沉淀硬化不锈钢 17-7PH、PH13-8Mo、PH15-7Mo等钢种，这些钢种都要求进行冷处理，而且零件尺寸都比较大。有些渗碳零件要求控制表面残留奥氏体，提高表面硬度，也要求进行冷处理。铝合金热处理还有液氮淬火和大型冷藏要求等等，所以对冷处理设备提出了更高要求。

冷处理设备发展比较快的是液氮冷处理设备，它具有冷速快，又可控制冷速，温度均匀性好，容易制作大型冷处理设备，节能，成本低。由于近年制氮技术进步，航空工厂热处理炉使用氮气也逐渐改为液氮，大都配置了大型液氮罐，这样采用液氮冷处理设备具备了良好条件，应大力推广。

## 4 热处理节能减排技术

在机械制造行业，热处理是耗能大户，也是容易产生污染环境。在当前全世界和各国都在致力于节能减排的形势下，热处理行业节能减排的任务十分艰难和光荣。

## 4.1 热处理节能

热处理节能主要通过设备节能、工艺节能和管理节能。

(1) 热处理设备节能技术 主要采用陶瓷纤维炉衬或轻质耐火砖，减少蓄热；提高炉门密封性和减少炉壁开孔，提高炉子密封性；减少料盘、料筐重量，降低带走热量

(2) 热处理工艺节能技术 主要有采用先进热处理技术，提高和稳定热处理质量，发展复合热处理和修复热处理，提高零件寿命。

(3) 热处理管理节能技术 主要是：企业设专人管理能源，并建立完善的管理制度；改善能源管理，合理组织生产；建立奖惩制度，调动各方面节能积极性。哈尔滨某厂，通过改进管理，达到了节能30%效果。

## 4.2 热处理减排技术

热处理生产过程中排放的废热、废气、废水（液）、粉尘、废渣、噪声和电磁辐射都会对作业环境和周围的环境、大气、水质产生污染。

航空热处理中主要的是真空炉和底装料立式多用炉代替盐浴炉，用高频局部回火代替铅浴局部回火，淘汰落后工艺技术。另外，对于有污染的作业环境，如吹砂、油烟等强化通风除尘。

## 5 标准与管理

航空热处理特点是热处理材料种类多、工艺复杂多样、热处理生产小批量多品种，要求严格，实行全面质量管理。为适应航空热处理生产，重视热处理标准工作，不断把热处理生产经验和研究应用成果总结提高，形成标准，并严格执行。下一步发展是实现国内外一体化。

国内外一体化，就是实现国内产品热处理与国际合作中各厂家产品均采用相同条件、相同设备及相同工艺文件进行生产和质量控制，实现真正意义上的与国际接轨。首先是企业通过ISO9000系列标准认证，建立完整有效的质量保证体系，产品按ISO9000系列标准生产和管理。其次在设备和各种条件上达到一定水平，满足国际合作生产的各项要求。还要在技术上研究国内外的差异及解决办法，然后建立一整套被国内外接受的技术文件，用于指导生产。

## 6 结束语

航空热处理技术正处于迅速发展的时期，新技术、新工艺不断被研究和应用。技术改造全面展开，航空工业与国际合作和接轨的形势又对热处理提出更多更新的要求，我们应抓住大好时机，密切合作，深入交流研讨，学习借鉴国内外先进热处理技术，把航空热处理技术推上一个新台阶。