

航空热处理特点和发展

王广生, 张善庆

(北京航空材料研究院, 北京 100095)

摘要: 分析了航空热处理特点,介绍了航空热处理现状和新技术,分析论述了航空热处理今后发展预测和研究课题。

关键词: 航空热处理; 新技术; 发展预测

中图分类号: TG15 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-5053(2003)S0-0250-06

1 前言

航空工业是高科技产业,大量采用发展前沿的科学技术,选用各种比强度高新材料,发展近无余量成形技术、精密和超精密加工技术、柔性加工生产线等精密制造技术,为适应新材料和精密制造技术发展,航空工业热处理(以下简称航空热处理)重要发展方向是精密热处理,实现精密形状和尺寸控制及精确组织性能控制。为了确保航空产品高性能和安全可靠,航空系统研究和采用热处理新技术,率先实现了热处理全面质量控制,加快了技术改造力度。

2 航空热处理特点

航空工业生产各种航空器,减轻重量和确保安全是突出的矛盾,为了提高航空器的飞行性能,希望每个航空零件越轻越好,所以千方百计减轻每一克重量,另一方面飞行器安全问题是严重危及人身安全,甚至造成机毁人亡空难的大事,为解决重量与安全性这一矛盾,航空零件选用了各种比强度高的材料,并进行严格的热处理,以期获得最佳的综合性能。

改革开放以来,航空工业与国际交往迅速发展,引进并消化吸收了很多国外先进热处理技术,其中很重要的方面是热处理全面质量控制。热处理属于“内科”,热处理质量一般需通过使用专门仪器对零件或随炉试样进行检测,由于受到检测抽检率和检测部位的限制,对于每一炉批热处理

零件,甚至对每一个零件来说,检测都只是个别的、局部的,无论如何都不能达到对热处理质量100%的检测,检验不能完全反映整批零件或整个零件的热处理质量。热处理生产成炉批量投入,连续生产,一旦出现热处理质量问题,对生产和产品的影响很大;另一方面热处理对象大部是经过加工的半成品件或成品件,如果出现热处理质量问题,损失都很大;更主要的是热处理缺陷漏检很容易发生严重的机械事故,造成的损失更大。因此,从质量控制观点看,热处理属于特种工艺,要采取特殊措施进行质量控制,必须实行全面质量控制。

实行热处理全面质量控制,就是改变过去传统的单纯靠最终检验被动把关来保证质量的观念和制度,实行以预防为主、预防与检验结合的主动控制质量保证模式,把重点转移到质量形成过程的控制上来,把热处理缺陷消灭在质量形成过程中。热处理全面质量控制是一项系统工程,把专业技术、管理技术和科学方法集中统一在一个整体之中。

热处理全面质量控制,就是对零件在整个热处理过程中的一切影响因素实施全面控制。全体热处理有关人员都参与热处理质量控制工作,对热处理过程每一个环节都实行质量控制,其中主要是设备与仪表控制、工艺材料及槽液控制、工艺控制、技术文件资料控制、人员素质控制、环境控制等。

航空热处理对象除了钢铁材料之外,还包括众多的有色金属(铝、镁、钛、铜等)合金、精密合金、贵金属合金、高温合金等材料,热处理状态繁多,热处理工艺复杂多样,对热处理设备要求各种

收稿日期: 2003-06-05; 修订日期: 2003-08-25

作者简介: 王广生(1940-), 男, 研究员。

各样。

航空工业生产与其他军工生产的共同特点是小批量多品种,航空热处理作为航空工业生产一个环节,其生产特点也是小批量多品种。

综上所述,航空热处理特点是要求严格,实行全面质量管理,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。

3 航空热处理现状

根据航空热处理中心 2001 年调查和估算,主机厂热处理设备平均 63 台套,厂房面积平均 5700m²,职工平均约 153 人;辅机厂热处理设备平均为 24 台套,厂房面积平均 1600m²,职工平均约 26 人,航空工业热处理加热设备约 3200 多台套。少无氧化脱碳炉型约占 1/3。厂房面积约 24 万平方米,职工约 4500 人,其中技术人员占 12% 左右。

航空热处理近年来有了较大发展变化,概括起来有如下几方面:

(1)普通电炉全面改造,结合设备大修、技改、更新,实现了节能、提高炉温均匀性、双偶控测温、仪表智能化,使普通电炉上了一个档次。

(2)全面实施了炉温均匀性检测和管理,提高了全面质量控制的水平。

(3)积极采用先进的热处理技术。真空热处理以每年 30% 左右速度递增。氮基气氛热处理成为可控气氛首选,应用不断扩大;可控渗碳代替传统的滴注渗碳,已占 50% 左右,氢探头或氢分析仪(或氨分析仪)控制渗氮迅速发展,每年新增 5~10 台,铝合金空气循环电炉全面采用,已成为铝合金热处理的主力炉型。有机淬火介质代替传统的油、水在钢铁零件热处理应用,有机淬火介质在铝合金淬火中应用有突破性进展,在减少热处理畸变和环境污染方面显现了明显的效果。高能束热处理,如激光热处理、离子注入等已开始应用于航空工业应用。智能仪表和微机广泛用于工艺控制,计算机网络开始在航空热处理车间出现,使热处理车间呈现出现代化气息。

(4)航空热处理标准化体系更完整和先进。以“航空热处理质量控制”为龙头,补充完善了各种航空材料热处理工艺标准和热处理质量检验标准,建立了热处理工艺材料标准系列,制定了真空热处理、氮基气氛保护热处理、铝合金电导率测定

等新工艺标准。现有航空热处理标准 40 多项,形成了完整体系,并得到了认真贯彻执行。

(5)在基础条件(设备、人员素质等)不断改善的前提下,航空热处理生产管理水平不断提高,技术文件和管理体系与世界先进国家接轨,形成了本国产品生产和转包生产国内外一体化,完全按国际先进水平进行生产和管理。

4 航空热处理新技术

根据航空工业对热处理的特殊要求和航空热处理特点,航空热处理技术发展方向主要是精密热处理,即少无氧化脱碳、减小变形、精确控制,重点发展真空热处理、氮基气氛热处理、可控化学热处理、激光、电子束和离子注入等高能束热处理、新型冷却介质,以及计算机应用等。

4.1 真空热处理

真空热处理具有无氧化、无脱碳、可保持零件表面光亮的热处理效果,同时可使零件脱脂、脱气,变形小、节能、不污染环境且便于自动控制等优点,特别适合航空热处理高质量、小批量、多品种的特点,近年被广泛采用。

真空退火、真空油淬、真空气淬、真空回火、真空除气、真空除油、真空加压气淬等真空热处理技术都已很成熟,广泛用于生产。在真空油淬增碳现象及其防止、真空加热元素贫化规律、真空度与光亮度的关系、真空加压气淬冷速测定、真空热处理工艺及工艺参数优化等方面的研究已经完成,真空热处理已用于飞机起落架、梁、接头及发动机叶片等重要受力件。今后重点研究发展真空加压气冷和真空化学热处理。

(1) 真空油淬增碳问题

试验表明,高速钢真空高温加热时,使其表面活化,真空淬火时淬火油受热分解形成的活性碳原子在油淬过程中渗入钢中,使工件表面形成 30~40 μm 的白层。这种渗碳现象随淬火温度上升而更加严重,且与淬火加热保温时间无关。为防止该现象的产生,可采取气-油两段冷却法予以解决。

结构钢真空油淬也有类似现象产生,采用先充气后入油工艺增碳层只有约 0.1~0.2 μm 厚,其力学性能均能满足技术条件要求,并不影响使用性能,详见表 1。

表1 40CrNi2Si2MoVA钢真空油淬与普通油淬力学性能对比^{①②}Table 1 Mechanical property comparison between vacuum oil quenched and oil quenched steel 40CrNi2Si2MoVA^{①②}

Cooling ways	Process parameters	σ_b /MPa	δ_5 /%	ψ /%	a_k /kJ·m ⁻²	K_{IC} /MN·m ^{-3/2}	N_i (k=0.6)
Vacuum oil quenched	Soaked at 870°C × 1h with 6.7Pa vacuum then gas filled up (to 7.5 × 10 ⁴ Pa) after then quenched into oil	1919	11.8	54.7	746	82.2	1370
Oil quenched	Soaked at 870°C × 1h, oil quenched	1974	11.2	50.8	801	84.2	1445
Specification requirement	Soaked at 870°C × 1h, oil quenched	1860~2060	≥8	≥30	≥490	-	-

Note① After vacuum oil quenched and oil quenched, the samples were tempered at 300°C × 2h with air cooling, tempering for two times.

② The samples with vacuum oil quenching is of finished surface. And the samples with oil quenching is of rough finished surface.

(2) 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试验法,测试了美国 Abar-Ipsen 公司 H3636-6bar 炉型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。

(3) 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(详见表 2),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_s)相同情况下,矫顽力(H_c)明显降低。

表2 真空磁场热处理与普通真空热处理对比

Table 2 Comparison between vacuum magnetic heat treatment and vacuum heat treatment

Category	Process of heat treatment	Property results					Remarks
		B_4 (T)	B_{10} (T)	B_{25} (T)	H_c (O _e)	σ_s (MPa)	
Vacuum magnetic heat treatment	Soaked at 760°C × 3h, ≤0.133Pa; 15min before the soak stage is over, add magnetization current of 330A and maintain for another 5min, after cooling starts. samples cool down with furnace cooling	2.05	2.16	2.23	0.3	Longitudinal 343 transverse 358	First treatment pass
Vacuum heat treatment	Soaked at 770~780°C × 3h, ≤0.133Pa; furnace cooling to 730°C, then cooling at the rate of 400°C/h to 500°C, further cooling to 300°C, finally gas cooling	2.02	2.16	2.25	0.9	Longitudinal 351 transverse 309	No first treatment pass
		2.04	2.18	2.26	0.5	Longitudinal 356 transverse 314	Second treatment pass
Specification requirement	Soaked at 760~780°C × 2.5~3h, ≤0.133Pa; 15min. Before the soak stage is over, add magnetization current of 330A and maintain for another 5min after cooling starts; then cooling at the rate of 300~600°C/h to 400°C, finally furnace cooling	≥1.85	≥2.05	≥2.20	≤0.7	≥294	

4.2 氮基气氛热处理

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、不会产生氢脆等优点,目前成为热处理的重要分支。我国航空热处理中,高强度钢、超高强度钢采用等温淬火较多,而且目前真空热处理尚没有完全解决真空等温淬火技术关键。美、英等西方国家对超高度钢大都采用可控气氛保护热处理或真空油淬热处理,技术上比较成熟。因此,结合我国航空热处理等温淬火较多特点,应重点发展氮基可控气氛热处理。

(1) 氮基气氛井式多途炉

氮基气氛井式多用途炉既可以用于保护淬火,也可以用于可控渗碳。这种炉型可以用普通井式渗碳炉改造,也要以直接生产制造。特点是成本低,保护热处理能满足脱碳层 $\leq 0.075\text{mm}$ 要求。

氮基气氛井式多用途炉采用微机气氛温度控制仪进行碳势和温度控制,氧探头为炉气碳势传感器,氮气气源可以采用制氮机或瓶装氮气,氮气纯度98.0%~99.9995%。

(2) 氮基气氛保护热处理工艺

氮基保护热处理气氛炉气中主要是氮气,氢在6~10%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,只要及时回火氢脆危险可避免,不必增加专门除氢处理工艺。氮基气氛热处理温度过高可能产生增氮现象,应用温度控制在1050℃以下。

4.3 可控化学热处理

航空工业中大量的齿轮、轴、凸轮、花键等零件需采用渗碳或渗氮表面强化工艺。为了适应航空工业对渗碳件表面碳浓度和渗层浓度梯度控制的要求,必须采用可控渗碳工艺技术,目前可控渗碳可以采用氧探头、红外仪、电阻探头控制,常用的还是氧探头控制,从单参数控制发展到氧势-CO-温度三参数控制,碳势控制精度为 $\pm 0.025\sim 0.05\%$,同时还要根据渗层浓度梯度要求进行渗层深度的仿真控制。适应航空工业热处理小批量多品种特点,要求渗碳炉温度气氛恢复要快。

提高渗氮控制精度,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,炉温均匀性 $\pm 3\text{℃}\sim \pm 5\text{℃}$,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2~3级,白亮层 $\leq 0.01\text{mm}$,氮分解率波动 $\pm 1.5\%$ 。一种方案是采用氢分析仪(或氨分析仪)控制,另一种是采用氢探头控制。

4.4 高能束热处理

近几年发展起来的高能束热处理,在减少变形、获得特殊组织性能和表面状态方面显示了巨大优越性和潜力。对航空工业来说,有发展前途的高能束热处理有激光热处理和表面合金化、电子束局部热处理、离子注入表面改性,它们可以大大提高材料和零件的耐磨性、抗蚀性、抗咬合性等。在轴承、封严环等高精度、易磨损零件生产中有广泛的应用前景。

4.5 新型冷却介质

加热和冷却是热处理的两个基本组成部分,热处理基本原理就是通过加热和冷却来改变材料的组织性能。目前国内外不但发展了一系列适合各种热处理冷却要求的油类冷却介质,而且广泛使用有机淬火介质,对减少热处理变形和减少环境污染有重大作用。

(1) 研究推广有机淬火介质在铝合金热处理应用,我们对美国联碳公司 Ucon 型和德国德润宝公司 Aquatesid BW 型淬火介质进行了应用研究,并已成功在航空工业中应用;

(2) 研究用于真空热处理炉的等温淬火介质和工艺,代替盐浴等温,满足真空等温淬火要求;

(3) 研究和采用控制冷却技术和装置,以获得最佳组织和性能。

4.6 计算机应用

计算机的迅速发展和应用,不但可以用于热处理控制和计算机模拟。把网络技术应用于热处理,发展热处理车间的网络监控系统。

该系统包括自动记录仪、智能控温仪、执行元件、电源主回路、二次保护回路、工控机、打印机及监控系统软件等。集中监控计算机可以实时了解各设备运行情况,可以设置工艺参数、状态控制、数据查询、数据拷贝等功能。再把热处理车间管理网络联起来,可以实现热处理车间计算机化。

4.7 炉温均匀性检测新技术

在初期实施炉温均匀性检测时困难很多,热处理炉没有专门的测温孔或装置,采用无电阻转换开关和 UJ-33 仪表测试,效率和准确度很低。

后来改用巡回检测仪(如大华仪表厂 RD15, RD30)或多点记录仪表,实现自动打印记录,近几年又发展了直插式测试方法,解决了高温炉、连续炉炉温均匀性测试问题。炉温追踪仪可以实现与测温架或工件一起入炉,随系统移动,记录炉子温度均匀性或工件热工艺过程。

(1)直插式测试方法

传统测温架测试炉温均匀性,对高温炉经常发生烧塌测温架和热电偶损坏现象,对连续炉经常发生拉断热电偶现象,直插式测试方法解决了上述困难,测试方便简捷。

直插式测试炉温均匀性,首先对预定炉子的有效加热区的各测试点,从炉子顶上或侧面打几个直插热电偶的孔,在孔边缘固定法兰盘和通孔螺栓,以便固定插入热电偶,对真空炉还要作好动密封。测试时将直插热电偶从测温孔按要求插入炉膛并固定,测试后取出热电偶,恢复炉子正常情况。

(2)炉温追踪仪

该仪器由数据记录仪和隔热箱组成,相当于飞机的“黑匣子”。首先把热电偶按测温要求固定在测温架或工件上,然后将热电偶与数据记录仪联接,把数据记录仪放入隔热箱中;测试时把测温架、热电偶及装入隔热箱中的数据记录仪一起放入炉中,数据记录仪将自动跟踪记录各点温度;测试后将数据记录仪与电脑联接,把各点温度自动打印或绘制曲线。

5 发展预测

根据航空热处理近几年发展和航空工业发展规划,预计今后5~10年为航空热处理技术发展和技术改造的高峰期,预计10年后航空热处理面貌将有很大改观。近10年热处理设备需求如下:

(1)真空炉预计每年需求20~30台,其中进口1/4~1/5。炉型包括真空加压气淬炉、真空油淬炉、真空回火炉、真空相沉积炉、真空石墨化炉、真空钎焊炉、真空渗碳炉等。此外需研制生产真空磁场热处理炉、真空氩弧焊箱、真空氢气炉等。

(2)氮基气氛热处理炉,预计每年需求5台左右。

(3)可控渗碳炉,预计每年10~20台。

可控渗氮炉,预计每年5~10台。

(4)高精度空气循环电炉,预计每年10~20

台。

(5)符合航标的普通电阻炉,预计每年30~40台。特别是炉温均匀性 $\pm 10^{\circ}\text{C}$ 以内高温电炉(工作温度 1200°C 以上)有待开发生产。

(6)各种炉温均匀性检测仪,预计每年10~20台。

(7)计算机网络监控系统预计每年2~5套。

根据航空工业发展对热处理的需求,借鉴国内外热处理行业发展规划,从航空热处理特点出发,今后航空热处理主要发展方向仍然是精密热处理,同时兼顾节能和环保。今后重点研究课题如下:

(1)真空/气氛控制冷却热处理技术研究

适应单晶与定向合金,新型高温合金和不锈钢等含有饱和蒸气压高的合金元素材料的要求,实现表面成分和状态的精确控制,提高表面质量和使用性能。适应粉末盘等温淬火、双性能涡轮盘、钛合金无应力退火、高温合金分段冷却的要求,实现真空气冷的冷速精确控制,满足各种不同材料的最佳冷速要求,获得最佳组织性能配合,充分发挥材料潜力。

(2)钛合金真空/氢工艺研究

利用钛合金加氢合金化使钛合金压力加工流动应力成倍降低、变形极限成倍提高,片状粗晶组织很容易转变成球状细晶组织,热等静压时易粘合,机加工性能改善等效应,研究氢增塑、氢热加工、氢致密、氢机械加工等氢工艺。钛合金真空/氢工艺是先对钛合金加氢达到一定浓度,利用氢对工艺性能的有益影响进行工艺处理,再用真空退火降低氢含量达到规定值,使钛合金零件在使用中不发生氢脆。

(3)真空渗碳/高压气淬技术研究

为适应无法或很难精加工的特小和特大齿轮、花键轴等零件表面渗碳硬化要求,研究新型空淬渗碳钢和真空/高压气淬技术,以提高航空渗碳零件性能和质量。真空渗碳/高压气淬工艺可以实现渗碳件热处理后直接装机使用,大大提高生产效率,降低成本,延长寿命。

(4)铝合金、钛合金表面激光强化技术研究

本世纪应力投入服役的第四代战斗机(以F-22为代表)和第五代大型民用客机(以B-777为代表),其结构用材料将以铝合金为主,钢用量有所减少,钛合金用量显著增加,树脂基复合材料在承力构件上全面应用。钛合金将成为推重比10~20的先进发动机主要结构材料,约占25%~

40%。铝合金、钛合金的硬度和耐磨性较差。通过激光合金化和激光冲击,可以提高表面硬度、耐磨性、抗疲劳性能、提高零件使用寿命。

(5)表面超硬化工艺技术研究

高性能齿轮、轴承是关键零件,我国航空工业的齿轮和轴承寿命较低,生产技术落后,急需开展渗层分布结构设计,确定合理硬层硬度和残余应力分布,提高表层硬度,提高抗接触疲劳性能;同开展快速渗氮技术(脉冲渗氮、真空/离子渗氮、高压渗氮)和表面复合硬化技术研究,提高生产效率。

(6)热处理专家数据库和热处理模拟技术研究

利用快速发展的计算机技术提高热处理研究和生产水平,在已有仿真控制和计算机网络化基础上,今后重点在热处理专家数据库研究上,以提高热工艺准确性和生产稳定性;开展热处理模拟技术研究,预测温度场、组织场和应力场,提高组织性能控制的精确度,减少变形,提高热处理生

产水平。

预计到2010年,航空工业中近净成形件和成品件基本实现真空或气氛保护热处理,毛坯件热处理实现精确控温。化学热处理达到70~80%可控化学热处理。高能束热处理在某些特殊要求场合发挥作用。新型冷却介质和控制冷却技术获得较广泛应用。计算机应用范围进一步扩大。航空热处理标准体系进一步完善,并获得认真实施。航空热处理质量控制和热处理质量全面提高,更大范围实现国内外一体化。

参考文献:

- [1] 航空制造工程手册总编委会,航空制造手册—热处理分册(M),北京:航空工业出版社,1993.
- [2] 王广生,王志刚.真空热处理的发展与关键技术[J],材料工程,1997:3-7.
- [3] 王广生.氮基气氛热处理现状及发展[J].材料工程,1997:3-6.
- [4] 中国热处理行业协会.当代热处理技术与工艺装备精品集[M].北京:机械工业出版社,2002.

Characteristic and development of heat treatment for aviation industry

WANG Guang-sheng, ZHANG Shan-qing

(Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing100095, China)

Abstract: Characteristic of heat treatment is first summarized particularly for chinese aviation industry and then emphasis is put on the present situation and new technology of aviation heat treatment. Finally, this paper discusses the directions in which aviation heat treatment should be developed and the research topics on which aviation heat treatment should focus.

Key words: aviation heat treatment; new technology; development forecast