



真空热处理技术

在航空领域的应用与发展

中国航空工业第一集团公司北京航空材料研究院 (100095) 张善庆 王庆生

真空热处理由于具有无氧化, 无脱碳, 脱气, 脱脂, 表面质量好, 变形小, 热处理零件综合性能优异和稳定, 无污染无公害, 自动化程度高等优点, 近年得到迅速的发展和广泛的应用。据国际热处理与表面工程联合会 (IFHT) 的统计和预测, 欧洲工业化国家真空热处理零件 1980 年约占 3%, 1985 年增加至 18%, 2000 年预计增加到 23%。在美国, 真空热处理占 15%。我国研制的第一台真空淬火炉自 1975 年问世以来, 获得了很快发展, 1989 年已拥有真空热处理设备 500 台左右, 其中包括引进设备约 50 台, 到 1996 年我国拥有真空热处理设备 1500 台左右, 约占我国热处理设备的 1.2%, 今后 10 ~ 20 年, 每年还将以新增 200 ~ 300 台真空热处理设备的速度增长, 是热处理设备增长最快的领域。目前真空热处理已应用于真空退火、真空油淬、真空水淬、真空气淬、真空加压气淬、真空回火、真空渗碳、真空除气、真空校形、真空浇注、真空钎焊、真空烧结以及真空喷涂等领域。

真空热处理自发展以来已有 50 多年的历史, 真空热处理技术的发展经过了四个阶段: 真空加热和油淬或气淬、真空加热和加压气淬、真空对流加热的高压气淬、真空对流加热和真空控制冷却 (详见下表), 此外还发展了真空渗碳等真空化学热处理和真空磁场热处理等真空功能热处理。

真空热处理技术的发展及动向

内容	第一代	第二代	第三代	第四代
加热技术	真空辐射加热	真空辐射加热、负压载气加热	负压载气加热, 低温阶段正压对流加热	低温阶段正压对流加热的推广普及, 真空局部加热方法的开发

(续)

内容	第一代	第二代	第三代	第四代
冷却技术	负压油冷、负压气冷	加热气冷 $2 \times 10^5 \text{ Pa}$ 、超高压气冷 $5 \times 10^5 \text{ Pa}$	高压气冷 $2 \times 10^5 \text{ Pa}$ 、高压气冷 $5 \times 10^5 \text{ Pa}$	H_2 或 H_2 和 N_2 的混合气冷技术的开发, 气体回收技术的开发, 真空等温冷却技术及真空流态床技术的开发
加热室结构	开放型	开放型	密闭型	密闭型结构推广
绝热材料	陶瓷毡、碳毡	碳质预制件	高强碳质材料	高强碳质整体结构
搬送机构	台车式、吊架式	分叉式	辊底式	各种形式的复合, 实现夜间无人化操作
自动控制	分立式手动 PID 控温, 继电器控制	多组 PID 任选 PC 程序控制	智能仪表控温自调节 + 自适应 PC 程序控制	多种工艺并存, CRT 显示, 计算机单台控制或多台群控

一、真空热处理技术在航空领域的应用

1. 合金结构钢与超高强度钢的真空热处理

合金结构钢、超高强度钢的真空热处理工艺主要是真空油淬。只有在材料的淬透性好、零件的截面厚度小的情况下, 才可采用真空气淬。真空退火的应用近年来逐渐增多。超高强度钢的真空正压气淬正在研究发展。

合金结构钢、超高强度钢真空热处理, 由于真空脱气与净化的作用, 使阻碍晶粒长大的氧化物、



氢化物、氮化物减少,晶粒容易长大。因此,对晶粒长大倾向比较敏感的材料,真空加热温度比规定温度低 $5\sim 10^{\circ}\text{C}$ 为宜,或者采用工艺温度范围的下限。

这类钢一般可在 $0.133\sim 13.3\text{Pa}$ 的真空度下加热,不必回充高纯的保护气氛就可获得无合金元素蒸发的光亮表面。但是,对于含有Cr、Mn等蒸汽压高的合金元素的钢种,特别是以Mn作为主要合金元素的钢种,应选用较低的真空度或者采取回充高纯保护气氛的办法进行加热。这类钢在回火时,若回火温度高于 250°C ,应在真空炉中回火。真空回火一般是在回充高纯保护气氛的加热室内进行,充气压强可在 $3\times 10^4\sim 9\times 10^4\text{Pa}$ 的范围内调节。若回火温度低于 250°C ,或回火后还需精加工的工件,则可在空气炉中进行回火。

2. 弹簧钢与轴承钢的真空热处理

用弹簧钢制成的弹簧,热处理后要求具有较高的抗拉强度、弹性极限、屈强化(σ_s/σ_b)、疲劳强度和足够的韧性。弹簧在使用中发生的主要破坏形式是疲劳断裂。采用普通空气炉或盐浴炉加热淬火,弹簧表面不可避免地要产生氧化脱碳。在随后的酸洗和电镀工序中,还会吸氢,导致使用过程中发生氢脆断裂。

采用真空热处理可以避免氧化、脱碳、吸氢等问题,从而提高弹簧的疲劳寿命和工作可靠性。

弹簧钢中含有高蒸汽压的Mn、Cr等合金元素,因此要适当选择淬火加热时的真空度或采取回充高纯保护性气体进行加热,若不回充高纯保护气体,Mn系、Mn-Si系弹簧钢淬火加热时的真空压强不宜低于 1.33Pa ;含Cr的弹簧钢则不宜低于 0.133Pa 。65Mn、60Si2MnA、60Si2CrVA钢有回火脆性问题,因此真空回火后应在强制循环的高纯保护气体中冷却。

轴承零件热处理后要求具有高而均匀的硬度、高的耐磨性和疲劳性能、足够的韧性和尺寸稳定性。采用真空热处理,其接触疲劳寿命可比普通热处理提高2倍以上。轴承钢中也含有易蒸发的Cr、Mn等合金元素,因此,应适当选择加热时的真空度或真空氮气分压压强。若不采用真空氮气分压处理,含Si、Mn的轴承钢,加热真空压强一般不低于 1.33Pa ,含Cr的轴承钢,加热真空压强一般不低于 0.133Pa 。轴承钢真空淬火加热温度可根据零

件截面尺寸的大小来加以选定,截面尺寸小,可选择工艺温度的下限,截面尺寸大,可选择工艺温度的上限。

3. 工模具钢的真空热处理

高速钢中除了含W、Mo、Cr、V、Co等合金元素以外,还含有Al、Si、Mn、Nb等合金元素。高速钢的淬火温度一般为 1200°C 以上,在这样高的温度下进行真空加热,Cr、Mn、Al等合金元素极易蒸发,因此高速钢在真空热处理时,加热真空度不宜过高,采取真空氮气分压处理较好,通常是在高速钢加热的第二阶段预热时或升至淬火温度以前,向加热室内回充氮气,使真空工作压强控制在 $13.3\sim 1.33\text{Pa}$ 的范围内。W18Cr4V淬火加热温度 $1260\sim 1280^{\circ}\text{C}$,回火温度 $550\sim 580^{\circ}\text{C}$,硬度 $61\sim 67\text{HRC}$ 。

高速钢真空热处理易产生晶粒长大问题,因此,真空淬火加热温度比普通淬火的低 $10\sim 20^{\circ}\text{C}$ 为宜。高速钢工具的有效厚度在 40mm 以下时,可采用真空气淬代替真空油淬,这样既可达到所需硬度,又能减少变形;当工具的有效厚度在 $40\sim 80\text{mm}$ 时,可采用真空正气压淬代替真空油淬。高速钢的淬火温度高,淬火油因热分解碳化,附在工件表面,加上油的酸根、残炭的不良影响,表面光亮度不如气淬的好。高速钢的回火温度高,为了保持真空淬火的表面光亮度,在真空回火时,应向炉内回充90%的氮气和10%的氢气的混合气体,使液面充气压强达到 $7.5\times 10^4\text{Pa}$ 左右。

常用合金工模具钢中虽然也含有蒸汽压高的Cr、Mn等合金元素,但由于淬火温度都不高,所以在 $1.33\sim 0.133\text{Pa}$ 的真空度范围内,不会发生Mn、Cr的明显蒸发,可以得到光亮的表面。

合金工模具钢的导热性比较差,特别是高合金工模具钢或大截面的工模具,为减少热应力应采取预热措施。

4. 不锈钢与高温合金的真空热处理

不锈钢的真空热处理除了奥氏体型和沉淀硬化型不锈钢的固溶处理和时效外,还有马氏体型和马氏体+奥氏体双相不锈钢的淬火和回火。不锈钢的均匀化退火或消除应力退火也可采用真空处理。不锈钢真空热处理只有采用高真空度($1.33\times 10^{-2}\sim 1.33\times 10^{-3}\text{Pa}$),才能得到光亮的表面,但是,不锈钢中大多含有蒸汽压高的合金元素Cr,极易



因真空加热温度过高, Cr 大量蒸发, 而导致表面合金元素贫化, 使抗腐蚀能力降低。为防止 Cr 的蒸发, 应采取真空保护气氛热处理。

不锈钢真空热处理也存在晶粒长大问题, 所以, 应适当降低淬火加热温度。由于导热性差, 一般应采取两段预热。要求抗腐蚀性高、塑性好的奥氏体不锈钢, 应采用水淬。此外, 也可采取油冷或 Ar 冷却。

马氏体型不锈钢、双相不锈钢及沉淀硬化不锈钢的淬火或固溶处理一般在油或水中冷却, 当工件较薄时, 也可采用真空气冷。奥氏体型不锈钢, 若在氮气压下进行真空加热和冷却, 零件表面有 Cr_2N 形成, 导致表面性能变坏, 即 σ_b 增加, ψ 下降, 抗腐蚀性也会受到一定的影响。所以不宜用氮气而用氩气。

高温合金与不锈钢相似, 含有大量的 Cr、Ni、Al、Mn、Ti 等合金元素, 其蒸气压都比较高, 因此, 高温合金真空热处理的真空度选择原则与不锈钢一样。真空固溶处理要求在较高的真空度 ($1.33 \times 10^{-2} \sim 1.33 \times 10^{-3} \text{ Pa}$) 下进行; 为防止合金元素的蒸发, 应采用真空分压处理, 即先将加热室的真空度抽至 $1.33 \times 10^{-2} \sim 1.33 \times 10^{-3} \text{ Pa}$, 然后回充 Ar, 使充气压强保持在 $1.33 \sim 0.133 \text{ Pa}$ 或者更高。真空时效可采用较高的真空度 ($1.33 \times 10^{-2} \sim 1.33 \times 10^{-3} \text{ Pa}$)。由于时效的时间长, 所以, 真空炉的压升率最好小于或等于 0.67 Pa/h , 否则, 不易保护零件的表面光亮度。

5. 钛合金的真空热处理

钛合金采用真空热处理可避免吸 H_2 、 O_2 、 N_2 等气体, 并可除气, 从而使塑性与韧性得到恢复或提高。钛合金的真空热处理包括真空退火、真空固溶处理与时效。钛合金真空退火的真空度应高于 $1.33 \times 10^{-2} \text{ Pa}$, 可获得光亮表面, 否则, 表面会生成淡黄色或蓝色氧化膜。加热温度宜采用工艺温度的下限, 以防止晶粒粗化。可热处理强化的 $\alpha + \beta$ 和 β 钛合金, 在固溶处理和时效时, 真空度在 $1.33 \times 10^{-2} \sim 1.33 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ 之间, 才能得到光亮表面。这类合金的淬火转移速度要快, 一般在 10s 以下, 否则, 真空淬火后的强度要降低。

二、真空热处理技术在航空领域的发展

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, 近年来被广泛采用。

真空油淬、真空气淬、真空退火、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, 被广泛用于生产。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. 真空油淬增碳问题的解决

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化的碳原子在油淬过程中渗入钢中, 使工件表面形成 $30 \sim 40 \mu\text{m}$ 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 $0.1 \sim 0.2 \mu\text{m}$ 厚, 其力学性能均能满足技术条件要求, 并不影响使用性能。

2. 加压气淬的冷速测定技术

真空加压气冷, 提高了冷却速度, 可以代替过去的负压气冷、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 H3636-6 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. 真空热处理设备的最新发展

(1) 真空加压气冷炉的控制冷却 ①通过预先设定的程序, 要求真空加压气冷炉准确地进行分压控制。②通过载荷热电偶的控制, 要求真空加压气

(下转第 39 页)

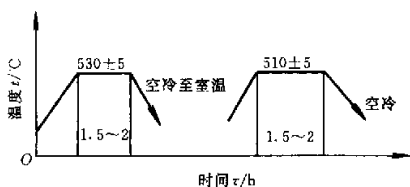


图6 65Nb回火工艺曲线图

工件不得水冷，回火后待工件冷至室温方可清洗。

5. 研制中出现的主要问题和采取的对策

研制过程中出现的主要问题是热处理工序。由于65Nb材料导热性能极差、敏感性极强，在淬火中很难掌握得准确无误。因此淬火后往往出现裂纹，造成废品。裂纹分两种，一种是宏观裂纹，淬、回火后就可发现，另一种是微观裂纹，在磨加工后才可发现，此外，淬火后，硬度值有时也出现偏低现象。

为了解决这一关键问题，避免废品出现，我们采取了如下对策。

(1) 为了保证热处理不出现裂纹，对冷加工采取两条对策：加工外形尺寸时，表面粗糙度必须达到 $R_a 6.3\mu\text{m}$ ，不允许有明显过粗、过深的刀花纹；磨加工表面时，严格控制进给量，避免表面烧伤。

(2) 热处理工序采取5条对策：对GCr15、65Nb两种材料一定区分来处理；盐浴炉温度计保证值准确，事前可作好严格校正；严格按工序工艺要求操作，技术人员要现场指导和示范、亲自操作；淬火后，不待冷至室温，尽早回火；100%进行表面裂纹和硬度值的检查。

通过采取以上措施，在先后4次小批量循环试

验中，保持架厂在冲压过程中，基本上解决了上述问题，无论是4次小批生产还是正常投产应用，使用新的更加耐磨、寿命更高的65Nb材料代替传统的GCr15钢是一个重大突破，经过前后近三年时间的艰苦跟踪试验、反复验证，我们终于取得了成功——用65Nb新模具材料制作的以197726规格为代表的冲窗孔凸、凹模，平均使用寿命是GCr15材料的5倍，达到了预期效果。

三、经济效益分析

在试验期间，采用65Nb制作的冲孔、凹模，其寿命均比GCr15钢提高4倍以上，使模具制造量大幅度减少，保持架厂工具消耗费用下降，提高了生产效率，减少了换模具调整时间。

四、结语

经过攻关组先后摸索，我们积累和总结出许多宝贵的实践数据，确定出一套较完整加工工艺，但我们的试验研究还没有使模具寿命达到极限状态，还要探索最佳的热处理工艺参数。机械加工时，表面粗糙、刀痕过深等原因也会使模具产生应力集中，淬火时模具易开裂。俗话说“好模具要有好的热处理”，热处理是提高模具使用寿命的重要环节。调查表明：热处理工艺或操作不当而导致模具断裂失效占失效总数的60%。必须针对裂纹产生的原因，采取相应措施，以减少和避免模具的早期断裂，提高模具的使用寿命。当然正确使用，合理的管理，精心的维修，也是减少模具早期断裂失效，提高模具使用寿命的有效措施。

(20030801)

(上接第26页)

冷炉可自动地调节冷却气体的流速和流量。③要求真空加压气冷炉满足大型零件不同区域的不同冷速的要求。

(2) 真空气淬和回火炉（即：对流循环加热）的发展。

(3) 真空等温淬火炉。

(4) 真空气氛加热炉。

(5) 真空化学热处理炉 包括真空渗碳热处理

炉、真空渗氮热处理炉。

(6) 特殊功能真空热处理炉 主要包括：真空磁场热处理炉、钛合金氢处理炉、真空充氩焊箱、真空校正炉。

(7) 大尺寸真空炉 ($1.5\text{m} \times 3\text{m} \times 9\text{m}$)。

(8) 连续真空热处理炉和生产线。

(9) 超高真空炉 ($10^{-5} \sim 10^{-6}\text{Pa}$)。

(10) 超高温真空炉 ($2200 \sim 2600^\circ\text{C}$)。

(20030908)