

16Co14Ni10Cr2Mo 钢制飞机平尾大轴的真空淬火

Vacuum Quenching of Rotating Shaft of Stabilizer Made of 16Co14Ni10Cr2Mo

贵航集团云马飞机制造厂 袁培柏*

Yuan Peibai (Yunma Aircraft Factory, Guizhou Aviation Industry Group Corp)

[摘要] 介绍了可焊接的新型超高强度结构钢 16NiCo 及其制作的飞机水平安定面转动轴的真空热处理工艺。实践证明,采用真空热处理,可获得最佳的技术经济效益。

关键词: 16Co14Ni10Cr2Mo 钢 平尾大轴

[Abstract] Vacuum Quenching Processing of new ultra-high strength steel 16Co14Ni10Cr2Mo and rotating shaft of stabilizer made of this steel is introduced. It is practically proved that the optimum technical economic benefit can be obtained by using this vacuum treatment.

Keywords: 16Co14Ni10Cr2Mo steel rotating shaft of stabilizer

1 前言

平尾大轴是飞机水平安定面转动轴的简称,是后机身连接水平尾翼的关键受力部件。主要承受着由平尾传递过来的弯曲和扭转应力,以及拉、压等交变循环载荷的作用。又由于它距离发动机较近,有一定的温度和燃气作用,故要求制作平尾大轴的材料不仅应具有高的强度和刚性,还应具有抗应力腐蚀等良好的综合性能。平尾大轴形状复杂,既是一个一端封闭的厚壁管,也是一个截面为圆环形、插在后机身上的悬臂梁(亦称水平梁),如用整根棒料加工,不仅加工难度很大,材料利用率也很低。如一端用管料,另一端用棒料分别粗加工,然后组焊起来加工成形,就方便和经济多了,但这就需要可焊接的超高强度结构钢。

遗憾的是现有的超高强度航空结构钢,如 30CrMnSiNi2A、GC-4 或 300M 等,虽然其拉伸强度可达 1700~2000MPa,并有一定的综合性能,但由于它们的断裂韧度 K_{IC} 值太低,不能满足损伤容限设计的要求,而且焊接性能差、对氢脆很敏感、抗应力腐蚀性能差,使用温度不能超过 250℃ 等不足之处,不利于用来制造结构复杂的受力件。

16Co14Ni10Cr2Mo 钢是近年来研制成功的新型超高强度航空结构钢,该钢焊接性能良好,经热处理后,具有强度高 ($\sigma_b > 1600\text{MPa}$)、韧性高 ($a_k > 1280\text{kJ/m}^2$)、

$K_{IC} > 156\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 、抗应力腐蚀性能好 ($K_{ISCC} > 82\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$) 等许多优点。适用于制造飞机上的各种接头、承力梁、连接件和平尾大轴、着陆钩等重要受力构件。其制件的使用性能可靠、寿命长。

由于该钢采用了真空感应熔炼+真空自耗重熔工艺炼就,其纯洁度较高,钢中常存元素(如 Si、Mn)及杂质(如 P、S、O、N、H)的含量很低,并有严格的控制,即炉料是超纯净的。为充分发挥材质的使用性能,在加工过程中,特别是热加工过程中,应尽量减少有害气体对材质的污染,所以,平尾大轴要求施行大真空热处理。我们在课题组一系列前期工艺试验研究工作的基础上^[1~3],首次对 16Co14Ni10Cr2Mo 钢制造的平尾大轴,在我厂大型多功能立式真空淬火炉上进行了淬火,取得了良好的技术经济效益。

2 平尾大轴用料分析

16Co14Ni10Cr2Mo 钢的标准化学成分和用做平尾大轴的 3H210023 及 3H210026 炉号钢材的化学成分列于表 1。该钢的主要相变温度列于表 2。

关于 16Co14Ni10Cr2Mo 钢的化学成分设计、组织结构和力学性能的研究等,资料^[1~3]已作了详尽介绍。简言之,该钢系低碳高合金二次硬化钢,主要依靠低碳马氏体和碳化物二次硬化达到高强度、高韧性的目的,也就是说该钢淬火后可以得到具有高密度位错的板条马氏体,通过高温回火析出合金碳化物 (M_2C),达到

* 参加本工作的还有李昭学、雷还梧同志。

二次硬化。其强化机制是马氏体相变+碳化物沉淀共同强化。这种利用碳化物二次硬化的钢,无各向异性。又由于采用双真空冶炼,提高了钢材的纯洁度,因而具有优异的加工性、焊接性和较300M钢更优异的抗应力腐蚀性、裂纹扩张速率低和断裂韧性高,可满足损伤容限设计的要求^[4],是一个较理想的优秀钢种。

3 平尾大轴真空热处理工艺

3.1 热处理工艺参数的确定

按技术条件 Q/6S1161-95 规定,该钢试样毛坯热处理制度为:

正火: $900 \pm 10^\circ\text{C}$ 、保温 60min、空冷;
 高温回火: $680 \pm 10^\circ\text{C}$ 、保温 6h、空冷;
 淬火: $860 \pm 10^\circ\text{C}$ 、保温 $60 \pm 5\text{min}$ 、油冷;
 冷处理: $-73 \pm 8^\circ\text{C}$ 、保温 $60 \pm 5\text{min}$ 、空气中回温;
 回火: $510 \pm 5^\circ\text{C}$ 、保温 $\leq 5\text{h}$ 、空冷。

基于上述,平尾大轴真空淬火温度取 $860 \pm 10^\circ\text{C}$,油淬;工作真空度取 $6.7 \sim 6.7 \times 10^{-1}\text{Pa}$,淬火时油面压强取 $4 \times 10^4 \sim 8 \times 10^4\text{Pa}$;回火在空气循环电炉中进行,温度取 $505 \pm 5^\circ\text{C}$,保温时间 5h,出炉后吹风冷却;冰冷处理在自制的工作尺寸为 $\phi 320\text{mm} \times 1100\text{mm}$ 的冷处理罐中进行,介质为固体 CO_2 泡酒精。

表 1 16Co14Ni10Cr2Mo 钢化学成分

含量, % 炉号	元 素	C	Cr	Mo	Co	Ni	Si	Mn	S	P	S+P	O	N	H
3H210023		0.17	1.99	1.03	14.27	10.37	0.06	<0.10	0.001	0.006	0.007	0.0007	0.0003	0.0002
3H210026		0.18	1.97	1.04	14.42	10.66	—	—	0.001	0.007	0.008	0.0006	0.0002	—
Q/6S1161-95		0.15~ 0.19	1.8~ 2.2	0.9~ 1.1	13.5~ 14.5	9.5~ 10.5	<0.1	<0.1	<0.005	<0.008	<0.010	<0.002	<0.0015	—

表 2 16Co14Ni10Cr2Mo 主要相变点

相变点	A_{c1}	A_{c3}	M_s	M_f
相变温度 $^\circ\text{C}$	600	800	310~320	160~170

3.2 零件状态及工艺曲线

首批试制的平尾大轴计 12 件,分属两个熔炼炉号,即 3H210026# (7 件), 3H210026# (5 件)。它们都是焊接件,焊后消除焊接应力的退火工艺为: $680 \pm 10^\circ\text{C} \times 6\text{h}$ 空冷。所有大轴内孔均已加工到尺寸,外圆留有一定的磨量。

此外,每个材料炉号带有 6 件标准拉伸试样,将随同炉号的大轴进行淬火、冰冷处理及回火。检查真空淬火后表面状况的金相试样,每炉带 2 件,真空淬火后送检。图 1 为平尾大轴的热处理工艺参数曲线。

3.3 主要工序及操作要点

(1) 清洗除油 我厂通过系统的工艺试验,采用了 LCX-52 水基清洗剂作为真空淬火前后的除油洗涤剂^[5]。并配制了浓度为 2~3% LCX-52 的专用清洗槽,工件装夹后用吊车吊入槽内泡洗,必要时通入压缩空气搅拌。槽温 $40 \sim 60^\circ\text{C}$,时间 5~10min。亦可在常温下手工擦洗,事后即可烘干装炉。

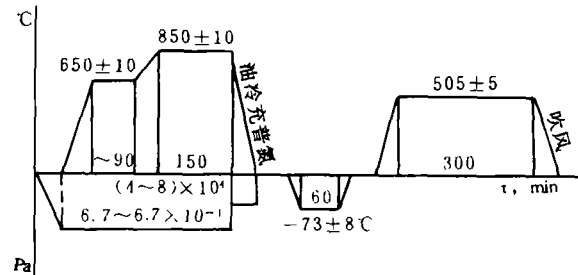


图 1 平尾大轴热处理工艺曲线

(2) 装挂 真空炉加热主要靠辐射,工件间必须保持一定的间隙、避免遮蔽;又由于整个操作过程是在封闭的环境中靠机械自动操作完成的,故要求装挂工件时必须保持平衡可靠。平尾大轴通过专用淬火夹具,以自由状态悬挂在真空炉自动吊具上。每炉装 3 件,重约 100kg。

(3) 真空淬火 待真空炉加热室真空工作压强 $< 6.7\text{Pa}$ 时装入工件,在保持工作真空度 $6.7 \sim 6.7 \times 10^{-1}\text{Pa}$ 的前提下,按工艺曲线要求预热、加热和保温。保温时间为加热滞后时间+按工件截面尺寸规定的“最短淬火保温时间”。计算结果为 150min。大轴保温结束

前,应提前 20min 左右对油槽抽真空至 6.7Pa 以下,并加温至 40~60℃,搅拌,充分脱气。大轴淬入油中后,充入普氮,控制油面压强在 $4\times 10^4\sim 8\times 10^4$ Pa 范围内。待大轴冷透后 (~20min),放入大气,取出清洗除油。

(4) 冰冷处理 大轴淬火冷至室温后,应在 1h 内及时进行冷处理。先在冷处理罐内铺上 200~300mm 厚的固体 CO₂,倒入适量酒精,然后放入大轴和试样,再补充固体 CO₂ 和酒精,直至浸没大轴。加盖,在 -65℃ 以下保持 1h,事后取出在空气中自然回温。冷处理罐中残留的冷冻液,可加盖保温备用,下炉次仅加入少量的固体 CO₂ 和酒精,即可达到 -65℃ 以下的要求。

(5) 回火 大轴温度回升至室温后,应在 4h 内装炉回火。回火是在 RJJ-70 空气循环炉中进行。温度 505±5℃,时间 5h,出炉后悬挂,用鼓风机吹冷。

(6) 校正,变形量很小,未予校正。

(7) 检验 (略)

4 结果分析与讨论

4.1 常规力学性能

本批平尾大轴 12 件分 4 炉次,经全程热处理(真空淬火+冰冷处理+回火)后,随炉所带试样之力学性能

及轴上指定位置的硬度检测结果列于表 3。

表 3 力学性能检测结果

力学性能 材料炉号	σ_b MPa	ψ %	δ_4 %	硬度值 HRC
3H210023	1749	69.7	16.5	50~51.5
	1740	69.1	16.0	
3H210026	1712	69.1	15.3	49.5~51
	1720	69.3	15.5	
技术条件 Q/6S1161-95	>1620	>60	>12	48~52

由上表可见,平尾大轴经全程热处理后,力学性能全面满足该钢的技术条件要求,轴上指定位置的硬度 100% 合格。工艺重现性好,性能数据很稳定。

此外,表 4 给出了材料炉号为 3H210083[#] 的试样,经普通空气电炉淬火和真空炉淬火后力学性能的对比。不难看出,在塑性指标相当的情况下,真空炉淬火的拉伸强度和屈服强度都有所提高,而冲击韧性提高更为明显,达到 12%,显示了真空淬火的优越性。

表 4 普通炉淬火与真空炉淬火后力学性能对比

工艺特点	σ_b	$\sigma_{0.2}$	ψ	δ_5	a _{KV} kJ/m ²
	MPa		%		
电炉：860±10℃，油淬 -73±8℃ 空冷 510±5℃ 风冷	1734	1610	73.1	13.4	1761
	1730	1609	71.1	13.8	1651
					1581
	平均 1732	1610	72.1	13.6	1645
真空炉：860±10℃，油淬 -73±8℃ 空冷 510±5℃ 风冷	1761	1631	68.1	14.0	1748
	1765	1649	68	13.6	1783
					1990
	平均 1763	1640	68.1	13.8	1840

4.2 变形情况

实践表明: 300M、30CrMnSiNi2A、GC-4 等钢制造的飞机起落架外筒、活塞杆和主梁、接头、Z 形梁等,真空淬火后,由于组织转变、比容变化,都有一定的伸长(0.05~0.12%)。为探讨 16Co14Ni10Cr2Mo 钢制件真空淬火后的变形情况,任意抽查了 4 件平尾大轴和 1 件圆筒形($\phi 140$ mm/ $\phi 100\times 400$ mm) 试验件,考核其全长伸缩和弯曲变形情况,结果列于表 5。由表 5 可见:

(1) 平尾大轴弯曲变形很小,无需校正。

(2) 大轴全长未见伸长,但试验件仍有 0.35~0.4mm (0.087~0.1%) 的伸长。大轴未见伸长,可能

与焊接件有关,因为微量的伸涨有可能被焊缝所吸收。

由此看来,超高强度结构钢制长杆及长筒件热处理(包括真空热处理)后,由于组织比容的变化,长度伸长是不可避免的。有公差要求的尺寸,必须事先留有余量。

4.3 表面状况

在试验中发现,16Co14Ni10Cr2Mo 钢试样经真空油淬后,表面呈黑褐色,但仔细用布擦拭一下,又大有改观。为探讨这一现象产生的原因,设计了一组对比试验。目的是搞清这种颜色是在真空炉加热过程中、由于工作真空度还不够高或因有泄漏形成了“穿堂风”造成

的氧化色?还是在入油冷却的瞬间被熏黑的?或是在出炉转移过程中因中间室真空度低被污染造成的?此外,考虑到该钢系低碳高钴钢,特意选择了含Co高速钢W2Mo9Cr4VCo8及低碳钢A3、20#参与对比试验。试验方案和结果列于表6。

表5 全长伸缩量和弯曲变形

件号	01#	02#	07#	12#	筒形件
全长伸缩量 (mm)	±0.	+0 -0.1	+0 -0.1	+0 -0.1	+0.35~0.4
径向跳动量 (mm)	0.05~0.35				~0.05

结果显示:无论是真空态下油淬或是随炉慢冷退火,300M、30CrMnSiNi2A钢试样表面都很光亮,而16Co14Ni10Cr2Mo钢试样却呈黑褐色,参与试验的含Co高速钢试样,几乎与该钢试样颜色一样。低碳钢A3和20#试样虽不光亮,但要好得多。

表6

试验条件及工艺	试样材料	表面状况
真空炉 860±10℃×2h 油淬 工作真空度: 5~3.85Pa	300M	光亮
	30CrMnSiNi2A	光亮
	16Co14Ni10Cr2Mo	黑褐色
	W2Mo9Cr4VCo8	黑褐色
真空炉 860±10℃×2h 随炉 冷却至 200℃以下 工作真空度: 4.9~4Pa	A3, 20#	暗灰色
	300M	光亮
	30CrMnSiNi2A	光亮
	16Co14Ni10Cr2Mo	黑褐色
	W2Mo9Cr4VCo8	黑褐色
	A3, 20#	亮灰色

对比试验结果说明:

(1) 16Co14Ni10Cr2Mo及W2Mo9Cr4VCo8钢之表面颜色是在真空炉加热过程中造成的,与中间室真空度及淬火油无关。

(2) 在同一条件下,只有含Co的16Co14Ni10Cr2Mo和W2Mo9Cr4VCo8钢试样产生氧化色,表明与其化学成分、特别是高含Co量有关。

因此,为改善该钢制平尾大轴真空淬火后的表面状态,适当提高了真空炉加热室和中间室的工作真空度;更换了部分胶圈,尽量杜绝泄漏;强化了除油清洗工序和对吊挂、夹具进行脱气等,终于获得了光亮的表面。由此也说明,16Co14Ni10Cr2Mo钢制件在真空淬火时,所要求的环境比300M、30CrMnSiNi2A钢要苛刻些。

随炉金相试样,按HB/Z191-91规定检查,未发现表面有脱碳、增碳、增氮及晶界氧化现象,即表面状

态合格。

4.4 关于冰冷处理

16Co14Ni10Cr2Mo钢制件,按技术条件规定,淬火后要进行冰冷处理($-73\pm 8^{\circ}\text{C}\times 1\text{h}$),但冰冷处理的必要性确是一个值得探讨的问题。

一般认为:对高碳钢或合金工具钢来说,冰冷处理的目的是为了减少残余奥氏体,提高硬度,保证使用过程中组织和性能稳定。对某些特殊用途的钢而言,还可提高钢的铁磁性。但对16Co14Ni10Cr2Mo钢来说,资料[1, 2]介绍,该钢自830~860℃淬火后,其残余奥氏体很少,约为0.5~1.0%,而且事后又是采用能够使残余奥氏体分解的高温回火($510^{\circ}\text{C}\times 5\text{h}$),故淬火后的冷处理实际意义不大。我们的试验也证明,淬火后冷处理与否,对常规力学性能没有什么影响。表7所列为3H210083炉号的试样冰冷处理与否对比试验的数据。

表7 冰冷处理及未冰冷处理对比试验数据

试样状态	σ_b	$\sigma_{0.2}$	ψ	δ_4	a_{KU}	HRC
	MPa		%		kJ/m ²	
淬火+冷 处理+回火	1715	1598	71.8	12.4	1614	49.5~50.0
	1709	1584	72.7	14.8	1812	49.5~50.0
	平均 1712	1591	72.25	13.6	1726.5	
淬火+回火	1715	1596	71.8	14.4	1901	49.5~50.0
	1715	1609	71.8	14.4	1549	49.5~50.0
	平均 1715	1602.5	71.8	14.4	1725	

5 结语

16Co14Ni10Cr2Mo平尾大轴和若干试验件,在我厂通过真空淬火、冰冷处理和回火等工艺过程,从检测结果看,随炉试样力学性能和轴上指定位置的硬度,全面达到技术条件要求;表面光亮,无脱碳、无增碳、增氮及晶界氧化现象;基本不变形,无需校正,今后生产中还可大大减少加工余量。

超高强度航空结构钢制件采用真空淬火,完全避免了在甲醇裂化气氛炉中加热时“氢脆”的危害和普通电炉中加热时的氧化脱碳现象,与现行工艺比较,可省去长时间低温回火除氢工序,还可节省部分磨削、校正、喷砂工时,经济效益显著。工艺重现性好,产品质量稳定。还有一些理论性问题,如该材料的高温抗氧化性能、对工作真空度指标及其环境要求、大轴真空淬火后未见伸长的机理、冰冷处理的必要性等等,有待进一步探讨。

参考文献(略)