

# 大直径薄壁燃烧室壳体热处理变形研究

余天雄<sup>1,2</sup>

(1 中南大学,长沙 410073)

(2 中国三江航天集团江北机械厂,孝感 432100)

**文 摘** 对 30CMnSiA 钢大直径薄壁燃烧室壳体热处理变形规律进行了研究。结果表明:燃烧室壳体的直径和长度变化主要受热应力和组织应力影响,且组织应力的作用大于热应力,导致热处理后直径缩小,长度在一定范围变化。燃烧室壳体椭圆度及母线直线度主要受吊装方式、壳体焊接质量、油冷时壳体入油速度等工艺方法影响,采取专用工装,可以校正燃烧室壳体椭圆度及母线直线度。

**关键词** 薄壁,壳体,热处理,变形

## Research on Heat Treatment Deformation of Big Diameter Thin Wall Combustion Chamber Case

Yu Tianxiong<sup>1,2</sup>

(1 Zhong Nan University, Changsha 410073)

(2 China San Jiang Space Group Jiang Bei Machinery Plant, Xiaogan 432100)

**Abstract** This article discusses on deformation law of big diameter thin wall combustion chamber case of 30CMnSiA steel after heat treatment. The results show that the deformation of diameter and length of combustion chamber case is affected by structure stress and heat stress. The structure stress larger than heat stress leads to deformation of diameter and length. The ovality and generatrix straightness of combustion chamber case are mainly affected by the technological methods such as lifting way, wilding quality and quenching speed during oil cooling. Special toolings can be used to correct the ovality and generatrix straightness of chamber case.

**Key words** Thin wall, Case, Heat treatment, Deformation

### 1 引言

固体火箭发动机燃烧室壳体是贮存推进剂的容器,又是进行燃烧的空间,不仅要有足够的容量,还要有承受高温、高压的能力,是固体火箭发动机中最重要的部件之一<sup>[1]</sup>。

为了保证固体火箭发动机装药量的准确,必须严格控制燃烧室壳体的容积,在产品加工过程中通常是控制燃烧室壳体的直径和长度;而为了确保发动机轴线与导弹飞行轴线一致,必须控制发动机的

质心质偏,工艺上主要通过控制燃烧室壳体的椭圆度及母线直线度来实现。由于燃烧室壳体结构尺寸大、壁薄、结构刚性差、容易变形,加上多次进行焊接与热处理,工件形状变形趋势大。本文通过对热应力和组织应力影响分析,研究热处理前后燃烧室壳体变形规律,统计热处理前后直径和长度的变化量,在工艺上采取预留量的形式,达到精确控制直径和长度的目的;研究影响燃烧室壳体的椭圆度及母线直线度的因素,制定工艺控制措施,达到有效控制燃

收稿日期:2005-11-16

作者简介:余天雄,1966年出生,硕士研究生,主要从事机械加工及复合材料应用的研究工作

宇航材料工艺 2006年 第3期

— 55 —

烧室壳体的椭圆度及母线直线度的目的。

## 2 实验

### 2.1 材料

某固体火箭发动机燃烧室壳体是一个两端开口的压力容器,整个腔体由壁厚 3.8 mm 的四个圆筒和两个碟形体以及六个接头组焊而成,直径为 900 mm,筒形段长度 5 400 mm,质量 500 kg。壳体外壁焊有多种连接件,基体材料为 30CMnSiA 钢,热处理后的性能指标:  $\sigma_b = (1\ 177 \pm 98)$  MPa,  $\delta_5 = 10\%$ , 双面全脱碳层深度 0.15 mm,焊接接头  $\sigma_b = 1\ 040$  MPa,  $k_{\text{ik}} = 490$  kJ/m<sup>2</sup>,无裂纹弯曲角 40°。

### 2.2 方法

燃烧室壳体是在井式联合电炉中进行热处理的,热处理参数为:预热时加热温度 550 °C,保温 50 min;淬火时加热温度 900 °C,保温 50 min,油冷;回火时加热温度 480 °C,空冷。采用游标卷尺测量平均直径,用专用钢卷尺测量燃烧室壳体长度,由专用工装检测母线直线度。壳体椭圆度,主要检测用同截面大小直径差,测量工具采用专用游标卡尺。

## 3 结果与讨论

金属制件在热处理时的形状和尺寸变化是不可避免的,过大和不均匀的畸变会增加加工余量或使之报废。减少畸变是热处理领域的一个重点研究课题<sup>[2]</sup>。

### 3.1 热应力、组织应力对燃烧室壳体外形尺寸的影响

#### 3.1.1 在轴向、径向、切向分布的比较

工件淬火冷却时会产生热应力和组织应力。工件冷却时,表面总是比心部冷却得快,使截面上存在一定的温差,导致收缩速度不同,相互牵制,产生内应力,这种内应力称为热应力。热应力在圆柱形工件三个方向分布:轴向、径向、切向。轴向热应力冷却前期,表层受拉,心部受压;冷却后期,表层受压,心部受拉。冷却后,径向应力心部为拉应力,表面为零。切向应力心部为拉应力,表面为压应力<sup>[3]</sup>。

组织应力是由于工件的表层和心部发生马氏体转变的不同时性而造成的。冷却前期,表层受压,心部受拉;冷却后期,表层受拉,心部受压。正好与热应力相反。当热应力、组织应力超过材料的屈服极限时,就会产生变形。

图 1 为 30<sup>#</sup>钢圆柱试样(φ44 mm)在 700 °C 加热水冷后残余热应力分布,图 2 为 Fe-16Ni 合金圆柱试样(φ50 mm)自 900 °C 缓冷至 330 °C,再在冰水中急冷

至室温时残余组织应力的分布。从图 1、图 2 可看出,圆柱形工件的热应力、组织应力在轴向分布上,大小接近,方向相反;在切向分布上,组织应力大于热应力,方向相反;在径向分布上,组织应力大于热应力,方向相反<sup>[4]</sup>。

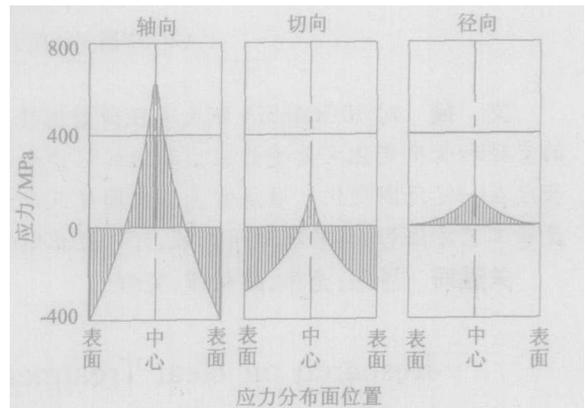


图 1 30<sup>#</sup>钢圆柱试样热处理后残余热应力的分布

Fig 1 Distribution of residual heat stress of 30<sup>#</sup> steel cylinder sample

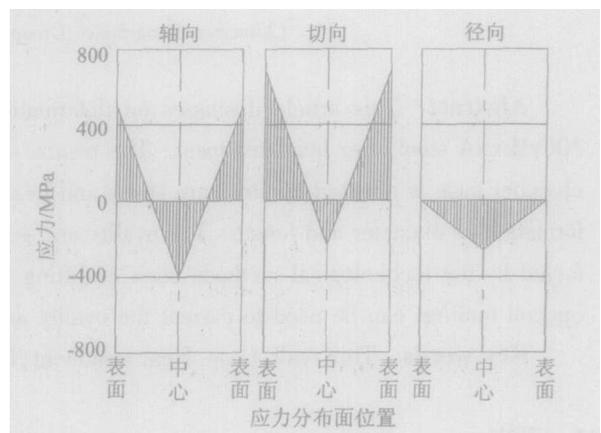


图 2 Fe-16Ni 合金圆柱试样热处理后残余组织应力的分布

Fig 2 Distribution of residual texture stress of Fe-16Ni alloy cylinder sample

#### 3.1.2 外形尺寸变化趋势

淬火变形有两种主要形式:一种是工件几何形状变化,另一种是体积变化。前者是热应力和组织应力作用的结果,后者是组织转变时比容改变引起的,一般称为体积效应。

热应力引起的变形表现为使工件沿最大尺寸方

向收缩,沿最小尺寸方向胀大。对燃烧室壳体而言,淬火后热应力的影响应该是长度缩短、直径增大。

组织应力造成的变形表现为使工件沿最大尺寸方向伸长,沿最小尺寸方向收缩,与热应力相反。对燃烧室壳体而言,淬火后组织应力的影响应该是长度伸长,直径缩小。在高温回火时,金相组织再次发生转变,但此时壳体屈服强度较高,较难产生屈服变形。

体积效应一般总是使工件在各个方向作均匀胀大或缩小。淬火时,球化组织转变为马氏体组织,马氏体的比容比退火态球化组织大,壳体胀大,直径、长度增加;但随后的回火,将马氏体组织转变为回火屈氏体组织,因此整个调质过程中,体积效应不明显。

表 1 热应力、组织应力、体积效应对壳体的影响<sup>1)</sup>

Tab 1 Influence of heat stress, texture stress and volume effect on chamber case

原始状态	壳体变形		
	热应力	组织应力	体积效应
$L, D$	$L^-, D^+$	$L^+, D^-$	$L, D$

注: 1)  $L$ —壳体长度;  $D$ —壳体外径。

从表 1 可以看出,由于体积效应不明显,壳体热处理变形主要是热应力、组织应力综合作用的结果。

需要说明的是,壳体自重产生的拉应力为  $0.43 \text{ N/mm}^2$ ,与热应力、组织应力(高达  $200 \sim 400 \text{ N/mm}^2$ )相比太小,讨论时忽略。

### 3.2 燃烧室壳体筒形段长度变化规律

影响壳体长度的因素,主要是热应力、组织应力中的轴向应力。淬火过程中,在组织转变以前,往往只有热应力产生,到  $M_s$  点以下,热应力和组织应力共同作用,以组织应力为主,两种应力方向相反,相互抵消。受冷却速度、淬火后马氏体含量以及马氏体含碳量等因素影响,时而热应力作用强,时而组织应力作用强,导致壳体有时伸长,有时缩短,有时又保持尺寸不变。从统计数据看,伸长占 49.6%,缩短占 43.6%,组织应力的影响略强于热应力。

在整个试验阶段,共统计了 133 台壳体热处理的有关数据,见表 2。

热处理后,壳体筒形段 66 台伸长,占 49.6%,58 台缩短,占 43.6%,保持尺寸不变的 9 台,占 6.8%;最大伸长量 2.5 mm,最大缩短量 2.65 mm。

宇航材料工艺 2006 年 第 3 期

表 2 燃烧室壳体热处理长度变化统计

Tab 2 Statistics on length change of combustion chamber case after heat treatment

伸长量 /mm	子样数 /台	所占比例 /%	平均比例 /%
2~2.5	2	1.5	
2~1	10	7.5	49.6
1~0	54	40.6	
0	9	6.8	6.8
0~-1	45	33.8	
-1~-2	12	9	43.6
-2~-2.65	1	0.8	

### 3.3 壳体的平均直径变化规律

热应力、组织应力在圆柱形工件三个方向分布:轴向、径向、切向。影响直径变化的主要是径向应力和切向应力。从统计可以看出,组织应力的径向应力和切向应力均大于热应力,因此热处理后燃烧室壳体平均直径缩小。一次热处理,一般缩小 0.7 mm;二次热处理后,一般再缩小 0.5 mm。

### 3.4 影响燃烧室壳体的椭圆度及母线直线度的因素

#### 3.4.1 测量方法

按照国标(GB 7235—87)《评定圆度误差的方法—半径变化量测量》的规定,应以下列任一圆心(评定基准圆的中心)得出的被测零件轮廓的最大半径和最小半径之差来确定被测截面的圆度误差:(1)最小区域圆圆心;(2)最小二乘圆圆心;(3)最小外接圆圆心;(4)最大内接圆圆心<sup>[5]</sup>。

对于大直径的筒形和柱形零件,由于缺少必要的检测设备,工程上通常采用测量同一截面大小直径差的方法来检测零件圆度。对于大直径燃烧室壳体,检测方法通常由设计与工艺共同商定。如图 3 所示,某型号燃烧室壳体设计规定检测 8 个截面,每个截面测 8 个直径,见表 3。检测工具为专用千分尺。

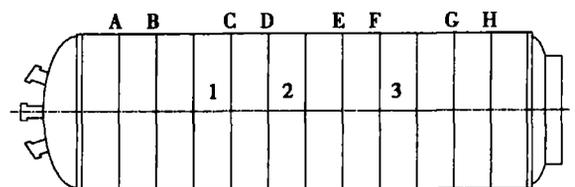


图 3 直径测量位置

Fig 3 Measure position of diameter change

表 3 直径测量数据

Tab 3 Measured data of diameter change

mm

截面	A	B	C	D	E	F	G	H
1	898.28	895.05	894.00	898.80	895.70	895.40	897.55	899.36
2	900.42	898.17	896.50	895.05	895.70	897.04	900.50	901.40
3	900.35	901.85	901.95	900.51	899.95	900.56	902.42	902.10
4	900.90	902.90	903.60	905.15	904.05	903.62	902.20	902.35
5	901.45	903.30	903.56	903.75	903.25	903.27	903.20	901.45
6	900.90	904.15	903.68	902.62	902.10	901.60	902.77	901.62
7	900.72	900.35	899.95	900.25	901.05	900.28	899.80	899.50
8	898.70	896.48	896.68	895.90	896.72	897.55	897.78	899.25
直径差	3.17	9.1	9.68	10.1	8.35	8.22	5.65	3.10

由表 3 可知,壳体热处理后,圆度变形较大,大小直径差最大值达 10.1 mm。最大变形一般发生在距前接头三分之一处,原因是燃烧室壳体淬火油冷时,由于壳体后开口较大,前开口较小,排气速度远低于进油速度,壳体内腔气体(空气、油烟等)受压,产生较大内压,至距前接头三分之一处内压最大,变形也就最大。

壳体母线直线度:一般采用专用直尺,沿圆周方向测量 16 条母线直线度,见表 4。

表 4 直线度数据

Tab 4 Generating line length and alignment degree data

序号	直线度/mm	序号	直线度/mm
1	0.7	9	6.2
2	1.4	10	5.9
3	1.6	11	7.7
4	1.9	12	3.0
5	1.8	13	2.7
6	2.9	14	2.1
7	3.7	15	3.0
8	2.7	16	1.6

由表 4 可知,壳体直线度最大值达 7.7 mm。实践证明,壳体热处理后,圆度变形越大,直线度变形也越大;圆度变形越小,直线度变形也越小。

### 3.4.2 热处理工艺对燃烧室壳体的椭圆度及母线直线度的影响因素

(1)壳体吊挂时轴线不铅垂,造成冷却入油时壳体是倾斜的,热应力、组织应力中的径向应力、切

向应力与壳体轴线不垂直,导致异常变形。

对策:采用可调吊具和测具,保证吊挂铅垂。

(2)壳体焊接质量差。有两种情况影响较大:一是补焊部位多和补焊次数多,焊接应力分布不均匀;二是焊接时接口尺寸相差大,采用局部冷校后强制焊接,产生较大内应力。

焊接应力在 700 退火可消除 70% 应力,不均匀残余应力在高温状态重新分布,导致产品变形。

对策:提高焊接合格率,减少补焊;控制接口平均直径差,一般控制在 0.20 mm 以内。

(3)油冷时壳体下降速度过快。由于壳体后开口较大,前开口较小,排气速度远低于进油速度,壳体内腔气体(空气、油烟等)受压,产生浮力,改变壳体下降速度,甚至使壳体在油槽内处于悬浮状态。

对策:采用变频机构控制壳体下降速度。

(4)淬火冷却时,为保证壳体冷却充分、均匀,使用压缩空气搅拌冷却介质,导致壳体内腔气体过多,排气不畅。同时,油槽中的油处于翻动状态,使壳体难以垂直入油。

对策:淬火冷却前关闭压缩空气搅拌。

(5)油冷时壳体下降过程中出现晃动。由于淬火炉是车载式,预热炉、油槽均为井式,从预热炉将壳体拉入淬火炉内,淬火冷却时将车载式淬火炉从预热炉处移动到油槽处,直接淬火,这时壳体未停止晃动,难以垂直入油。

对策:提前 30 min 将车载式淬火炉从预热炉处移动到油槽处。

(6)工艺环刚性不足。

对策:改用 5 mm 钢板,并在 6 个孔处焊接加强件。

### 3.4.3 椭圆度及母线直线度变形的校正

对于热处理后椭圆度及母线直线度变形大的壳体,可以采用专用撑具进行热校正。由于变形壳体一般为椭圆形,校正时用专用撑具将壳体短轴方向撑成长轴,然后在略低于首次回火温度下进行补充回火,一般撑长量是变形量的 1.8 倍。热校正后,可以保证圆柱段大小直径差小于 6 mm,母线直线度小于 4 mm。

## 4 结论

(1) 30CMnSiA 材料的大直径薄壁燃烧室壳体,热处理后,其直径和长度变化主要受热应力和组织应力影响,且组织应力的作用大于热应力,导致热处理后直径缩小,长度在一定范围变化。一般情况下,燃烧室壳体经过一次热处理,直径缩小 0.7 mm,二次热处理后,再缩小 0.5 mm;燃烧室壳体圆筒段长度变化范围为 -2.65 ~ 2.5 mm。

(2) 淬火工艺方法主要影响燃烧室壳体椭圆度及母线直线度。热处理时的燃烧室壳体的吊装方

式、壳体焊接质量、油冷时壳体入油速度、淬火冷却介质是否含有饱和气体、壳体入油过程是否晃动、工艺环刚性等因素,都直接影响燃烧室壳体的椭圆度及母线直线度。采取专用工装,可以校正燃烧室壳体椭圆度及母线直线度,保证圆柱段同截面大小直径差小于 6 mm,母线直线度小于 4 mm。

需要特别说明的是,不同材料的钢,热处理制度不同,淬火回火组织不同,变形规律不尽相同。

### 参考文献

- 1 李宜敏,张中欣,张远君. 固体火箭发动机原理. 北京:北京航空航天大学出版社,1991
- 2 樊东黎. 先进热处理技术的发展和展望. 金属热处理,2004;29(1):6~12
- 3 丁文华,韩会民. 热处理手册(第1卷). 第二版. 北京:机械工业出版社,1991
- 4 胡光立,李崇谟,吴锁春. 钢的热处理. 北京:国防工业出版社,1985
- 5 何贡. 计量测试技术手册(第二卷). 北京:中国计量出版社,1997

(编辑 李洪泉)

---

## 微型四坐标万能工具显微镜测量系统

本成果是在普通万能工具显微镜的导轨上加装轴向光栅传感器,光学分度台上加装圆感应同步器,中央显微镜处安装电感测头(或多向触发式测头),通过接口电路与微机联接所形成的一套微机辅助坐标测量系统。在使用时,被测零件的坐标值由采样开关控制送入计算机,通过相应误差软件处理,便可迅速得到被测零件的几何形状误差。

性能指标:测量范围,  $x, y, z$  坐标 200 mm  $\times$  100 mm  $\times$  150 mm, 旋转坐标 0 ~ 360°; 示值分辨率,  $x, y$  坐标 0.5  $\mu$ m,  $z$  轴相对坐标 0.1  $\mu$ m, 旋转坐标 1°; 配置的光栅传感器 100 条/mm; 专用接口电路, BMPC/XTAT 及其系列兼容机。

本成果多维测量技术达国际先进水平,曾获省科技进步二等奖。

本技术可用于对各种型号的万能工具显微镜进行改造,改造后的测量系统,在复杂零件的检测方面具有较大的优越性,提高了万能工具显微镜检测功能。具有广泛的推广和应用价值。

(西北工业大学,西安 710072)

·李连清·