

TC4钛合金碟形弹簧的制作工艺和力学性能

张二龙, 张丹丹, 史航, 殷莹

西安泵阀总厂有限公司 陕西西安 710025

摘要: 研究了不同热处理工艺对TC4钛合金的显微组织、力学性能和硬度的影响, 结果表明: 经过固溶+时效 ($900^{\circ}\text{C} \times 1.5\text{h}$ 水冷 + $500^{\circ}\text{C} \times 6\text{h}$ 炉冷) 处理后材料晶粒细小, 强度和硬度高。采用固溶+时效热处理工艺, 参照GB/T 1972—2005《碟形弹簧》标准, 设计出了TC4钛合金碟形弹簧小批量生产的制造方法, 采用该方法成功试制出了满足技术要求的碟形弹簧。

关键词: TC4钛合金; 碟形弹簧; 热处理; 显微组织; 力学性能

1 序言

钛材阀门具有良好的耐蚀性, 近年来, 我厂针对化工行业应用的钛材球阀订单越来越多, 为保障可靠的密封性能, 对阀座密封提供支撑力的蝶形弹簧至关重要, 要具备综合的力学性能。TC4 (Ti-6Al-4V) 钛合金抗腐蚀能力强, 比强度高, 变形抗力和变形回弹量大, 重量轻, 抗阻尼性能强^[1], 使用温度范围广, 制作的零部件可在 $-196 \sim 350^{\circ}\text{C}$ 内长期使用, 是一种理想的弹簧用材料。

2 蝶形弹簧

碟形弹簧是在轴向呈锥形并承受负荷的特殊弹簧, 应力分布由里到外均匀递减, 承受负荷变形后反方向实现载荷效果。依据GB/T 1972—2005《碟形弹簧》用金属板料或锻压坯料成形加工的锥形截面碟形弹簧结构如图1所示。

其结构特点具有刚度大, 缓冲吸震能力强, 以较小的变形承受较大的载荷^[2], 适用于轴向空间较

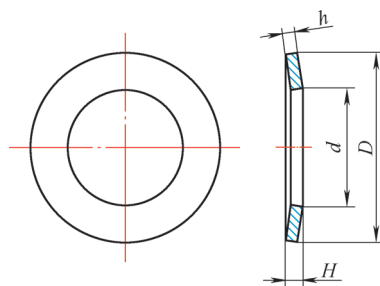


图1 碟形弹簧结构

小的场合。按照厚度和使用条件分为无支承面碟形弹簧和有支承面碟形弹簧, 其制造工艺方法见表1。

表1 GB/T 1972—2005《碟形弹簧》建议制造工艺方法

类别	型式	工艺方法	碟形弹簧厚度 t/mm
1		冷冲成形, 边缘倒圆角	< 1.25
2	无支承面	切削内外圆或平面, 边缘倒圆角, 冷成形或热成形	$1.25 \sim 6$
		精冲, 边缘倒圆角, 冷成形或热成形	
3	有支承面	冷成形或热成形, 加工所有表面, 边缘倒圆角	$> 6.0 \sim 16$

试样尺寸对韧脆转变温度的影响受冷却速度控制。

2) 随着回火温度的增加, 屈服强度、极限抗拉强度和硬度降低, 而塑性和冲击吸收能量增加。但极限抗拉强度比屈服强度降低的速率高, 随着回火温度的增加, 加工硬化速率减小。

3) 经过热处理的试样疲劳强度比未经过热处理

的试样疲劳强度高。对于汽车用传动轴要得到所需的疲劳强度应遵循油淬+ 600°C 回火处理工艺。

参考文献:

- [1] 赵欣, 刘芳. 热处理工艺对汽车用含锰钢性能的影响[J]. 金属世界, 2015 (5): 52-55.

MW 20200514

3 材料与性能

3.1 试验材料

TC4 (Ti-6Al-4V) 试验材料选用GB/T 2965—2007《钛及钛合金棒材》规定的棒料,退火态,试验材料的化学成分和力学性能分别见表2、表3。

表2 TC4 ϕ 60mm棒料化学成分 (质量分数) (%)

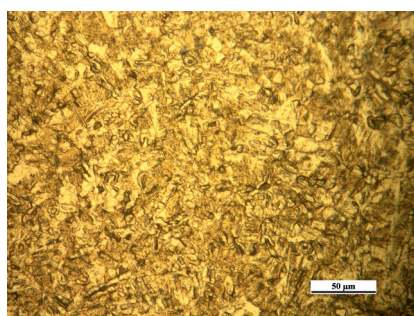
Ti	Al	V	Fe	C	N	H	O
余量	5.85	4.35	0.072	0.031	0.013	0.001	0.169

表3 TC4 ϕ 60mm棒料的主要力学性能

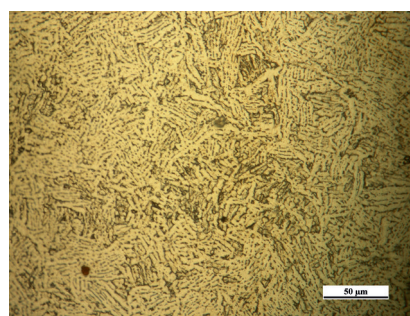
$R_{p0.2}/\text{MPa}$	R_m/MPa	A (%)	硬度HBW
921	904	12	321.7

3.2 试验方法

锯床切割6根 ϕ 60 $\times$ 150mm规格的棒料进行2种



a) 900℃ $\times$ 1.5h水冷+500℃ $\times$ 6h炉冷



b) 750℃ $\times$ 2h炉冷

图2 不同热处理后的显微组织

均由 $\alpha + \beta$ 相组成。由图2a看出经900℃ $\times$ 1.5h水冷+500℃ $\times$ 6h炉冷的固溶+时效处理后,组织为双态组织 ($\alpha + \beta$), 包括有球状 α 相, 条形 α 相和 β 相, 采用截点法计算晶粒度, 3次测定的结果分别为13.0级、13.3级与12.8级, 即其组织晶粒度为13.0级。

由图2b看出, 经750℃ $\times$ 2h炉冷的退火处理后组织为网篮组织, 主要为条状 α 相, 还可以看到少量的球状 α 相, 采用截点法计算晶粒度, 3次测定的结果分别为11.6级、11.5级与11.8级, 即退火后组织

制度的热处理试验, 950℃以下加热与冷却方式对性能的影响较小, 且合金具有较高的综合力学性能^[2], 热处理制度见表4。

热处理后纵向取样制取拉伸试样与金相试样, 用拉伸强度试验机测试室温拉伸性能, 用奥林巴斯光学显微镜观察试样的显微组织。

表4 TC4棒料热处理制度^[3]

热处理制度	试样编号
900℃ $\times$ 1.5h水冷+500℃ $\times$ 6h炉冷	1、2、3
750℃ $\times$ 2h炉冷	4、5、6

3.3 热处理对显微组织的影响

TC4钛合金的组织形态和晶粒度取决于保温温度、保温时间以及冷却方式等^[4], 不同热处理后的光学显微组织如图2所示。

图2中TC4钛合金经不同热处理后的显微组织

晶粒度为11.6级。

3.4 热处理对力学性能的影响

TC4钛合金经900℃ $\times$ 1.5h水冷+500℃ $\times$ 6h炉冷的固溶+时效处理, 以及750℃ $\times$ 2h炉冷的退火处理后力学性能测试结果见表5。

表5数据表明, TC4棒料经固溶+时效处理后的抗拉强度和屈服强度明显高于退火态, 伸长率低于退火态, 材料硬度均值达到37.5HRC, 满足了TC4钛合金碟形弹簧表面硬度 $\geq 35\text{HRC}$ 的技术要求。

综上所述, TC4钛合金经固溶+时效处理后晶粒

表5 TC4在不同热处理后的力学性能

试样编号	900℃ $\times$ 1.5h水冷+500℃ $\times$ 6h炉冷				试样编号	750℃ $\times$ 2h炉冷			
	$R_{p0.2}/\text{MPa}$	R_m/MPa	A (%)	硬度HRC		$R_{p0.2}/\text{MPa}$	R_m/MPa	A (%)	硬度HRC
1	1090	1138	10.5	37.9	4	920	943	17.5	30.3
2	1079	1105	8	37.2	5	886	909	14.5	32.1
3	1029.3	1095	8.5	37.5	6	947	970.3	13.7	30.6

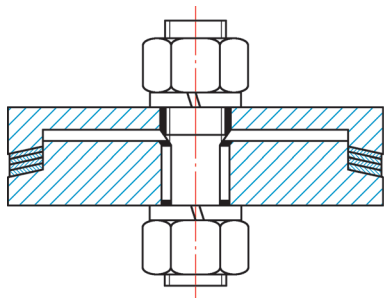


图3 模具结构

细小，材料的屈服强度和表面硬度高，更适合作为TC4钛合金碟形弹簧制备的热处理工艺。碟形弹簧在服役过程中受到持久的弹性应力，高的屈服强度能使材料在更大的弹性变形范围内服役^[5]。

4 碟形弹簧制造与测试

4.1 TC4钛合金碟形弹簧制造方法

根据碟形弹簧结构形式设计并计算模具工装尺寸，模具的参数满足碟形弹簧的基本尺寸要求^[5]，模具材质为35CrMo钢，图3所示为设计的模具工装结构。

车削 $\phi 60\text{mm}$ 棒料得到 $\phi 59\text{mm} \times 5\text{mm} \times 1\text{mm}$ 的垫片状坯料，用细砂纸轻抛去掉毛刺。放置一定数量的垫片状坯料于模具压槽中，采用扳手拧紧螺栓

端部紧固螺母，使板状垫片坯料冷变形成碟形弹簧尺寸。

选择普通大气炉对模具工装和冷变形碟形弹簧整体进行 $900^\circ\text{C} \times 1.5\text{h}$ 水冷+ $500^\circ\text{C} \times 6\text{h}$ 炉冷形变热处理，为了防止TC4材料表面被氧化，可将工装整体埋置于石灰中或涂抹防氧化涂料，如果有条件放置于气氛保护炉或真空炉更佳。形变热处理后随炉自然冷却至室温，拆卸工装取出碟形弹簧并进行表面处理，碟形弹簧成品如图4所示。



图4 成品碟形弹簧

4.2 TC4钛合金碟形弹簧测试

依据GB/T 1972—2005《碟形弹簧》，使用弹簧拉压试验机对碟形弹簧进行性能测试，自制的碟形弹簧外形尺寸与压缩弹力满足技术要求，碟形弹簧的力学性能测试结果见表6。

表6 TC4碟形弹簧尺寸与压缩弹力

项目	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]	5 [#]	6 [#]	设计要求
厚度H/mm	2.01	2.10	2.04	2.06	2.08	2.00	2 ± 0.1
弹力/N	压缩0.5mm	633.8	802.2	644	747.6	630.8	545
	压缩0.75mm	890	1101.8	870.4	1098.8	929.8	687

5 结束语

1) 固溶+时效热处理工艺($900^\circ\text{C} \times 1.5\text{h}$ 水冷+ $500^\circ\text{C} \times 6\text{h}$ 炉冷)更适合于TC4钛合金碟形弹簧生产制备。

2) TC4钛合金经过($900^\circ\text{C} \times 1.5\text{h}$ 水冷+ $500^\circ\text{C} \times 6\text{h}$ 炉冷)处理后晶粒细小，其组织晶粒度达到13.0级。

3) 经过固溶+时效热处理后TC4钛合金碟形弹簧具有较高的屈服强度，良好的塑韧性，表面硬度>35HRC。

4) 该方法制备TC4钛合金碟形弹簧工艺简单、成本低、易于实现、成品率高，可用于不同规格尺寸的小批量自用生产。

参考文献:

- [1] 周佳宇, 王德全. 钛合金弹簧的研究和应用[J]. 材料开发与应用, 2011, 26 (1): 92-94.
- [2] 罗焱泽, 赵朋举, 余巍, 等. 阀门用钛合金碟形弹簧[J]. 材料开发与应用, 2015, 30 (5): 68-72.
- [3] 孟祥康, 周义刚, 俞汉清, 等. 改善TC4钛合金锻件机械性能的热处理工艺[J]. 金属热处理, 1991 (1): 46-49.
- [4] 李露. 固溶时效对TC4合金组织与机械性能的影响[J]. 特钢技术, 2014, 20 (1): 29-31.
- [5] 宋智丽. 碟形弹簧成形模具的设计[J]. 机械工人(热加工), 2002 (10): 74-75.

MW 20200401