

机车用钛合金弹簧的设计与制备

杨海瑛¹, 赵亮², 应扬¹, 曹祖涵¹, 郭荻子¹, 李磊¹

(1. 西北有色金属研究院, 陕西 西安 710016)

(2. 西部金属材料股份有限公司, 陕西 西安 710201)

摘要: 钛合金弹簧替代钢制弹簧应用于机车悬架弹簧可以减重 40%~60%, 而且钛合金弹簧具有良好的耐蚀性和阻尼特性, 不仅能够抵御恶劣环境的腐蚀, 增加机车的行驶里程, 还能增强机车的操控性和乘架的舒适性。通过赛车用悬架弹簧实例, 详细介绍 TB9 钛合金弹簧的设计方法和制备过程。计算得到钛合金悬架弹簧的螺旋角为 9.45°, 已经超出弹簧设计国家标准范围, 因此对公式进行了修正。此外, 还研究了温度对 TB9 钛合金弹簧刚度的影响。研究发现, 随着温度的上升, TB9 钛合金弹簧的刚度逐渐下降。

关键词: 钛合金; 弹簧; 刚度; 弹性模量; 剪切模量

中图分类号: TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1009-9964(2024)02-031-04

Design and Preparation of Titanium Alloy Springs for Automotive Vehicles

Yang Haiying¹, Zhao Liang², Ying Yang¹, Cao Zuhuan¹, Guo Dizi¹, Li Lei¹

(1. Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, China)

(2. Western Metal Materials Co., Ltd., Xi'an 710201, China)

Abstract: Replacing steel springs with titanium alloy springs can reduce weight by 40%-60% when applied to suspension springs. Titanium alloy springs have good corrosion resistance and damping performance, which not only increase the mileage, but also make the vehicles more controllable and comfortable. Through an example of suspension springs used in racing cars, this paper will provide a detailed introduction to design and prepare TB9 titanium alloy spring. The calculated helix angle of TB9 titanium alloy suspension spring is 9.45°, which exceeds the range of steel spring design standards. So the design equations for titanium alloy spring have been revised here. In addition, the influence of temperature on the TB9 titanium alloy spring rate is investigated. With the increase of temperature, the TB9 titanium alloy spring rate decreases gradually.

Keywords: titanium alloy; spring; rate; elastic modulus; shear modulus

高强钛合金是制备航空弹簧的最佳候选材料之一。钛合金弹簧的首次应用始于 1970 年, 美国麦道 (McDonnell Douglas) 公司将 Ti-13V-11Cr-3Al 合金弹簧用于 DC-10 宽体客机, 主要应用在机头和主起落下降锁定弹簧, 以及升降舵和副翼控制弹簧^[1]。1971 年, RMI 公司发明了 Beta-C (TB9) 亚稳 β 钛合金, 除了高强度和低模量等性能外, 该合金还具有优异的冷加工性能, 可以轻松制备成弹簧用丝材。TB9 钛合金逐渐替代了加工难度较大的 Ti-13V-11Cr-3Al 合金, 用作

波音 757 窄体飞机客舱门的平衡弹簧, 减重高达 66.6%。之后, TB9 钛合金弹簧在波音 777、空客 A330、A340 等机型上也得到应用^[1-3]。

除了航空领域, 钛合金在机车用弹簧方面也有很多优势和应用实例^[3-6]。首先, 钛合金具有优异的耐腐蚀性能, 能够减少复杂的防腐处理过程, 特别是在恶劣的环境中, 能够保障弹簧长期稳定服役, 减少车辆的维护成本。Renton Coil & Spring Company 已经将钛合金弹簧应用于雪地越野摩托, 有效抑制了弹簧的锈蚀。其次, 钛合金的密度只有钢材的 60% 左右, 而且钛合金的弹性模量和剪切模量约为钢材的一半, 钛弹簧设计所需的有效圈数只要钢弹簧的一半, 因此理论上减重可达 70% 左右。根据机车用弹簧的实际载荷和

收稿日期: 2023-11-29

基金项目: 陕西省国际科技合作计划项目 (2020KW-041); 陕西省重点研发计划项目 (2022GY-286)

通信作者: 李磊 (1983—), 男, 正高级工程师。

装配要求,使用钛合金弹簧能够减重 40%~60%。弹簧减重不仅能够节约能源,提高车辆的运行里程,而且有利于提高车辆的灵活性和操控性。TIMETAL 公司开发了一种低成本的 β 钛合金,用作汽车螺旋弹簧。大众 Lupo FSI 轿车将钛合金弹簧用作悬架弹簧,之后类似的悬架弹簧被用于法拉利 Challenge Stradale 跑车等车型。通用汽车公司的雪佛莱 Corvette ZO6 型汽车使用钛弹簧代替不锈钢弹簧,用于排气系统中^[3-4]。除此之外,钛合金弹簧还具有良好的阻尼特性,在移动过程中加速和减速所需的能量少,较低重量或较小能量即可使其产生弹性变形,从而使负载下的运动更平稳、更可控。目前,很多摩托车和自行车使用中强钛合金(TC4)弹簧替代钢制弹簧主要就是利用了钛合金弹簧良好的阻尼特性,提高了颠簸路况下的舒适性。

根据文献[7]报道,使用 TC4 钛合金弹簧替代钢制弹簧,弹簧的体积将会增加 42%,重量却只减少了 20%。但是使用高强 TB9 钛合金弹簧,重量将减少 52%,体积减小 22%。由此可见,在机车用弹簧设计时采用高强度的钛合金,更能够发挥钛合金的性能优势。然而,钛合金弹簧在设计上还有很多需要注意的细节。比如,现行的弹簧设计标准 GB/T 23935—2009《圆柱螺旋弹簧设计计算》主要针对钢制弹簧,弹簧螺旋角范围在 $5^\circ\sim 9^\circ$ 之间,而钛合金弹簧由于弹性模量和剪切模量低,弹簧有效圈数少,螺旋角往往大于 9° ,现有标准和计算公式并不能适应钛合金弹簧的设计要求,需要对刚度计算公式进行修正。美国早在 1976 年就制定了 AMS 4959《Titanium Alloy Wire 13.5V-11Cr-3Al Spring Temper》钛合金弹簧材料标准,而我国尚未颁布钛合金弹簧的设计标准以及钛合金弹簧用材料相关标准,关于钛合金弹簧设计与制备的研究也鲜有报道。

本研究将通过赛车用悬架弹簧实例,详细介绍钛合金弹簧刚度计算和设计方法,以及钛合金弹簧的制备过程,并深入研究温度对钛合金弹簧刚度的影响规律。

1 机车用钛合金弹簧设计

1.1 钛合金弹簧设计方法

钛合金压缩螺旋弹簧的特性线可近似为直线型,弹簧刚度理解为定值。依据 GB/T 23935—2009 标准,弹簧刚度和切应力计算公式如下:

$$F' = \frac{F}{f} = \frac{Gd^4}{8D^3n} \quad (1)$$

$$\tau = \frac{8KDF}{\pi d^3} = \frac{KGdf}{\pi D^2n} \quad (2)$$

式中: F' 为弹簧刚度, F 为载荷, f 为弹簧变形量, G 为弹簧材料的剪切模量, d 为弹簧丝径, D 为弹簧中径, n

为弹簧有效圈数, τ 为弹簧切应力, K 为弹簧曲度系数。

式(1)适用于螺旋角(α)小于 9° 的弹簧,而对于钛合金弹簧,螺旋角往往大于 9° ,刚度的计算公式需考虑螺旋角的影响,优化后的公式为^[8]:

$$F' = \frac{F}{f} = \frac{Gd^4}{8D^3n} \times \frac{E \cos \alpha}{E \cos^2 \alpha + 2G \sin^2 \alpha} \quad (3)$$

由此可见,钛合金弹簧的刚度计算公式(3)相比于现行弹簧设计标准,增加了弹性模量 E 和螺旋角 α 两个参数。螺旋角 α 与弹簧有效圈数 n 、自由高度 H_0 以及弹簧外径 D_2 有关。对于弹簧的精度控制,丝径 d 是影响刚度 F' 最关键的参数,丝径偏差 1%,负载会产生 4% 左右的偏差。

1.2 前悬架弹簧的设计要求与参数计算

某赛车制造公司的前悬架弹簧设计参数要求见表 1。悬架弹簧为圆柱螺旋弹簧,设计刚度值为 76 N/mm,静载高度 146.5 mm 的设计载荷为 4838.5 N,全压缩高度为 96.24 mm,全压缩高度下圈间间隙 ≥ 3 mm,弹簧内径 > 77 mm,外径 < 110 mm。

表 1 前悬架弹簧设计参数

Table 1 Design parameters of front suspension spring

| Parameter | Value |
|---|----------|
| Design load/N | 4838.5 |
| Spring rate/N mm ⁻¹ | 76 |
| Jounce height/mm | 96.24 |
| Design height/mm | 146.5 |
| Rebound height/mm | 189 |
| Gap between circles at jounce height/mm | ≥ 3 |
| Outer diameter of main cylinder/mm | 50 |
| Diameter of envelope/mm | < 110 |
| Diameter of docking port/mm | > 77 |

根据上述前悬架弹簧的设计参数要求,可计算得到弹簧空载时的自由高度 $H_0=210.2$ mm。钛合金棒材的弹性模量和剪切模量数值与热处理工艺有关,本研究采用 TB9 钛合金制备悬架弹簧,计算过程中 TB9 钛合金的弹性模量 E 使用实测值 104 GPa。根据文献[7]报道,剪切模量 $G=40$ GPa,扭转屈服强度 $\tau=840$ MPa。将上述参数带入式(3),可得到弹簧参数如表 2 所示。

表 2 TB9 钛合金前悬架弹簧参数

Table 2 Parameters of TB9 titanium alloy front suspension spring

| H_0 /mm | D_2 /mm | d /mm | n | n' |
|-----------|-----------|---------|------|------|
| 210.2 | 107.6 | 14.8 | 3.95 | 5.70 |

计算得到 TB9 钛合金弹簧的螺旋角为 9.45° ，超过 GB/T 23935—2009 标准的范围，公式 (1) 与 (3) 计算的刚度值偏差约为 1%。弹簧设计外径 107.6 mm，内径 78 mm，满足弹簧装配要求。弹簧总圈数 $n'=5.70$ ，展开长度 1662 mm，质量 1377 g。

2 钛合金悬架弹簧的制备

实验材料为西北有色金属研究院通过 3 次 VAR 真空自耗电弧熔炼制备的 TB9 钛合金铸锭。铸锭经过多次墩拔锻造以及多次轧制得到 $\phi 16$ mm 的 TB9 钛合金棒材，终轧温度为 920°C ，再经无心车床精密加工至目标尺寸，获得直径均匀的棒材，其化学成分如表 3 所示。

表 3 TB9 钛合金棒材化学成分 (w%)

Table 3 Chemical composition of TB9 titanium alloy bar

| Ti | Al | V | Cr | Zr | Mo | Fe | O | N | H |
|------|------|------|------|------|------|------|-------|------|--------|
| Bal. | 3.54 | 8.18 | 6.08 | 4.13 | 4.01 | 0.05 | 0.097 | 0.01 | 0.0011 |

TB9 钛合金的弹性模量 E 和剪切模量 G 与热处理制度有关，时效温度与时效时间都会对钛合金材料的性能产生影响^[9-10]。AMS 4957E 标准对 TB9 钛合金棒材的推荐热处理工艺为固溶温度 $790\sim 925^\circ\text{C}$ ，时效温度 $482\sim 566^\circ\text{C}$ ，时效时间 $6\sim 12$ h，热处理后抗拉强度的范围为 $1241\sim 1379$ MPa（针对直径为 $9.52\sim 15.88$ mm 的棒材）。本研究中采用的热处理工艺为 800°C 固溶 + $500^\circ\text{C}/10$ h 时效处理。TB9 钛合金棒材热处理后的力学性能如表 4 所示，满足 AMS 4957E 标准要求。

表 4 TB9 钛合金棒材力学性能

Table 4 Mechanical properties of TB9 titanium alloy bar

| R_m/MPa | $R_{p0.2}/\text{MPa}$ | $A/\%$ | $Z/\%$ | E/GPa |
|------------------|-----------------------|--------|--------|----------------|
| 1315.5 | 1220 | 12 | 30 | 104 |

图 1 为 TB9 钛合金棒材固溶态和时效态的显微组织。固溶处理后，TB9 钛合金棒材发生了再结晶，等轴 β 晶粒取代轧态的变形晶粒，加工过程中的畸变能得到释放，成为再结晶的驱动力。晶粒尺寸较为均匀，平均晶粒尺寸为 $30\sim 40\ \mu\text{m}$ 。经过 $500^\circ\text{C}/10$ h 时效处理后，析出大量 α 相，弥散分布在 β 基体中。图 1b 亮色区域为无 α 相析出的区域。TB9 钛合金棒材经数控卷簧机冷卷成型，得到总圈数 5.70 圈的弹簧。钛合金弹簧冷卷加工回弹较大，考虑到卸载后的回弹量，需要选择合适的芯棒。冷卷加工后弹簧两端并紧，使用磨簧机进行平头处理，磨平 $3/4$ 圈。另外，用模具固定弹簧后进行热处理，热处理后弹簧的自由高度和外径都会增加。因此，在弹簧冷卷加工时需要对其总圈数进行适当补偿。

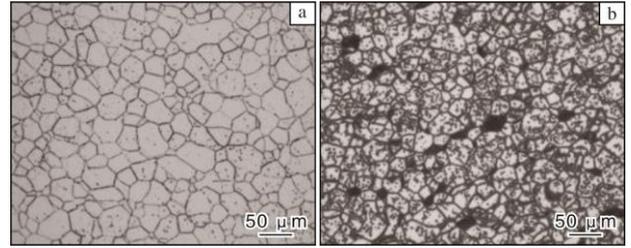


图 1 TB9 钛合金棒材的显微组织

Fig.1 Microstructures of TB9 titanium alloy bar: (a) solid solution state; (b) aging state

图 2 为 TB9 钛合金弹簧热处理前后的照片。由图 2 可见，冷卷加工的 TB9 钛合金弹簧垂直度良好，螺距均匀一致。冷卷后弹簧静置 24 h 再进行热处理，时效处理之后弹簧高度增加 3 mm，外径增加 1.1 mm。因此，需要根据弹簧热处理前后规格的变化控制冷卷弹簧的直径和高度。



图 2 TB9 钛合金弹簧热处理前后的照片

Fig.2 TB9 titanium alloy springs before and after heat treatment

3 温度对钛合金弹簧刚度的影响

汽车悬架弹簧受到频繁的冲击载荷时，其温度会升高。温度对钛合金的力学性能有显著影响，这也必然会导致弹簧刚度的变化。Rateick 等^[11]研究了 TB9 钛合金弹簧剪切模量随温度的变化规律。结果表明，随着温度从 220°C 逐渐降低，合金剪切模量逐渐减小。众所周知，钛合金的弹性模量和剪切模量随着温度升高逐渐减小，文献[11]结果可能存在很大的实验误差。

为了验证温度对钛合金弹簧刚度的影响，使用直径 13 mm 的 TB9 钛合金棒材制备赛车前悬架弹簧的缩比件，并对其进行高温压缩实验（高温压缩实验腔体可容纳试样高度 ≤ 150 mm，外径 ≤ 90 mm）。实验制备的 TB9 钛合金弹簧缩比件的高度 144 mm，外径 78 mm，总圈数 6 圈，有效圈数 4 圈。分别测量 TB9 钛合金棒材在室温到 380°C 范围内的力学性能以及弹簧的位移-载荷曲线，分别如图 3 和图 4 所示。从图 3 可知，随着温度升高，TB9 钛合金棒材抗拉强度从 1388 MPa 降至 1238 MPa，下降了

10.8%；弹性模量 E 从室温时的 106 GPa 降至 380 °C 时的 85.6 GPa，下降了 19.2%。从图 4 可以看出，随着温度的升高，钛合金弹簧在压缩至自由高度 H_0 的 65% 时，载荷从室温时的 7027 N 降至 380 °C 时的 6023 N，减少了 14.3%。

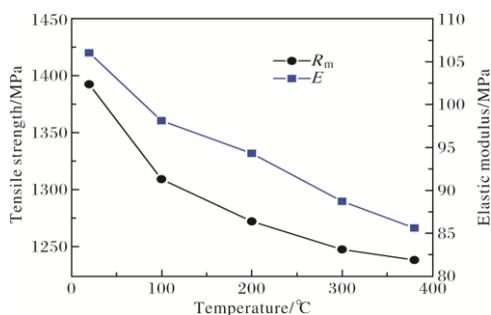


图 3 TB9 钛合金棒材抗拉强度和弹性模量随温度的变化曲线

Fig.3 Curves of tensile strength and elastic modulus of TB9 titanium alloy bars vs. temperature

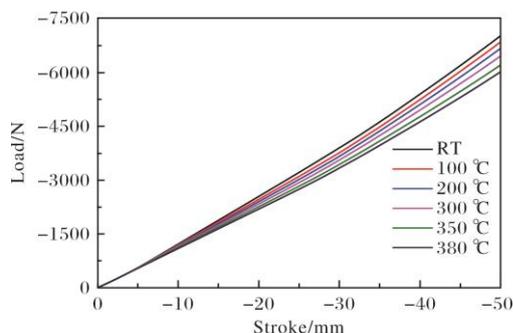


图 4 不同温度下 TB9 钛合金弹簧的位移-载荷曲线

Fig.4 Stroke-load curves of TB9 titanium alloy spring at different temperatures

图 5 为 TB9 钛合金弹簧刚度随温度变化的曲线。从图 5 可以看出，TB9 钛合金弹簧的刚度随着温度升高逐渐降低，且当温度超过 300 °C 时，刚度减小的速率增大。因此，在进行机车用钛合金弹簧设计时，应考虑温度对弹簧刚度的影响。

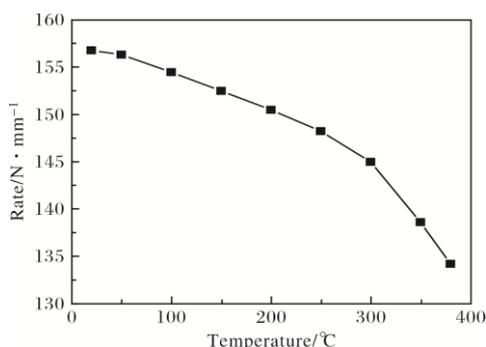


图 5 TB9 钛合金弹簧刚度随温度的变化曲线

Fig.5 Rate of TB9 titanium alloy spring vs. temperature

目前，钛合金弹簧的热处理制度还有待优化，尚需深入研究显微组织与钛合金弹簧疲劳性能的关系。尽管钛合金弹簧在赛车或高档轿车等民用领域成功应用，但整体用量不大，主要是受到成本的限制。通过设计低成本钛合金，并使用短流程的加工方法进一步降低制备成本，可以有效扩大钛合金弹簧的应用市场。

4 结论

(1) 钛合金弹簧在设计时应考虑大螺旋角对刚度的影响，使用修正公式进行刚度计算。设计的 TB9 钛合金悬架弹簧，修正公式与国标中公式的计算结果存在 1% 左右的偏差。

(2) 在钛合金弹簧制备过程中，冷卷和热处理都会造成弹簧自由高度和外径的变化，应根据回弹量调整芯棒的直径，并对总圈数进行补偿。

(3) 在室温到 380 °C 范围内，温度升高导致弹簧刚度逐渐下降，且 300 °C 以上时弹簧刚度快速减小。

参考文献 References

- [1] Royer R R, Briggs R D. The use of β titanium alloy in the aerospace industry[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2005, 14(6): 681-685.
- [2] Boyer R R, Bajoraitis R, Greenwood D W, et al. Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr wire for spring application[C]//Boyer R R, Rosenberg H W. Symposium on beta titanium alloys in the 80's. Atlanta, Georgia: Metallurgical Society, 1983: 295-305.
- [3] 郑勇. 钛合金弹簧发展动态研究[J]. 飞机设计, 2012, 32(3): 46-49.
- [4] 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): 92-95.
- [5] 王超, 黄志辉. 钛合金弹簧在轨道交通行业的应用前景分析[J]. 现代城市轨道交通, 2018(5): 67-70.
- [6] 黄志辉, 王超, 孙生龙, 等. 一系钛合金弹簧的应用研究[J]. 机车电传动, 2017(1): 14-16.
- [7] 彭希仁. 钛合金弹簧[J]. 航空工艺技术, 1989(2): 39-42.
- [8] 张英会, 刘辉航, 王德成. 弹簧手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2017: 415-416.
- [9] 李雷, 罗斌莉, 杨宏让, 等. 固溶时效处理对 TB9 钛合金棒材组织和性能及其弹簧弹性的影响[J]. 钛工业进展, 2012, 29(5): 30-32.
- [10] Okamoto T, Wakita M, Muramatsu H, et al. Effect of microstructure on torsional fatigue strength of titanium alloy for high strength spring[J]. Transactions of Japan Society of Spring Engineers, 2009, 2009(54): 35-40.
- [11] Rateick R G, McCool K C, Leonard E C, et al. Metastable beta titanium spring performance at elevated temperature [C]//World Aviation Congress & Exposition. United States: SAE International 2002-01-3004, 2022.