

文章编号: 2097-1974(2025)06-0041-05

DOI: 10.7654/j.issn.2097-1974.20250606

# 气瓶充气阀传动螺纹改进设计研究

高兆金, 张博文, 吴立夫  
(北京航天爱锐科技有限责任公司, 北京, 100076)

**摘要:** 现役气瓶充气阀的传动螺纹基本延续了成熟型号的设计方案, 采用与紧固螺纹相同的普通三角螺纹, 普通螺纹连接自锁性能好, 常用于紧固连接或小螺距的调节螺旋。由于螺纹牙型固有的适用性问题, 在批次产品的研制中, 出现了寿命试验中传动螺纹滑扣的问题, 针对此问题提出了螺纹改进方案。通过对气瓶充气阀传动螺纹改进设计研究, 将原有的三角螺纹改为梯形螺纹, 改进后的梯形螺纹应力水平更低, 相对许用应力的余量更大, 改进效果较好。4件3J1螺杆顺利通过了1 000次高压带压极限寿命试验考核, 螺纹副寿命由原来的不足250次提高到1 000次, 验证了梯形螺纹方案的可行性, 提高了螺纹副的使用寿命。

**关键词:** 阀门; 三角螺纹; 梯形螺纹; 寿命; 高压

中图分类号: V433

文献标识码: A

## Study on Improved Design of Transmission Thread for Gas Cylinder Charging Valve

GAO Zhaojin, ZHANG Bowen, WU Lifu  
(Beijing Ares Technology Co., Ltd., Beijing, 100076)

**Abstract:** The transmission thread of the currently used gas cylinder charging valve largely follows the design scheme of mature models, employing the same ordinary triangular thread as the fastening thread. Ordinary thread connections offer good self-locking performance and are commonly used for fastening connections or fine-pitch adjustment screws. Due to inherent issues with the thread profile's applicability, a problem of thread stripping in the transmission thread occurred during the standard life test of batch-produced products. To address this issue, a thread improvement scheme was proposed. Through research on the improved design of the transmission thread for the gas cylinder charging valve, the original triangular thread was replaced with a trapezoidal thread. The improved trapezoidal thread exhibits a lower stress level and a larger margin relative to the allowable stress, demonstrating a good improvement effect. Four 3J1 studs successfully passed the 1 000-cycle high-pressure limit life test under pressure. The service life of the thread pair increased from less than 250 cycles to 1 000 cycles, verifying the feasibility of the trapezoidal thread scheme and improving the service life of the thread pair.

**Keywords:** valve; triangular thread; trapezoidal thread; service life; high pressure

### 0 引言

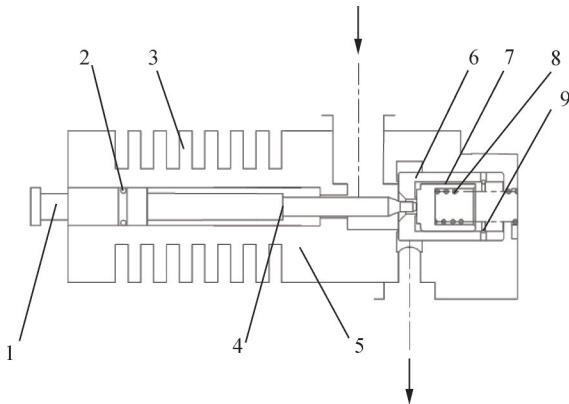
气瓶充气阀目前广泛应用于气瓶充放气, 部分产品在临近射前仍有启闭动作, 对其可靠性要求高。传动螺纹是气瓶充气阀的关键功能模块, 影响开关的启闭功能。随着新一代运载火箭高压气瓶工作压力的不断提高<sup>[1]</sup>, 目前已达38 MPa以上, 内部顶杆承受气压作用直径可达10 mm以上, 传动螺纹启闭动作时需承受约3 000 N的工作载荷, 受力状况恶劣, 要求使

用寿命至少满足250次, 可靠性要求达0.999 97。

现役气瓶充气阀手动操作部分传动螺纹延续了成熟型号的设计方案, 采用普通三角螺纹<sup>[2]</sup>, 自锁性能好<sup>[3]</sup>, 在较强振动工况下具有防松能力, 常用于紧固连接或小螺距的调节螺旋。但其强度相对较低, 且普通三角螺纹牙根部应力较高<sup>[4]</sup>, 在气瓶充气阀批产过程中出现了寿命试验后传动螺纹滑扣的问题, 针对此问题提出螺纹结构及材料改进方案。

## 1 气瓶充气阀工作原理

气瓶充气阀主要由主活阀、卸荷活阀、弹簧、O形密封圈、螺杆、壳体、止动环、顶杆、壳体翅片组成,如图1所示。工作原理为:气瓶充/放气时,手动旋转螺杆带动顶杆推开卸荷活阀,进而推开主活阀,阀门打开;充/放气完毕后,手动旋转螺杆带动顶杆退回,卸荷活阀和主活阀在弹簧力的作用下回位,保证密封。弹簧复位式阀门广泛应用于高压工况<sup>[5]</sup>



1—螺杆;2—O形密封圈;3—壳体翅片;4—顶杆;5—壳体;6—主活阀;  
7—卸荷活阀;8—弹簧;9—止动环。

图1 气瓶充气阀结构原理

Fig.1 Structural principle of gas cylinder inflation valve

螺杆与壳体之间螺纹配合副即为传动螺纹,启闭动作时承受气压力的载荷作用。螺纹副的配合材料为双相钢/铝青铜,壳体材料为双相钢F151,硬度要求HRC23~34,螺杆材料为铝青铜QA19-4,硬度要求HB110~190。铝青铜硬度较低,具有自润滑效果<sup>[6]</sup>,双相钢硬度较高,具有较佳延伸率<sup>[7]</sup>。

## 2 传动螺纹结构存在的问题

气瓶充气阀的最高工作压力可达38 MPa,阀门开启前出口预充压38 MPa是最恶劣的受力工况,此时传动螺纹副承受的轴向力最高。螺纹副在高承载状态下多次反复动作时,造成硬度偏低的铝青铜螺杆外螺纹产生较为严重的磨损。当螺纹副的加工质量或精度稍差,或寿命试验中每次动作后冷却时长不足时,可能出现螺纹滑扣等异常现象,如图2所示。当低硬度摩擦副与高硬度摩擦副接触时主要磨损发生在低硬度摩擦副部位<sup>[8]</sup>,根据 archard 磨损模型,硬度越高的材料磨损率越低<sup>[9]</sup>。

为避免上述现象的发生,需要对螺纹结构进行改进,提高螺纹副的承载能力,延长使用寿命。



图2 气瓶充气阀寿命试验螺纹滑扣现象

Fig.2 Thread stripping failure observed on gas cylinder filling valve after life test

## 3 改进方案设计

### 3.1 梯形螺纹特点

梯形螺纹具有加工难度较低、强度较高、传动可靠的特点<sup>[10]</sup>,其螺纹的工艺性好,内外螺纹以锥面贴合,对中性好,不易松动,在金属切削机床的丝杆、锻压机的传力螺旋等领域有广泛的应用,是使用最多的传动螺纹<sup>[11]</sup>。

与气瓶充气阀当前设计状态采用的普通三角形螺纹相比,梯形螺纹的承载能力更强<sup>[12]</sup>,主要原因是梯形螺纹牙根强度高,同样的载荷下应力值较低,不易产生变形,因此,采用梯形螺纹方案进行改进。

### 3.2 梯形螺纹改进方案

#### 3.2.1 使用条件

壳体材料选用双相钢F151,其屈服强度不低于735 MPa;螺杆材料选用3J1弹性合金,其屈服强度不低于981 MPa。气瓶充气阀的最高工作压力为38 MPa,此时整个传动螺纹副受到的气压力面为直径10 mm的圆形,可计算得螺纹承载轴向力:

$$F = \frac{\pi}{4} \times d^2 \times p_h \quad (1)$$

式中  $d$  为气压作用面直径;  $p_h$  为最高工作压力。计算得轴向力为2 983 N。

#### 3.2.2 许用应力取值

梯形螺纹的牙型角  $\alpha = 30^\circ$ ,单线  $n=1$ ,对于传动螺纹3J1螺杆挤压面许用压应力为45 MPa,许用弯曲应力为490 MPa,许用切应力为327 MPa。

壳体材料为双相钢F151,挤压面的许用压应力为35 MPa,许用弯曲应力为367 MPa,许用切应力为245 MPa。

#### 3.2.3 牙型设计和耐磨性计算

螺旋副中壳体为F151,机械性能相较3J1更低,F151的许用比压为35 MPa,可计算得到螺纹中径应满足:

$$d_2 \geq 0.8 \sqrt{\frac{F}{\psi \sigma_p}} \quad (2)$$

式中  $F$  为最大轴向力, 2 983 N;  $\psi$  为整体式螺母螺纹系数, 1.8;  $\sigma_p$  为配合副中强度较低材料的许用比压。计算得到中径应不小于 5.5 mm, 根据目前的整阀结构参数, 取螺纹中径  $d_2$  为 22.5 mm。

按梯形螺纹标准, 为减少整阀结构长度, 螺距  $P$  取 3 mm, 选取中等旋合长度  $L$ , 范围为 12 mm <  $L$  < 36 mm, 根据以往批次产品统计包络尺寸范围, 选取最小旋合长度为 14 mm, 设计得到的螺纹牙型参数如表 1 所示。

表 1 梯形螺纹牙型参数  
Tab. 1 Trapezoidal thread parameters

设计参数	数值/mm
基本牙型高	1.5
牙底宽	1.098
牙顶间隙	0.25
螺纹牙高	1.75
牙顶最大倒圆角半径	0.125
牙底最大倒圆角半径	0.25
壳体内螺纹小径	21
壳体内螺纹中径	22.5
壳体内螺纹大径	24.5
螺杆外螺纹小径	20.5
螺杆外螺纹中径	22.5
螺杆外螺纹大径	24

旋合长度  $L=14$  mm, 螺距为 3 mm, 旋合长度除以螺距可得螺纹旋合圈数  $z=4.7$ , 按下式对工作比压  $P_p$  进行校核:

$$P_p = \frac{F}{\pi d_2 h z} \quad (3)$$

式中  $h$  为螺纹工作高度, 1.5 mm。

计算得  $P_p$  为 6.03 MPa, 小于许用比压 35 MPa, 因此上述梯形螺纹牙设计耐磨性满足要求。

### 3.2.4 自锁性能计算

螺纹导程  $S=3$  mm, 导程角计算公式为

$$\gamma = \arctan \frac{S}{\pi d_2} \quad (4)$$

计算得导程角为 2.43°, 根据经验, F151 对 3J1 的摩擦系数为 0.08~0.1, 摩擦系数越低越容易发生自锁失效问题, 按照最保守选取摩擦系数  $\mu = 0.08$ , 当量摩擦角计算公式为

$$\rho_v = \arctan \frac{\mu}{\cos \frac{\alpha}{2}} \quad (5)$$

式中  $\alpha$  为梯形螺纹夹角, 30°。计算得  $\rho_v$  为 4.73°, 大于导程角 2.43°, 可满足自锁要求。

### 3.2.5 螺杆强度计算

计算螺纹副摩擦转矩:

$$T_1 = \frac{1}{2} d_2 F \tan(\gamma + \rho_v) \quad (6)$$

计算得  $T_1$  为 4 217.6 N·mm。

计算螺杆当量应力:

$$\sigma_{ca} = \sqrt{\left(\frac{4F}{\pi d_1^2}\right)^2 + 3\left(\frac{T_1}{0.2d_1^3}\right)^2} \quad (7)$$

式中  $d_1$  为壳体内螺纹小径, 20.5 mm。计算得  $\sigma_{ca}$  为 7.11 MPa, 小于许用压应力 35 MPa, 因此螺杆强度满足要求。

### 3.2.6 螺牙强度计算

螺牙剪切应力为

$$\tau = \frac{F}{\pi d_1 b z} \quad (8)$$

螺牙弯曲应力为

$$\sigma_{bb} = \frac{3Fh}{\pi d_1 b^2 z} \quad (9)$$

式中  $d_1$  为螺纹小径;  $b$  为螺牙根部的宽度, 1.95 mm。

分别对壳体及螺杆螺纹进行强度计算, 螺杆螺纹代入螺杆外螺纹小径 20.5 mm, 壳体螺纹代入壳体内螺纹小径 21 mm, 计算得螺杆外螺纹剪切应力为 5.09 MPa, 弯曲应力为 11.74 MPa, 远小于 3J1 材料的许用切应力及许用弯曲应力。壳体内螺纹剪切应力为 4.35 MPa, 弯曲应力为 10.03 MPa, 远小于 F151 材料的许用切应力及许用弯曲应力, 因此内外螺纹的螺牙强度均满足要求, 且有较大裕度。

## 4 改进螺纹验证情况

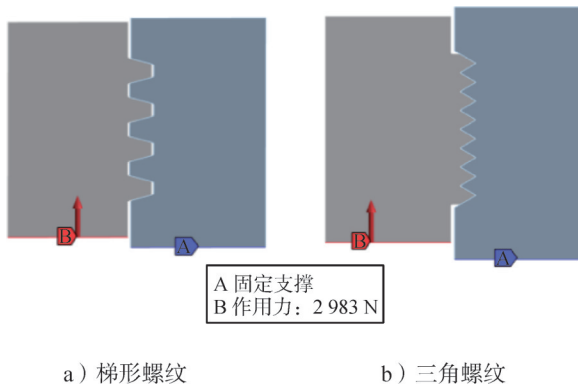
### 4.1 试验项目

改进螺纹试验产品共投产 4 套梯形螺纹模块试验件。为了减少产品研制试验迭代次数, 缩短验证周期、控制成本, 在产品验证过程中, 只开展了传动螺纹功能模块试验, 试验项目为 1 000 次高压带压极限寿命试验。试验条件为保持试验件入口压力为 38 MPa, 缓慢旋转充气阀手柄使充气阀达到最大开度, 再关闭充气阀试件, 重复 1 000 次。

### 4.2 仿真对比验证

使用有限元计算方法对两种螺纹连接进行强度分析, 该方法被广泛用于结构分析领域<sup>[14]</sup>。由于螺纹受力主要集中在前 3—4 扣<sup>[15]</sup>, 梯形螺纹按 4 扣螺纹进行仿真校核, 三角螺纹螺距为梯形螺纹的一半, 三角螺纹按 8 扣螺纹建模。建立二维轴对称模型, 在壳体位置设置固定支撑, 在螺杆位置设置沿轴向向上的

作用力，大小为2 983 N，如图3所示。



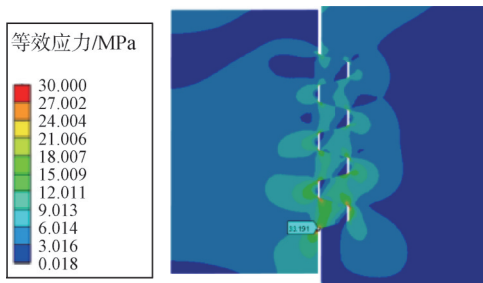
A 固定支撑  
B 作用力: 2 983 N

a) 梯形螺纹                      b) 三角螺纹

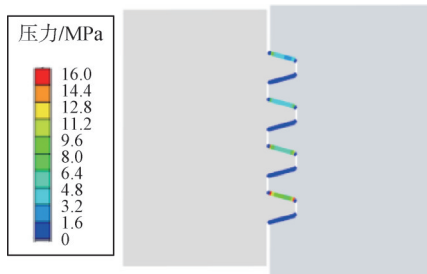
图3 仿真建模

Fig.3 Simulation modeling

梯形螺纹仿真结果见图4，由图4a可见，越远离轴向力施加端的螺纹牙所受应力越低。根部应力值相对较高，最高位置位于螺杆沿轴向第一个螺纹牙根部，约为33.9 MPa，远低于3J1的屈服强度981 MPa。接触比压分布趋势与等效应力分布趋势一致，越远离轴向力施加端接触比压越低，最高比压位置位于沿轴向第一个螺纹牙顶位置，约为16.0 MPa，低于F151许用比压35 MPa，且有较大裕度。



a) 等效应力云图



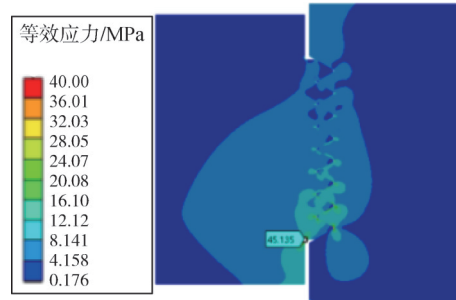
b) 接触面比压云图

图4 梯形螺纹仿真结果

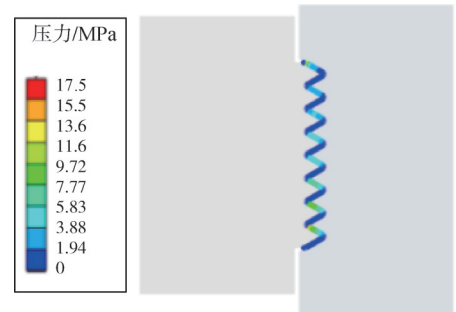
Fig.4 Trapezoidal thread simulation results

三角螺纹仿真结果见图5，由图5a可见，越远离轴向力施加端的螺纹牙所受应力越低，应力分布趋势与梯形螺纹一致。根部应力值相对较高，最高位置位于沿轴向第一个螺纹牙根部，约为45.1 MPa，远低于

铝青铜材料的屈服强度450 MPa。接触比压分布趋势与等效应力分布趋势一致，越远离轴向力施加端接触比压越低，最高比压位置位于沿轴向第一个螺纹牙顶位置，约为17.5 MPa，低于铝青铜材料许用比压25 MPa。



a) 等效应力云图



b) 接触面比压云图

图5 三角螺纹仿真结果

Fig.5 Triangular thread simulation results

仿真分析结果表明，3J1 梯形螺纹传动螺纹副结构设计及选材合理可行，相比三角螺纹结构铝青铜材料的方案拥有更大裕度。

### 4.3 试验结果

4件3J1 螺杆顺利通过了1 000次高压带压极限寿命试验考核，试验全程动作灵活、操作力矩手感无明显变大趋势。试验件分解后发现传动螺纹无异常变形、磨损和结构破坏。试验后分解照片见图6。



图6 梯形螺纹试验件分解检查情况

Fig.6 Disassembly inspection of trapezoidal thread test piece

## 5 结束语

通过对气瓶充气阀传动螺纹改进设计研究,将原有的三角螺纹改为梯形螺纹后,4件3J1螺杆顺利通过了1 000次高压带压极限寿命试验考核,螺纹副寿命由原来的不足250次提高到1 000次,验证了梯形螺纹方案的可行性,提高了螺纹副的使用寿命。

### 参 考 文 献

- [1] 周宏,邵业涛,王铁岩.新一代中型运载火箭动力系统总体技术分析[J].导弹与航天运载技术,2022(2): 21-26.  
ZHOU Hong, SHAO Yetao, WANG Tiejian. Overall technical analysis of the power system for a new-generation medium launch vehicle[J]. Missiles and Space Vehicles, 2022(2): 21-26.
- [2] 韩兵奇.井口闸阀中法兰连接螺纹的优化设计[J].流体传动与控制,2013(6): 38-40.  
HAN Bingqi. Optimal design of flange connecting threads in wellhead gate valves[J]. Fluid Power Transmission and Control, 2013(6): 38-40.
- [3] 刘军威,刘跃华,崔晓研.关于改善蜗轮蜗杆机构在振动条件下自锁性的研究[J].机电产品开发与创新,2022,35(5): 152-154.  
LIU Junwei, LIU Yuehua, CUI Xiaoyan. Research on improving the self-locking performance of worm gear mechanisms under vibration conditions[J]. Development & Innovation of Machinery & Electrical Products, 2022, 35(5): 152-154.
- [4] 方栋,陈继志.高强度螺栓螺纹根部应力集中的有限元分析[J].材料开发与应用,2007,22(2): 40-42.  
FANG Dong, CHEN Jizhi. Finite element analysis of stress concentration at the thread root of high-strength bolts[J]. Development and Application of Materials, 2007, 22(2): 40-42.
- [5] 社会峰.基于气液弹簧复位的阀门驱动系统设计[J].液压与气动,2012(1): 14-15.  
DU Huifeng. Design of a valve drive system based on gas-liquid spring return[J]. Hydraulics Pneumatics, 2012(1): 14-15.
- [6] 金玉花,路阳,王智平.新型复杂铝青铜Cu-14Al摩擦磨损特性的研究[J].特种铸造及有色合金,2004(3): 36-37.  
JIN Yuhua, LU Yang, WANG Zhiping. Research on friction and wear characteristics of a new type of complex aluminum bronze Cu-14Al[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2004(3): 36-37.
- [7] 徐增华.金属耐蚀材料:第五讲:双相钢[J].腐蚀与防护,2001,22(5): 45-47.  
XU Zenghua. Metal corrosion-resistant materials: Lecture 5: martensitic stainless steel[J]. Corrosion and Protection, 2001, 22(5): 45-47.
- [8] 吴维设,候朋,曹戡.阀体梯形螺纹卡滞故障的分析及解决[J].机械制造,2015,53(6): 57-59.  
WU Weishe, HOU Peng, CAO Yu. Analysis and solution of jamming failure of trapezoidal threads in valve bodies[J]. Machinery Manufacturing, 2015, 53(6): 57-59.
- [9] 王雷刚,黄瑶,孙宪萍.基于修正Archard磨损理论的挤压模具磨损分析[J].润滑与密封,2006(3): 15-17.  
WANG Leigang, HUANG Yao, SUN Xianping. Wear analysis of extrusion dies based on the modified Archard wear theory[J]. Lubrication Engineering, 2006(3): 15-17.
- [10] 张永振,朱均.不同滑动干摩擦条件下钢/铁摩擦副的摩擦磨损性能与表面形貌特征研究[J].摩擦学学报,2001,21(1): 37-41.  
ZHANG Yongzhen, ZHU Jun. Friction and wear properties and surface morphology characteristics of steel/iron friction pairs under different dry sliding conditions[J]. Tribology, 2001, 21(1): 37-41.
- [11] 杜一民,李志辉,贾学志,等.振动环境下传动螺纹配合间隙对其自锁性的影响[J].机械强度,2019,41(3): 509-514.  
DU Yimin, LI Zhihui, JIA Xuezhi, et al. Influence of fit clearance of transmission threads on their self-locking performance under vibration environment[J]. Journal of Mechanical Strength, 2019, 41(3): 509-514.
- [12] 张幼振,石智军,田东庄,等.高强度大通孔钻杆接头圆锥梯形螺纹的有限元分析及改进设计[J].煤炭学报,2010,35(7): 165-169.  
ZHANG Youzhen, SHI Zhijun, TIAN Dongzhuang, et al. Finite element analysis and improved design of conical trapezoidal threads for high-strength large through-hole drill pipe joints[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(7): 165-169.
- [13] 严仁兴.低温阀杆梯形螺纹公差的研究[J].阀门,2010(1): 20-26.  
YAN Renxing. Research on trapezoidal thread tolerances of cryogenic valve stems[J]. Valve, 2010(1): 20-26.
- [14] 支有冉,赵鸿健,杨欢,等.基于ANSYS Workbench的某边三轮车架有限元强度分析[J].工程科学学报,2025,47(9): 1955-1964.  
ZHI Youran, ZHAO Hongjian, YANG Huan, et al. Finite element strength analysis of a three-wheeler frame based on ANSYS Workbench[J]. Journal of Engineering Science and Technology Review, 2025, 47(9): 1955-1964.
- [15] 陈海平,曾攀,方刚,等.螺纹副承载的分布规律[J].机械工程学报,2010,46(9): 171-178.  
CHEN Haiping, ZENG Pan, FANG Gang, et al. Load distribution law of thread pairs[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(9): 171-178.

### 作 者 简 介

高兆金(1988—),男,工程师,主要研究方向为阀门。  
张博文(1993—),男,工程师,主要研究方向为阀门。  
吴立夫(1989—),男,博士,高级工程师,主要研究方向为阀门。