

# 镁合金基体螺纹扭拉特性及重复使用性研究

孟德浩, 张超颖, 袁文全, 闫路, 闫冰

(北京宇航系统工程研究所, 北京 100076)

**摘要:** 针对镁合金基体螺纹连接问题, 采用试验装置研究了高强耐热镁合金螺纹连接结构的扭拉关系及多次重复使用性能, 分析了带钢丝螺套及不带钢丝螺套情况下镁合金螺纹连接结构的扭拉破坏形式、扭矩系数、螺纹副摩擦系数及重复使用性能等, 研究结果为镁合金螺纹的力矩量化控制提供了依据, 对于镁合金螺纹连接结构的设计和使用具有指导意义。

**关键词:** 镁合金; 扭拉关系; 重复使用性能

中图分类号: TH12

文献标志码: A

文章编号: 2096-4080 (2019) 05-0045-05

## Research on Torsion-Tension Relation and Reuse Performance of Magnesium Alloy Screw Thread

MENG Dehao, ZHANG Chaoying, YUAN Wenqan, YAN Lu, YAN Bing

(Beijing Institute of Aeronautical Systems Engineering, Beijing 100076, China)

**Abstract:** To solve the problem of magnesium alloy connection, this work researches the torsion-tension relation and reuse performance of magnesium alloy screw thread connection structure used in spacecraft. The torsion-tension relation failing mode, torsion-tension coefficient, thread friction coefficient and reuse performance were studied by analyzing the magnesium alloy screw thread with and without wire thread insert. The results will guide the torque quantification control, the design and application of magnesium alloy screw thread connection structure.

**Key words:** Magnesium alloy; Torsion-tension relation; Reuse performance

### 0 概述

镁合金具有密度低、比强度和比刚度高、阻尼减振性好、导热性好、电磁屏蔽效果佳、机加工性能优良等优点, 在航空航天等对质量要求苛刻的领域中应用不断增多<sup>[1-4]</sup>。随着航天事业的发展, 航天运载器等对螺纹连接的可靠性提出了越来越高的要求<sup>[5-6]</sup>。镁合金的强度一般在 400MPa 以下, 基体相对较软, 镁合金基体螺纹连接结构的扭拉特性及重复使用性能对镁合金结构连接可靠性具有重要影响, 目前对于镁合金特别是应用在箭体结构上的新型高强耐热镁合金的螺纹连接

结构的研究还鲜有报道。

影响螺纹连接可靠性的实质是预紧力, 但预紧力无法直接测量, 工程上一般通过控制力矩来间接实现预紧力的控制<sup>[5]</sup>。紧固件的扭拉关系试验是研究螺纹紧固件安装力矩和轴向预紧力之间关系的一种试验方法<sup>[7]</sup>, 研究镁合金基体螺纹的扭拉关系对于了解连接结构的破坏形式及力矩量化控制具有重要意义。另外, 测试镁合金基体螺纹的重复使用性能, 对于镁合金基体螺纹的使用规范也具有重要意义。

本文以高强耐热镁合金为基体材料, 在其上制螺纹, 并与不同规格的螺栓配合, 研究了镁合

收稿日期: 2019-03-06; 修订日期: 2019-04-15

作者简介: 孟德浩 (1986-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为箭体结构设计。

E-mail: dh\_meng0015@163.com

金带钢丝螺套及不带钢丝螺套情况下和常用螺栓的扭拉关系和重复使用性能。

## 1 试验准备

### 1.1 试验件设计

在镁合金试板上制螺纹孔，模拟螺母，在薄铝板上制光孔模拟被连接件，扭拉关系试验安装示意图见图 1，其中夹具夹层用于测量轴向预紧力，试验件实物见图 2。

连接结构的螺纹规格为 M4、M6、M8、M10 和 M12，一组试验件直接采用基体螺纹和螺栓配合使用，另一组试验件在基体螺纹上安装钢丝螺套，两组试验件都没有采取润滑措施。M4、M6 和 M8 螺栓表面镀层为镀锌，M10 和 M12 螺栓表面镀层为镀镉。

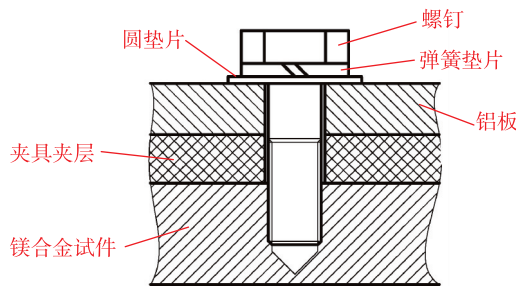


图 1 扭拉关系试验安装示意图

Fig. 1 Schematic diagram of torsion-tension relation test



图 2 扭拉关系试验件

Fig. 2 Test pieces of torsion-tension relation test

### 1.2 试验方法

试验采用德国 Schatz-Analyse 螺纹紧固件试验分析系统<sup>[8]</sup>，扭拉试验装置的示意图见图 3。通过试验机均匀施加扭矩拧紧螺栓，通过总扭矩-角度传感器测量得到总扭矩，通过轴向力-螺纹扭矩复合传感器可以测到螺纹副扭矩和预紧力  $F$ ，通过总

扭矩、螺纹副扭矩及夹紧力可以计算出扭矩系数、螺纹副摩擦系数等参数，试验原理及计算公式见 GB/T 16823.3-2010《紧固件 扭矩-夹紧力试验》。

工程中，拧紧力矩  $N$  与螺栓轴向预紧力  $F$  的关系通常按以下经验公式进行拟合，以此得到扭矩系数  $K$ ，扭矩系数  $K$  反映了螺纹连接的扭拉特性<sup>[9-10]</sup>。

$$N = K \cdot d \cdot F \quad (1)$$

其中， $d$  为螺纹公称直径。

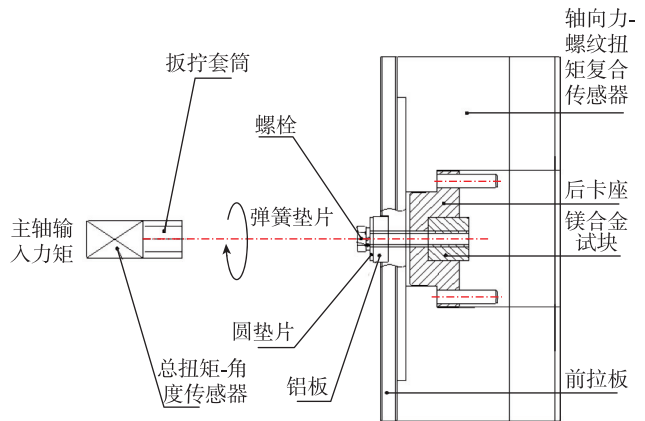


图 3 扭拉关系试验装置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the torsion-tension relation test device

## 2 安装力矩研究

当力矩较小时，力矩和预紧力成线性关系，随着力矩增加，材料发生屈服或零件发生变形，导致力矩和预紧力不再成线性增长，转折点记为屈服力矩。随着力矩继续增大，连接结构最终发生破坏，破坏值记为破坏力矩。

首先研究了不同规格试验件的屈服力矩和破坏力矩，每种规格子样为 5 个。对试验结果进行分析，得到以下结论：

1) M8 及以下规格主要为螺钉断裂，平垫压溃，见图 4；平垫为 08Al 钢，强度不大于 400MPa，屈服点主要是该垫片引起的；通过提高垫片的强度可以进一步提高屈服力矩。M10 和 M12 的破坏主要为镁合金基体拉脱和平垫破坏，见图 5，说明随着螺栓承载能力的提高，基体的剪切破坏首先发生。

2) 以不带螺套的 M4 规格试验件为例，螺栓长度  $L = 5$  和  $L = 10$  时的平均屈服力矩分别为  $3.3 \text{ N} \cdot \text{m}$ （离散系数为 7.0%）和  $3.9 \text{ N} \cdot \text{m}$ （离

散系数为 1.5%)，平均破坏力矩分别为  $5.0\text{N}\cdot\text{m}$  (离散系数为 5.2%) 和  $6.6\text{N}\cdot\text{m}$  (离散系数为 4.8%)，可知相比于  $L=10$ ，螺栓长度  $L=5$  时平均屈服力矩和破坏力矩只有 85% 和 75%，说明适当增加螺纹配合长度可以提高承载能力 15%~25%，这主要是由于配合长度增加后，可以适当降低前几扣螺纹的承载；长度增加 1 倍，承载只提高了 15%~25%，验证了普通螺纹的承载主要集中在前几扣，而不是均匀分布在各个螺纹上。



图 4 M6 试验件破坏形式

Fig. 4 The destruction form of the M6 test piece

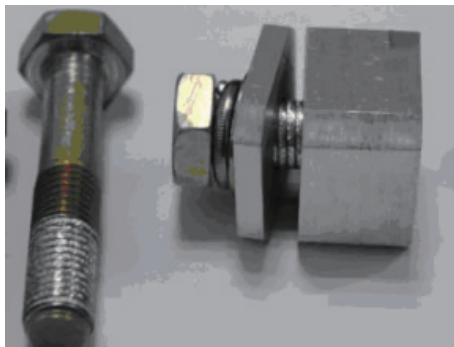


图 5 M10 试验件破坏形式

Fig. 5 The destruction form of the M10 test piece

### 3 扭矩系数分析

为了测量扭矩系数  $K$ ，按规定的安装力矩在试验装置上进行扭拉试验，每种规格试验件有 3 个子样，每个子样重复进行了 6 次试验，典型样品的扭拉关系曲线见图 6，不同试验件的平均  $K$  值统计见图 7，典型子样数据见图 8~图 11。

由图 7 可知，M8 及以下的试验件，带钢丝螺套的试验件的扭矩系数  $K$  的平均值比镁基体螺纹

(不带钢丝螺套) 的略大，而 M10 及 M12 的试验件，镁基体螺纹试验件的  $K$  值反而略大；对于镁基体螺纹，M10 和 M12 试验件下  $K$  值最大，可能是螺栓镀层差异引起的 (M8 及以下螺栓表面处理为镀锌，M10 及 M12 螺栓表面处理为镀镉)。

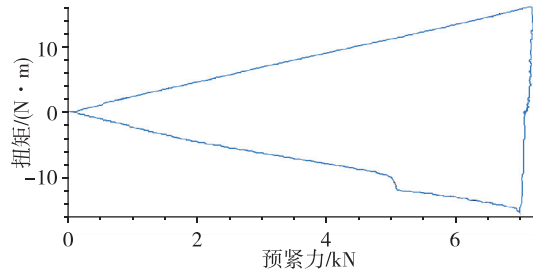


图 6 典型样品的扭拉关系曲线

Fig. 6 Torsion-tension curves of typical samples

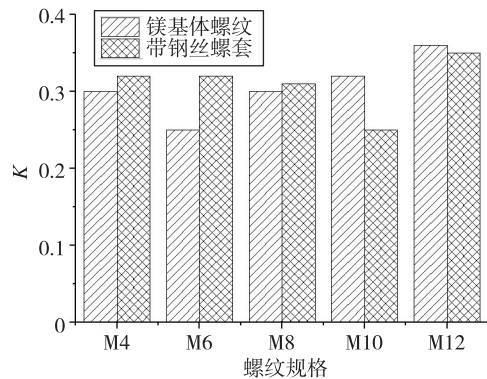


图 7 不同螺纹规格的扭矩系数  $K$

Fig. 7 Torque coefficient  $K$  of different test pieces

分别以 M8 和 M12 两种规格为例，统计了每种规格下 3 个试样测得的  $K$  值，见图 8~图 11。由图 8~图 11 可知，M8 规格的试验件，无论带钢丝螺套与否， $K$  值随着试验次数的增加无明显增大的趋势；而 M12 规格的试验件，无论带钢丝螺套与否， $K$  值随着试验次数的增加有明显增加的趋势，原因是随着试验次数增加，螺栓镀镉层易脱落，造成螺纹副摩擦力矩增大，从而导致  $K$  值增加。

考虑到随着试样次数增加，部分规格试验件  $K$  值会增加，因此统计了不同试验次数 3 个子样  $K$  值的离散系数，然后求平均值，具体见表 1。由表 1 可知，不同规格试验件  $K$  值的离散系数最大为 12.6%，大部分在 10% 以下，主要是由装配及试验误差引起的。

表 1 扭矩系数 K 的离散系数

Tab. 1 Discrete coefficient of Torque coefficient K

试验件规格	离散系数/%
M4-基体螺纹	6.8
M4-带钢丝螺套	8.8
M6-基体螺纹	6.5
M6-带钢丝螺套	9.8
M8-基体螺纹	12.6
M8-带钢丝螺套	8.7
M10-基体螺纹	5.1
M10-带钢丝螺套	11.8
M12-基体螺纹	6.8
M12-带钢丝螺套	6.7

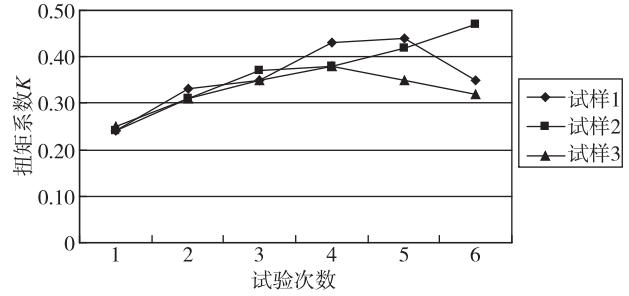


图 11 M12 带钢丝螺套下的扭矩系数 K 的变化

Fig. 11 Torque coefficient K versus test count of M12 test pieces with wire threaded sleeve

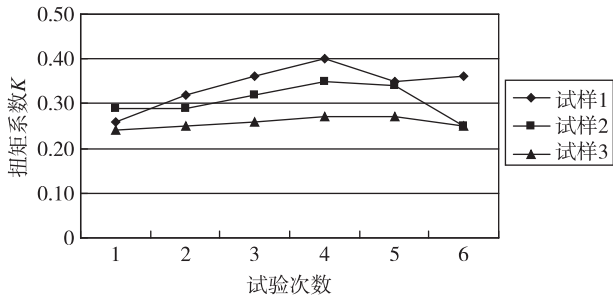


图 8 M8 不带钢丝螺套下扭矩系数 K 随试验次数的变化

Fig. 8 Torque coefficient K versus test count of M8 test pieces without wire threaded sleeve

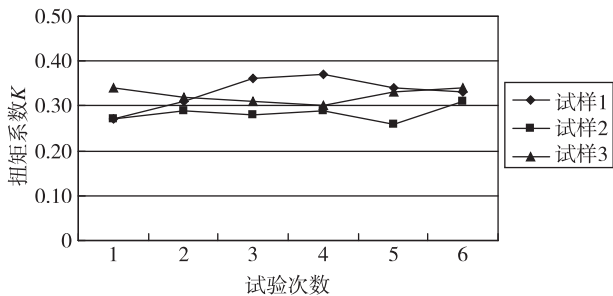


图 9 M8 带钢丝螺套下的扭矩系数 K 随试验次数的变化

Fig. 9 Torque coefficient K versus test count of M8 test pieces with wire threaded sleeve

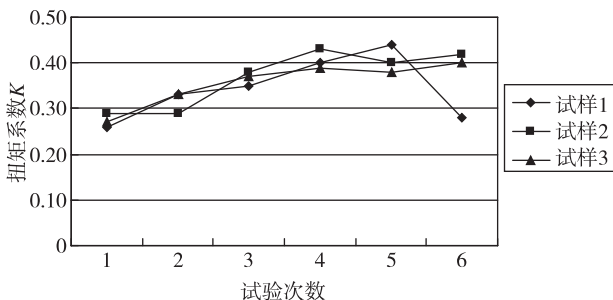


图 10 M12 不带钢丝螺套下的扭矩系数 K 的变化

Fig. 10 Torque coefficient K versus test count of M12 test pieces without wire threaded sleeve

#### 4 重复使用性能

为了研究镁合金基体螺纹的重复使用性能，在不带钢丝螺套的情况下，按前述安装力矩用螺栓进行 15 次拆卸试验，每 5 次试验后用螺纹通止规检查镁合金基体螺纹，通止规有一个检测不合格即视为螺纹损坏。

试验结果显示，M8 及以下规格的试验件，通过 15 次重复拆卸，通止规检测合格；M10 及 M12 的试验件重复 5 次后，通止规检测即不合格，如果继续重复拆卸，随着拆卸次数增多，发现螺栓镀层脱落，螺纹上有金属屑，转动困难，有咬死趋势。通过分析螺纹副的摩擦系数可以发现（见图 12、图 13），镀锌螺栓（M8 及以下规格）随着拧入次数增加，螺纹副摩擦系数基本不变，而镀镉螺栓（M10 及 M12 规格）随着拧入次数增加，螺纹副摩擦系数逐渐变大，主要原因是镀镉层耐磨性不好，易脱落，影响重复使用性能。上述分析表明，螺纹副摩擦系数的变化是引起 K 值变化的原因。

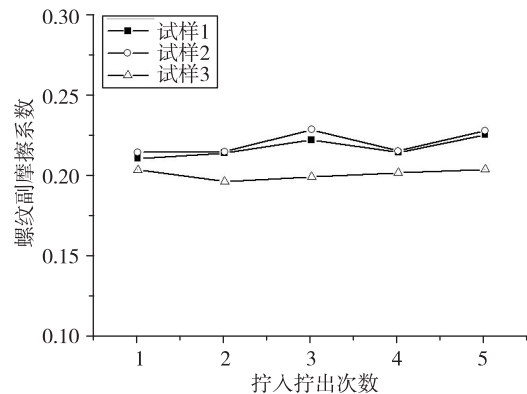


图 12 M8 镀锌螺栓试验件螺纹副摩擦系数变化

Fig. 12 Friction coefficient of thread pair of M8 test piece

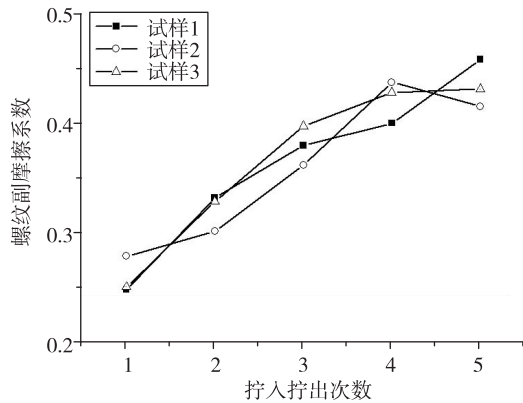


图 13 M12 镀镉螺栓试验件螺纹副摩擦系数变化

Fig. 13 Friction coefficient of thread pair of M12 test piece

考虑到镁合金电子电位低, 易和异质金属发生电偶腐蚀, 一般镁合金基体螺纹长期使用时应考虑防护措施, 如涂胶密封、镀微弧氧化层等措施。

## 5 结论

研究了不同螺纹规格镁合金基体的扭拉破坏形式、扭矩系数和重复使用性能, 主要结论如下:

1) M8 及以下规格试验件扭拉破坏形式主要为螺钉断裂, 平垫压溃, M10 和 M12 规格的试验件扭拉破坏主要为镁合金基体拉脱和平垫破坏, 说明随着螺栓承载能力的提高, 镁合金基体发生了剪切破坏。

2) 平弹垫连接方式下, 随着拧紧力矩增加, 由于弹垫的挤压, 平垫易首先发生屈服和变形, 导致连接结构的屈服力矩下降, 承载性能降低。

3) 镁合金基体螺纹带钢丝螺套和不带钢丝螺套下的扭矩系数略有差异, 都在 0.3 左右, 为镁合金螺纹的力矩量化控制提供了依据。

4) 镀镉螺栓在重复使用时, 镀层易脱落, 导致螺纹副摩擦增大, 扭矩系数  $K$  增大, 随着使用次数的增多有发生咬死的风险。

## 参考文献

- [1] 吴国华, 陈玉狮, 丁文江. 镁合金在航空航天领域研究应用现状与展望 [J]. 载人航天, 2016 (3): 281-292.
- [2] Aghion E, Bronfin B. Magnesium alloys development towards the 21<sup>st</sup> century [C]. Materials Science Forum, 2000: 19-30.
- [3] Meng D H, Li P J, Wang D Z, et al. High-cycle fatigue of Mg-6Gd-3Y-0.5Zr cast magnesium alloys [C]. Chinese Materials Conference, Springer, Singapore, 2018: 515-525.
- [4] Meng D H, Zhou B, Wu D, et al. Parameter optimization of gas tungsten-arc repair welding technique in Mg-6Gd-3Y-0.5Zr alloy [J]. International Journal of Metalcasting, 2019, 13 (2): 345-353.
- [5] 张忠伟, 侯崇强, 刘锴. 航天型号用螺纹防松胶的选用、涂覆工艺与扭拉关系研究 [J]. 质量与可靠性, 2015 (2): 10-15.
- [6] 龙乐豪, 李平岐, 秦旭东, 等. 我国航天运输系统 60 年发展回顾 [J]. 宇航总体技术, 2018, 2 (2): 1-6.
- [7] 温楠, 侯崇强, 刘长栋. 钢丝螺套组件扭拉关系及预紧力/安装力矩控制研究 [J]. 航天标准化, 2016 (1): 1-3.
- [8] 张超颖, 孟德浩, 袁文全, 等. 基于镁合金基体的螺纹连接承载性能研究 [J]. 宇航计测技术, 2018, 38 (2): 7-10.
- [9] 温楠, 刘锴. 紧固件扭拉验证试验样本量选取方法 [J]. 质量与可靠性, 2015 (4): 10-12.
- [10] 任丽华, 李凤玲, RENLI-hua, 等. 螺纹拧紧扭矩的理论分析 [J]. 煤矿机械, 2006, 27 (7): 67-69.

引用格式: 孟德浩, 张超颖, 袁文全, 等. 镁合金基体螺纹扭拉特性及重复使用性研究 [J]. 宇航总体技术, 2019, 3 (5): 45-49.

Citation: Meng D H, Zhang C Y, Yuan W Q, et al. Research on torsion-tension relation and reuse performance of magnesium alloy screw thread [J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2019, 3 (5): 45-49.