

航空航天用 GH2132 系列楔形螺纹托板螺母 紧固件防松性能研究

余威¹, 李建刚¹, 黄帅¹, 刘娅婷¹, 闫路²,
李连鹏¹, 林万鹏¹, 余磊磊¹

(1. 北京首航科学技术开发有限公司 北京 100076; 2. 北京宇航系统工程研究所 北京 100076)

摘要: 针对 GH2132 材料托板螺母不同规格产品开展楔形螺纹的应用研究, 研究了楔形螺纹结构对产品最小安装力矩、反复拆装振动、高低温交变处理环境相容性以及轴向载荷拉脱等性能的影响, 找出了楔形螺纹产品安装力矩、预紧力、扭拉系数和振动松脱的关系。研究表明, GH2132 材料托板螺母采用楔形螺纹结构的锁紧性能极高, 耐反复拆装 50 次, 在温度 $-196^{\circ}\text{C} \sim 100^{\circ}\text{C}$ 交变环境下松脱力矩不减, 抗振动 6 万次, 拉脱力值达到常规自锁产品的 1.5 倍。

关键词: 楔形螺纹; 紧固件; 防松; 制造工艺

中图分类号: TH131.3 **文献标志码:** A

文章编号: 2096-4080 (2018) 01-0062-09

Study on the Anti-loosening Performance of GH2132 Series Aerospace Wedge-thread Plate Nut Fasteners

YU Wei¹, LI Jian-gang¹, HUANG Shuai¹, LIU Ya-ting¹, YAN Lu², LI Lian-peng¹, LIN Wan-peng¹, YU Lei-lei¹

(1. Beijing Shouhang Science and Technology Development Company Ltd, Beijing 100076, China;

2. Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing 100076, China)

Abstract: In this paper, different specifications of GH2132-material plate nut products were studied for the application of wedge thread, so as to figure out the effect of wedge thread structure on minimal installation torque, repeated disassembly and vibration, compatibility to high and low temperature alternating environment and axial loading and pulling and other conditions, and to explore the relations between installation torque, pretightening force, twist coefficient and vibration and loosening. The results showed that the locking effect of GH2132 plate nuts was considerably improved due to the application of the wedge thread structure, and it tolerated to 50 cycles of assemblies and disassemblies. In the alternating temperature of $-196^{\circ}\text{C} \sim 100^{\circ}\text{C}$, the loosening-required torque was not reduced, and it tolerated to 60000 times of vibrations, and its pulling force value achieved 1.5 times that of conventional self-locking products.

Key words: Wedge thread; Fastener; Anti-loosening; Manufacturing process

0 引言

楔形螺纹又称自锁内螺纹、预载荷锁紧螺纹,

是一种新型的不加任何锁紧机构但具有锁紧功能的内螺纹, 其防松能力大大高于有效力矩螺母, 已被世界上许多国家使用。目前有美国军方螺纹

收稿日期: 2017-10-20; 修订日期: 2017-12-29

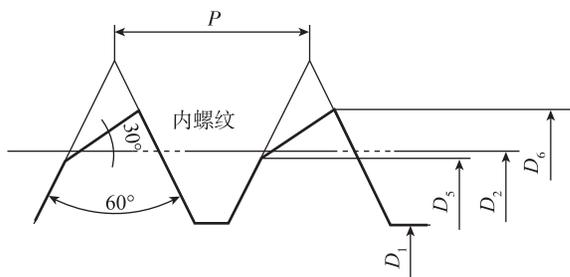
作者简介: 余威 (1985-), 男, 工程师, 主要研究方向为紧固件设计及开发。E-mail: yw3212@163.com

标准 NASM85353-2000 《施必牢螺纹》^[1] 和我国机械部标准 JB/T 10971-2010 《30°楔形防松螺纹》^[2]。国外施必牢螺纹已广泛应用于航空、汽车、高铁领域，国内以民用汽车、高铁领域居多，军工领域应用极少。国内虽然有施必牢螺纹的制造厂家，但是由于该螺纹未公开螺纹具体尺寸，因此国内无施必牢螺纹的检验标准。JB/T 10971-2010 《30°楔形防松螺纹》标准为机械部首次发布楔形螺纹具体尺寸，但对于紧固件产品的开发和综合性能研究极少，本文从楔形螺纹工作原理及紧固件应用性能方面进行了研究。

1 楔形螺纹尺寸、工作原理及优势

1.1 楔形螺纹尺寸^[2-3]

楔形螺纹牙型与普通螺纹牙型基本相同，唯一的区别是在内螺纹的小径上有一个 30°的楔形斜面，见图 1。根据 JB/T 10971-2010 《30°楔形防松螺纹》标准，其大径、中径、小径基本尺寸比普通螺纹略大，见表 1。



D_1 -内螺纹牙顶小径;
 D_2 -内螺纹中径;
 D_3 -内螺纹牙底斜面小径;
 D_5 -内螺纹牙底斜面大径;
 D_6 -内螺纹牙底斜面大径

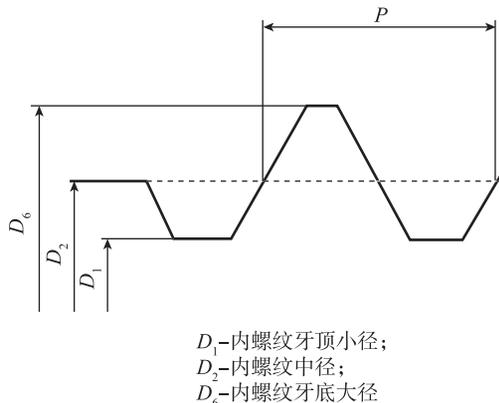
图 1 楔形螺纹基本牙型

Fig. 1 Wedge thread basic tooth profile

表 1 楔形螺纹与普通螺纹基本尺寸

Tab. 1 Basic dimensions of wedge thread and general thread

规格	楔形螺纹基本尺寸/mm			普通螺纹基本尺寸/mm		
	D_6	D_2	D_1	D_6	D_2	D_1
M5×0.8	5.154	4.824	4.381	5	4.480	4.134
M6×1	6.188	5.646	5.216	6	5.350	4.917
M8×1.25	8.216	7.543	6.994	8	7.188	6.647
M10×1.5	10.251	11.565	8.775	10	9.026	8.376



D_1 -内螺纹牙顶小径;
 D_2 -内螺纹中径;
 D_6 -内螺纹牙底大径

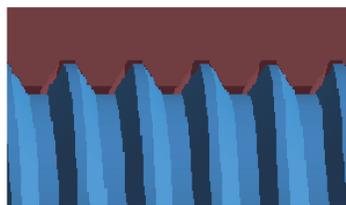
图 2 普通螺纹基本牙型

Fig. 2 Basic thread basic tooth profile

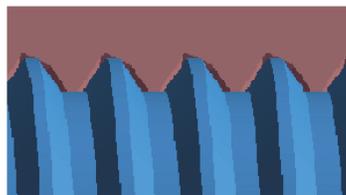
1.2 楔形螺纹工作原理^[4-5]

与普通螺纹相比，楔形螺纹可以明显改善螺纹的受力状况。普通螺纹连接时，轴向力主要集中在内螺纹的第 1 牙和第 2 牙上，其余各牙基本上不受力，因此，当拧紧力矩较大时，应力集中在第 1、2 牙螺纹处，很容易产生弯曲和剪切变形。承载负荷面将受力一个个牙传递，造成螺纹牙依次剪切和磨损，导致螺纹强度大幅度下降，最终产生脱扣。

楔形螺纹结构独特，全部螺纹牙尖紧紧地顶在 30°楔形斜面上，而且螺旋线上每牙承受的负载都比较均匀，同样负荷能分散到每个面上，使螺纹牙各处产生的防松摩擦力相近，能够有效抗击横向振动。



(a) 普通螺纹啮合示意图



(b) 楔形螺纹啮合示意图

图 3 楔形螺纹啮合示意图

Fig. 3 Meshing diagram of wedge thread

研究数据显示，普通螺纹在第一螺纹啮合面和第二螺纹啮合面承载了 70%~80% 的负荷，而以后几个啮合面承受的负荷很少。这样，普通螺

纹紧固件在工作振动负荷条件下,就很容易克服螺纹接触面上的锁紧力而产生转动、松脱。螺纹受力分析如图4所示。图中显示了楔形螺纹径向负载远远大于轴向负载,因此,所产生的摩擦力也大大增加,达到更高的防松脱效果。

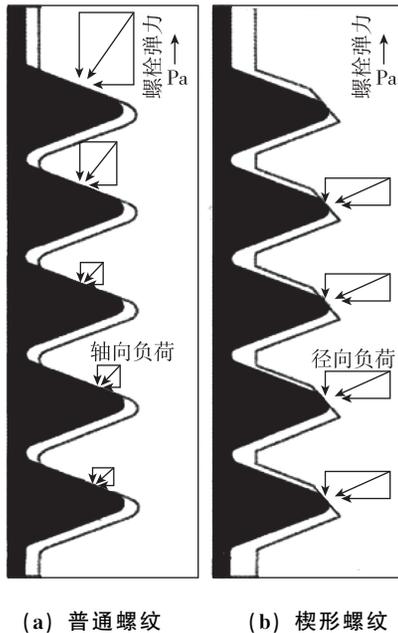


图4 楔形螺纹和普通螺纹的受力分析

Fig. 4 Stress analysis of wedge thread and common thread

1.3 楔形螺纹紧固件优势分析^[6-8]

1.3.1 螺纹结构承载更加均匀

在普通的 60° V型螺纹里,第一条旋合螺纹承受大部分夹紧负载,通过图4受力分析可知,80%的负载落在头两条螺纹上。

螺纹本身就存在一些螺距误差,因此,在无负载的情况下,所有的外螺纹从不会和内螺纹接触。由于普通螺纹配合为面接触,当施加负载时,就会随之产生两种情况。外螺纹紧固件开始在其头部和第一条旋合螺纹之间出现伸展或拉长,这时,第一条旋合螺纹开始变形或偏移;当夹紧负载继续增加时,第二条螺纹开始承受一些负载。

在同等载荷下,独特的楔形锁紧螺纹就避免了这种负载集中的问题。因为这种螺纹的结构设计,使螺纹配合由面接触变为线接触。这种线接触形式在负载下螺纹牙尖形变时,能使载荷均匀分配到每个螺纹牙,使承载更加均匀。

1.3.2 支持反复拆装

大部分普通螺纹自锁螺母主要靠螺纹形变产生径向载荷实现自锁功能,这种自锁螺母在反复

拆装过程中主要靠材料弹性来保证自锁。从螺纹拧入开始至产生轴向载荷整个装配过程,螺纹处于大摩擦力矩和弹性变形过程中,而反复装配后的载荷也会让材料发生塑性变形,其自锁功能会逐渐减小直至消失,所以这种自锁螺母要求具备15次锁紧性能要求。而楔形螺纹靠拧紧时的径向载荷实现锁紧,而不是螺纹变形,所以楔形螺纹紧固件在没有轴向载荷情况下可以反复拆装,而不丧失紧固件的锁紧力,这是优越于其他锁紧紧固件的一个重要特点。楔形锁紧的螺纹紧固件拧开和再拧紧达50次,而其锁紧力无明显损失。

1.3.3 操作简单易装配

在无负载情况下,楔形锁紧螺纹要比标准螺纹的配合间隙大,这就为简化装配操作、特别是为自旋装配创造了条件。与普通扭矩紧固件相比,这种螺纹锁紧紧固件不管是用手工还是用于自动装配机,都极易装配。

1.3.4 良好的经济性

多数紧固件的锁紧主要依靠弹簧垫圈、尼龙塞块、化学黏结剂、螺纹的永久变形来实现,生产和安装过程复杂,且对配合螺栓及装配基体会造成永久性损伤,配合螺栓亦是同时更换,综合成本较高。楔形螺纹50次以上的拆装有效性,安装的便利性,对基体的损伤程度小,经济性较普通自锁螺母高。

1.4 楔形螺纹紧固件在航天航空典型应用

航天、航空系统应用环境多为振动、高温、低温等交叉环境,较为复杂,可应用多种楔形螺纹紧固件,如楔形螺纹螺套、楔形螺纹法兰面螺母及楔形螺纹托板螺母等^[9]。北京首都科学技术开发有限公司根据航天航空紧固件特点,生产了如下几种类型楔形螺纹紧固件,如图5~图7所示。



图5 楔形螺纹螺套

Fig. 5 The wedge sleeve thread

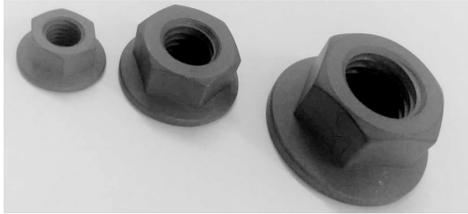


图 6 楔形螺纹法兰面螺母
Fig. 6 Wedge thread flange nut



图 7 楔形螺纹单耳、双耳、游动托板螺母
Fig. 7 Wedged thread single ear, double ears, moving plate nut

2 楔形螺纹紧固件防松效果研究

本文以 GH2132 系列楔形螺纹单耳、双耳托板螺母产品（强度 $\sigma_b = 1000\text{MPa} \sim 1200\text{MPa}$ 、精度 4H、钝化）参照 QJ3079. 1A-2011《全金属自锁螺母通用规范》^[10]中常用的试验项目，研究楔形螺纹的防松效果。

2.1 最小安装力矩试验

试验方法：先将试验产品与试验螺栓（强度 $\sigma_b = 1300\text{MPa} \sim 1600\text{MPa}$ 、精度 5g6g、GH4169 材质、钝化）组成的螺纹副安装在综合性能试验机的测轴力装置中（夹层为铝 2A12 垫片（模拟铝

基体）、粗糙度 $Ra3.2$ ），对试验产品按梯度施加不同的安装力矩值以测知相对应的预紧力值，最后将试验产品与试验螺栓（强度 $\sigma_b = 1300\text{MPa} \sim 1600\text{MPa}$ 、精度 5g6g、GH4169 材质、钝化）组成的螺纹副按已测知预紧力的安装力矩值分别安装在振动台上（夹层为铝 2A12 垫片（模拟铝基体）、粗糙度 $Ra3.2$ ）进行振动试验。

试验过程中，可预先给定一适中安装力矩值安装在振动台上做振动试验，观察试验结果，若有松脱现象，则按一定梯度逐次加大安装力矩；若无松脱现象，则按一定梯度逐次减小安装力矩，直至确定出最小极限安装力矩值。要求每组试验产品做振动试验时只能安装一种安装力矩且每组试验产品数量不少于 5 件。正弦波振动、振动频率为 30Hz、全振幅 $(11.43 \pm 0.4)\text{mm}$ ，次数 60000 次，试验过程如图 8 所示，扭拉系数曲线见图 9~图 12，试验结果详见表 2。

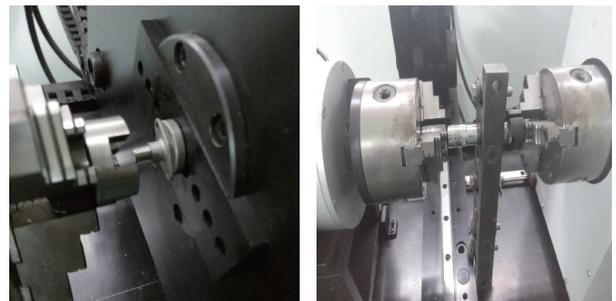


图 8 试验过程
Fig. 8 Test process

表 2 GH2132 托板螺母

Tab. 2 GH2132 pallet nut

项目		安装力矩试验								推荐最小安装力矩
RLM5×0.8	安装力矩/ (N·m)	3	4	5	8	10	12	15	17	10
	预紧力/kN	2.19	2.31	2.79	3.58	4.67	5.00	5.65	5.81	4.67
	扭拉系数 k	0.31	0.33	0.35	0.45	0.43	0.47	0.52	0.57	0.43
	振动试验结果	有松脱			无松脱					—
RLM6×1	安装力矩/ (N·m)	3	5	8	10	12	15	18	20	15
	预紧力/kN	2.00	2.17	3.25	3.82	4.61	5.20	6.12	6.04	5.20
	扭拉系数 k	0.35	0.38	0.41	0.43	0.45	0.48	0.50	0.55	0.48
	振动试验结果	有松脱			无松脱					—

续表

项目		安装力矩试验								推荐最小安装力矩
RLM8×1.25	安装力矩/(N·m)	10	12	15	20	25	30	35	40	20
	预紧力/kN	3.40	3.34	3.96	4.46	5.56	6.70	7.66	8.30	4.46
	扭拉系数 k	0.36	0.45	0.5	0.56	0.56	0.56	0.57	0.60	0.56
	振动试验结果	有松脱		无松脱						—

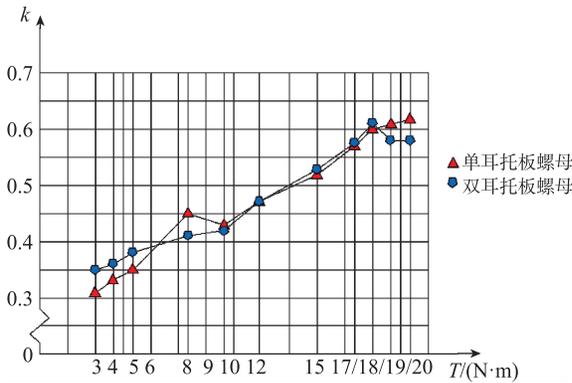


图9 RLM5×0.8 GH2132 楔形螺纹托板螺母扭拉系数 k
Fig. 9 The torsional coefficient k of RLM5×0.8 GH2132 wedged nut

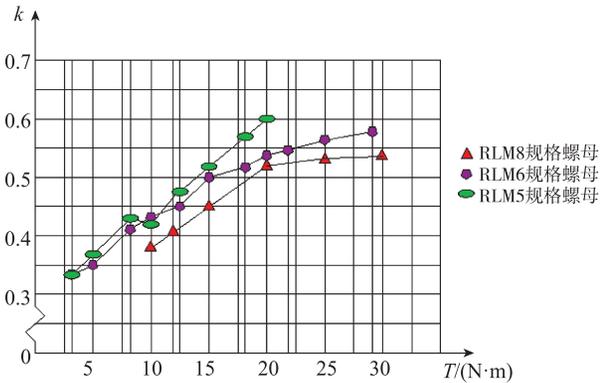


图12 3种规格 GH2132 楔形螺纹托板螺母扭拉系数 k 对比图
Fig. 12 The torsional coefficient k of the 3 types of GH2132 wedged nuts

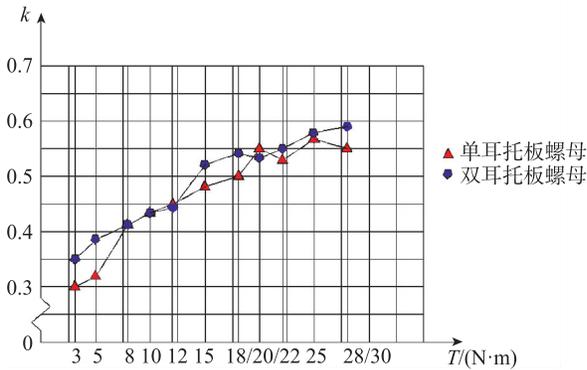


图10 RLM6×1.0 GH2132 楔形螺纹托板螺母扭拉系数 k
Fig. 10 The torsional coefficient k of RLM6×1 GH2132 wedged nut

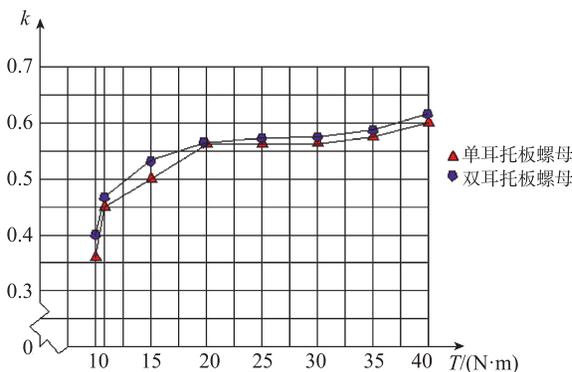


图11 RLM8×1.25 GH2132 楔形螺纹托板螺母扭拉系数 k
Fig. 11 The torsional coefficient k of RLM8×1.25 GH2132 wedged nut

通过该试验数据可知,对试验产品施加不同的安装力矩,预紧力随安装力矩增大而同步增大,扭拉系数 k 值随安装力矩增大而逐渐增大,然后逐渐稳定。本次实验获得了产品在正常使用条件下的最小安装力矩。

2.2 反复拆装 50 次后的振动试验

试验方法:用最小安装力矩将试验产品与试验螺栓(强度 1300MPa~1600MPa、精度 5g6g、GH4169 材质、钝化)组成的螺纹副安装在振动板上(夹层为铝 2A12 垫片(模拟铝基体)、粗糙度 $Ra3.2$),进行 50 次反复安装拆卸后,再以规定的最小安装力矩安装在振动台上做振动试验,观察试验结果。要求每组振动试验时试验产品数量不少于 5 件。试验过程如图 13 所示,试验结果详见表 3。



图13 试验过程
Fig. 13 Test process

表 3 反复拆装 50 次后的振动试验
Tab. 3 Vibration test after repeated assembly for 50 times

规格	振动试验								
	振动频率	振动次数	试验结果	安装力矩 / (N·m)	试验产品序号(振动后松脱力矩/(N·m))				
					1	2	3	4	5
RLM5×0.8	30Hz	60000	无松脱	10	10.02	9.86	9.27	10.13	9.82
RLM6×1.0	30Hz	60000	无松脱	15	14.21	14.26	13.97	14.26	14.83
RLM8×1.25	30Hz	60000	无松脱	20	18.36	19.17	19.25	18.89	20.12

试验结果表明, GH2132 楔形螺纹托板螺母在经过 50 次反复拆装后可以满足 6 万次的振动试验要求。

2.3 高、低温环境下的振动试验

试验方法: 将试验产品与试验螺栓(强度 $\sigma_b = 1300\text{MPa} \sim 1600\text{MPa}$ 、精度 5g6g、GH4169 材质、钝化)组成的螺纹副按标准规定的最小安装力矩安装在振动板上(夹层为铝 2A12 垫片(模拟铝基体)、粗糙度 $Ra3.2$), 进行 50 次反复安装拆卸后, 再以规定的最小安装力矩安装在振动台上, 置于高温 100°C 的环境下做振动试验, 观察试验结果, 若无松脱现象, 即可认为试验产品高温环境下的振动试验合格。

将试验产品与试验螺栓(强度 $\sigma_b = 1300\text{MPa} \sim 1600\text{MPa}$ 、精度 5g6g、GH4169 材质、钝化)组成的螺纹副按标准规定的最小安装力矩安装在振动

板上(夹层为铝 2A12 垫片(模拟铝基体)、粗糙度 $Ra3.2$), 进行 50 次反复安装拆卸后, 再以规定的最小安装力矩安装在振动台上, 置于低温 -70°C 的环境下做振动试验, 观察试验结果。要求每组试验产品只能做一种温度处理且每组试验产品数量不少于 5 件。试验过程如图 14 所示, 试验结果详见表 4。



(a) 高温 100°C 振动试验 (b) 低温 -70°C 振动试验

图 14 试验过程

Fig. 14 Test process

表 4 轴向载荷和拉脱试验
Tab. 4 Axial load and pull-out test

规格	振动试验									
	振动频率	振动次数	试验结果	安装力矩 / (N·m)	试验产品序号(振动后松脱力矩/(N·m))					试验结果
					1	2	3	4	5	
RLM5×0.8	30Hz	60000	100°C	10	10.16	10.13	10.20	10.31	10.02	无松脱
	30Hz	60000	-70°C	10	8.89	9.52	9.74	9.81	10.11	无松脱
RLM5×1.8	30Hz	60000	100°C	15	14.99	15.07	15.10	14.96	15.07	无松脱
	30Hz	60000	-70°C	15	14.23	14.18	14.96	14.20	14.86	无松脱
RLM5×1.2	30Hz	60000	100°C	20	18.87	19.36	18.75	19.24	19.19	无松脱
	30Hz	60000	-70°C	20	19.25	18.86	19.32	19.33	19.05	无松脱

试验结果表明, GH2132 楔形螺纹托板螺母在高温 100℃、低温 -70℃ 环境下也能满足 6 万次的振动要求。

2.4 高、低温交变处理后的松脱力矩试验

试验方法: 将试验产品与试验螺栓(强度 $\sigma_b=1300\text{MPa}\sim 1600\text{MPa}$ 、精度 5g6g、GH4169 材质、钝化)组成的螺纹副以标准规定的最小安装力矩安装在衬套上(夹层为铝 2A12 垫片(模拟铝基体)、粗糙度 $Ra3.2$), 进行 50 次反复安装拆卸之后, 再以规定的最小安装力矩安装后, 进行高温 100℃—低温 -196℃—高温 100℃—低温 -196℃ 交变处理, 要求每次保温时间 6 小时、间隔时间为 6 小时(其中高温 100℃ 处理在高温炉中进行, 低温 -196℃ 处理在液氮罐中进行, 间隔时间处理为常温放置)。反复 4 次循环后, 对其做卸载处理, 并记录整理松脱力矩值。

要求每组试验产品必须全部经过高温 100℃—低温 -196℃—高温 100℃—低温 -196℃ 交变处理, 且每组试验产品数量不少于 5

件。同时, 还将未经过高、低温交变处理的 GH2132 楔形螺纹托板螺母的松脱力矩数据记录表中, 作为对比参照。要求试验产品数量不少于 5 件。试验过程如图 15 所示, 试验结果详见表 5。

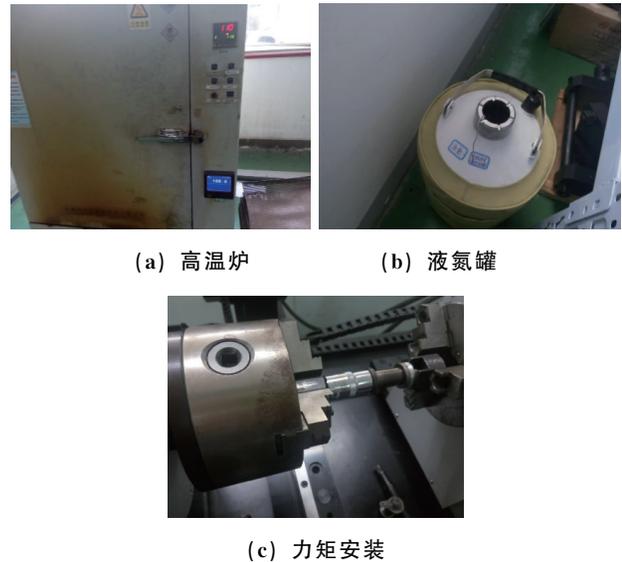


图 15 试验设备及过程

Fig. 15 Test process

表 5 高、低温交变处理后的松脱力矩

Tab. 5 The loose torque of high and low temperature alternating treatment

项目		高、低温交变处理后的松脱力矩试验							
		试验产品序号							
		1	2	3	4	5	6	平均值	
RLM5×0.8	安装力矩/(N·m)	10						—	
	松脱力矩/(N·m)	高温 100℃、低温 -196℃ 交变处理	10.176	9.856	9.322	9.603	9.711	9.512	9.696
		常温无交变处理	8.780	8.961	8.884	8.756	8.652	8.887	8.820
RLM6×1	安装力矩/(N·m)	15						—	
	松脱力矩/(N·m)	高温 100℃、低温 -196℃ 交变处理	13.675	13.403	14.722	14.609	15.485	13.210	14.184
		常温无交变处理	12.823	12.403	13.011	12.717	13.051	12.849	12.809
RLM8×1.25	安装力矩/(N·m)	20						—	
	松脱力矩/(N·m)	高温 100℃、低温 -196℃ 交变处理	20.516	17.153	18.059	20.665	19.996	18.952	19.224
		常温无交变处理	19.456	19.029	20.280	19.338	19.191	20.012	19.551

试验结果表明, GH2132 楔形螺纹托板螺母经过高、低温交变处理后的松脱力矩与常温下的松脱力矩相比, 变化不大, 能在高、低温交变环境下使用。

2.5 轴向载荷和拉脱试验

试验方法: 将试验产品与试验螺栓 (强度 $\sigma_b = 1300\text{MPa} \sim 1600\text{MPa}$ 、精度 5g6g、GH4169 材质、钝化) 组成的螺纹副 (试验螺栓尾部至少旋出试验产品 2 倍螺距) 放在万能试验机上, 按标准规定值对其进行轴向载荷试验。试验后, 若试验螺栓能够轻松旋出且试验产品的内螺纹无变形, 即可认为试验产品的轴向载荷试验合格。

将试验产品与试验螺栓组成的螺纹副 (试验螺栓尾部至少旋出试验产品 2 倍螺距) 放在万能试验机上, 施加一定的轴向载荷进行拉脱试验, 直至

试验产品的内螺纹变形且试验螺栓不能轻松旋出。试验后, 记录该试验产品所施加的轴向载荷最大值, 即为拉脱力值。要求试验产品数量不少于 5 件。试验过程如组图 16 所示, 结果详见表 6。



图 16 试验过程

Fig. 16 Test process

表 6 轴向载荷和拉脱试验

Tab. 6 Axial load and pull-out test

项目		轴向载荷和拉脱试验							
		标准要求	试验产品序号						平均值
			1	2	3	4	5	6	
RLM5×0.8	轴向载荷/kN	无裂纹及破坏	产品无裂纹、破坏情况, 满足标准要求						—
	拉脱力值/kN	≥15.6	28.112	28.977	29.013	28.115	27.694	28.885	28.466
RLM6×1	轴向载荷/kN	无裂纹及破坏	产品无裂纹、破坏情况, 满足标准要求						—
	拉脱力值/kN	≥22.1	35.848	34.732	35.116	36.816	36.764	35.713	35.832
RLM8×1.25	轴向载荷/kN	无裂纹及破坏	产品无裂纹、破坏情况, 满足标准要求						—
	拉脱力值/kN	≥40.3	52.643	50.900	53.021	52.119	50.183	50.822	51.615

试验结果表明, GH2132 楔形螺纹托板螺母的轴向拉脱力值较大, 可以满足正常的使用要求。

3 结论

1) 研制的楔形螺纹螺母振动防松效果显著, 施加一定安装力矩, 并反复拆装 50 次, 仍能满足振动循环 6 万次的要求;

2) 研制的楔形螺纹螺母在 $-196^{\circ}\text{C} \sim 100^{\circ}\text{C}$ 交变温度范围内, 松脱力矩较常温状态下无变化, 可满足零件在 $-196^{\circ}\text{C} \sim 100^{\circ}\text{C}$ 温度范围内反复使用的要求;

3) 研制的楔形螺纹螺母在 $-70^{\circ}\text{C} \sim 100^{\circ}\text{C}$ 温度范围内, 振动 6 万次循环不松动, 防松效果无明显降低, 可满足零件在 $-70^{\circ}\text{C} \sim 100^{\circ}\text{C}$ 温度范围内振动环境下使用的要求;

4) 依靠预紧力试验与振动试验的对比关系, 摸索出不同规格楔形螺纹的最小安装力矩;

5) 楔形螺纹螺母具有安装方便、使用可靠、实用性强、防松效果好等优点, 在一定环境下可替代部分普通自锁螺母应用于螺纹连接结构;

6) 由于楔形螺纹的结构、防松特点, 所施加力矩大于普通自锁螺母, 在拧紧时才能产生防松性能, 卸载瞬间防松效果即消失, 在某些重要连接部位设计选用时还需进行验证。

参考文献

- [1] NASM85353-2000 施必牢螺母验收技术条件 [S]. 美国航空航天工业协会, 2000.
- [2] JB/T 10971-2010 30°楔形防松螺纹 [S]. 北京: 机械工业出版社, 2010.

- [3] GB/T196-2003 普通螺纹基本尺寸 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2003.
- [4] 上海底特精密紧固件有限公司. 施必牢螺纹技术介绍 [M]. 上海底特, 2011.
- [5] 上海底特精密紧固件有限公司. 美国施必牢防松螺母及工具简介与产品标准 [M]. 上海底特, 2011.
- [6] 孙维恒. 楔形螺纹锁紧 [J]. 紧固件技术, 2000 (2): 29-40.
- [7] 刘永军, 黄太刚, 冯仁余. 施必牢防松螺母的设计原理 [C]. 全国机械设计年会, 2006.
- [8] 孙小炎, 杨林. 航天紧固件实用手册 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- [9] 徐阿玲, 窦志伟. 防松螺纹技术的应用研究 [J]. 航空标准化与质量, 2009 (3): 17-19.
- [10] QJ3079.1A-2011 全金属自锁螺母 通用规范 [S]. 中国航天标准化研究所, 2011.