

# 航天产品密封铆接工艺方法研究

梁洪涛

(海军驻北京地区特种导弹专业军事代表室, 北京 100076)



**摘要:** 选用 QJ1546—88 直径 4mm 半圆头自封铆钉, 对铸件产品与三种材料零件进行干涉铆接试验。通过控制铆钉孔极限偏差、轴线偏斜度, 调整密封表面双角度窝深度, 分析铆接干涉量的影响因素, 最终获得满足气密性要求的产品, 使全密封结构可承受 0.35MPa 内外压的环境需求。

**关键词:** 密封铆接; 密封结构; 环境需求

## Application of Interference-fit Riveting Technology on Aerospace Products

Liang Hongtao

(The Navy Agent's Room of Special Missile Profession in Beijing Area, Beijing 100076)

**Abstract:** With QJ1546—88 cup head self-sealing rivets in 4mm diameter, an interference-fit riveting experiment was carried out for casting products and parts of three kinds of materials. Products which meet the requirements of airtightness were made by controlling limit deviation of the rivet holes and skewness of axis, adjusting the depth of the dual-angle hole on the sealing surface, and analyzing factors which influence riveting interference quantity. The full-sealed structure can meet the environmental requirement of 0.35MPa inside and outside pressure.

**Key words:** interference-fit riveting; seal structure; environment requirement

### 1 引言

随着国内航空航天产品的不断研发, 对于铆接壳体的承载能力、强度、密封性等特性均提出更高的性能要求, 为适应型号发展, 新型铆钉及新型铆接技术开始不断涌现。

航天产品水下发射是技术上的重大突破。由于水下发射的特殊环境, 全密封结构成为此型号壳体铆接的最大特点, 也是与其它产品系列的最重要差别。新型航天产品在水下发射时需要承受 0.35MPa 的轴外压, 其发射条件对产品提出了高质量、高密封性的特殊要求。其中采用 ZL114A 材料进行铸件数控加工成型的结构, 经试验分析, 支架、支座等零件与铸件壳体的连接方式也并不适用于焊接, 最终在结构设计上提出了密封铆接的工艺方法以适应特殊的环境要求。密封铆接将逐渐成为新一代航空航天产品首选的连接

方式。同时支座、支架等零件与壁薄处壳体的密封铆接质量将直接影响产品水下发射的成败, 密封铆接工艺技术在航空航天产品上的应用成为目前亟待解决的关键问题。

### 2 密封铆接产品技术要求及难点分析

密封铆接与普通铆接不同, 是沿铆缝在夹层内外敷设密封材料并利用铆钉在施铆过程中钉杆的自身膨胀, 堵塞沿铆缝及钉孔的泄漏渠道, 形成径向压应力。即铆接后铆钉杆与钉孔之间获得规定的过盈量, 产生过盈配合, 从而达到结构的密封性<sup>[1]</sup>。由于密封材料有储存期的限制, 目前主要选用  $\Phi 4\text{mm}$  半圆头自封铆钉, 对铸件壳体与三种材料支架进行干涉铆接试验, 分析铆接干涉量的影响因素, 最终获得高质量、高密度的产品。

作者简介: 梁洪涛 (1979—), 工程师, 电子工程专业; 研究方向: 飞行器研究、航天制造技术研究。

收稿日期: 2015-08-04

2.1 产品技术指标

壳体材料：ZL114A；壳体材料厚度：4~15mm；壳体外形尺寸：直径 2000mm，高度 700mm；支架、支座材料：1Cr13 不锈钢、LY12 硬铝合金、ZL105；密封要求：承受 0.35MPa 轴外压，保压 0.5h，压降 ±0.05MPa；铆钉规格：QJ1546-88，4×(12~17)mm。

2.2 密封铆接的技术难点分析

2.2.1 铆钉孔加工精度高

密封铆接（干涉铆接）对制孔、制窝精度要求较高，不易控制；钻制铆钉孔的技术要求包括极限偏差、表面粗糙度及孔轴线偏斜度，尺寸及偏差如表 1、图 1 所示，其表面粗糙度应小于 3.2μm，轴线偏斜度小于 2°；制窝圆度应确保在其直径极限偏差内，制窝表面不允许有棱角、划伤、破边及裂纹，零件表面由窝钻造成的轻微机械损伤其深度应小于材料包覆层，数量不大于铆钉排内的 3%。

表 1 铆钉孔的尺寸参数及其偏差 mm

D	基本尺寸	3	4	5
	极限偏差	0~+0.040	0~+0.048	
E	基本尺寸	4.2	5.6	7.0
	极限偏差	±0.09		±0.11
h	基本尺寸	1.2	1.6	2.0
	极限偏差	±0.09		
R	基本尺寸	0.7	1.0	2.0
	极限偏差	±0.20		

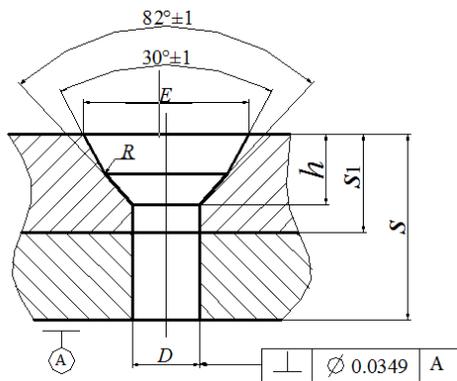


图 1 铆钉孔形状

2.2.2 铆接质量要求严格

表面粗糙度要求：孔  $R_a3.2\mu m$ ，窝  $R_a6.3\mu m$ 。

表面质量要求：钉孔的划伤仅允许存在于非密封表面一侧，划伤深度不大于 0.04mm。

高自封铆钉的锤击成型要求：墩头必须填满铆钉窝；铆接时墩头易歪斜则不易达到所需干涉量产品气

密性能要求。

工艺试片的干涉量检查：通过整钉测量法、逐层铣切法检查，要求满足 0.8%~5%。

产品的干涉量检查：通过检查墩头尺寸，使墩头满足规定尺寸要求。

3 密封铆接工艺方案

3.1 提高铆钉孔的加工精度方案

密封铆接工艺流程：准备工作→预装配→制孔→制窝→拆开清理→总装配→密封铆接→铣平墩头→测量干涉量→密封试验→清洗多余物。

用铅笔在产品上划出导孔位置线，钻制铆钉孔底孔并铰孔，转速不易过高，钻铰孔时，钻头应始终与零件表面保持垂直，孔径加工精度为  $\Phi3H10mm$ 、 $\Phi4H10mm$ 、 $\Phi5H10mm$ ，孔粗糙度  $R_a3.2\mu m$ ，孔内表面无划伤，孔周围无棱边、缺口或裂纹；密封表面制双角度窝  $82^\circ/30^\circ$ ，可采用特制专用工具保证制窝精度，粗糙度为  $R_a6.3\mu m$ 。

3.2 不同材料间的密封铆接方案

针对 1Cr13 不锈钢、LY12 硬铝合金、ZL105 等材料，采用如下操作控制铆接质量：首先用铅笔导孔位置线，用尖冲冲点后钻导孔，避免钻头打滑时划伤零件；钻铰孔时，应控制转速并加润滑液保证粗糙度要求；制窝环节至关重要，为保证制窝精度，应控制转速并加润滑液（酒精或煤油），并选用特制双角度划窝钻，划窝限位器控制深度，保证制窝质量符合铆接技术条件要求。为获得较为理想的密封性，优先采用正铆法，利用专用带凹槽的顶铁，通过控制铆接力及墩头大小控制铆接干涉量，确保铆接质量。

3.3 自封铆接锤击成型方案

自封铆接不同于一般普通铆接，须产生一定的干涉量来达到密封的要求，对操作人员的技能和经验要求很高。同时在生产正式产品前，要求进行工艺试片铆接，检测干涉量合格后，方可应用于正式产品。铆接时，铆具与零件接触面需贴胶布保护，防止打空枪击伤产品；此外为避免铆钉墩头歪斜，采用专用  $66^\circ$  凹槽顶铁铆接，确保顶铁与铆钉钉杆表面垂直。见表 2。

表 2 顶铁的技术要求 mm

钉径	3	4	5
槽深	1.2	1.6	2
槽径	3.2	4.2	5.2

密封铆接装配时应进行在线检查,采用铆钉卡板测量墩头的高度和直径判定装配铆接高低,装配时所使用的专用 66° 凹槽顶铁仅可进行两三次冲击,将窝填满后再用普通顶铁锤击成形,且顶铁应始终与铆钉杆垂直,避免铆后孔、窝未填满、墩头歪斜、碰伤及裂纹等缺陷。操作过程中注意使用定位销定位,可有效避免铆后产生间隙。铆接成型后如墩头不符合技术条件要求,有铆钉裂纹等现象时应及时更换铆钉,拆除过程中需在半圆头铆钉头中心打冲点,防止钻头打滑损伤零件,采用钻头钻出钉头并用铆钉冲将钉杆冲出。如孔大允许用大一个规格的铆钉更换但不超过钉排总数的 5%。自封铆钉铆接后,铆钉钉头应与被铆接零件的表面紧密贴合无间隙,使墩头充分填满铆钉窝。

#### 4 密封铆接试验检测

##### 4.1 检测密封铆接干涉量

密封铆接的干涉量是指铆接后由于铆钉镦粗而使铆钉孔胀大的量。铆接工艺试片选取材料及厚度与产品相同的 ZL114A 铆接试片试验。检测铆接试片干涉量。自封铆钉铆接要求钉孔之间产生的相对干涉量控制在 0.8%~5% 最佳, X 光检查表明此范围干涉量下不会在孔壁造成明显误伤。

##### 4.1.1 试片整钉测量法

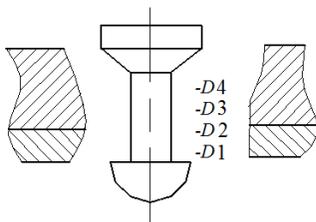


图 2 整钉测量法

表 3 整钉测量法典型数据 mm

编号	孔直径	D1 直径	D2 直径	D3 直径	D4 直径	相对干涉量
1	4.02	4.08	4.15	4.19	4.2	4.9%
2	4.03	4.07	4.08	4.09	4.09	1.5%
3	4.02	4.05	4.09	4.11	4.13	2.7%
4	4.03	4.12	4.13	4.15	4.15	2.9%
5	4.02	4.06	4.11	4.15	4.19	4.2%

试片铆接后沿平行铆钉轴线方向,从两边锯至接近铆钉部位,将板拉开,取出铆钉,用千分尺测量所示部位的直径与原孔径之差即为绝对干涉量,自封铆

钉铆接要求钉孔之间产生的相对干涉量为 0.8%~5%,测量方法见图 2。经实验测试干涉量满足要求。检测数据见表 3,铆接试片见图 3。



图 3 干涉铆钉试片

##### 4.1.2 试片逐层铣切测量法

干涉量的计算方法<sup>[2]</sup>:干涉量通常有绝对干涉量、相对干涉量:绝对干涉量  $I_a = D - D_0$ ; 相对干涉量  $I_b = [(D - D_0) / D_0] \times 100\%$ ,  $D_0$ ——铆前孔径, mm;  $D$ ——铆后孔径或钉径, mm。

干涉量的测量方法:试片铆接后从墩头一侧开始沿轴线方向,用铣床将铆钉及周围的基本金属铣去,见图 4,铣到 D1 处,在工具显微镜下检查钉杆直径,与原孔径之差即为绝对干涉量<sup>[3]</sup>, D2、D3 依次按上述方法处理测量。因铆钉镦粗干涉量沿钉杆分布不均匀,因此规定在工艺试片上制孔后,仅用工具显微镜分别测出 D2、D3 处直径即可,其平均值得到  $D_0$ 。经测试相对干涉量控制在 0.8%~5%,满足密封要求。检测数据见表 4。

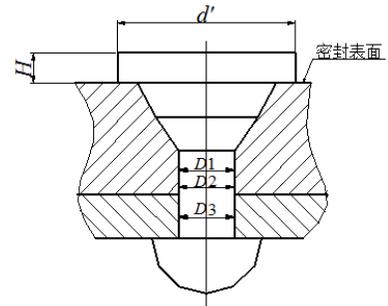


图 4 干涉量分布图

表 4 逐层铣切法典型数据 mm

铆钉数	孔直径	D3 直径	D2 直径	D1 直径	相对干涉量
1	4.03	4.028	4.04	4.23	4.9%
2	4.045	4.019	4.05	4.19	3.6%
3	4.02	4.015	4.05	4.22	4.9%
4	4.03	4.024	4.05	4.18	3.7%
5	4.03	4.013	4.03	4.2	4.2%

##### 4.1.3 产品墩头检测法

产品铆接后,检测铆钉墩头尺寸,重要测量指标为墩头直径及墩头高度,见表 5。

表5 墩头尺寸要求 mm

铆钉直径 $d$	墩头直径 $d'$	墩头高度 $H$	
		最小	最大
3	5~5.5	1.2	1.35
4	5.5~6.5	1.6	1.8
5	7.5~8.5	2.0	2.25

4.2 试验二 测试密封铆接产品铆钉密封性能

测量气密的试验台包括测压台，加压、保压装置及高压气缸。在完成干涉量试片后，对所铆的同一批试片进行气密检测，加压 0.35~0.8MPa（图纸要求 0.35MPa）保压 0.5~1h，压降不大于 0.05MPa，气密数据见表 6，经测试铆接后的产品满足气密检查。

表6 铆接试片气密试验数据

试片	加压值/MPa	保压时间/h	压力值/MPa	压降/MPa
1	0.35	0.5	0.33	0.02
2	0.35	0.5	0.335	0.015
3	0.35	0.5	0.34	0.01
4	0.4	1	0.37	0.03
5	0.5	2	0.46	0.04

针对水下发射产品上装的仪器支架所用材料的不同，先后对 1Cr13 不锈钢、LY12 硬铝合金、ZL105



（上接第14页）

性不足等共性、突出问题将发挥重要的现实作用，通过智能生产系统建设可达到以下具体预期效果。

a. 研制集成一批具有自适应控制功能的智能装备，减少车间机加、焊接、铆接和检测制造过程中的人工干预，并以智能功能研制开发为载体，掌握自动化装备软硬件集成技术。

b. 改变工艺设计方式，通过专家知识库建设，提供有效的知识发现和积累手段，使工人的经验知识得到沉淀共享，提高工艺设计质量和效率，并减少对工人的依赖。

c. 生产全过程得到精细化管控，通过信息采集和实时监控支撑车间运行优化，并利用车间中控平台，对生产过程信息进行三维分类展示和集中管控。

d. 转变物流模式，提升物流效率。结合车间实际情况，采用 AGV 小车与传统物流运输结合的方式，实现车间产品的高效运输，并为物流全过程数字化奠定基础。

6 结束语

等材料进行铆接，检测其干涉量符合技术条件要求，保证气密试验满足设计要求。

5 结束语

通过对 4~15mm 厚度 ZL114A 材料壳体与 1Cr13 不锈钢、LY12 硬铝合金、ZL105 三种材料支架、支座的密封铆接的试验研究及性能测试分析，密封铆接主要采用在密封表面制 82°/30°双角度窝，铆接时通过控制铆钉成形产生的干涉量实现过盈配合。利用特制专用铰刀、双角度划窝钻、特制铆钉顶铁以及测压台辅助测压试验完成密封铆接工艺技术攻关，最终产品实现在 0.35MPa 轴外压下，压降不大于 ±0.05MPa 的密封要求。此项工艺研究为航天产品结构设计采用新型铆接提供工艺可行性研究数据，预计在未来新型产品结构应用上具有广阔前景。

参考资料

- 1 陈先有, 黄俊波. 直升机密封铆接技术[J]. 航空制造技术, 2008(4): 11
- 2 盛惜, 曹增强, 王俊彪. 复合材料结构的干涉配合铆接[D]. 西安: 西北工业大学, 2003, 5

数字化车间/智能工厂是智能制造的落脚点，航天大型薄壁结构件智能生产系统是对智能制造技术在航天领域的应用探索，对满足航天结构件在多变条件下零缺陷生产要求，提升产品质量稳定性和生产效率具有显著作用，同时通过智能生产系统建设掌握生产过程自适应控制、知识积累与发现、SCADA 等关键技术，为后续智能工厂建设奠定坚实的基础。但是，智能生产系统的建设涉及面广，智能生产要素的实施和关键技术的突破是个循序渐进的过程，要实现工厂智能化和航天制造业转型升级任重而道远。

参考文献

- 1 乌尔里希 森德勒. 工业 4.0[M]. 邓敏, 李现民译. 北京: 机械工业出版社, 2014. 7
- 2 中国机械工程学会. 中国机械工程技术路线图[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2011. 8
- 3 王华忠. 监控与数据采集系统及其应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012. 9
- 4 涂子沛. 大数据[M]. 桂林: 广西师范大学出版社, 2012. 4