

核电站机柜压铆螺钉 紧固力矩的研究

Research on Tightening Torque of Pressure Riveting Screws for Nuclear Power Plant Cabinets

★北京广利核系统工程有限公司 张伟, 单士起, 孙洪涛

摘要: 针对核电站机柜压铆螺钉在施加紧固力矩时背面出现“凹陷”缺陷的问题, 对压铆螺钉的紧固力矩进行了试验研究。根据常用强度等级螺钉的理论计算紧固力矩和压铆螺钉手册规定紧固力矩, 对常用规格M3、M4、M5、M6压铆螺钉分别压铆在常用厚度为1.5mm、2.0mm、3.0mm冷轧钢板进行试验, 最后结合试验数据给出针对不同厚度钢板、不同规格压铆螺钉的紧固力矩推荐值。该推荐值可有效防松, 可以满足法规对核电站机柜的抗震要求, 目前已在核电站相关机柜和盘台中应用。

关键词: 核电站; 机柜; 压铆螺钉; 紧固力矩

Abstract: This paper mainly describes the research on tightening torque of pressure riveting screws for nuclear power plant cabinets. According to theoretical tightening torque of ordinary screws and allowable tightening torque of pressure riveting screws, the test is carried out for pressure riveting screws of M3, M4, M5 and M6, which are riveted to 1.5mm, 2.0mm and 3mm thick steel plates. The result is a table of recommended tightening torques for different pressure riveting screws riveted to different thick steel plates. The screws with recommended tightening torques can be fastened reliably, and have been validated to meet the requirements of nuclear power plants by seismic test. The recommended tightening torques have been applied in some projects of nuclear power plants.

Key words: Nuclear power plant; Cabinet; Pressure riveting screw; Tightening torque

1 引言

机柜是电气设备中不可或缺的组成部分, 是电气控制设备的重要载体。对应用到核电站的机柜安全性能要求较高, 除具备必要的功能外还要具备足够的抗震性能。抗震插件、机箱、机柜上所有零件的机械连接均应牢固、可靠, 连接所用紧固件必须有防松措施^[1]。机柜的安全可靠性对核电站安全、可靠、稳定运行至关重要。

压铆紧固件(如压铆螺钉、压铆螺母等)由于安装方便且具有高抗扭矩阻力等优点, 已广泛应用于钣金行业, 因此压铆螺钉在机柜中应用较为普遍。但质控人员在对机柜进行检验时发现, 当在厚度为1.5mm柜门上将M6压铆螺钉按4.8级螺钉紧固力矩紧固时, 压铆螺钉背面会出现“凹陷”, 如图1所示。核电站机柜外表面涂层要均匀牢固, 不应有气泡、皱纹、挂漆、擦伤、剥落、锤痕及修补刷痕等缺陷^[2]。“安全第一”是核电行业的根本方针, 为确保机柜中使用的压铆螺钉的安全可靠, 本文研究了将常用的M3、M4、M5、M6规格的压铆螺钉, 分别压铆在常用厚度为1.5mm、2.0mm和3.0mm的SPCC钢板上, 对其紧固力矩进行了测试研究, 并在此基础上给出了压铆螺钉紧固力矩推荐值。

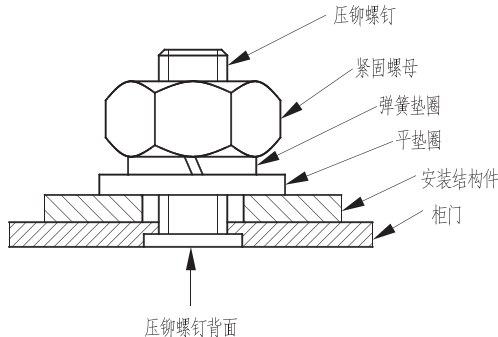


图1 压铆螺钉背面“凹陷”

2 紧固力矩的计算

为增强螺栓连接的刚性、紧密性、防松能力以及防止横向载荷螺栓连接的滑动, 多数螺纹连接在装配时

都要预紧^[4]。一般以为螺栓的紧固力矩仅与螺栓规格有关，螺栓规格越大，其需要的紧固力矩越大。实际上，螺栓的紧固力矩除与其规格有关外，还与螺栓的性能等级、被连接件支撑面状态等因素有关。对于螺栓连接，其紧固力矩T用于克服螺纹副螺纹阻力矩T₁和螺母与被连接件（或垫片）支撑面间的端面摩擦力矩T₂。紧固力矩的计算公式如式（1）所示^[4]：

T=T₁+T₂=KF'd (1)

式中：

K——紧固力矩系数；

F'——预紧力，N；

d——螺纹公称直径，mm。

预紧力的大小需要根据螺栓组受力的大小和连接的工作要求决定。设计时首先保证所需的预紧力，又不使连接结构的尺寸过大。一般规定拧紧后螺纹连接件预紧力不得大于其材料的屈服点的80%。对于一般连接用碳素钢螺栓，推荐的预紧力F'的计算公式如式（2）所示^[4]：

F'=(0.6~0.7)σ_sA_s (2)

式中：

σ_s——螺栓材料的屈服点，MPa；

A_s——螺栓公称应力截面积，mm²。

实际工程应用过程中，很少存在螺栓六角面直接作用在被连接件表面的情况，一般都使用镀锌弹、平垫圈。所以进行紧固力矩计算时可根据表1取K=0.22。根据式（1）和式（2），计算机柜结构设计过程中常用M3~M16规格螺栓的紧固力矩如表2所示。

表1 拧紧力矩系数K^[4]

摩擦表面状态	有润滑	无润滑
精加工表面	0.10	0.12
一般加工表面	0.13~0.15	0.18~0.21
表面氧化	0.20	0.24
表面镀锌	0.18	0.22
干燥粗加工表面	—	0.26~0.30

表2 计算紧固力矩

螺纹直径 d/mm	公称应力截面积 A _s /mm ²	计算紧固力矩T (N·m)		
		4.8 σ _s =320MPa	5.8 σ _s =400 MPa	6.8 σ _s =480 MPa
3	5.03	0.63~0.75	0.80~0.93	0.96~1.11
4	8.78	1.48~1.73	1.85~2.16	2.23~2.60
5	14.2	3.00~3.5	3.75~4.37	4.50~5.25

6	20.1	5.09~5.94	6.37~7.43	7.64~8.91
8	36.6	12.37~14.43	15.46~18.04	18.55~21.64
10	58.0	24.50~28.58	30.62~35.73	36.75~42.87
12	84.3	42.73~49.85	53.41~62.31	64.09~74.78
16	157	106.11~123.79	132.63~154.74	159.16~185.69

3 压铆螺钉规定紧固力矩

查询常用压铆螺钉产品手册可知其规定的紧固力矩如表3所示。

表3 压铆螺钉规定紧固力矩^[3]

螺钉规格	M3	M4	M5	M6
参考紧固力矩N·m	1.4	2.7	3.8	8.1
破坏力矩N·m	1.7	4.2	6.5	11.3
试验钢板厚度mm	1.5	1.5	1.5	2.2

4 紧固力矩测试试验

针对机柜常用规格压铆螺钉M3X10、M4X12、M5X16、M6X20和常用厚度1.5mm、2.0mm和3.0mm的SPCC钢板进行紧固力矩试验。试验目的是得到不同规格压铆螺钉压铆到不同厚度钢板上施加紧固力矩时背面出现“凹陷”的紧固力矩值，从而判断不同紧固力矩对产品外观质量和可靠性的影响。

4.1 试验方法简述

为保证试验条件与实际使用情况有更好的相似性，设计试验方法和过程简述如下：

· 分别加工厚度为1.5mm、2.0mm和3.0mm，材质为SPCC的“压铆底板”，如图2所示。

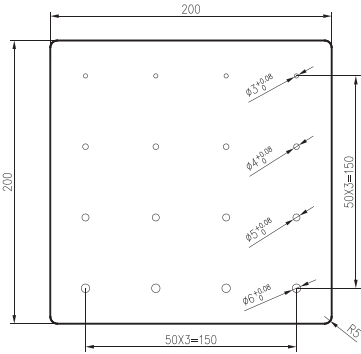


图2 压铆底板

· 加工厚度为1.5mm，材质为SPCC的“安装板”一块，如图3所示。

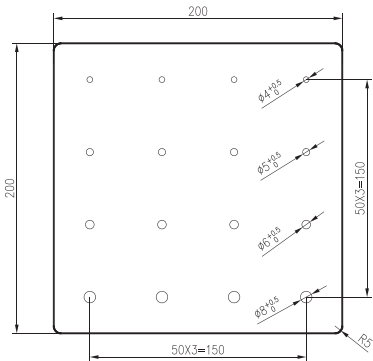


图3 安装板

- 在“压铆底板”预加工孔上进行对应螺钉的压铆操作。
- “压铆底板”和“安装板”进行表面喷涂。要求“压铆底板”喷涂后压铆螺钉背面不可见压铆痕迹。
- 将“安装板”安装到“压铆底板”（Φ4孔对应M3规格的压铆螺钉）。
- 安装相应规格的GB/T 97.1 A级平垫圈、GB 93标准型弹簧垫圈和GB/T 6170 1型六角螺母。
- 根据表4要求对各个压铆螺钉施加紧固力矩，并做好记录（针对厚度1.5mm、2.0mm和3.0mm的压铆底板分别记录）。

表4 试验数据记录表格

螺钉规格	紧固力矩N•m				备注
M3X10	0.63	0.75	1.4	1.7	
M4X12	1.48	1.73	2.7	4.2	
M5X16	3.00	3.5	3.8	6.5	
M6X20	5.09	5.94	8.1	11.3	

注：

- 表中第一列数据为表2理论计算4.8级螺栓紧固力矩的最小值；第二列数据为表2理论计算4.8级紧固力矩的最大值；第三列为压铆螺钉手册规定的参考紧固力矩值；第四列为压铆螺钉手册规定的破坏紧固力矩值；
- 备注栏记录两种数据：压平弹簧垫圈的紧固力矩值和（或）出现“凹陷”时的紧固力矩值；
- 每种规格四个压铆螺钉，只要其中一个出现“轻微凹陷”就要记录该紧固力矩数值。

4.2 试验结果

根据标准要求，机柜表面涂覆层油漆或喷塑用目测法进行检验^[2]。本文将施加紧固力矩时压铆螺钉背面出现的“凹陷”分为三个等级：

- 轻微凹陷：逆光仔细观察可见的凹陷，手摸无不平感觉。轻微凹陷允许出现在产品非重要表面；
- 一般凹陷：逆光观察可见的凹陷，手摸有不同感觉。一般凹陷影响产品外观质量，不能出现在产品可见表面；
- 严重凹陷：明显可见，手摸有不平感觉。严重凹陷影响产品可靠性，在产品任何区域均不允许出现。

根据试验数据，整理不同规格的压铆螺钉在不同厚度钢板上出现“凹陷”和压平弹簧垫圈的紧固力矩值如表5所示。

表5 紧固力矩试验结果

螺钉规格	紧固力矩N•m									
	1.5mm			2.0mm			3.0mm			压平弹垫
M3X10	无	无	无	无	无	无	无	无	无	0.2
M4X12	3.5	无	无	无	无	无	无	无	无	0.4
M5X16	2.5	3.8	6.0	3.8	4.5	6.0	3.8	4.5	6.5	0.6
M6X20	4.0	6.0	8.0	6.5	7.5	11.3	6.5	8.5	无	0.8

5 结论

通过试验可见，施加紧固力矩时喷涂钢板压铆螺钉背面出现“凹陷”的原因不仅与紧固力矩的大小有关，还与钢板厚度相关。根据上述试验结果和以往项目使用经验，与产品结构外观相关的压铆螺钉紧固力矩推荐值如表6所示；与产品结构外观无关的压铆螺钉紧固力矩推荐值如表7所示。

表6 与外观相关压铆螺钉紧固力矩推荐值

螺钉规格	推荐紧固力矩N•m		
	1.5mm	2.0mm	3.0mm
M3	0.7±0.1		
M4	1.7±0.2		
M5	1.5±0.2	2.0±0.2	
M6	2.0±0.2	4.0±0.2	

表7 与外观无关压铆螺钉紧固力矩推荐值

螺钉规格	推荐紧固力矩N·m		
	1.5mm	2.0mm	3.0mm
M3	0.7±0.1		
M4	1.7±0.2		
M5	3.3±0.3		
M6	5.4±0.5		

实际应用过程中应根据具体情况进行识别，如果上述紧固力矩推荐值无法满足使用要求，则需要通过修改

设计方案或变更安装工艺来提高紧固力矩值。当无法确定是否满足使用要求时，应通过计算和试验获得相关数据，以确保产品可靠性。**AP**

作者简介：

张 伟（1979-），男，北京人，高级机械工程师，学士，现就职于北京广利核系统工程有限公司，主要从事核电站数字化仪控系统产品结构设计工作。

参考文献：

[1] EJ/T 800.1-1993, 反应堆用抗震、耐振机箱和机柜[S].
[2] GB/T 7353-1999, 工业自动化仪表盘、柜、台、箱[S].
[3] PennEngineering. Self-Clinching Studs And Pins[Z]. 2020.
[4] 成大先. 机械设计手册（第2卷）. 北京: 化学工业出版社, 2007 : 69 - 72.