

Strength Calculation of the Combined Aerobridge of High Strength Bolts*

Xiaoqin Gu, Liangqing Luo

University of Electronic Science and Technology of China, Zhongshan College, Zhongshan
ThyssenKrupp Airport Systems Co. Zhongshan Ltd., Zhongshan
Email: 13640417490@139.com, delmonluo@tecs.com

Received: Mar. 19th, 2013; revised: Apr. 15th, 2013; accepted: Apr. 24th, 2013

Copyright © 2013 Xiaoqin Gu, Liangqing Luo. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract: The combined aerobridges are designed by a new concept with independent manufactured and transported standard modules which can be assembled rapidly. Due to the structural designed requirements as well as their appearance, the bolts in high-strength bolt group of the combined part have varied diameters. This paper studies computing method of high-strength bolt group in combined part according to the different designing schemes. We get fatigue strength condition of high-strength bolts in the fatigue design of aerobridge connections and joints.

Keywords: Aerobridge; High Strength Bolts; Strength; Fatigue

组合式登机桥高强度螺栓群的强度计算*

顾晓勤, 罗良清

电子科技大学中山学院, 中山
蒂森克虏伯机场系统中山有限公司, 中山
Email: 13640417490@139.com, delmonluo@tecs.com

收稿日期: 2013年3月19日; 修回日期: 2013年4月15日; 录用日期: 2013年4月24日

摘要: 组合式登机桥采用全新的设计概念, 标准模块可独立制造和运输, 在现场快速装配。由于结构设计要求以及为了外形美观, 组合式登机桥接合部高强度螺栓群中螺栓直径大小不一, 本文针对不同设计方案, 研究通道接合部高强度螺栓群强度计算方法。在登机桥联接与接头的抗疲劳设计中, 得到高强度螺栓疲劳强度条件。

关键词: 登机桥; 高强度螺栓; 强度; 疲劳

1. 引言

旅客登机桥是连接候机楼和飞机机身的一种桥梁设备, 是广泛应用于各大航空机场的辅助设备, 如图 1 所示。登机桥主体结构由立柱、旋转平台、活动通道、接机口、升降与行走系统、服务梯等部分组成 [1,2]。

*基金项目: 中山市科技计划项目“组合式旅客登机桥”(20114A157), 企业委托项目“空客 A380 登机桥有限元分析及 APDL 代码开发”(411Q43)、“登机桥结构力学分析”(411Q14)。



Figure 1. Combined aerobridge
图 1. 登机桥

2. 组合式登机桥及螺栓群布置方案

当前世界各大厂家生产的登机桥的长度大都在十几米到四十几米；重量从十几吨到三十几吨不等。三通道登机桥，从内到外分为通道 A、通道 B、通道 C 三部分，如图 2 所示。二通道桥分为通道 A、B，内外通道之间通过滚轮或者滑块在钢轨道上滚动或滑行，实现伸缩运动。受外形结构尺寸及重量的限制，登机桥的运输主要采用大件散货运输，因此造成登机桥运输成本高、运输能耗大，运输过程中登机桥可能损坏等缺陷，基于此，需要研究组合式旅客登机桥。组合式登机桥结构。

登机桥每个通道一般都在十米以上，因此须将其合理分段，各段的尺寸须小于集装箱的尺寸，段与段之间采用高强度螺栓群连接。螺栓连接的设计须满足强度要求，不影响外观，可现场快速安装。传统设计中，接机平台一般与外通道焊接在一起，在本项目设计中，为解决因为接机平台宽度太宽而导致通道无法放入集装箱的难题，将接机平台与外通道分割为二部分，通过高强度螺栓群连接。

组合式登机桥采用全新的设计概念，将整桥分割为尺寸较小、重量较轻的标准模块。标准模块可独立制造和运输，在现场快速装配。如图3所示。

由于结构设计要求以及为了外形美观，组合式登机桥桥接合部高强度螺栓群中螺栓直径大小不一，本文针对几种不同设计方案，研究通道接合部高强度螺栓群静力强度、疲劳等。

如图2所示，通道接合部I-I、II-II、III-III，经过计算得到弯矩 M_1 、 M_2 、 M_3 ，剪力 F_1 、 F_2 、 F_3 。通道接合部高强度螺栓群布置方案，有图4、图5两

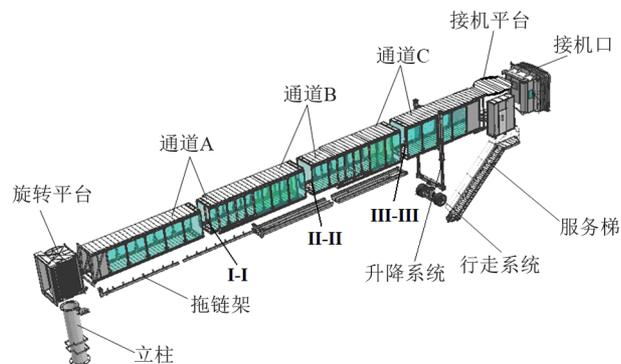


Figure 2. Combination of boarding bridge structures
图2. 组合式登机桥结构

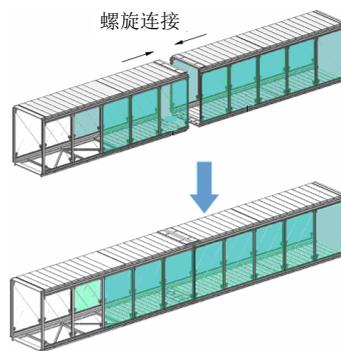


Figure 3. Rapid field assembly
图3. 现场快速装配

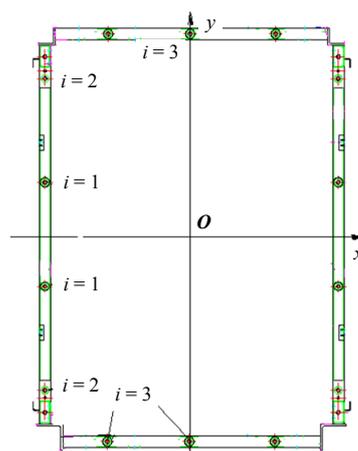


Figure 4. Bolt axis along horizontal arrangement
图4. 螺栓轴线沿水平布置

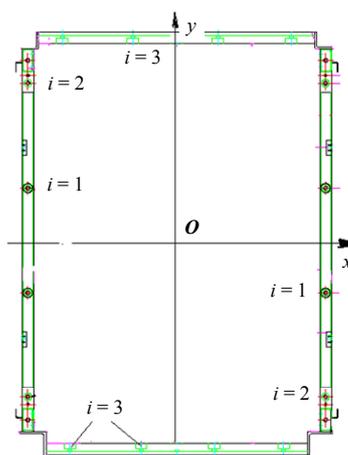


Figure 5. Top and bottom bolt axis vertical arrangement
图5. 顶底螺栓轴线垂直布置

种，分别称为方案一、方案二。

3. 方案一静强度分析^[3-5]

螺栓轴线沿水平布置，在弯矩 M 作用下，靠近中

性轴的螺栓受拉压应力小于远离的, 例如对 $i=1$, 采用 M20 高强度螺栓; 对 $i=2$, 采用 M24 高强度螺栓; 对 $i=3$, 采用 M30 高强度螺栓。螺栓群的形心轴即中性轴, 弯矩 M 导致的螺栓轴力 N_{ii} 、正压力 σ_i 分别为

$$N_{ii} = \frac{Md_i^2 y_i}{\sum_{j=1}^3 m_j d_j^2 y_j^2} \quad \sigma_i = 1.273 \frac{My_i}{\sum_{j=1}^3 m_j d_j^2 y_j^2} \quad (1)$$

其中 d_i 、 d_j ——第 i 、第 j 排每个螺栓的有效直径, y_i 、 y_j ——第 i 、第 j 排螺栓轴线到中性轴的距离, m_j ——第 j 排螺栓个数。

登机桥通道接合部 I-I、II-II、III-III, 整个结合面受到剪力 F 作用, 对于承压型连接, 单个高强度螺栓受到的剪力

$$N_{Vi} = \frac{Fd_i^2}{\sum_{j=1}^3 m_j d_j^2} \quad (2)$$

对于摩擦型连接, 由于此时同时承受摩擦面间的剪力和螺栓杆轴方向的外拉力, 由(1)、(2)式得到承载力计算式

$$\left(\frac{F}{N_{Vi}^b \sum_{j=1}^3 m_j d_j^2} + \frac{My_i}{N_{ii}^b \sum_{j=1}^3 m_j d_j^2 y_j^2} \right) d_i^2 \leq 1 \quad (3)$$

其中 N_{Vi}^b 、 N_{ii}^b ——第 i 排每个高强度螺栓的抗剪、抗拉承受力设计值。接触面抗滑移系数 $\mu = 0.35$ 时, N_{Vi}^b 、 N_{ii}^b 值见列表 1。

登机桥承受自重、人载、雪灾或者风载等, 如果万一如台风等, 造成摩擦型连接变成承压型连接, 由(1)、(2)式得到承载力计算式

$$d_i^2 \sqrt{\left(\frac{F}{N_{Vi}^b \sum_{j=1}^3 m_j d_j^2} \right)^2 + \left(\frac{My_i}{N_{ii}^b \sum_{j=1}^3 m_j d_j^2 y_j^2} \right)^2} \leq 1 \quad (4)$$

$$N_{Vi} \leq 0.833 N_{Ci}^b \quad (5)$$

其中 N_{Ci}^b ——第 i 排每个高强度螺栓的承压承受力设计值。

4. 方案二静强度分析

顶底螺栓轴线垂直布置, 用一块钢板连接, 俯视

图如图 6 所示。通道接合部受到弯矩 M 和剪力 F 作用。如图 5 所示, $i=1、2$ 的高强度螺栓组通过轴向力对中性轴的力矩, $i=3$ 的高强度螺栓组通过摩擦力对中性轴的力矩, 共同承担弯矩 M 。钢板虚线截面和 $i=1、2$ 的高强度螺栓组共同承担剪力 F 。

$$M = \sum_{i=1}^2 m_i N_{ii} y_i + m_3 N_{V3} y_3 \quad (6)$$

$$F \leq \sum_{i=1}^2 m_i N_{Vi} + 2a[\tau] \quad (7)$$

其中 $[\tau]$ 为钢板许用切应力, 其他字母前已述。

由于 $i=1、2$ 的高强度螺栓组对中性轴距离较 $i=3$ 的近, 从偏于安全的考虑, 以及工程中常用的简化算法, 认为组合截面上弯矩 M 主要由 $i=3$ 的高强度螺栓群承担, 为了提供图 6 中钢板之间所需的压力, 由(6)式得每个螺栓需要的预紧力

$$F_p \geq \frac{M}{m_3 \alpha_3 y_3 \mu} \quad (8)$$

其中 μ ——摩擦面的抗滑移系数; α ——抗力分项系数的倒数, 一般取 0.9。

由(7)式可以算得钢板厚度 $t \geq \frac{F - \sum_{i=1}^2 m_i N_{Vi}}{2a[\tau]}$, 由于

Table 1. Shearing resistance and tensile value of high-strength bolt (kN)

| 螺栓公称直径/mm | 8.8 级 | | | 10.9 级 | | |
|------------|-------|------|------|--------|------|------|
| | M16 | M20 | M24 | M16 | M20 | M24 |
| N_{Vi}^b | 25.5 | 39.4 | 55.1 | 31.5 | 48.8 | 70.9 |
| N_{ii}^b | 64 | 100 | 140 | 80 | 124 | 180 |

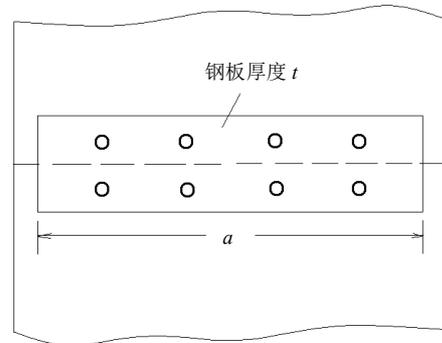


Figure 6. Top and bottom bolt arrangement
图 6. 顶底螺栓布置

钢板虚线截面面积远大于 $i = 1、2$ 的高强度螺栓组横截面面积，可得偏于安全的钢板厚度简化计算式

$$t \geq \frac{F}{2a[\tau]}$$

5. 联接与接头的抗疲劳设计

登机桥设计寿命一般为 20 年，故螺栓连接需要考虑疲劳寿命。由于连接节点构造复杂，节点处存在应力集中。当承受动力荷载时，这些缺陷作为裂纹源，应力集中的存在使缺陷尖端区域金属的应力达到钢材的屈服强度，在循环荷载作用下不断扩展，形成疲劳裂纹。合理选取节点构造形式，是提高摩擦型高强度螺栓连接节点疲劳性能的有效措施。

构件和节点的疲劳性能计算方法有二种：容许应力幅法(也称常规计算方法)和断裂力学分析方法。高强度螺栓的排列方式、螺栓数量、螺栓孔直径等节点构造均会对节点主体金属的疲劳性能产生影响。在满足静力承载能力要求的前提下，选用小直径螺栓可提高节点承受的名义应力幅。采用椭圆螺栓孔也可在一定程度上改善节点的疲劳性能。

《钢结构设计规范》规定预拉力设计值

$F_p = 0.608 f_u A_e$ ， f_u 为高强度螺栓的抗拉强度， A_e 为高强度螺栓的有效截面面积^[5]。当受到动荷载 F_A 作用(图 7)，螺栓所受轴力 F_b 为^[6,7]

$$F_b = F_p - \frac{\lambda_c}{\lambda_b + \lambda_c} F_A \quad (8)$$

其中 λ_c ——衬垫系统柔度， λ_b ——螺栓系统柔度。

$$\lambda_c = \frac{1.83}{Ed} \lg \frac{\left(1 + \frac{d}{b}\right) \left(1 + 0.8 \frac{t-d}{b}\right)}{\left(1 - \frac{d}{b}\right) \left(1 + 0.8 \frac{t+d}{b}\right)} \quad (9)$$

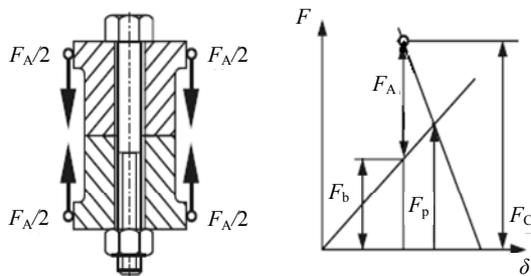


Figure 7. After preloading by dynamic load force
图 7. 预紧后受动荷载力

$$\lambda_b = \sum_{j=1}^n \frac{l_j}{EA_j} + \frac{1}{6.67hE} + \frac{1}{dE} \sqrt{0.346 + 2.23 \frac{s}{d_0}} \quad (10)$$

其中 b ——网格线所示圆台上端直径(图 8)； t ——被联接件钢板厚度； n ——螺栓分段数； E ——弹性模量； l_i 、 A_i ——螺栓上第 i 段的长度、横截面积； s ——螺距； d_0 、 d ——螺纹的中径、外径； h ——螺栓头高度。对于长螺栓，(10)式右边第 2、3 项可以略去不计^[6]，

$$\text{即 } \lambda_b = \sum_{j=1}^n \frac{l_j}{EA_j}。$$

考虑疲劳时，高强度螺栓强度条件

$$\begin{cases} 2 \times \frac{A\sigma_{-1} - \psi_\sigma F_p}{(K_{\sigma D} + \psi_\sigma) \chi F_A} \geq [n] \\ \frac{2A\sigma_{-1} + (K_{\sigma D} - \psi_\sigma) F_p}{(K_{\sigma D} + \psi_\sigma)(F_p + \chi F_A)} \geq [n] \end{cases} \quad K_{\sigma D} = \frac{K_\sigma}{\varepsilon_\sigma} + \frac{1}{\beta} - 1 \quad (11)$$

其中 F_p ——预拉力设计值； A ——螺纹有效截面积； σ_{-1} ——对称循环下的材料疲劳极限； $[n]$ ——许用安全系数； K_σ ——疲劳缺口系数； β ——表面加工系数； ψ_σ ——平均应力折算系数； ε_σ ——尺寸系数； P ——外荷载；外荷载系数 $\chi = \frac{\lambda_c}{\lambda_b + \lambda_c}$ 。

螺纹联接中各圈螺牙上的负荷为不均匀分配，一般以螺母与被联接件接触处的第一圈螺牙所传递的载荷为最大，因此螺纹联接一般在第一圈螺牙的根部应力集中处产生疲劳破坏。降低应力集中，提高疲劳寿命还应该包括：结构设计中尽量避免承力焊缝应力集中，承力焊缝焊接工艺的缺陷导致微观的应力集中不易察觉，“探伤”不能排除所有的应力集中可能；对承力焊缝的焊接工艺缺陷必须要有健全的质量管理体

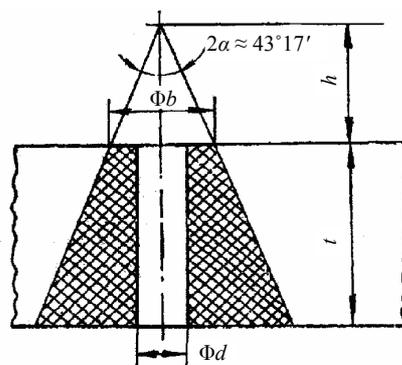


Figure 8. Pressure cone
图 8. 压力锥

系和可操作的措施,重要焊缝打磨也应科学。

疲劳损伤积累理论是建立在对称循环的不稳定变应力的实验资料的基础上的。应用应力的等效转化概念,可把它推广到组合式登机桥联接螺栓群非对称循环的不稳定变应力的计算中去。

6. 结论

组合式旅客登机桥因所有模块均可以放入标准集装箱,大大降低了运输成本。在降低运输成本的同时,在设计周期和制造成本上,组合式登机桥也具有显著优势。针对客户的个性化需求,组合式登机桥只须对部分模块重新设计,整桥的大部分结构均可采用批量化生产的标准模块。

通过静力学强度计算,可以分析登机桥零部件的安全性,同时减少过度设计、笨重和高成本的设计。利用疲劳强度理论计算登机桥高强度螺栓安全性,可

以预防巨大的灾难。随着技术的日益发展,疲劳安全设计可以减少运行失效,使设计人员能够有更多的机会设计新的登机桥产品。

参考文献 (References)

- [1] BS EN 1915-1-2001, Basic safety requirements for aircraft ground support equipment general requirements. Age-2c Vehicle Maintenance AND Aircraft Servicing Committee, 2009.
- [2] BS EN 1915-2-2001, Stability and strength requirements, calculations and test methods for aircraft ground. Age-2c Vehicle Maintenance and Aircraft Servicing Committee, 2009.
- [3] GB 50017-2003, 钢结构设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2003.
- [4] B. Davison, G. W. Owens. Steel designers' manual (6th Edition). Oxford: Blackwell Publishing Ltd, 2003.
- [5] 陈志华, 编著. 钢结构原理与设计[M]. 天津: 天津大学出版社, 2011: 76-99.
- [6] 赵少汴, 编著. 抗疲劳设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.
- [7] 景文明. 现代机械抗疲劳设计方法概述[J]. 装备制造技术, 2012, 1: 154-155.