第 16 卷 第 4 期 复 合 材 料 学 报 Vol 16 No. 4
1999 年 10 月 ACTA MATERIAE COMPOSITAE SINICA October 1999

FRP 结构螺栓接点的预紧力与应力松弛

刘德安 刘 隽
(武汉工业大学 荷花新村 106 栋 2- 4, 武汉 430070)

摘 要 应用螺栓-垫圈应力理论对 FRP 结构搭接点预紧力进行了研究。理论计算的预紧力与垫圈的尺寸, 在结构试验初期与试验数据相吻合, 但随时间的增长, 由于基体的松弛效应, 预紧力有明显的减小, 然后在某一数值上又趋于稳定, 但重新按原预紧力紧固螺栓后, 1. 5 年的试验结果表明, 接点的应力松弛得到非常明显的抑制, 取得了预定的效果。

关键词 FRP 螺栓接点, 预紧力, 应力松弛
中图分类号 TB332

复合材料结构的连接形式有多种, 在结构设计中究竟如何选定连接点的结构形式, 取决于产品的功能和使用条件。当承受较大荷载并对结构的变形有限制时, 为了防止灾难性的破坏发生, 仍然普遍使用混合连接或螺接。

螺接是复合材料结构中使用最广的接点形式。它的特点是: 有局部加厚的连接区域, 有分布的螺孔或槽、螺栓、螺母及垫圈, 因而涉及的参数也较多。金属结构的螺接理论也能用于复合材料结构, 但设计人员往往将注意力集中于如何解决复合材料低的层间剪切强度和拉伸强度对接点的影响, 而忽视了基体的松弛效应对接点承载力的削弱作用。而这种削弱作用就有可能使结构产生大变形和累积破坏。

对接点的这种削弱作用的预测, 常需要辅用相应的结构试验, 该试验常常花费相当长的时间和财力。本文中应用螺栓-垫圈应力理论, 对某工程绝缘悬臂支架的主要承力接点的螺栓预紧力进行了计算。相应的结构试验表明, 只要合理地控制螺栓的预紧力和选择垫圈尺寸, 就能减小基体松弛效应对接点承载力的削弱作用, 并能稳定在设计要求以内。

1 螺栓接点的预紧力及垫圈尺寸

1. 1 螺栓预紧力

螺栓的预紧力不仅可保证螺接接头的贴紧, 也有助于提高接头的抗蠕变性能。保证螺接点的承载力和气密性的基本条件为

$$Q_0 > (1 - \zeta)P \tag{1}$$

Q_0 为预紧力, P 为外载。作用在螺栓上的整个力为 Q_n 与预紧力 Q_0 和外载 P 的关系为

$$Q_n = Q_0 + \zeta P \ , \ \zeta = \frac{\lambda_1 + U}{\lambda_0 + \lambda_1 + U} \tag{2}$$

收修改稿、初稿日期: 1998-07-08, 1998-04-22

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

式中: λ_0, λ_t —— 分别为螺栓和连接板压缩应力引起的柔度; U —— 螺母或销在受到螺栓轴向力时的柔度。

由于复合材料结构成型工艺的特殊性, 很难保证材料的绝对均匀以及结构表面高精度的平整。因此, 在接头的连接工艺上需要采取一些特殊措施: 如对有气密性要求的结构, 除保证螺孔的精度外, 还需对开孔处的表面进行抛光; 对主要承力接点, 要求螺栓垫圈嵌入复合材料表面一定深度 $\delta \leq 0.1 \sim 0.15$ mm, 因此公式(1)和(2)对复合材料结构的螺接点设计并无多大实用价值。本文作者建议采用下列公式估算螺栓的预紧力 Q_0:

由于螺栓头与垫圈的刚度比复合材料层面垂向刚度大得多, 嵌入 δ 深度的预紧力 Q_{0min} 可按具有圆环平底的压头计算[1]

$$Q_{0min} = \frac{E_z D_0}{1 - m^2} \cos\left(\arcsin\frac{d_0}{D_0}\right) \cdot d \tag{3}$$

同时, 螺栓预紧力也应小于螺栓材料的屈服极限 $0.7\sigma_s$, 则预紧力 Q_0 的范围为

$$\frac{E_z D_0}{1 - m^2} \cos\left(\arcsin\frac{d_0}{D_0}\right) \cdot d \leq Q_0 \leq 0.7\sigma_s \tag{4}$$

在设计中尽可能选用螺栓标准件, 通常标准垫圈的外径与内径之比 $D_0/d_0 = 1.70 \sim 3.0$, 取 $D_0/d_0 = 2.5$, $\mu = 0.3$, $d_0 \approx d$, $\delta = 0.125$ mm, 则式(4)可改写为

$$0.315 E_z d \leq Q_0 \leq 0.7\sigma_s \tag{5}$$

式中: E_z —— 垂直复合材料层面的弹性模量(kg/mm^2); d —— 螺栓直径(mm); σ_s —— 螺栓材料的屈服极限(kg/mm^2)。

1.2　垫圈尺寸

垫圈对提高复合材料层板接点强度和持久性作用是十分明显的。一般情况下, 无垫圈的连接效率为 37%～40%, 有垫圈的效率为 50%～55%。当垫圈尺寸合理时, 其持久性可提高 50%～100%。

垫圈的主要尺寸是外径 D_0 和 d_0 内径, 金属结构都采用标准垫圈, 通常复合材料结构为了避免加工上的麻烦也采用标准垫圈。标准垫圈一般比螺栓直径 d 大 0.5～1.5 mm, 试验表明, 当 D_0/d_0 不恰当时, 就不能有效地保证复合材料层板共同受力, 特别是接点同时承受弯曲荷载时, 更为明显。若采用内径较小的垫圈, 则可使有效率增大一倍。最合理垫圈尺寸为 $D_0/d_0 = 2.0 \sim 2.5$。但对有开槽的接点, 由于接触面积减小, 建议 $D_0/d_0 = 2.5 \sim 2.8$ 较为合理。

2　螺栓预紧力的松弛

由于树脂基复合材料的基体具有高弹变形特性, 即使在常温下也会发生蠕变。因此, 螺栓预紧力随时间的延长而逐渐减小。当预紧力较小或复合材料的固化程度不够时, 蠕变而引起的预紧力松弛, 就愈加明显, 并且有可能使复合材料结构产生逐渐积累的破坏。

螺栓和板件的变形一致性和平衡应满足下列条件:

$$P_b = P_p \quad , \quad U_b = U_p \tag{6}$$

式中: P_b, P_p —— 分别为螺栓和板件所受的力; U_b, U_p —— 分别为螺栓和板件的位移。

蠕变时的松弛应力为[2]

$$\Delta P_b = \Delta P_p \tag{7}$$

或

$$s(t)F - s_0 F = \left[s_0 \frac{L}{E_0} - L\,\epsilon(t) \right] C \tag{8}$$

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

式中: L ——螺栓受力长度; E_0——螺栓材料弹性模量; C——板件刚度。

令 $\beta = CL/E$, 式(8)可改写为

$$\sigma(\tau) = \sigma_0(1 + \beta/E_0) - \beta\epsilon(t) \tag{9}$$

将上式对时间微分得

$$\dot{\sigma} = -\beta\dot{\epsilon} \tag{10}$$

式中, $\dot{\epsilon}$为蠕变速率, 假定蠕变变形按指数规律变化, 则有

$$\dot{\epsilon}(t) = V(\sigma, t) = \epsilon_b(\sigma/\sigma_b)^n \tag{11}$$

由式(10)和式(11), 可求得松弛时间

$$t = \left(\frac{1}{\beta} + \frac{1}{E_0}\right)\frac{\sigma_b^n}{(n-1)\epsilon_b}\left(\frac{1}{\sigma^{n-1}} - \frac{1}{\sigma_0^{n-1}}\right) \tag{12}$$

式中: σ_b, ϵ_b 和 n 为螺栓材料常数, 由蠕变试验曲线确定。

在应用上并不一定按式(11)来捏合蠕变速率曲线, 可以按试验的 $\dot{\epsilon}\sim t$ 曲线, 直接得出松弛应力

$$\sigma(\tau) = \sigma_0\left(1 + \frac{\beta}{E_0}\right) - \beta\int\dot{\epsilon}\,\mathrm{d}t \tag{13}$$

3 算例与试验

某工程复合材料绝缘支架, 根据使用条件和设计要求, 采用搭接连接方式。主要承力螺栓为M 16, 材料为 1Cr18Ni9Ti, 承受恒定的轴向拉力 $P = 6738$ N。

3.1 螺栓预紧力

螺栓材料常数: $E_0 = 196$ GPa, $\sigma_b = 202$ MPa, 连接板材料: 玻璃纤维含量 $V_f = 0.31$, $E_c = 3.84$ GPa, Z 向压缩强度 $\sigma_b = 91.1$ MPa。螺栓预紧力 $Q_P = 19933$ N, 满足式(5)要求。

3.2 接点蠕变试验

接点蠕变试验在露天试验平台上进行。气温变化范围 -20℃~45℃, 相对温度变化 40%~85%。采用 1:1 原型加载, 加载示意图如图 1 所示。支架数为 3 个, 支架间距 4.2 m。加载后 12 天(线性变形稳定后), 同时对支架承力接点和悬臂端的变形进行测量, 在试验过程中采用了两种不同的垫圈尺寸, 图 2 中的 $\dot{\epsilon}\sim t$ 曲线 1(虚线), 螺栓垫圈尺寸 $D_0/d_0 = 1.71$, 被连接板接点处平均压力为 49.8 MPa, 1080 小时, 变形仍然不稳定并有发展趋势, 试验终止。然后改用 $D_0/d_0 = 2.66$ 的垫圈尺寸, 被连接板接板处平均压应力为 37.8 MPa。接点蠕变曲线如图 2 中的曲线 2(实线)所示, 960 小时以后, 变形趋于稳定。

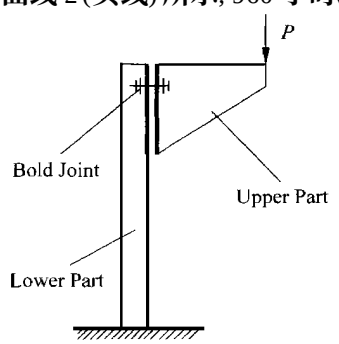

图 1 支架加载示意图

Fig. 1 Schematic diagram of load on the support

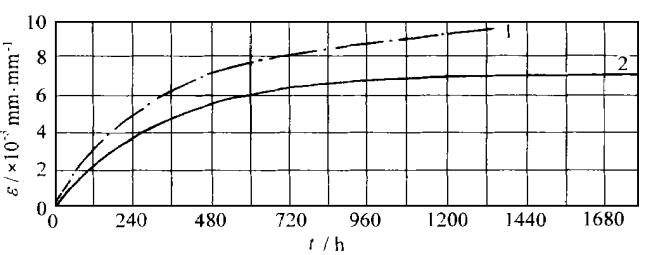

图 2 接点 $\dot{\epsilon}\sim t$ 曲线

Fig. 2 $\dot{\epsilon}\sim t$ curve for bolt

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

相应的蠕变变形速率与时间 t 的关系曲线如图 3 所示, 螺栓松弛应力参数 $\beta = 121.7 \times 10^2$ MPa, 由图 3 所示曲线和式(13), 可求得 1320 小时后螺栓夹紧松弛应力 $\sigma(\tau) = 96.78$ MPa, 螺栓预紧力被减小了近 30%, 应力松弛曲线如图 4 所示。

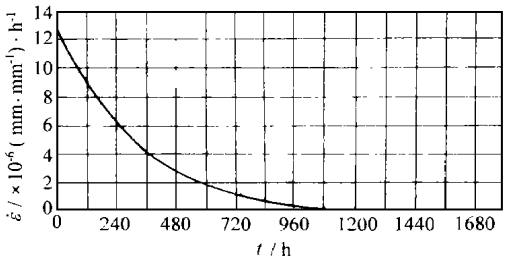

图 3　接点 $\dot{\varepsilon} \sim t$ 曲

Fig. 3　$\dot{\varepsilon} \sim t$ curve for bolt

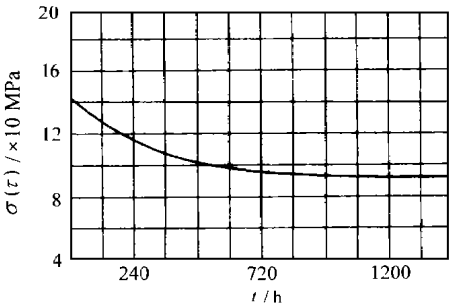

图 4　螺栓应力松弛曲线

Fig. 4　Stress relaxation curve for bolt

4 结　　语

(1) 树脂基复合材料结构, 由于基体的高弹形变, 螺接点螺栓夹紧松弛应力不能忽视, 它可使预紧力减小高达 30%, 并削弱了接点的承载能力。

(2) 合理的螺栓预紧力和垫圈尺寸, 使被连接点处的平均压应力比值 σ_b/σ_b 控制在 35% ～ 40% 范围, 可提高接点的抗蠕变性能和持久性。

(3) 对于主要承力螺接点, 应采取有效的防松措施。在有条件的情况下, 待接点变形稳定后, 应重新紧固螺栓。

参 考 文 献

1　加林 ПА. 弹性理论的接触问题. 北京: 科学出版社, 1958. 133～135

2　ВОРОБЕЙ В В, СИРОТКИН О С. СОЕДИНИЯ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ. МАШИНОСТРОЕНИЕ, 1985

PRETIGHTENING FORCE AND STRESS RELAXATION OF FRP CONSTRUCTION BOLT JOINT

Liu Dean　　Liu Jun
(Wuhan Uneversity of Technology, Wuhan 430070)

Abstract　The pretightening force of FRP construction bolt joint has been researched in the theory of bolt-washer stress. The computed pretightening force of bolt and washer size reach the prefigurative result in the construction test, but the pretightening force of bolt was decreased obviously by the time increase for matrix relaxation effect, and then tending towards a stable value.

Key words　bolt joint, pretightening force, stress ralaxation

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net