

文章编号:1006-7329(2002)04-0025-06

抗拉连接高强度螺栓的工作性能及设计计算

程睿, 崔佳, 龙莉萍

(重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045)

摘要:分析了抗拉连接高强度螺栓的工作性能,指出高强度螺栓的抗拉承载力与很多因素如连接板翼缘和螺栓的刚性性质、撬力、预拉力等有关。当连接板翼缘的刚度较小时,其弯曲变形将造成明显的撬力,从而增大了螺栓力,使整个连接过早破坏。考虑到撬力的作用,各种设计方法被提出来。我国现行《钢结构设计规范》GB50017中没有具体的撬力计算公式,只是在螺栓抗拉强度设计值公式中引入系数0.8来考虑撬力,设计应用较方便。但高强度螺栓抗拉承载力计算方法过于保守,其设计值明显低于国外标准,建议对高强度螺栓的抗拉承载力设计值予以适当提高。

关键词:高强度螺栓; 抗拉连接; 撬力作用; 设计方法

中图分类号: TP391

文献标识码: A

在采用端板连接和T形连接的钢结构节点中,经常会遇到螺栓连接受拉的情况,这种连接的节点板一般都带有一定的柔性,连接板的过度变形将造成额外的紧固件拉力,即撬开作用。撬开作用会削弱连接节点的极限承载能力及疲劳强度,影响螺栓的工作性能。因此,有关撬开作用对抗拉式螺栓连接性能的影响,在各国钢结构设计规范给出的设计表达式中均有所考虑,但设计强度的取值却存在较大的差异。

高强度螺栓的预拉力对连接节点会产生较大的板间压紧力,压紧力将减少撬力作用。但撬力对抗拉连接高强度螺栓承载能力的影响目前尚研究不足,因此在设计中一般采用了间接考虑其影响的计算方法。

1 抗拉连接高强度螺栓的工作性能

1.1 高强度螺栓的抗拉性能

用于抗拉连接的高强度螺栓在承受荷载前已经有很高的预拉力 P_0 ,在施加外力以前,高强度螺栓的预拉力 P_0 与板间接触力 C 是相等的(图1)。当施加荷载 T 到连接板的外表面时,螺栓会伸长而经预加压力的板趋向于膨胀到原来的厚度。如果板件的膨胀量不超过原有的收缩量,则连接板件间仍然保持有若干接触压力。在这种情况下,预拉力 P_0 增加了 ΔP ,板间接触力 C 减少了 ΔC ,即此时的外力 $T = \Delta P + \Delta C$ 。假定螺栓和板保持弹性,在 T 力作用下,螺栓与板的变形量 Δe 应相等。由于 $\Delta e = \Delta C/k_p = \Delta P/k_b$,式中 k_p 、 k_b 分别为连接板和高强度螺栓的刚度。从而得:

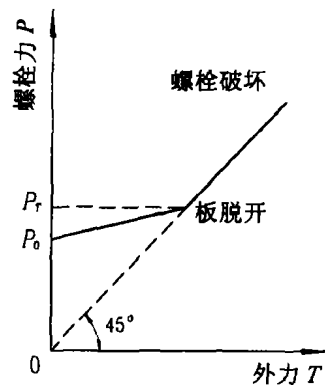


图1 高强度螺栓拉力的变化

$$\Delta P = \frac{T}{k_b + k_p} k_b \quad (1)$$

$$\Delta C = \frac{T}{k_b + k_p} k_p \quad (2)$$

* 收稿日期:2002-05-01

作者简介:程睿(1977-),男,重庆人,硕士生,主要从事钢结构研究。

当外荷载增加到刚好使接触压力消失时, $\Delta C = C$ 。因为 $C = P_0$, 此时:

$$\frac{T}{k_b + k_p} = \frac{P_0}{k_p} \quad (3)$$

从而有

$$\Delta P = \frac{k_b}{k_p} P_0 \quad (4)$$

螺栓总拉力:

$$P_T = P_0 + \Delta P = \left(1 + \frac{k_b}{k_p}\right) P_0 \quad (5)$$

显然, 此时应有 $P_T = T$ 。即板完全松开后, 螺栓的受力情况就和没有加过预拉力的螺栓相同。

图1反映了高强度螺栓的拉力随外加荷载变化的情况。

1.2 撬开作用

上述高强度螺栓的抗拉性能有一个前提, 即板的刚度很大, 但实际工程中的连接板在承受拉力 T 时会产生弯曲变形。以两侧各有一行螺栓的对称 T 形连接为例(图2、图3), 因为连接对称, 螺栓所受拉力相等, 连接上的外加荷载会减少 T 形连接翼缘和底板之间的接触压力。由于连接板的弯曲变形, 在 T 形连接翼缘板外边缘将产生附加力, 此附加力即撬开作用, 亦称撬力。撬开作用增加了抗拉连接中高强度螺栓所承受的拉力, 直接影响到螺栓的工作性能。

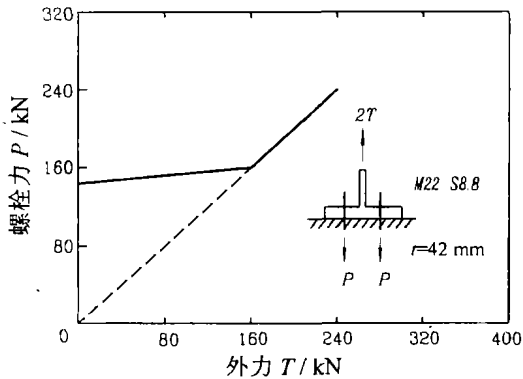


图2 螺栓力的变化(翼缘板厚 $t = 42$ mm)

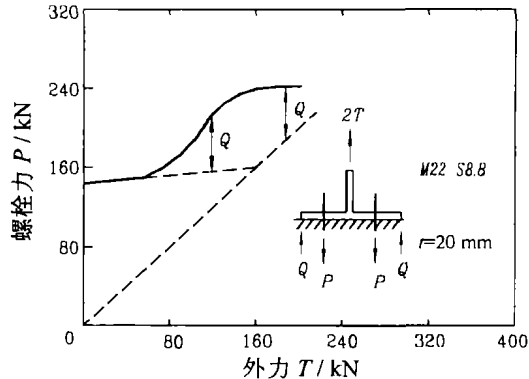


图3 螺栓力的变化(翼缘板厚 $t = 20$ mm)

撬开作用受翼缘和紧固件的刚性性质影响, 如果 T 形连接中的翼缘有足够刚性, 翼缘的弯曲变形与高强度螺栓的伸长相比很小, 产生的撬开力亦很小, 连接高强度螺栓的受力接近于受拉的单个螺栓。图2即是此种情况下外力 T 与螺栓拉力 P 的试验曲线。T 形连接中的最大弯矩发生在腹板和翼缘交界处, 翼缘可看作承受纯弯曲。

当 T 形连接采用更柔性的翼缘板时, 翼缘板的弯曲变形将产生较大的撬开力。此种情况下外力 T 与螺栓拉力 P 的关系曲线如图3所示。初始阶段, 外加荷载使 T 形翼缘板和底板之间的接触压力减小, 直至在螺栓轴线上发生脱离。此间, 由于撬力 Q 的作用, 曲线偏离原直线位置, 使 P 迅速增大。但当螺栓和 T 形连接板的翼缘屈服后, 螺栓拉力的增加随着外加荷载的增加逐渐趋缓。由于塑流的影响, 撬力在外荷载水平下得到减少。但直到破坏为止, 撬力会始终存在。

以上的讨论中, T 形连接件是假定连接在刚性底板上的, 然而实际情况中的 T 形连接件不是连于刚性底板, 如钢框架结构中梁-柱连接节点, 传递拉力的 T 形连接板的腹板连接到梁的受拉翼缘上, 而 T 形连接板的翼缘连接到柱的翼缘上, 如图4所示。如果框架柱的翼缘没有足够的刚度, 撬开力的位置会从脚线 AB 和 CD 移到 AD 和 BC 边。在这种情况下, 撬力的大小和位置是由 T 形连接件翼缘和柱的翼缘的相对刚度控制。通过变化 T 形连接板翼缘厚度而进行的试验表明: 当 T 形连接板翼缘刚度增加, 撬力趋向于集中在靠近 T 形断面边角的面积上。当 T 形连接板翼缘的刚度大于柱翼缘的刚度很多时, T 形断面形成刚性底板, 并且由于柱翼缘变形而产生撬力。

又如当吊杆有多于两行平行于腹板的紧固件时, 由于翼缘的柔性, 外侧一行螺栓的作用会急剧降低。试验表明, 在连接加载的初期, 外侧螺栓的应变最初稍有降低或保持常数, 几乎全部荷载是

由内侧螺栓承担,在外侧螺栓参与受力之前内侧螺栓几乎已发生破坏。通过增加翼缘抗弯刚度能使外侧螺栓的作用增加。这说明除非翼缘特别厚或者设置如图5所示的加劲肋,外侧螺栓对承受拉力并不是很有效。

1.3 预拉力的影响

高强度螺栓的板间压紧力使受拉时T形连接板不容易产生严重的变形,撬力作用也有所缓和。但只要外拉力 $T > 0.5P_0$

以后,将出现不可忽视的撬力。外拉力的极限值由 N_u 下降到 N_u' (图6)。如果要完全忽略撬力的影响,办法之一是使 $T \leq 0.5P_0$;办法之二是增加端板刚度,分析认为宜使端板厚度 $t \geq 2d$ 。后者往往很难作到,可以用设置加劲肋(图5)来代替。

图7是高强度螺栓当采用不同的预拉力时,螺栓拉力与外荷载的试验曲线。虽然在相当低的荷载下增加预拉力(即板件间的压紧力)会减少撬开作用,但是在接近极限荷载的荷载水平下其撬开作用大致一样。即预拉力对极限荷载没有重大影响,极限时的撬开作用主要是受螺栓变形能力的影响。

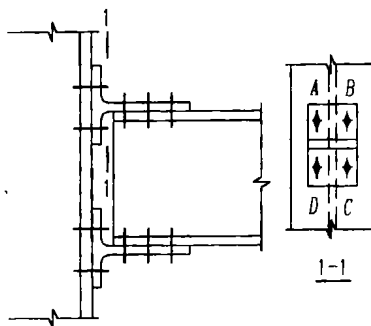


图4 梁-柱连接

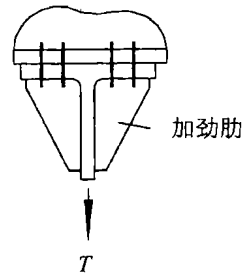


图5 设置加劲肋的T形连接

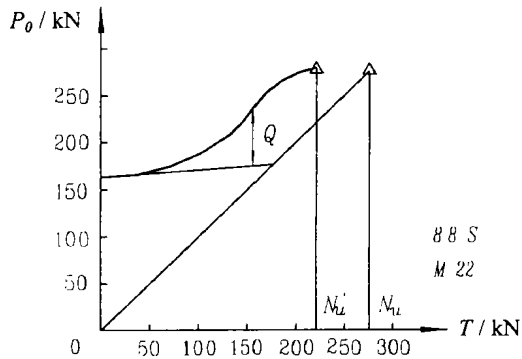


图6 撬力对外拉力极限值的影响

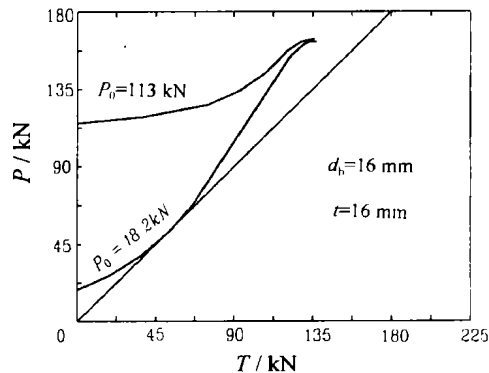


图7 不同预拉力时螺栓拉力与外荷载的关系曲线

2 撬力的计算

因为撬力的大小与连接板的厚度及螺栓直径有关,其准确值较难计算。Struik 等人曾提出一种确定撬力的近似方法。简化模型见于图8。假定T形连接板的翼缘栓接在刚性底板上, Q 为极限状态时的撬力, P 为螺栓的极限抗拉荷载, M 为1-1截面弯矩。螺栓轴线上由撬力 Q 引起的弯矩取为 $\alpha\delta M$ 。其中 δ 是2-2截面净面积与1-1截面面积之比; α 是2-2截面单位宽度弯矩和1-1截面单位宽度弯矩之比。平衡式如下:

$$\begin{cases} (1 + \alpha\delta)M = Tb \\ Qa = \alpha\delta M \\ P = T + Q \end{cases} \quad (6)$$

1-1截面极限抗弯能力: $M = \frac{1}{4} l_e t^2 f_y \quad (7)$

由此可推出: $P = T \left[1 + \frac{\delta\alpha b}{(1 + \delta\alpha)a} \right] \quad (8)$

$$t = \sqrt{\frac{4Pab}{l_e f_y [a + \alpha\delta(a + b)]}} \quad (9)$$

此公式得出的答案与实验值相比,过高地估计了撬力。这主要是由力的实际分布与模型假定之间的差别造成的。模型假定螺栓拉力 P 作用在螺栓中心线上,而实际的螺栓力 P 是作用在螺栓轴线和螺栓头边缘之间的某个位置,使 b 减小而直接改变了 Q ,如图 9。因此,Struik 等人以修正后的 $b' = b - d/2, a' = a + d/2$ 代替原 $b、a$ 值,这样算得的结果与实验比较符合。同时,实验还发现,当 $a \leq b$ 时,模型假定较合理。因此通常限制: $a \leq 1.25b$ 。设计时,取 P_u 代入(8)式求出的容许最大值,再代入(9)式算出板厚 t ,这种计算方法对紧固于刚性底板的连接是有效的。

欧洲钢结构协会和英国桥梁规范 BS5400 采用了一种简单的计算方法,其基本思路是上述方法的简化。如图 10,螺栓的强度条件为:

$$P = T + Q \leq A_e f_t \quad (10)$$

板的极限强度条件为:

$$M_1 = Qa \leq \frac{1}{4}(l_e - d)t^2 \cdot f \quad (11)$$

$$M_2 = Pb - Q(a + b) = Tb - Qa \leq \frac{1}{4}l_e t^2 f \quad (12)$$

同时限制: $a \leq 1.25b, l_e \leq 2b \tan 60^\circ$ 。

计算时,先假定 $Q(\geq 0.1T)$,由(10)算出螺栓直径,然后用(11)(12)算出板厚 t ,取较大值。

美国 AISC 规范对撬力的计算也作了具体的规定。假定翼缘与腹板交界面上出现塑性铰,见图 11。根据力的平衡条件:

$$T + Q = P \quad (13)$$

$$Tb - Qa = M = M_p \quad (14)$$

用(13)式除以(14)式,得撬开比:

$$\frac{Q}{T} = \frac{b - M_p/P}{a + M_p/P} \quad (15)$$

因为, $M_p = \frac{1}{4}l_e t^2 f_y, P_u = f_u Ab$, 所以

$$\frac{M_p}{P} = \frac{1}{4}l_e t^2 f_y \frac{1}{f_u Ab} = \frac{f_y}{f_u} \frac{l_e t^2}{\pi d^2} = \beta \frac{l_e t^2}{d^2} \quad (16)$$

式中: $\beta = \frac{f_y}{f_u}$ 为参数; f_y 为翼缘材料的屈服强度; f_u 为螺栓材料的极限抗拉强度; l_e 为 T 形连接板上从属于每个螺栓的翼缘宽度(图 8); d 为螺栓直径。

将(3.11)代入(3.10)得:

$$\frac{Q}{T} = \frac{bd^2 - \beta l_e t^2}{ad^2 + \beta l_e t^2} \quad (17)$$

通过对四只 A325 及 A490 螺栓穿过翼缘栓接在一起的两个碳素钢 T 形连接板进行的实验和分析研究,获得了经验值:

A325(相当于 8.8 级)螺栓连接达到极限荷载时的撬开比:

$$\frac{Q}{T} = \frac{100bd^2 - 18l_e t^2}{70ad^2 + 21l_e t^2}$$

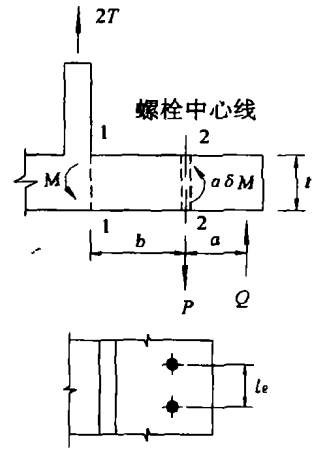


图 8 Struik 等人提出的简化模型

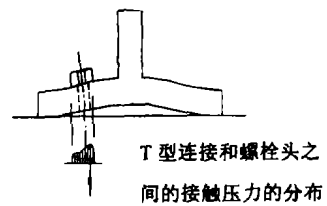


图 9 螺栓力 P 的实际分布

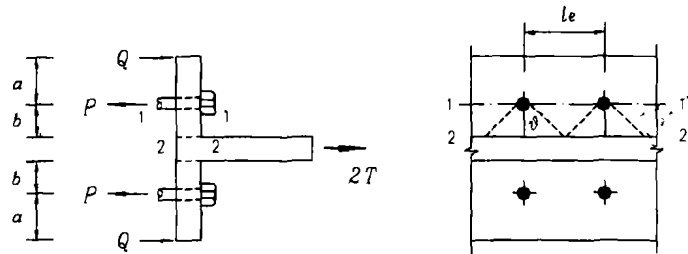


图 10 T 形连接

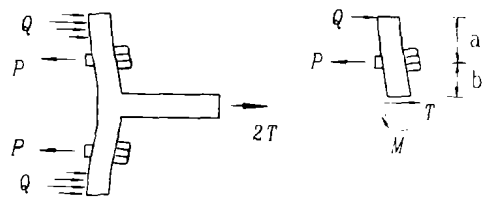


图 11 T 形连接受力示意

A490(相当于 10.9 级)螺栓连接达到极限荷载时的撬开比:

$$\frac{Q}{T} = \frac{100bd^2 - 14l_e t^2}{62ad^2 + 21l_e t^2}$$

这两个公式只适用于各自对应螺栓的情况,不同螺栓与板材的组合需要不同的公式。

我国现行《钢结构设计规范》GBJ17-88 以及新修订的《钢结构设计规范》GB50017 中,没有直接计算撬力的规定。在这两本规范中,将普通螺栓的抗拉强度设计值取为相应螺栓材料强度设计值的 0.8 倍来考虑撬开作用的影响,相当于考虑了撬力 $Q = 0.25T$,即取 $f_t^b = 0.8f$, f 为螺栓材料的抗拉强度设计值。

3 各国规范设计值比较

我国新修订的国家标准《钢结构设计规范》GB50017 对高强度螺栓的抗拉承载力设计值取为:

$$N_t^b = 0.8P_0 \quad (18)$$

式中: P_0 为高强度螺栓的预拉力。规范没有考虑撬力对螺栓抗拉强度的影响。限制每个高强度螺栓在杆轴方向的外拉力设计值 N_t^b 不大于 $0.8P_0$,是为了避免当外拉力过大时螺栓松弛并保留一定的余量。

美国房屋钢结构设计规范 LRFD-1999 取高强度螺栓的抗拉设计强度为:

$$\varphi F_t A_b \quad (19)$$

式中: φ 为抗力系数, $\varphi = 0.75$; F_t 为高强度螺栓的抗拉强度; A_b 为螺栓的截面面积。

美国规范取恒载分项系数为 $\gamma_G = 1.2$,与我国规范相同,但活荷载分项系数 γ_Q 取为 1.6,大于我国规范 1.4 的规定值。

欧洲钢结构规范 EC3-1993 对摩擦型高强度螺栓的抗拉承载力按下式验算:

$$F_{t, Sd} \leq F_{t, Rd} = \frac{0.9f_{ub}A_s}{\gamma_{Mb}} \quad (20)$$

式中: f_{ub} 为高强度螺栓的抗拉强度; γ_{Mb} 为抗力分项系数,取为 1.25。

欧洲规范的荷载分项系数为恒载 $\gamma_G = 1.35$,活载分项系数 $\gamma_Q = 1.5$ 。

表 1 为我国现行国家标准与美国规范及欧洲规范中高强度螺栓抗拉承载力的比较。

表 1 高强度螺栓抗拉连接承载力比较

直 径	8.8 级			10.9 级		
	中国	美国	欧洲	中国	美国	欧洲
M16	64	73	90	80	91	113
M20	100	114	141	124	143	176
M22	120	141	174	152	176	216
M24	140	164	203	180	205	254
M27	184	214	265	232	267	331
M30	224	261	323	284	326	404

从表中可以看出,我国规范规定的高强度螺栓抗拉承载力明显低于国外标准,说明由于对抗拉连接高强度螺栓的工作性能研究不足,我国的设计计算方法过于保守,有待于进一步对螺栓连接性能的试验研究。

4 结论及建议

从以上分析可以看出,抗拉连接高强度螺栓的承载力与很多因素如连接板翼缘和螺栓的刚性性质、撬力、预拉力等都有关。当翼缘刚度大时,撬力很小,翼缘承受纯曲率弯曲。而当翼缘刚度较

小时,翼缘弯曲变形造成明显的撬力,增大了螺栓力,从而使整个连接过早破坏,连接的极限承载力降低。

与抗拉式连接相连的底板如果没有足够刚性,撬力的位置会发生改变,其大小由T形连接板翼缘和底板的相对刚度控制。在这种情况下所得到的荷载是高度复杂的,这对整个连接的承载能力会有影响。

此外,在多排螺栓连接中,外侧螺栓在加载初期几乎不参与工作,只有通过增加翼缘的抗弯刚度才能使外侧螺栓发挥作用。

高强度螺栓的预拉力 P_0 会影响连接的撬力。 P_0 越低,在加载中撬力越大,撬力作用越明显。但按照现有的研究资料,预拉力对抗拉连接螺栓的极限破坏力影响不大。

考虑到这种撬开作用,各种设计方法被提出来。Struik 等人建议的方法中包括了影响撬开作用的主要参数,它不限于特殊的螺栓-板组合,较具适用性;而美国规范采用的公式只适用于特殊的板和螺栓组合。Struik 等人提供的方法是计算极限荷载时的情况。值得注意的是,当 $\alpha = 1.0$ 时,Struik 等的方法与欧洲规范的方法是一致的,尽管之后的设计步骤有差别。中国规范中没有具体的撬力计算公式,只是在螺栓抗拉强度设计值公式中引入系数 0.8 来考虑撬力,设计应用较方便。

我国对抗拉连接高强度螺栓的工作性能研究不足,现行《钢结构设计规范》GB 50017 规定的高强度螺栓抗拉承载力计算方法过于保守,其设计值远低于国外标准,建议在对螺栓连接性能作进一步试验研究的基础上,适当提高高强度螺栓的抗拉承载力设计值。

参考文献:

- [1] 陈绍蕃. 钢结构设计原理(第二版)[M]. 北京, 科学出版社, 2000.
- [2] 魏明钟. 钢结构设计新规范应用讲评[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1991.
- [3] J. W. 费雪, J. H. A. 斯特鲁克. 螺栓和铆钉连接设计准则指南[M]. 北京: 人民交通出版社, 1983.
- [4] American Institute of Steel Construction, INC, Load and Resistance Factor Design Specification for Structural Steel Building [S]. 1999.
- [5] European Committee for Standardisation, Eurocode 3: Design of Steel Structures. Part 1.1 General Rules for Buildings[S]. 1993.
- [6] 卢铁鹰, 等. 钢结构[M]. 重庆: 西南师范大学出版社, 1993.

Behavior and Design of High – strength Bolt in Tensile Connection

CHENG Rui, CUI Jia, LONG Li – ping

(Faculty of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: The tensile strength of high strength bolt is affected by many factors, including prying force. The prying force can result in the increment of bolt force, for which the connection failed ahead of time. Several methods are presented for calculating the prying force. In the China's "Code for Design of Steel Structure" (GB50017), there is no formula for calculation of prying force and a factor of 0.8 is considered in formula for tensile strength of bolt for taking the prying force into account. It is proposed that the design value of tensile resistance for high strength bolt should be increased.

Keywords: high strength bolt; tensile connection; prying force; design method