

粘接连接钢构件的试验研究与理论分析

徐桂根 聂建国

侯建群*

(清华大学 土木工程系 北京 100084)

(清华大学 建筑设计研究院 北京 100084)

摘要: 粘接作为一种重要的连接方式,在结构加固中已经得到较广泛的应用。为研究粘接连接钢结构的力学性能,进行了一系列试验,包括5个轴心受压短柱,5个压弯柱,1根梁。介绍了试验方案和主要试验结果,分析了粘接对于试件力学性能的影响,又从理论上对粘接连接的传力形式进行了讨论,并得出了相关结论。

关键词: 钢结构构件 粘接连接 试验研究 理论分析 力学性能

EXPERIMENTAL STUDY AND THEORETICAL ANALYSIS ON THE STEEL MEMBERS JOINTED BY CEMENTATION

Xu Guigen Nie Jianguo

(Dept of C. E., Tsinghua University Beijing 100084)

Hou Jianqun

(Architectural Design & Research Institute of Tsinghua University Beijing 100084)

Abstract: Adhesive joint as an important method of joint, has been widely used in the construction. To study the mechanical behavior of the steel members jointed by cementation, five short columns under axial loads, five columns under eccentric loads, one beam under moment load are tested. The test schemes and the main test results are introduced. It is analyzed that the effect of cementation on the mechanical behavior, ultimate bearing capacity, failure modes and deformation distribution. Differences between adhesive failure and structural failure are told. And some concerned conclusions are drawn.

Keywords: steel member adhesive joint experimental investigation theoretical analysis mechanical behavior

目前,钢结构在建筑领域已得到越来越广泛的应用。对于钢结构的连接方式,一般来说都是采用焊接或螺栓连接。这两种连接方式虽然都有着各自的优点,但也存在各自的不足。钢结构现场连接工作量较大,焊接时有残余应力及残余变形的问题,而螺栓连接由于开孔的缘故,也会出现应力分布不均匀的问题,并且两者在现场施工时都要占用一定工期。当今结构胶^[1]在建筑业中有了越来越广泛的应用,胶接的形式在很多行业中也越来越多地被采用。本文试图探讨把胶接用于钢结构的连接。

与普通的焊接和螺栓连接相比^[2],胶粘连接的优势有:

1) 胶粘连接的结构或构件,其应力分布比较均匀,从而使连接部位具有更高的强度; 2) 可以连接差别比较大的构件,如不同材质、形状、壁厚等; 3) 不削弱结构或者使结构发生翘曲变形,不影响材料的材质; 4) 可以简化工艺,不需要太高的加工精度,也减少了焊接的后处理; 5) 可以减少构件的数量,减轻结构自重; 6) 可降低成本,节省能源,缩短工期,提高效益。

由于以上优势,使得胶接作为钢结构一种新的连接方式成为可能,目前,胶接技术在航天产业中已经得到较为广泛的应用^[1],但在建筑业中主要用于混凝土结构的修补或补强。在钢结构的安装中却没有使用或研究的先例。鉴于此,我们对胶接连接钢结构构件进行了试验研究,并且建立了分

析模型并加以分析,从而得出了一些相关结论。

1 试验概况

在本次试验中,研究粘接连接钢结构构件的受力性能,胶接构件在各种荷载形式(轴压、压弯、纯弯)下的承载力、破坏形式、粘胶区的应变分布以及变形特点等,同时与非胶接构件进行对比。并据此对粘胶构件的作用形式进行分析并得到相关结论,主要是胶接构件强度与刚度方面的性质,考虑到粘胶方面参数的影响,同时比较粘结连接钢结构构件与等强连接构件受力性能方面的差异,检验钢结构构件粘结连接的可靠性。

本次试验主要由三部分组成,分别是轴心受力状态下的短柱(称为轴压柱,记为 ZYZ),同时承受轴力和弯矩作用的短柱(称为压弯柱,记为 YWZ),梁(记为 CWL)。其中以研究柱的连接受力性能为主。共有轴压试件 5 个,压弯试件 5 个,其中分别有 1 个为对比试件(整个试件为一整体,中间没有连接),其他 4 个变化的参数为粘胶的长度和胶层的厚度。梁试件 1 个,未进行对比试验。试件及有关参数如表 1 所列。

* 侯建群同志为第二作者。

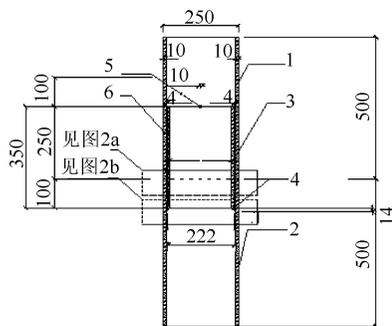
第一作者:徐桂根 男 1979年9月出生 博士研究生

收稿日期:2005-02-20

表 1 试验试件

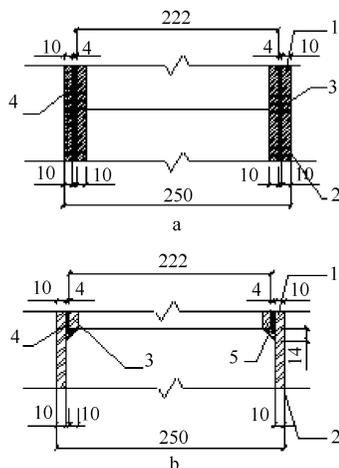
| 试件编号 | 壁厚/mm | 粘胶厚度/mm | 内部连接钢管长度/mm | 备注 |
|-------|-------|---------|-------------|--|
| ZYZ1 | 10 | 0 | 0 | 对比试件 |
| ZYZ2 | 10 | 2 | 350 | 轴压柱, 截面 250mm×250mm, 加载时轴心受压 |
| ZYZ3 | 10 | 4 | 350 | |
| ZYZ4 | 10 | 2 | 400 | |
| ZYZ5 | 10 | 4 | 400 | |
| YWZ1 | 10 | 0 | 0 | 对比试件 |
| YWZ2 | 10 | 2 | 350 | 压弯柱, 截面 250mm×250mm, 偏心受压, 偏心距 350mm |
| YWZ3 | 10 | 4 | 350 | |
| YWZ4 | 10 | 2 | 400 | |
| YWZ5 | 10 | 4 | 400 | |
| CWL1* | 10 | 4 | 600 | 纯弯梁, 截面 250mm×250mm, 梁长 2.5m, 试验时两点(间距 1.0m)加载, 研究跨中纯弯段的受力情形 |

图 1 给出了轴压柱的试件详图, 图 2 为连接部位的详图, 压弯柱试件构造的不同点在于两端分别有一短梁, 以施加偏心荷载。试件在构件厂加工后运到实验室灌胶, 一周之后即进行试验。试验时根据需要布置了应变片, 以此观测粘胶部位的应变, 同时用力传感器量测相应的荷载值。



1—外部受力钢柱(上柱); 2—外部受力钢柱(下柱); 3—内部连接钢柱; 4—焊缝; 5—灌胶孔; 6—粘剂

图 1 轴压试验试件



1—外部受力钢柱(上柱); 2—外部受力钢柱(下柱); 3—内部连接钢柱; 4—粘剂; 5—焊缝

图 2 试件粘接连接

2 主要试验结果

在试验中, 研究了粘接连接的钢结构构件的受力性能, 胶接钢构件在各种荷载形式(轴压、压弯、纯弯)下的承载力、破坏形式、粘胶区的应变分布以及变形特点等, 同时与非胶接构件进行对比。主要量测数据有, 应变随荷载增加和位置的变化, 以及胶体出现开裂到最终退出工作的荷载值, 以此分析粘接连接的结果。图 3 中给出一组较为典型的荷载—应变曲线, 在表 2~表 4 中分别列出了轴压、压弯、受弯试件的特征荷载值。

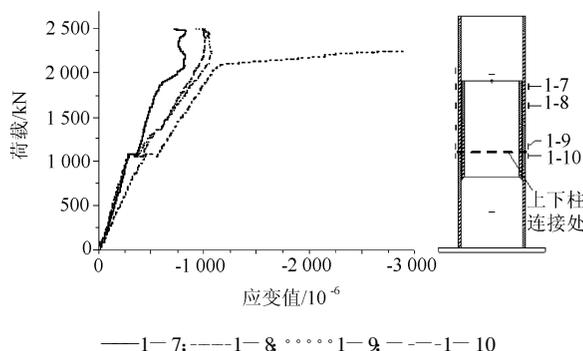


图 3 轴压柱 ZYZ5 应变—荷载曲线(右图为对应测点位置)

在图 3 中, 4 条曲线分别是外柱同一侧面中轴线处沿粘胶方向分布的 4 个应变片所量测的应变曲线。从曲线中可以看出, 由于粘胶传递荷载的作用, 沿粘胶方向轴力是变化的, 当胶体发生破坏时, 应变就会有突变, 以此可以判断粘胶是否破坏, 并研究粘胶的作用。另外, 胶体破坏后, 轴压柱的荷载可以继续增加, 直至钢材屈服。

表 2 轴压试验特征荷载

| 试件编号 | ZYZ1 | ZYZ2 | ZYZ3 | ZYZ4 | ZYZ5 |
|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 粘胶厚度/mm | 0 | 2 | 4 | 2 | 4 |
| 连接柱长度/mm | 0 | 350 | 350 | 450 | 450 |
| 胶体开裂荷载(较明显)/kN | — | 650 | 1 061 | 764 | 1 134 |
| 极限荷载/kN | 2 583 | 2 530 | 2 720 | 2 593 | 2 603 |

表 3 轴压试验特征荷载

| 试件编号 | YWZ1 | YWZ2 | YWZ3 | YWZ4 | YWZ5 |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 粘胶厚度/mm | 0 | 2 | 4 | 2 | 4 |
| 连接柱长度/mm | 0 | 350 | 350 | 450 | 450 |
| 胶体开始明显开裂荷载/kN | — | 59.5 | 85.4 | 103.2 | 106.6 |
| 胶失效前后荷载/kN | — | 209.4 | 221.8 | 209.2 | 268.5 |
| 极限荷载/kN | 433.3 | 379.1 | 299.1 | 469.1 | 374.9 |

从表 2~表 4 中可以看出, 一般在荷载较低的情况下, 胶体开始开裂, 此时应变和位移都会发生突变, 但此后荷载可以继续增加, 直至试件破坏, 这与使用中的要求有区别。粘胶的破坏强度远低于使用手册中给出的数值, 而且, 粘胶破坏时的荷载离试件的极限荷载还有比较大的差距, 表明粘接连接在钢结构构件的连接中显得不可靠。以下将从理论角度进行分析, 并得出一些结论。

表 4 纯弯试验特征荷载

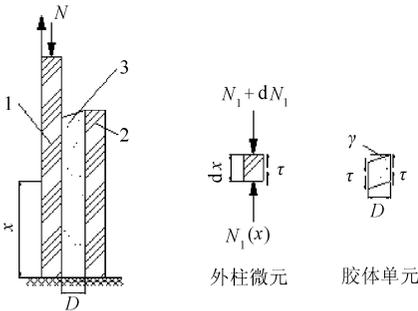
| 试件编号 | 胶体开始明显开裂荷载 /kN | 胶失效前后荷载 /kN | 极限荷载 /kN | 理论极限荷载 /kN |
|------|----------------|----------------|----------|------------|
| CWLI | 29.0 | 160.2 153.1 | 455.9 | 602.2 |

3 理论分析

从前面的试验结果可以看出,胶体一般都会较早地退出工作,下面从理论上分析其工作模式及原因。

3.1 粘胶在传力上的作用

为了能够较好地说明粘胶在传力上的作用机理,考虑轴压情形,模型如图 4 所示,并采用如下假设:1)忽略胶体对柱受力的偏心影响(柱四周受剪有力偶矩的作用),认为柱处于轴心受力状态;2)忽略胶体的受压模量,认为胶体仅通过受剪传递荷载;3)胶体是线弹性材料,不考虑非线性因素;4)胶的剪应力沿柱周均匀分布,不考虑外柱内周长与内柱下周长的差别。



1—外柱;2—内柱;3—胶体
图 4 轴压模型计算简图

有关参数除图 4 上所标明的外,还有外柱截面积 A_1 ,内柱截面积 A_2 ,胶体周长 c ,钢材弹性模量 E ,胶体剪切模量 G (均为常数)。另外,柱的应变 ϵ_1, ϵ_2 及胶体剪应变 γ 均为 x 的函数。

对外柱单元:

$$dN_1 = c\tau dx \quad (1)$$

$$\epsilon_1 = \frac{N_1}{EA_1} \quad (2)$$

对内柱单元:

$$dN_2 = -c\tau dx \quad (3)$$

$$\epsilon_2 = \frac{N_2}{EA_2} \quad (4)$$

对于胶体

$$\tau = G\gamma \quad (5)$$

由变形协调有:

$$\int_0^x \epsilon_1 dx - \int_0^x \epsilon_2 dx = D\gamma \quad (6)$$

由边界条件:

$$N_1(D) = N \quad N_2(D) = 0 \quad (7)$$

对式(6)两边求导可得:

$$\epsilon_1 - \epsilon_2 = D \frac{d\gamma}{dx}, \text{ 且有 } \gamma(0) = 0 \quad (8)$$

再求导,将式(1)~式(5)代入可得:

$$\frac{d^2\gamma}{dx^2} - \frac{Gc}{ED} \left(\frac{1}{A_1} + \frac{1}{A_2} \right) \gamma = 0 \quad (9)$$

同时,在 $x=1$ 时满足边界条件。

$$\text{记 } \frac{Gc}{ED} \left(\frac{1}{A_1} + \frac{1}{A_2} \right) = \lambda^2, \text{ 考虑 } \gamma(0)=0, \text{ 有:}$$

$$\gamma = k(e^{\lambda x} - e^{-\lambda x}) \quad (k \text{ 为待定系数}) \quad (10)$$

考虑式(7),将其代入式(8)可求出:

$$k = \frac{N}{EA_1 D} \times \frac{1}{\lambda(e^{\lambda} + e^{-\lambda})} \quad (11)$$

综合考虑剪应力 τ 的表达式为:

$$\tau = \frac{GN}{EA_1 D} \times \frac{(e^{\lambda x} - e^{-\lambda x})}{\lambda(e^{\lambda} + e^{-\lambda})}$$

$$\text{其中, } \lambda^2 = \frac{Gc}{ED} \left(\frac{1}{A_1} + \frac{1}{A_2} \right)$$

下面仅考虑 D 与 l 的变化对最大剪应力的影响, D 用 λ 来考虑。

$$\text{若记 } m = \frac{A_2}{(A_1 + A_2)c}, \text{ 则 } \tau_m = Nm\lambda \frac{(e^{\lambda} - e^{-\lambda})}{(e^{\lambda} + e^{-\lambda})}$$

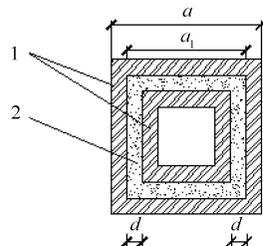
可以看出, τ_m 随 λ 和 l 的增大而增大,其中 λ 的影响更为明显。另外,还可以看出,粘胶长度越大,胶层越薄,上部粘胶越容易破坏。

再看胶层传递的轴力,由积分至柱下端,胶传递轴力 $N_2 = N \frac{A_2}{A_1 + A_2} \left(1 - \frac{2}{e^{\lambda} + e^{-\lambda}} \right)$,粘胶长度越大,胶层越薄,传递的力越大。这与我们的直观想象是一致的。利用这些推导,还可以进行其他量的求解。

3.2 泊松效应对粘胶作用的影响

上述分析中,仅考虑粘胶为单向受力的单元,但在实际试验中,由于泊松效应,外柱受压时有向外扩张的趋势,这势必对胶体产生垂直于胶结面的拉力,对于粘胶构件来说,显然是不利的。

下面以简单的计算对此进行说明,计算模型截面尺寸如图 5。



1—钢柱;2—胶体

图 5 粘胶柱截面简图

在计算中,为简化起见,有如下假设:1)胶体模量相对于钢材很小,因此忽略胶体对外柱的横向约束作用;2)计算截面取在粘胶区的最上部,这里内柱轴力很小,忽略不计,同时不考虑其横向变形。

设外柱由于轴力引起的应变为 ϵ (设钢材的泊松比 $\nu = 0.30$),根据广义虎克定律可以得到由此引起的横向应变为

0.3ϵ 。而内柱没有横向应变,内外柱之间将产生大小为 $0.15a_1\epsilon$ 的距离,如果胶体不被拉脱,将在横向产生的拉应变值为 $\frac{0.15a_1}{d}\epsilon$ 。对于试验试件, a_1 为 230mm, d 分别为 2mm 和 4mm,那么胶体中对应的应变值分别是钢材压应变值的 17.3 倍和 8.6 倍。

可以看出,即使考虑了内柱的变形和胶体对于外柱的约束作用,在胶体当中还是会产生很大的拉应变,从这个角度可以较好地解释胶体开裂前的荷载很低,而计算出的剪应变也很小。

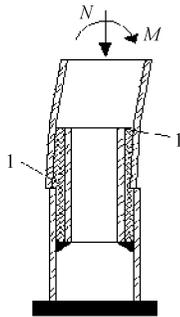
如果要避免泊松效应对于粘胶柱的不利影响,可以考虑将外柱设计为开口构件,但又会给构件的制作及灌胶施工等带来困难。

3.3 粘胶后结构的协同作用

前面考虑了粘胶钢结构中的胶通过受剪传递荷载的方式。但是,仅能受剪,胶还不能在结构中发挥自己的连接作用,还必须考虑胶与整个结构的协同作用,在此仅仅针对试验中的情形作一些定性分析。

对于轴压试件,可以认为在粘胶之后,由于柱在横向的变形比较小,胶体因为柱横向变形而受到的剥离力不是很大,因而能够较好地协同作用,从而能比较好地传递力与荷载,直至胶体因为剪切强度不够而发生破坏。

对于压弯试件,情形就大不相同了。因为受弯时,结构会发生挠曲变形,而粘胶试件内部连接构件的刚度相对较大,胶所传递的荷载不足以使其发生与主要受力构件相一致的变形,这样,胶体所连接的金属就有分离或挤紧的趋势。在分离的部位,胶就比较容易发生剥离破坏(图 6)。



1-剥离区
图 6 受弯时金属与胶之间的剥离作用

通过分析可以看出,粘胶之后,胶体仅能在沿粘胶方向上与结构较好地协同作用,而当其他方向上有附加作用时,粘胶结构常常易于被破坏,在涉及这样的结构时,要考虑这方面的因素。

另外,通过前面的试验可以看出,粘胶结构与一般结构的破坏形式有着明显的不同,在胶体破坏、承载力有所下降之后,整个结构凭借构件之间的接触和摩擦作用,仍能承受

继续增加的荷载。

所以,粘胶结构的破坏有两种,一为粘胶连接破坏,一为材料破坏,一般先是胶体的破坏。在此有一个判断结构失效条件的问题。若以胶体破坏为极限状态,此时结构的荷载仍然很低,虽然胶体破坏后结构的变形有一突增,但这一数值并不是很大,并且,从试验的曲线看,胶体破坏之后到结构达到最终承载力之间,能表现出一定的延性。这样就会有很大的承载能力被浪费。

显然,在实际应用中,仅能考虑胶体破坏作为结构破坏的标志。从试验来看,这表现为脆性,这也是结构连接所不希望出现的破坏形式。必须有一种合理的形式,能够避免粘胶的过早破坏。

4 结论

通过试验研究,可以得到如下结论:1)在较低的荷载下,粘胶用于钢结构的连接,在荷载的传递和协同作用上,可以起到一定的作用;2)因胶的强度不足引起的破坏表现为脆性,结构的受力状态会发生突变,如果不是单一受拉的状态,结构仍可继续作用;3)粘胶连接的存在,对结构的极限承载力并没有显著的影响,但是胶体破坏后结构变形增大;4)粘胶的厚度和长度对胶体开裂的荷载有明显影响,粘胶厚度越大,长度越大,胶体开裂越晚;5)试验表明,粘胶破坏大都为界面破坏,选用更合适的胶种,或者进行表面处理,显得较为重要;6)相对于轴向受压,弯矩作用时的变形对于粘胶更为不利,因此,粘胶连接应尽量位于弯矩较小的位置。

5 有待进一步研究的问题

尽管粘胶用于钢结构的连接在强度上可以满足建筑中的使用要求,但仍有些问题(力学和结构以外)需要进一步讨论:1)胶的破坏一般表现为脆性,在建筑中使用应谨慎;2)一般来说,建筑物要保证 50 年的使用寿命,而胶作为一种有机物,必须考虑其耐久性的问题;3)建筑中一般要考虑防火,而胶体的耐热性一般不是很好,在本试验中所使用的爱牢达结构胶(型号 XH130A/B)在温度达到 80°C 时,胶体就会变软,在建筑中使用这种连接时,需要着重考虑结构的耐热耐火性;4)粘胶达到要求强度比较缓慢,需要几天时间,这与现代社会追求高效率不甚相符,因此,需要有速凝高强的结构胶;5)胶接过程中,要求构件洁净,在施工中应注意保证;6)检验方法尚有待改善。

参考文献

- 李子东. 实用粘胶技术. 上海: 新时代出版社, 1992
- 李明智. 胶接新技术. 上海: 上海科学技术出版社, 1987
- 贺曼罗. 建筑结构胶回顾与发展. 粘接, 1999(增刊)
- 李双全. 建筑结构胶粘剂的研究和应用. 工业建筑, 1994(9)

欢迎订阅《工业建筑》杂志, 邮发代号: 2-825