

DOI:10.11918/202205014

常温与高温下高强钢 T 型连接受拉性能试验

强旭红, 卢 强, 姜 旭, 陈武龙

(同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘 要: 为研究高温下高强钢 T 型连接的受拉性能, 对 11 个常温下和 17 个高温下的 T 型连接试件进行拉伸试验, 其中包括 300、400、500、600 °C 等多种高温环境下 Q355、Q460、Q690、S690、S960 等不同强度钢材的 T 型连接, 通过试验得到各 T 型连接的初始拉伸刚度、抗拉承载力、破坏模式等。将试验结果与欧洲规范和中国规程的计算结果进行对比, 以期校验规范对于高强钢 T 型连接的适用性, 并分析翼缘强度、翼缘厚度、螺栓强度、螺栓直径、螺栓位置以及高温温度等多种因素对 T 型连接受拉性能的影响。常温与高温下的试验结果表明: 欧洲规范和中国规程对高温下高强钢 T 型连接初始拉伸刚度的估算偏于危险, 而对抗拉承载力而言偏于保守; 与普通钢 T 型连接相比, 薄翼缘高强钢 T 型连接能在保持承载能力相当的情况下, 具有更好的变形能力; 当螺栓离腹板距离和翼缘距离的比值小于 1 时, 增大螺栓离腹板的距离会显著降低 T 型连接的初始拉伸刚度和抗拉承载力; 螺栓直径的增加将增大 T 型连接初始拉伸刚度值, 但螺栓强度对初始拉伸刚度影响不大。本文研究成果可为高强钢端板连接节点及其等效 T 型连接的抗火设计提供试验依据, 为相关规范修订提供参考。

关键词: 高强钢; T 型连接; 拉伸试验; 受拉性能; 高温下

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2023)09-0122-13

Tensile tests of high strength steel T-stubs at ambient temperature and high temperature

QIANG Xuhong, LU Qiang, JIANG Xu, CHEN Wulong

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: To investigate the tensile properties of high strength steel T-stubs at high temperature, we carried out tensile tests on 11 T-stubs at ambient temperature and 17 T-stubs at high temperature, including T-stubs made of Q355, Q460, Q690, S690, and S960 with different strengths under various high temperature conditions, i. e. 300, 400, 500, and 600 °C. The initial tensile stiffness, tensile capacity, and failure modes of T-stubs under different test conditions were obtained. The test results were compared with the theoretical calculation results of European and Chinese codes to verify the applicability of the codes for high strength steel T-stubs. Moreover, the effects of flange strength, flange thickness, bolt strength, bolt diameter, bolt position, and high temperature on the tensile properties of T-stubs were analyzed. Results showed that the European code and Chinese code overestimated the initial tensile stiffness of T-stubs at high temperature, and were conservative in terms of tensile load-bearing capacity. Compared with ordinary steel T-stubs, the high strength steel T-stubs with thin-walled flange had better deformation capacity while maintaining the same load-bearing capacity. When the ratio of the distance between bolt and web to the distance between bolt and flange was less than 1, increasing the distance between the bolt and the web could significantly reduce the initial tensile stiffness and tensile load-bearing capacity of the T-stubs. The increase in the bolt diameter improved the initial tensile stiffness of T-stubs, while the bolt strength had little influence on the initial tensile stiffness. The research results can provide experimental basis for the fire-resistance design of high strength steel end-plate connections and their equivalent T-stubs, which are reference for the revision of relevant design codes.

Keywords: high strength steel; T-stub; tensile test; tensile property; at high temperature

高强钢节点的研究和设计中, T 型连接可用于模拟分析梁柱端板连接节点受拉区的力学性能, 并且模拟节点可能发生的破坏模式。目前, 欧洲钢结

构设计规范 EN 1993-1-8^[1] 已经引入 T 型连接模型, 对常温下端板连接节点的强度、刚度和转动能力做出明确规定, 并且在此设计规范的基础上增加补

收稿日期: 2022-05-05; 录用日期: 2022-07-11; 网络首发日期: 2022-08-09

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1235.T.20220809.0934.002.html>

基金项目: 国家重点研发计划重点专项(2020YFD1100403, 2017YFB0304701); 国家自然科学基金(51408150)

作者简介: 强旭红(1984—), 女, 副教授, 博士生导师

通信作者: 姜 旭, jiangxu@tongji.edu.cn

充条款 EN 1993 - 1 - 12^[2],使其适用范围涵盖了 S460 ~ S700 高强钢(屈服强度为 460 ~ 700 MPa),中国现行规范 GB 50017—2017《钢结构设计标准》^[3]只适用于 Q460 钢及以下强度等级的钢材, JGJ/T 483—2020《高强钢结构设计标准》^[4]对钢材强度不低于 460 MPa 的钢结构设计做出了规定。此外,美国、加拿大和日本等国家和地区相继发布了高强度结构用钢设计规范,或是在原有基础上增添了相关条文。虽然规范将高强结构钢引入结构设计,但设计理论和计算方法大多是在普通钢结构设计的基础上,套用普通钢的计算公式,通过改变公式系数等方法来计算高强钢结构的力学特性。对于世界范围内现行的主要钢结构设计规范,钢材在高温下力学性能的退化通常使用高温力学性能折减系数来表征,对于高强钢结构在高温下的力学性能的相关条文是基于普通钢的试验研究结果,缺乏更加深入的理论与试验研究,并没有相应的针对方法进行修正^[5-6]。这样设计的高强钢端板连接节点在常温 and 高温下的力学性能是否经济合理,需要通过试验以及理论研究进行更进一步的论证。

目前,国内外对于高强钢结构节点力学性能的研究较为有限。Piluso 等^[7]提出一种能有效预测 T 型连接下极限状态塑性变形能力的理论模型,并对试件进行拉伸试验分析论证模型的合理性。Heidarpour 等^[8]基于简支梁理论和高温材料折减,提出 T 型连接破坏模式、极限荷载和屈服荷载等力学性能指标可以由端板弯曲刚度和螺栓轴向刚度的

相对关系得到。陈士哲等^[9-10]提出了考虑螺栓抗弯刚度的 T 型连接初始刚度的计算方法。武念铎^[11]研究了考虑螺栓抗弯刚度情况下不同参数对 T 型连接初始刚度的影响,使其更具有包括高强钢结构的普适性。孙飞飞等^[12]将平齐式端板连接分为全普通钢、仅端板高强钢和全高强钢 3 种节点进行试验,试验结果表明高强钢柱翼缘会削弱节点的转动能力。

基于目前国内外学者对 T 型连接力学性能的研究现状,本文以梁柱外伸式端板连接节点为研究对象,以 T 型连接作为等效替代组件,完成了常温 and 高温下高强钢 T 型连接的拉伸试验,探究不同因素对 T 型连接的抗拉承载力、初始拉伸刚度及破坏模式的影响规律,为进一步研究端板连接节点在高温下的力学性能与优化设计方法奠定基础。同时,结合欧洲钢结构设计规范 EN 1993 - 1 - 8^[1]以及中国《端板式半刚性连接钢结构技术规程》^[13]计算得到的理论结果,研究各因素的影响规律以及验证规范的适用情况,并提出相应设计建议。

1 试验研究

1.1 试件设计

实际工程的 T 型连接节点见图 1(a),试件示意图见图 1(b),其中 e 为螺栓中心到翼缘边缘的距离, d 为螺栓中心到焊脚的距离, t_w 为腹板厚度, t_f 为翼缘厚度, b 为翼缘宽度。上下腹板长宽尺寸统一采用 170 mm × 100 mm,厚度与翼缘相等。

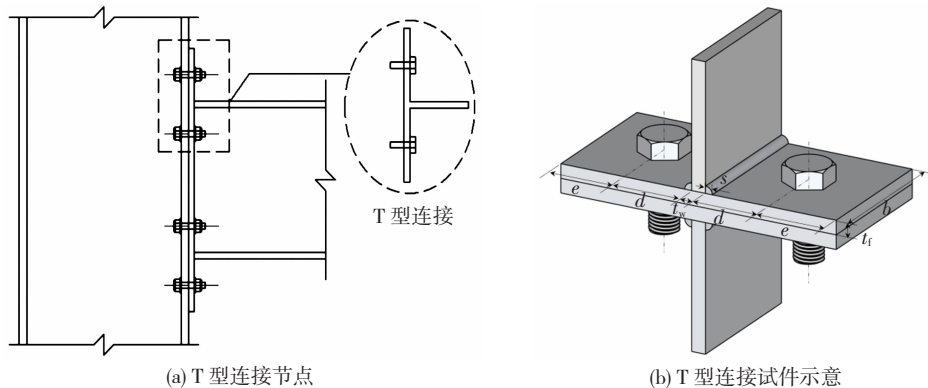


图1 T型连接

Fig. 1 T-stub diagram

欧洲钢结构设计规范 EN 1993 - 1 - 8^[1]对 T 型连接的设计尺寸做出如下建议:

$$m = d - 0.8s \quad (1)$$

$$n = \min(e, 1.25m) \quad (2)$$

$$n/m \leq 1.25 \quad (3)$$

式中: s 为焊脚尺寸, e 为螺栓中心到翼缘边缘的距离, d 为螺栓中心到焊脚的距离。

T 型连接试件的螺栓中心到翼缘边和焊脚距离之比 e/d 值的范围在 0.63 ~ 1.60, 围绕在规范建议值附近。实际工程中,端板连接节点的破坏模式主要是端板破坏,因此在确定高强钢端板厚度的时候,为保证端板首先失效,根据欧洲规范提供的计算公式,设计端板连接的承载力略低于其他组件,由此得到 Q690 的端板厚度为 14 mm,对应 T 型连接的翼缘

厚度 t_f 也为 14 mm。其余强度等级的 T 型连接翼缘厚度则按照等承载力的原则通过计算得到,即保证设计的其他 T 型连接试件与 14 mm 厚 Q690 钢 T 型连接具有近似的抗拉承载力,所有试件采用统一焊脚尺寸 8 mm。因为螺栓直径 d_e 与翼缘厚度 t_f 的比

值 d_e/t_f 会对 T 型连接的各项力学性能产生显著的影响^[14],所以在设计试件时,同时考虑了螺栓直径在内的其他因素。所有试件按试验温度可分为常温试验和高温试验,试件的编号、选材、温度、尺寸等信息详见表 1。

表 1 T 型连接试件统计表

Tab. 1 Detailed information of T-stub specimens

试件编号	钢材强度	温度/℃	t_f /mm	e /mm	d /mm	螺栓直径及强度等级
TEMP1 - 300	Q690	300	14	50	50	M20 10.9 级
TEMP1 - 400	Q690	400	14	50	50	M20 10.9 级
TEMP1 - 500	Q690	500	14	50	50	M20 10.9 级
TEMP2 - 300	S960	300	12	50	50	M20 10.9 级
TEMP2 - 400	S960	400	12	50	50	M20 10.9 级
TEMP2 - 500	S960	500	12	50	50	M20 10.9 级
STA - A	Q690	20	14	50	50	M20 10.9 级
ST1 - A	Q355	20	20	50	50	M20 10.9 级
ST2 - A	Q460	20	16	50	50	M20 10.9 级
ST3 - A	S960	20	12	50	50	M20 10.9 级
STA - 600	Q690	600	14	50	50	M20 10.9 级
ST1 - 600	Q355	600	20	50	50	M20 10.9 级
ST2 - 600	Q460	600	16	50	50	M20 10.9 级
ST3 - 600	S960	600	12	50	50	M20 10.9 级
BST - A	Q690	20	14	50	50	M20 8.8 级
BST - 600	Q690	600	14	50	50	M20 8.8 级
ED1 - A	S690	20	14	80	50	M20 10.9 级
ED2 - A	S690	20	14	70	50	M20 10.9 级
ED3 - A	S690	20	14	50	70	M20 10.9 级
ED4 - A	S690	20	14	50	80	M20 10.9 级
ED1 - 600	S690	600	14	80	50	M20 10.9 级
ED2 - 600	S690	600	14	70	50	M20 10.9 级
ED3 - 600	S690	600	14	50	70	M20 10.9 级
ED4 - 600	S690	600	14	50	80	M20 10.9 级
D1 - A	Q690	20	14	50	50	M16 10.9 级
D2 - A	Q690	20	14	50	50	M22 10.9 级
D1 - 600	Q690	600	14	50	50	M16 10.9 级
D2 - 600	Q690	600	14	50	50	M22 10.9 级

注:A/300/400/500/600 为试验温度,A 为常温 20 ℃;TEMP1/2 表示不同高温温度的试件;STA/1/2/3 表示不同钢材强度和翼缘厚度的试件;ED1/2/3/4 表示不同螺栓位置的试件;D1/2 表示不同螺栓直径的试件;BST 表示不同螺栓强度的试件。

1.2 加载方案

试验在同济大学土木工程防灾国家重点实验室的“新三思”高温力学试验机上进行,通过支架导轨上安装的高温电炉加热 T 型连接试件进行高温下试验。试验前,将试件固定在试验机夹持端两端,然后将试件升温到目标高温温度。在炉内升温时,保证整个试件受热均匀并达到预期试验温度后持温 15 min,再开始加载。加载时,两端夹持后通过上端液压拉伸加载,同时在加载端自动记录加载位移,试

件的变形通过 DIC 非接触式光学变形测量系统测量。进行常温试验时只需将电炉沿前后滑开,加载过程与高温试验相同。具体试验装置见图 2。

试验通过位移加载控制,加载速率为 1.5 mm/min。常温试验时加载至翼缘或是螺栓破坏时停止,高温试验时由于炉内空间有限(见图 2(b)),为防止螺栓崩裂造成炉内壁损坏,一方面降低加载速率至 1.0 mm/min,另一方面当加载到荷载-位移曲线下降段时即停止加载,同时设置 40 mm 加载位移为控制上限。

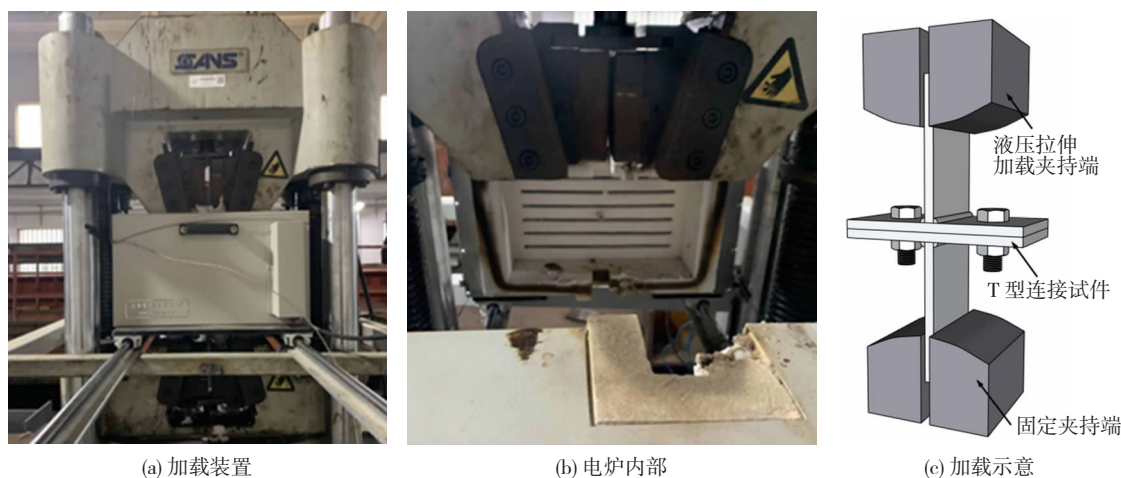


图2 试验装置

Fig. 2 Test device

2 试验结果分析

2.1 常温试验

根据试验结果可得到常温下T型连接各试件的荷载-位移曲线,按照不同试验影响因素分组进行对比,见图3。

从图3的荷载-位移曲线可以得到试件的初始拉伸刚度 $k_{\text{ini,exp}}$ 和抗拉承载力 $F_{\text{T,exp}}$,初始拉伸刚度

取荷载-位移曲线的初始切线模量,抗拉承载力取荷载-位移曲线最高点对应的荷载。欧洲规范将T型连接的破坏模式分为3种:破坏模式1——T型连接翼缘完全屈服;破坏模式2——T型连接翼缘屈服的同时螺栓被拉断失效,破坏模式3——仅螺栓被拉断失效。试验试件的破坏模式和破坏形态以及根据欧洲规范预测的破坏模式等结果见表2。

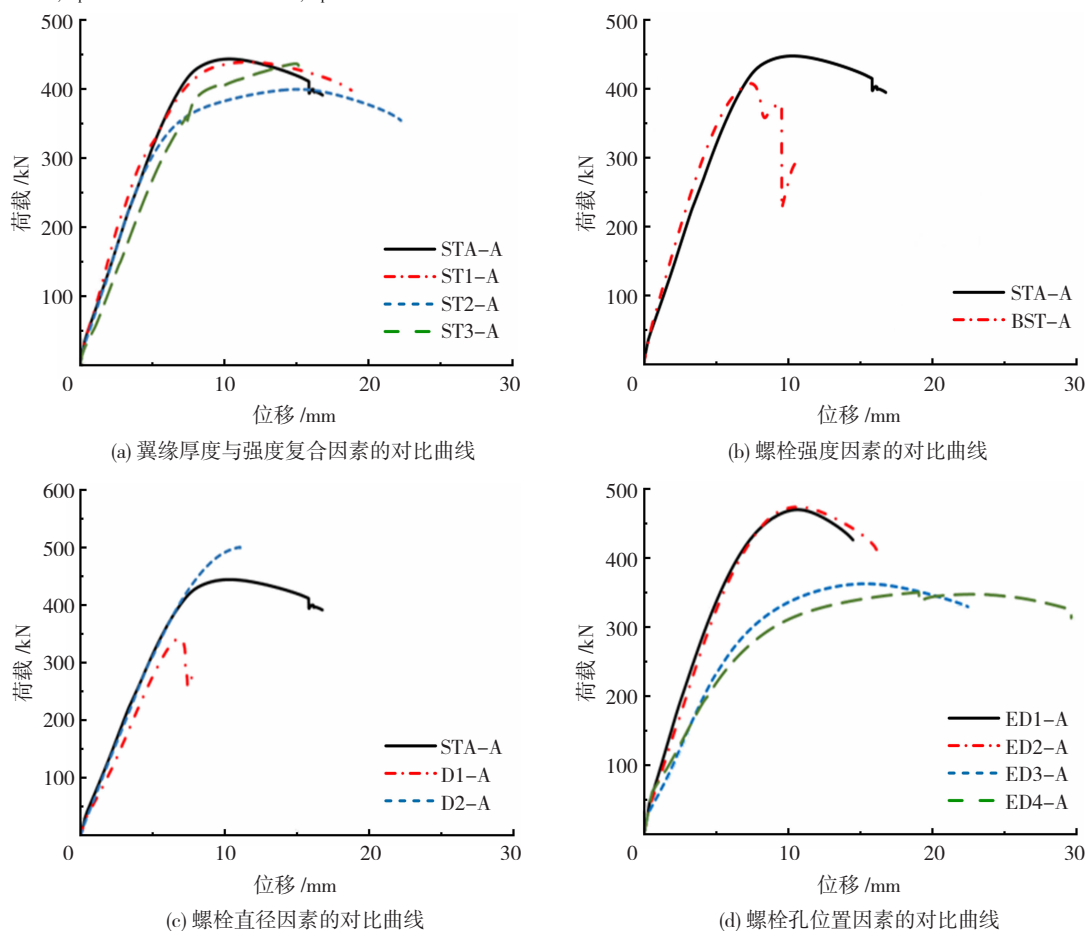


图3 常温下T型连接的荷载-位移曲线

Fig. 3 Load-displacement curves of T-stubs at ambient temperature

表 2 常温下 T 型连接受拉性能统计表

Tab. 2 Tensile properties of T-stubs at ambient temperature

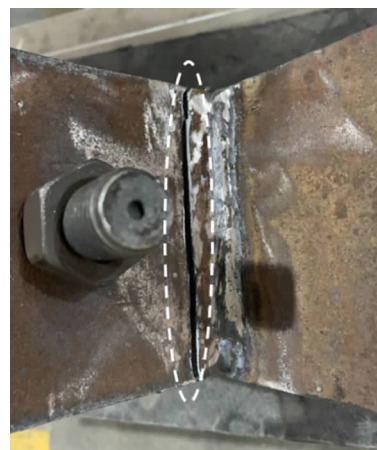
试件编号	螺栓断裂/ 弯曲	翼缘与腹板 交界处屈服	翼缘断裂	螺纹滑移	试验破坏 模式	欧洲规范预 测破坏模式	$k_{ini,exp}/$ ($N \cdot mm^{-1}$)	$F_{T,exp}/$ kN
STA-A	是	是	否	否	2	2	118 936	446.53
ST1-A	是	是	否	否	2	2	141 782	442.06
ST2-A	是	是	否	否	2	2	128 612	402.25
ST3-A	是	是	是	否	2	2	110 940	439.53
BST-A	是	是	否	是	2	2	120 246	406.65
D1-A	是	是	否	是	2	2	95 364	343.58
D2-A	是	是	否	否	2	2	129 412	502.82
ED1-A	是	是	否	否	2	2	126 616	471.29
ED2-A	是	是	否	否	2	2	125 790	475.23
ED3-A	是	是	否	否	2	1	85 002	363.64
ED4-A	是	是	否	否	2	1	65 356	351.18



(a) ST1-A 螺栓破坏



(b) D1-A 螺纹滑移



(c) ST3-A 翼缘断裂



(d) ED4-A 翼缘与腹板交界处屈服

图 4 常温下 T 型连接试件破坏形态

Fig. 4 Failure modes of T-stubs at ambient temperature

由表 2 和图 4 可知,常温下试验得到的各试件的破坏模式均为破坏模式 2,即翼缘与腹板交界处出现屈服线,同时螺栓也发生破坏。BST-A 和 D1-A 使用了不同批次的 M20 8.8 级和 M16 10.9 级螺栓,螺栓表面进行了发黑处理,削弱了螺栓与螺母接触面

的摩擦作用,导致在加载过程中发生了螺纹滑移。

欧洲钢结构设计规范 EN 1993-1-8^[1] 建议计算 3 种破坏模式下 T 型连接的抗拉承载力,以其中最小值对应的破坏模式作为预测结果。经试验验证,多数情况下欧洲规范能准确地预测常温下高强

钢 T 型连接的破坏模式。然而,对螺栓离焊缝距离 d 值较大的高强度 T 型连接,如 ED3-A 和 ED4-A,欧洲规范预测结果与试验结果不同,这是因为欧洲规范对两种模式的理论抗拉承载力的界定差距比较小,在 10% 以内。值得注意的是此时欧洲规范对高

强度 T 型连接破坏模式的预测是偏于不安全的。

2.2 高温试验

根据试验结果,可得到高温下 T 型连接各试件的荷载-位移曲线,按照试验影响因素分组进行对比见图 5。

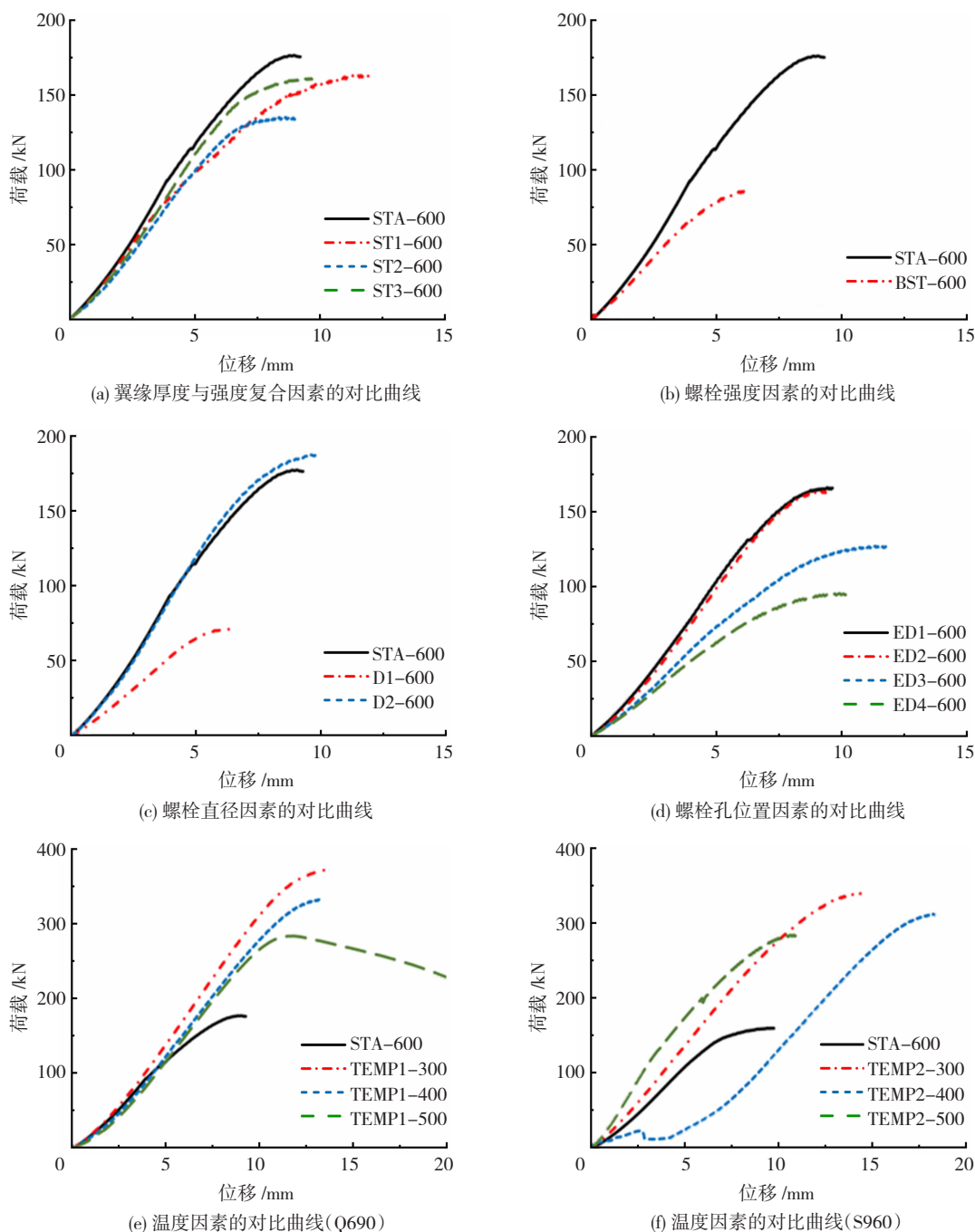


图 5 高温下 T 型连接的荷载-位移曲线

Fig. 5 Load-displacement curves of T-stubs at high temperature

需要说明的是,TEMP1-500 作为首个加载的试件,加载到螺栓断裂,出于对试验炉的保护目的,后续试件未加载到螺栓断裂。另外,TEMP2-400 在加载初期发生了夹持端滑移。从图中的荷载-位移曲线分析得到试件的初始拉伸刚度 $k_{\text{ini,exp}}$ 和抗拉承载力 $F_{T,\text{exp}}$,试验破坏情况以及根据欧洲钢结构设

计规范 EN 1993-1-8^[1] 预测的破坏模式见表 3。

出于对试验炉保护的需要,试验均只加载到荷载-位移曲线下降段初期,因此加载后的试件基本全部表现为翼缘与腹板交界处出现屈服线和螺栓弯曲,见图 6。

表 3 高温下 T 型连接受拉性能统计表

Tab. 3 Tensile properties of T-stubs at high temperature

试件编号	螺栓弯曲	翼缘与腹板 交界处屈服	翼缘断裂	螺纹滑移	试验破 坏模式	欧洲规范预 测破坏模式	$k_{ini,exp}/$ ($N \cdot mm^{-1}$)	$F_{T,exp}/$ kN
STA-600	是	是	否	否	2	2	36 879	159.65
ST1-600	是	是	否	否	2	2	47 090	164.95
ST2-600	是	是	否	否	2	2	42 684	135.84
ST3-600	是	是	否	否	2	2	36 562	161.99
BST-600	是	是	否	否	2	2	35 128	87.14
D1-600	是	是	否	否	2	2	27 414	71.22
D2-600	是	是	否	否	2	2	42 226	188.04
ED1-600	是	是	否	否	2	2	36 428	166.64
ED2-600	是	是	否	否	2	2	35 794	164.30
ED3-600	是	是	否	否	2	2	30 386	127.41
ED4-600	是	是	否	否	2	2	20 360	95.73
TEMP1-300	是	是	否	否	2	2	43 920	373.64
TEMP1-400	是	是	否	否	2	2	35 242	333.25
TEMP1-500	是	是	是	否	2	2	31 488	284.00
TEMP2-300	是	是	否	否	2	2	38 478	342.32
TEMP2-400	是	是	否	否	2	2	34 248	314.50
TEMP2-500	是	是	否	否	2	2	53 760	286.63

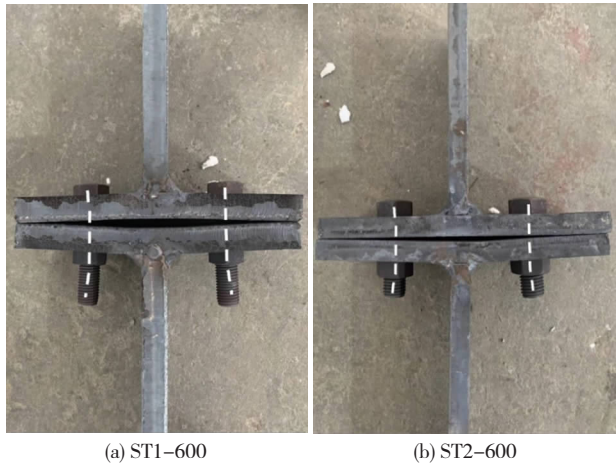


图 6 高温下 T 型连接的失效形态

由表 3 和图 6 可知, 高温下各试件的破坏模式依然均为破坏模式 2, 但变形较常温试验有明显区别: 在螺栓弯曲程度相近的情况下, 翼缘塑性发展并不完全, 弯曲变形更小。即在翼缘和螺栓的强弱对比中, 由于高温环境的存在, 高强螺栓的强度折减更大, 螺栓成为 T 型连接承载的薄弱环节, 试件整体破坏具有向破坏模式 3 发展的趋势。依据欧洲钢结构设计规范 EN 1993-1-8^[1]得到的理论预测结果与试验结果一致, 这表明欧洲规范对于高强钢 T 型连接破坏模式的预测方法在高温环境下也同样适用。

3 影响因素分析

针对 T 型连接每种破坏模式, 欧洲钢结构设计规范 EN 1993-1-8^[1]同时给出了相应的抗拉承载力和初始拉伸刚度计算方法。计算过程中涉及到常温和高温下 Q355、Q460、Q690、S690 和 S960 钢以及高强螺栓的相关力学性能。其中常温下 Q355、Q460 和 Q690 钢力学性能由拉伸试验确定, 见表 4。高温下 Q355、Q460 和 Q690 钢的力学性能分别由文献[15-17]确定。

表 4 常温下 Q355、Q460 和 Q690 力学性能实测值

Tab. 4 Measured mechanical properties of Q355, Q460, and Q690 at ambient temperature MPa

材料	f_y	f_u	E
Q355	458	587	211 203
Q460	581	671	214 290
Q690	723	990	201 778

常温及高温下 S690 和 S960 钢的力学性能分别采用文献[5-6]的试验数据。高强螺栓常温和高温下的力学性能数据则参照文献[18-19]。对高温下材性进行折减, 并按照欧洲钢结构设计规范 EN 1993-1-8^[1]以及中国《端板式半刚性连接钢结构技术规程》^[13]分别计算得到 T 型连接的初始拉伸刚度($k_{ini,EN}$ 、 $k_{ini,CECS}$)和抗拉承载力($F_{T,EN}$ 、 $F_{T,CECS}$), 计算结果和对应试验结果详见表 5。

表 5 T 型连接受拉性能规范计算结果与试验结果的比较

Tab. 5 Comparison of tensile properties of T-stubs between code predictions and test results

试件编号	$k_{ini,exp}/(N \cdot mm^{-1})$	$k_{ini,EN}/(N \cdot mm^{-1})$	$k_{ini,CECS}/(N \cdot mm^{-1})$	$F_{T,exp}/kN$	$F_{T,EN}/kN$	$F_{T,CECS}/kN$
STA - A	118 936	435 379	241 933	446. 53	391. 69	391. 69
ST1 - A	141 782	1 205 126	725 120	442. 06	417. 02	417. 02
ST2 - A	128 612	656 120	364 511	402. 25	380. 63	380. 63
ST3 - A	110 940	271 651	150 930	439. 53	370. 22	370. 22
BST - A	120 246	435 479	241 933	406. 65	340. 97	340. 97
D1 - A	95 364	435 479	241 933	343. 58	288. 29	288. 29
D2 - A	129 412	435 479	241 933	502. 82	459. 84	459. 84
ED1 - A	126 616	435 479	241 933	471. 29	415. 22	415. 22
ED2 - A	125 790	435 479	241 933	475. 23	426. 62	426. 62
ED3 - A	85 002	182 880	101 600	363. 64	337. 47	337. 47
ED4 - A	65 356	132 162	73 423	351. 18	318. 97	318. 97
STA - 600	36 879	158 206	87 892	159. 65	116. 69	116. 69
ST1 - 600	47 090	665 280	369 600	164. 95	100. 79	100. 79
ST2 - 600	42 684	198 619	110 343	135. 84	93. 76	93. 76
ST3 - 600	36 562	92 391	51 328	161. 99	112. 23	112. 23
BST - 600	35 128	158 206	87 892	87. 14	89. 58	89. 58
D1 - 600	27 414	158 206	87 892	71. 22	78. 36	78. 36
D2 - 600	42 226	158 206	87 892	188. 04	114. 86	114. 86
ED1 - 600	36 428	158 206	87 892	166. 64	105. 47	105. 47
ED2 - 600	35 794	158 206	87 892	164. 30	104. 05	104. 05
ED3 - 600	30 386	68 580	38 100	127. 41	89. 73	89. 73
ED4 - 600	20 360	49 561	27 534	95. 73	85. 64	85. 64
TEMP1 - 300	43 920	356 814	198 230	373. 64	362. 60	362. 60
TEMP1 - 400	35 242	329 597	183 109	333. 25	294. 49	294. 49
TEMP1 - 500	31 488	291 321	161 845	284. 00	183. 26	183. 26
TEMP2 - 300	38 478	228 161	126 756	342. 32	292. 61	292. 61
TEMP2 - 400	34 248	204 218	113 454	314. 50	253. 44	253. 44
TEMP2 - 500	53 760	151 825	84 347	286. 63	172. 08	172. 08

3.1 高温温度的影响

为探究高温温度对 T 型连接受拉性能的影响,分别选取 Q690 组试件: STA - A、TEMP1 - 300、TEMP1 - 400、TEMP1 - 500、STA - 600; S960 组试件: ST3 - A、TEMP2 - 300、TEMP2 - 400、TEMP2 - 500 和 ST3 - 600。以常温(20 ℃)下的试验数据为基准,即分别为 STA - A、ST3 - A 的数据,将高强度 Q690 和超高强度 S960 制作的 T 型连接在不同高温温度下的试验值归一化处理。得到 T 型连接初始拉伸刚度和抗拉承载力折减系数的变化曲线见图 7。

由图 7 可知,随着温度升高,T 型连接的初始拉伸刚度和抗拉承载力都出现下降趋势,其中 500 ℃下 S960 试件由于夹持端发生滑移,导致初始拉伸刚

度值略高。初始拉伸刚度下降段集中在 20 ~ 300 ℃范围,在 300 ~ 600 ℃随温度升高初始拉伸刚度下降并不明显,整体维持在一个相对稳定的区间。而抗拉承载力在 500 ℃之前随温度升高呈类线性下降,500 ~ 600 ℃开始快速下降,整体曲线走势与相应材料极限强度随温度的折减变化相似,见图 7(b)。与高温温度相关的 T 型连接试件受拉性能的规范计算结果与试验结果的比值见表 6。

由表 5、6 可知:1) 根据欧洲钢结构设计规范 EN 1993 - 1 - 8^[1] 和中国《端板式半刚性连接钢结构技术规程》^[13] 计算得到的常温下 T 型连接初始拉伸刚度会显著高于真实情况,是偏于不安全的。高温下直接通过温度折减材性的方式,简单套用两种规范

进行计算则会进一步放大这种差距,其原因在于欧洲规范和中国规程给出的 T 型连接初始拉伸刚度计算公式是基于理想的固接梁模型推导而来,结果与所使用翼缘的弹性模量的大小成正相关。然而钢材随温度变化的弹性模量并不能代表整个 T 型连接随温度变化的初始拉伸刚度,这点也可以从图 7 的刚度折减曲线对比看出;2) 两个规范都能在保有一定强度储备的情况下较为准确地算得 T 型连接的抗拉承载力,且温度越高剩余的强度储备越高。

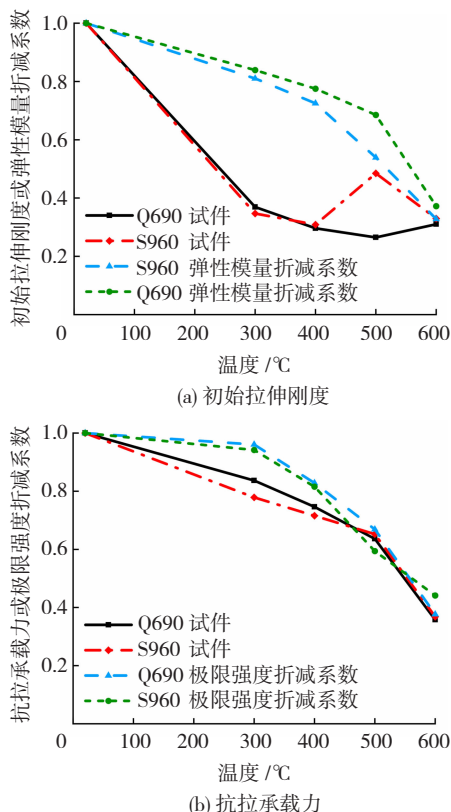


图 7 T 型连接受拉性能随温度的变化曲线

Fig. 7 Variation curves of tensile properties of T-stubs with temperature

表 6 与温度相关的 T 型连接规范计算结果与试验结果的比值

Tab. 6 Ratio of code predictions to test results of T-stubs considering temperature

试件编号	$k_{\text{ini,EN}}/$ $k_{\text{ini,exp}}$	$k_{\text{ini,CECS}}/$ $k_{\text{ini,exp}}$	$F_{\text{T,EN}}/$ $F_{\text{T,exp}}$	$F_{\text{T,CECS}}/$ $F_{\text{T,exp}}$
STA - A	3.66	2.03	0.88	0.88
TEMP1 - 300	8.12	4.51	0.97	0.97
TEMP1 - 400	9.35	5.20	0.88	0.88
TEMP1 - 500	9.25	5.14	0.65	0.65
STA - 600	4.29	2.38	0.73	0.73
ST3 - A	2.45	1.36	0.84	0.84
TEMP2 - 300	5.93	3.29	0.85	0.85
TEMP2 - 400	5.96	3.31	0.81	0.81
TEMP2 - 500	2.82	1.57	0.60	0.60
ST3 - 600	2.53	1.40	0.69	0.69

3.2 翼缘厚度与强度的复合影响

翼缘厚度是影响 T 型连接初始拉伸刚度的重要因素^[20-21],在保证计算得到的试件抗拉承载力相当的情况下,使其翼缘厚度和强度变化,相关试件为 STA - A、ST1 - A、ST2 - A、ST3 - A、STA - 600、ST1 - 600、ST2 - 600 和 ST3 - 600,同时以 Q355 的试验数据为基准,将其他试验值归一化处理,得到初始拉伸刚度和抗拉承载力系数的变化曲线见图 8。

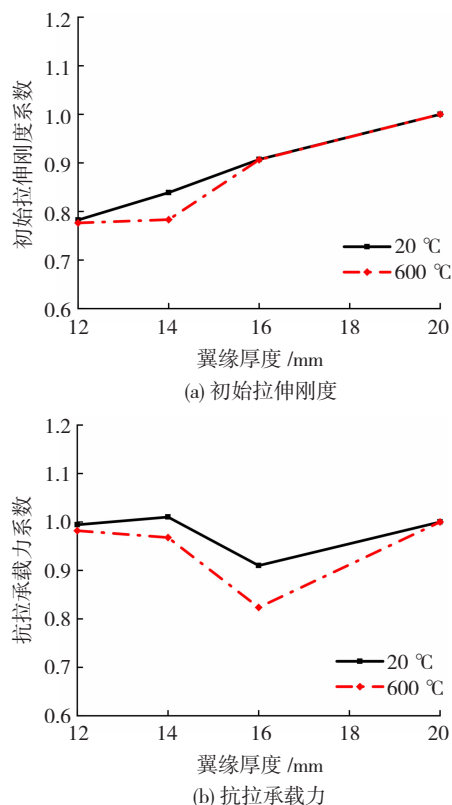


图 8 T 型连接受拉性能随翼缘厚度的变化曲线

Fig. 8 Variation curves of tensile properties of T-stubs with flange thickness

由图 8(a) 可知,随着翼缘厚度增加,常温 and 高温下 T 型连接的初始拉伸刚度会增加,原因是翼缘的弯曲变形是整个 T 型连接拉伸位移的重要组成部分,当翼缘厚度增加,其弯曲变形变小,初始拉伸刚度增加。由图 8(b) 可知,常温下 T 型连接的实际抗拉承载力差距均控制在 10% 以内,而在高温环境下其抗拉承载力波动变大,这一点主要受两方面因素影响:一是每种钢材抗火性能不同,导致高温下材料性能出现差异;二是高温环境下,T 型连接作用的撬力大小及分布发生改变,这导致抗拉承载力进一步变化。与翼缘厚度和强度相关的 T 型连接试件受拉性能的规范计算结果与试验结果的比值见表 7。

以翼缘 12 mm 厚的 ST3 系列试件为基准,分别将常温 and 高温下试验和规范计算得到的初始拉伸刚度值进行归一化处理,得到与翼缘厚度因素相关的 T 型连接初始拉伸刚度发展系数,见图 9。由表 5、7

和图 9 可知:1)试验得到的 T 型连接初始拉伸刚度值随厚度增加较为平缓,翼缘厚度从 12 mm 增加到 20 mm,初始拉伸刚度值大约增加了 30%;2)两个规范计算方式显著高估了板件厚度的影响作用,且板件厚度越大,通过规范计算得到的理论值更加偏离试验值。这主要是因为两个规范中初始拉伸刚度的计算式与板件厚度 t 的三次方成正比,因此其数值对于板件厚度变化非常敏感;3)两个规范对于常温 T 型连接的抗拉承载力留有 10% 左右的强度储备,在高温环境下,规范计算结果的强度储备则会扩大至 30% 左右,略偏于保守。

表 7 与翼缘厚度和强度相关的 T 型连接规范
计算结果与试验结果的比值

Tab. 7 Ratio of code predictions to test results of T-stubs
considering flange thickness and strength

试件编号	$k_{\text{ini,EN}}/$	$k_{\text{ini,CECS}}/$	$F_{\text{T,EN}}/$	$F_{\text{T,CECS}}/$
	$k_{\text{ini,exp}}$	$k_{\text{ini,exp}}$	$F_{\text{T,exp}}$	$F_{\text{T,exp}}$
STA - A	3.66	2.03	0.88	0.88
ST1 - A	8.50	5.11	0.94	0.94
ST2 - A	5.10	2.83	0.95	0.95
ST3 - A	2.45	1.36	0.84	0.84
STA - 600	4.29	2.38	0.73	0.73
ST1 - 600	14.13	7.85	0.61	0.61
ST2 - 600	4.65	2.59	0.69	0.69
ST3 - 600	2.53	1.40	0.69	0.69

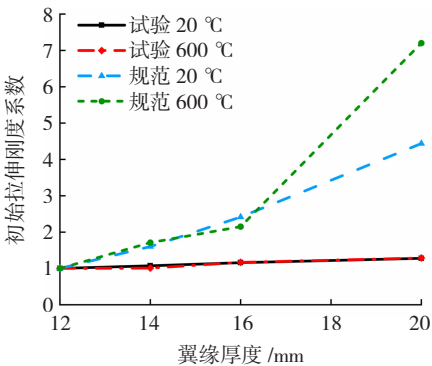


图 9 T 型连接初始拉伸刚度发展曲线

Fig. 9 Initial tensile stiffness development curves of T-stubs

3.3 螺栓位置的影响

不同螺栓位置的 T 型连接试件为 STA - A、ED1 - A、ED2 - A、ED3 - A、ED4 - A、STA - 600、ED1 - 600、ED2 - 600、ED3 - 600 和 ED4 - 600,其中 STA - A 和 STA - 600 使用了与其他 S690 试件名义屈服强度相同的 Q690 钢。以试验值最小的 ED4 系列的试验数据为基准,将其他试验结果归一化处理,得到初始拉伸刚度和抗拉承载力系数的变化曲线见图 10。

由表 5 和图 10 可知,在保持 T 型连接螺栓离腹板的距离 d 不变的情况下,增大螺栓离翼缘的边距 e ,其常温和高温下初始拉伸刚度和抗拉承载力并无

大幅度变化。而在保持 T 型连接螺栓离翼缘边距 e 不变的情况下,增大螺栓离腹板的距离 d ,其初始拉伸刚度和抗拉承载力会显著下降,而温度对抗拉承载力下降幅度的影响更大。综合来看,当 e/d 值大于 1 时,常温和高温下 T 型连接的初始拉伸刚度和抗拉承载力变化不大;当 e/d 值小于 1 时,随着 e/d 值的减小,常温和高温下 T 型连接的初始拉伸刚度和抗拉承载力也会显著减小。与螺栓位置相关的 T 型连接试件受拉性能的规范计算结果与试验结果的比值见表 8。

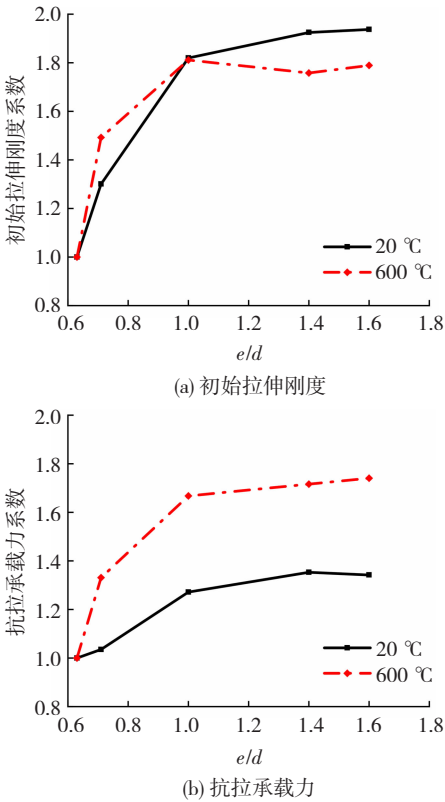


图 10 T 型连接受拉性能随螺栓位置的变化曲线

Fig. 10 Variation curves of tensile properties of
T-stubs with bolt position

表 8 与螺栓位置相关的 T 型连接规范计算结果
与试验结果的比值

Tab. 8 Ratio of code predictions to test results of
T-stubs considering bolt position

试件编号	$k_{\text{ini,EN}}/$	$k_{\text{ini,CECS}}/$	$F_{\text{T,EN}}/$	$F_{\text{T,CECS}}/$
	$k_{\text{ini,exp}}$	$k_{\text{ini,exp}}$	$F_{\text{T,exp}}$	$F_{\text{T,exp}}$
STA - A	3.66	2.03	0.88	0.88
ED1 - A	3.44	1.91	0.88	0.88
ED2 - A	3.46	1.92	0.90	0.90
ED3 - A	2.15	1.20	0.93	0.93
ED4 - A	2.02	1.12	0.91	0.91
STA - 600	4.29	2.38	0.73	0.73
ED1 - 600	4.34	2.41	0.63	0.63
ED2 - 600	4.42	2.46	0.63	0.63
ED3 - 600	2.26	1.25	0.70	0.70
ED4 - 600	2.43	1.35	0.89	0.89

由表 5、8 可知:1)保持螺栓离腹板的距离 d 不变,增大螺栓离翼缘边缘的距离 e ,由于没有改变翼缘塑性绞线的长度,欧洲规范和中国规程计算得到的初始拉伸刚度不变。当保持 e 不变, d 增大时,由于增大固接梁模型的计算跨度 m 的影响大于增加塑性绞线的计算长度 l_{eff} ,因此计算得的初始拉伸刚度仍变小;2)在保持螺栓离腹板的距离 d 不变,螺栓离翼缘边缘的距离 e 增大时,规范计算的抗拉承载力略高。保持 e 不变, d 增大,规范计算得到的抗拉承载力显著降低。一方面,是因为增大了固接梁模型的计算跨度 m ,导致焊缝和螺栓孔附近作用的弯矩大小增加,翼缘与腹板交界处更易屈服;另一方面,随着 e/d 值的增加,T 型连接内的撬力作用随之减小,且减大幅度也随之降低,当 e/d 值大于 1.25,减大幅度将大大降低^[22]。所以当 e/d 值减小,T 型连接内的撬力作用更明显,将使螺栓内力进一步增大,更容易发生螺栓断裂破坏;3)欧洲规范和中国规程能较为准确地计算出常温下 T 型连接的抗拉承载力,结果与试验结果的差距在 10% 左右,并且当 e/d 值越小,理论结果与试验结果的差距越小。在高温下差距缩小更为明显,当 e/d 值为 0.63 时,这一差距仅为 11%,而同组其他试件差距均在 25% 以上。

3.4 螺栓直径的影响

不同螺栓直径的 T 型连接试件为 STA - A、D1 - A、D2 - A、STA - 600、D1 - 600 和 D2 - 600。以 D1 系列试件试验数据为基准,将试验结果归一化处理,得到初始拉伸刚度和抗拉承载力系数的变化曲线见图 11。

由图 11 可知,常温和高温下 T 型连接的初始拉伸刚度会随着螺栓直径的增大而增加。欧洲规范把 T 型连接的破坏分为 3 种破坏模式,其本质是螺栓与翼缘之间的强弱对比。随着螺栓直径的增加,T 型连接的破坏会有从破坏模式 2 向破坏模式 1 发展的趋势,其初始拉伸刚度将相对变大。同样地,常温和高温下 T 型连接的抗拉承载力也会随着螺栓直径的增大而提高,并且高温下的增长幅度要显著大于常温。这主要是因为高温下螺栓强度的折减幅度比翼缘更大,T 型连接的破坏模式逐渐向破坏模式 3 发展,即仅螺栓断裂失效,T 型连接翼缘塑性发展不充分,属于脆性破坏,在这种情况下螺栓直径的增加将直接提高 T 型连接的抗拉承载力。与螺栓直径相关的 T 型连接试件受拉性能的规范计算结果与试验结果的比值见表 9。

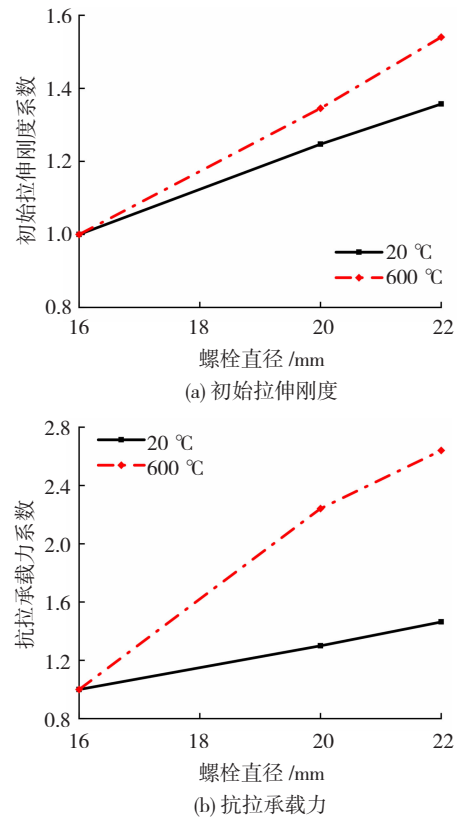


图 11 T 型连接受拉性能随螺栓直径的变化曲线

Fig. 11 Variation curves of tensile properties of T-stubs with bolt diameter

表 9 与螺栓直径相关的 T 型连接规范计算结果与试验结果的比值

Tab. 9 Ratio of code predictions to test results of T-stubs considering bolt diameter

试件编号	$k_{\text{ini,EN}}/$	$k_{\text{ini,CECS}}/$	$F_{\text{T,EN}}/$	$F_{\text{T,CECS}}/$
	$k_{\text{ini,exp}}$	$k_{\text{ini,exp}}$	$F_{\text{T,exp}}$	$F_{\text{T,exp}}$
STA - A	3.66	2.03	0.88	0.88
D1 - A	4.57	2.54	0.84	0.84
D2 - A	3.37	1.87	0.91	0.91
STA - 600	4.29	2.38	0.73	0.73
D1 - 600	5.77	3.21	1.10	1.10
D2 - 600	3.75	2.08	0.61	0.61

由表 5、9 可知:1)两个规范在计算 T 型连接的初始拉伸刚度时,均未考虑螺栓的作用,而实际上,随着螺栓直径的增加,常温和高温下 T 型连接的初始拉伸刚度都有所增加;2)两个规范都能在保有一定强度储备的情况下,较为准确地计算出常温和高温下使用不同直径螺栓的 T 型连接的抗拉承载力,这主要是因为规范在计算抗拉承载力时充分考虑了螺栓的承载能力,取 3 种破坏模式中承载力的最小值作为其抗拉承载力理论值。值得注意的是,D1 - 600 因为试验过程中发生了螺纹滑移,出现过早破坏,故试验承载力相较理论抗拉承载力偏低。

3.5 螺栓强度的影响

不同螺栓强度的 T 型连接试验结果见表 10。

表 10 与螺栓强度相关的 T 型连接试验结果

Tab. 10 Test results of T-stubs with different bolt strengths

试件编号	钢材强度	螺栓强度	$k_{ini,exp}/$ ($N \cdot mm^{-1}$)	$F_{T,exp}/$ kN
STA-A	Q690	10.9 级	118 936	446.53
BST-A	Q690	8.8 级	120 246	406.65
STA-600	Q690	10.9 级	36 879	159.65
BST-600	Q690	8.8 级	35 128	87.14

由表 10 可知,在不改变螺栓直径的情况下,增大螺栓的强度几乎不会改变常温和高温下 T 型连接的初始拉伸刚度,但是能显著提升 T 型连接的抗拉承载力,且在高温下的提升效果更加明显。与螺栓强度相关的 T 型连接试件受拉性能的规范计算结果与试验结果的比值见表 11。

表 11 与螺栓强度相关的 T 型连接规范计算结果与试验结果的比值

Tab. 11 Ratio of code predictions to test results of T-stubs considering bolt strength

试件编号	$k_{ini,EN}/$ $k_{ini,exp}$	$k_{ini,CECS}/$ $k_{ini,exp}$	$F_{T,EN}/$ $F_{T,exp}$	$F_{T,CECS}/$ $F_{T,exp}$
STA-A	3.66	2.03	0.88	0.88
BST-A	3.62	2.01	0.84	0.84
STA-600	4.29	2.38	0.73	0.73
BST-600	4.50	2.50	1.03	1.03

由表 5、11 可知:1)在螺栓直径相同的情况下,螺栓强度对于常温和高温下 T 型连接的初始拉伸刚度影响很小,规范推荐的计算公式没有考虑螺栓的作用,故螺栓强度改变也不会影响计算所得初始拉伸刚度的大小;2)如果直接采用材性折减的方式套用常温下的规范计算高温下 T 型连接的理论抗拉承载力,对于螺栓强度较低的 T 型连接,结果会偏于不安全。

4 结 论

对 28 个高强度 T 型连接试件进行试验研究和理论分析,主要结论如下:

1)欧洲规范和中国规程在计算高温下 T 型连接初始拉伸刚度的时候,仅考虑弹性模量的折减,理论计算结果偏于不安全的;对于抗拉承载力,欧洲规范和中国规程推荐的理论计算偏于保守。

2)相比于厚翼缘普通钢 T 型连接,薄壁高强度 T 型连接能在保持承载力相当的情况下,具有更好的变形能力。欧洲规范和中国规程推荐的 T 型连接初始拉伸刚度的计算公式对于厚翼缘的 T 型连

接计算结果会显著偏大。

3)当 e/d 值大于 1 时,保持螺栓离腹板的距离 d 不变,改变螺栓离翼缘边缘的距离 e ,对于 T 型连接的初始拉伸刚度和抗拉承载力影响不大。当 e/d 值小于 1 时,增大螺栓离腹板的距离 d 会明显降低 T 型连接的初始拉伸刚度和抗拉承载力。欧洲规范和中国规程对于高 e/d 值的 T 型连接计算结果更加保守,对于低 e/d 值的 T 型连接计算结果更准确。

4)欧洲规范和中国规程在计算 T 型连接初始拉伸刚度时没有考虑螺栓直径的影响,事实上螺栓直径的增加将增大 T 型连接初始拉伸刚度值,应纳入考虑。

5)仅改变螺栓强度会提高 T 型连接的抗拉承载力,但是对初始拉伸刚度影响不大。对于采用螺栓强度明显低于翼缘强度的 T 型连接,欧洲规范和中国规程的理论计算偏于不安全。

6)综上所述,欧洲规范和中国规程不适用于高温下高强度 T 型连接初始拉伸刚度的理论计算,不适用于常温 and 高温下其螺栓强度明显低于翼缘强度的 T 型连接的抗拉承载力计算,因此亟待提出针对性的设计建议。

参考文献

[1] European Committee for Standardization. Eurocode 3: design of steel structures-part 1-8: design of joints; EN 1993-1-8 [S]. Brussels: CEN, 2005

[2] European Committee for Standardization. Eurocode 3: design of steel structures-part 1-12: additional rules for the extension of EN 1993 up to steel grade S700; EN 1993-1-12 [S]. Brussels: CEN, 2006

[3] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构设计标准: GB 50017—2017[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2017

Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for design of steel structures; GB 50017—2017 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017

[4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 高强度钢结构设计标准: JGJ/T 483—2020[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2020

Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for design of high strength steel structure; JGJ/T 483—2020 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2020

[5] 强旭红,吴钟艳,姜旭,等. 高强度结构钢 S690 高温力学性能[J]. 同济大学学报(自然科学版),2016,44(5):685

QIANG Xuhong, WU Zhongyan, JIANG Xu, et al. Mechanical properties of high strength steel S690 at elevated temperature[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2016, 44(5): 685. DOI:10.11908/j.issn.0253-374x.2016.05.005

[6] 强旭红,张至毅,姜旭,等. 火灾下超高强度钢 S960 力学性能与抗火设计建议[J]. 同济大学学报(自然科学版),2020,48(5):673

QIANG Xuhong, ZHANG Zhiyi, JIANG Xu, et al. Fire

- performance and design recommendations of very high strength steel S960[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2020, 48(5): 673. DOI: 10.11908/j.issn.0253-374x.19174
- [7] PILUSO V, FAELLA C, RIZZANO G. Ultimate behavior of bolted T-stubs. II: model validation [J]. Journal of Structural Engineering, 2001, 127(6): 694. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2001)127:6(694)
- [8] HEIDARPOUR A, BRADFORD M A. Behavior of a T-stub assembly in steel beam-to-column connections at elevated temperatures[J]. Engineering Structures, 2008, 30(10): 2893. DOI:10.1016/j.engstruct.2008.04.007
- [9] 陈士哲. 对组件法的修正与改进及其在钢结构节点本构关系研究中的应用[D]. 广州:华南理工大学, 2015
- CHEN Shizhe. Application of modified and improved component method in the constitutive relation research for steel connections [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015
- [10] 陈士哲, 潘建荣, 王湛. 考虑弯矩作用的 T 型连接力学性能的研究[J]. 钢结构, 2017, 32(9): 17
- CHEN Shizhe, PAN Jianrong, WANG Zhan. Research on mechanical properties of T-stub considering bending moment [J]. Steel Construction, 2017, 32(9): 17. DOI: 10.13206/j.gjg201709004
- [11] 武念铎. 高强钢端板连接节点火灾性能研究[D]. 上海: 同济大学, 2018
- WU Nianduo. Study on fire behavior of high strength steel end plate connections[D]. Shanghai: Tongji University, 2018
- [12] 孙飞飞, 孙密, 李国强, 等. Q690 高强钢端板连接梁柱节点抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(4): 116
- SUN Feifei, SUN Mi, LI Guoqiang, et al. Experimental study on seismic behavior of high-strength steel beam-to-column end-plate connections[J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(4): 116. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2014.04.016
- [13] 中国工程建设标准化协会. 端板式半刚性连接钢结构技术规范: CECS 260: 2009[S]. 北京: 中国计划出版社, 2009
- China Association for Engineering Construction Standardization. Technical specification for steel structures with end-plate semi-rigid connection: CECS 260: 2009[S]. Beijing: China Planning Press, 2009
- [14] 刘秀丽, 王燕, 李美红. 构造参数对钢结构 T 型连接受力性能影响试验及分析[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2017, 42(4): 1329
- LIU Xiuli, WANG Yan, LI Meihong. Experiment and analysis on influence of configuration parameters on mechanical behaviors of steel T-stub connection[J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2017, 42(4): 1329
- [15] 李国强, 陈凯, 蒋首超, 等. 高温下 Q345 钢的材料性能试验研究[J]. 建筑结构, 2001, 31(1): 53
- LI Guoqiang, CHEN Kai, JIANG Shouchao, et al. Experimental study on the material properties of Q345 steel at elevated temperatures[J]. Building Structure, 2001, 31(1): 53. DOI: 10.19701/j.jzjg.2001.01.019
- [16] 王卫永, 刘兵, 李国强. 高强度 Q460 钢材高温力学性能试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2012, 32(增刊 1): 30
- WANG Weiyong, LIU Bing, LI Guoqiang, et al. Experimental study on mechanical properties of Q460 high strength steel at elevated temperature [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2012, 32(Sup. 1): 30
- [17] 李国强, 黄雷, 张超. 国产 Q690 高强钢高温下力学性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(2): 149
- LI Guoqiang, HUANG Lei, ZHANG Chao. Experimental research on mechanical properties of domestic high strength steel Q690 at elevated temperatures[J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(2): 149. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2017.0236
- [18] 李国强, 李明菲, 殷颖智, 等. 高温下高强度螺栓 20 MnTiB 钢的材料性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2001, 34(5): 100
- LI Guoqiang, LI Mingfei, YIN Yingzhi, et al. Experimental studies on the behavior of high-strength bolts made of 20 MnTiB steel at elevated temperatures[J]. China Civil Engineering Journal, 2001, 34(5): 100. DOI: 10.3321/j.issn:1000-131X.2001.05.020
- [19] LOU Guobiao, YU Shan, WANG Rui, et al. Mechanical properties of high-strength bolts after fire[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings, 2012, 165(7): 373. DOI: 10.1680/stbu.11.00015
- [20] 王卫永, 董毓利, 蒋宝锋, 等. 加劲肋和端板厚度对梁柱边节点抗火性能的影响[J]. 工业建筑, 2008, 38(2): 99
- WANG Weiyong, DONG Yuli, JIANG Baofeng, et al. Influence of stiffener and end-plate-depth on fire resistance of beam-to-column single-sided joint[J]. Industrial Construction, 2008, 38(2): 99. DOI: 10.13204/j.gyjz2008.02.026
- [21] 王卫永, 董毓利, 李国强. 外伸端板节点火灾行为的试验研究和理论分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2006, 38(12): 2125
- WANG Weiyong, DONG Yuli, LI Guoqiang. Experimental and analytical studies on extended end-plate connection in fire [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2006, 38(12): 2125. DOI: 10.3321/j.issn:0367-6234.2006.12.026
- [22] 张贵祥, 石永久, 王元清. 铝合金 T 形受拉接头撬力影响因素有限元分析[J]. 武汉大学学报(工学版), 2007, 40(1): 91
- ZHANG Guixiang, SHI Yongjiu, WANG Yuanqing. Finite element analysis of parameters related to prying force of T-stub connection in aluminum alloy [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2007, 40(1): 91. DOI: 10.3969/j.issn.1671-8844.2007.01.020

(编辑 赵丽莹)