

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202208004



冷弯厚壁型钢螺栓连接抗剪性能试验

魏阳坤, 王玲玲, 霍静思

(华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 通过 30 个厚度为 10 mm 的冷弯厚壁型钢螺栓连接件的静力拉伸试验,考察不同边距、端距下试件的破坏模式、抗剪承载力及相关规范的适用性,并基于试验结果对规程建议公式进行修正. 研究表明:在考察的边距、端距范围内,试件出现净截面、剪出、剪出与孔壁承压混合三种破坏模式;当试件发生剪出和剪出与孔壁承压混合破坏时,剪切破坏面上存在裂缝;试件达到极限承载力之前,出现在螺栓孔前的裂缝会减小钢板的受剪面积,导致试件抗剪承载力的计算结果高于实测结果;基于实际受剪面修正的剪出破坏承载力计算公式概念清晰,计算精度高;修正后美国规范 AISC 360-16 的计算结果与试验结果吻合最好,未修正的美国规范 ANSI/AISC 360-16 次之,而欧洲规范 EN 1993-1-8 的计算结果偏保守,中国规范 GB 50018—2002 的计算结果过于保守.

关键词: 冷弯厚壁型钢; 螺栓连接; 抗剪性能; 破坏模式; 有效受剪面

中图分类号: TU 392.102 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2023)01-0046-06

Experiment on Shear Behavior of Bolted Connection of Cold-Formed Thick-Walled Steel

WEI Yangkun, WANG Lingling, HUO Jingsi

(College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: Through the static tensile experiment of 30 specimens of cold-formed thick-walled steel with 10mm thickness, the failure mode, shear bearing capacity and the applicability of relevant specifications of specimens with different edge distance and end distance are investigated. Based on the experimental results, the recommended formula of the specification is modified. The results show that, in the experimental range of edge distance and end distance, there are three failure modes of the specimen: net section failure, shear out failure, and shear out-bearing mixed failure. When the sheared out and shear out-bearing mixed failures occur, there are cracks on the shear failure surface. Before the specimen reaches the ultimate bearing capacity, the cracks appearing in front of the bolt hole reduce the shear area of the steel plate, resulting in greater calculation result of the shear bearing capacity of the specimen than the measured result. The calculation formula of shear failure bearing capacity based on the correction of actual shear surface has clear concept and high calculation accuracy. The best agreement with the experimental results is the calculation results of the revised American code ANSI/AISC 360-16, the second is the unmodified American code ANSI/AISC 360-16, the calculation results of European code EN 1993-1-8 are conservative, and the calculation results of Chinese code GB 50018-2002 are too conservative.

Keywords: cold-formed thick-walled steel; bolted connection; shear behavior; failure mode; effective shear plane

收稿日期: 2022-08-07

通信作者: 王玲玲(1981-),女,副教授,博士,主要从事钢结构抗火的研究. E-mail:wanglinglingmary@aliyun.com.

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目(51678256);福建省自然科学基金资助项目(2022J01289)

与热轧型钢相比,冷成型钢具有断面形状灵活、比强度高、冷成型过程不损伤涂层,以及对环境污染小等优点. 以往受冷成型技术水平限制,冷成型钢构件壁厚较薄,常用于檩条、墙梁等次要承重构件中. 随着冷成型钢生产状况的改善和生产能力的提高,我国已能生产壁厚约为 20 mm、截面展宽达 2 m 的各类截面冷成型钢. 为了扩大冷成型钢在建筑钢结构领域的应用范围,国内外学者对冷弯厚壁型钢的冷弯效应与残余应力分布^[1-6]、基本构件承载力设计理论^[7-11]和抗震性能^[12-13]等展开了相关研究. 我国国家标准 GB 50018—2002《冷弯薄壁型钢结构技术规范》(以下简称中国规范 GB 50018—2002)^[14]的新一轮修订工作也已经启动.

螺栓连接是冷成型钢构件最常用的一种连接形式. 剪力作用下,连接可发生螺栓剪断、孔壁承压、剪出和净截面拉断 4 种形式的破坏. 除螺栓剪断外,其他 3 种形式的破坏属于延性破坏,且连接承载性能取决于连接板材的力学性能. 虽然各冷成型钢结构设计规范^[14-16]放宽了冷成型钢构件壁厚的使用范围,但冷弯厚壁型钢螺栓连接件的设计计算仍采用与热轧型钢完全相同的方法. 这种做法的不合理缘于连接承载力取决于被连接板材的极限抗拉强度且承载力计算公式中隐含了对连接板材变形能力的要求,而冷成型过程中钢材强度提高,变形能力下降.

因此,本文通过 30 个厚度为 10 mm 的冷弯厚壁型钢螺栓双剪连接件的静力拉伸试验,考察不同边距、端距组合下螺栓连接件的破坏模式和抗剪承载力,并将试验结果与不同规范计算结果进行对比;此外,针对冷弯厚壁型钢螺栓连接剪出破坏模式的特点,基于实际剪切破坏面,修正美国钢结构规范 AISC 360-16(以下简称美国规范 AISC 360-16)建议的抗剪承载力计算公式.

表 1 试件参数及编号

1 试验研究

Tab. 1 Parameters and number of specimens

1.1 试件设计

进行 30 个双剪形式的冷弯厚壁型钢单个螺栓连接件的静力拉伸试验,连接板厚度为 10 mm. 为避免螺栓被剪断,采用 10.9 级高强螺栓,螺栓直径为 24 mm,孔径为 26 mm. 设计考虑了 6 种端距和 4 种边距共 10 种端距、边距的组合工况,试件参数及编号,如表 1 所示. 表 1 中: d_0 为螺栓孔直径; e_1 为端距; e_2 为边距; t 为连接板厚度.

试件编号	e_1/d_0	e_2/d_0	t/mm	d_0/mm
SD-1.0-3.0	1.0	3.0	10	26
SD-1.2-3.0	1.2	3.0	10	26
SD-1.5-3.0	1.5	3.0	10	26
SD-2.0-3.0	2.0	3.0	10	26
SD-2.5-3.0	2.5	3.0	10	26
SD-3.5-3.0	3.5	3.0	10	26
SD-1.5-1.0	1.5	1.0	10	26
SD-1.5-1.2	1.5	1.2	10	26
SD-1.5-1.5	1.5	1.5	10	26
SD-1.5-2.0	1.5	2.0	10	26

厚度 10 mm 的连接板取自截面尺寸(长×宽×高)为 200 mm×200 mm×10 mm 的方形钢管平板区中部,钢管截面转角内径为 8 mm,沿纵向取样. 方钢管母材为 Q235 低碳钢,其屈服强度、极限抗拉强度、极限拉应变、伸长率分别为 269.4 MPa,415.3 MPa,0.216,29.0%. 取自方钢管平板区中部的连接板的屈服强度、极限抗拉强度、极限拉应变和伸长率分别为 295.0 MPa,455.0 MPa,0.170 和 23.5%.

1.2 试验方法

抗剪性能试验在 1 000 kN 的电液伺服万能试验机上进行. 试验时,以 1.5 mm·min⁻¹ 的速率加载至试件破坏,荷载采用万能试验机的力传感器测量,连接件两侧各布置 1 个位移传感器用以测量螺栓孔的伸长. 剪切试验装置,如图 1 所示. 拧紧螺栓使板叠紧密接触,但螺栓中并未产生预拉力,连接件依靠螺杆受剪和孔壁承压传递剪力.

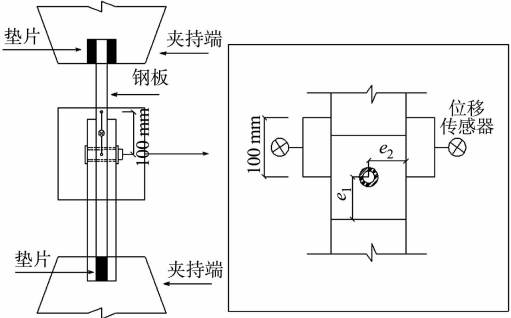


图 1 剪切试验装置

Fig. 1 Shear experiment device

1.3 试验结果与分析

边距固定($e_2=3.0d_0$),随着端距的变化,试件破坏形态,如图 2 所示. 所有试件破坏均发生在螺栓孔前. 当端距 $e_1\leq 1.5d_0$ 时,螺栓孔伸长主要由钢板挤出变形引起,试件发生剪出破坏. 随着端距增加,螺栓孔伸长变形中“钢板挤出”的占比逐渐减小,“螺栓埋入”的占比逐渐增大,试件破坏呈现剪出和孔壁承压混合的破坏特征. 由图 2 可知:当试件发生剪出和剪出

与孔壁承压混合破坏时,在螺栓孔前 45° 和 135° 方向可见两条近乎对称的剪切裂缝,且裂缝长度随端距的增加而增大. 这个现象在延性性能较好的热轧型钢的剪出破坏和孔壁承压破坏中并未见到.

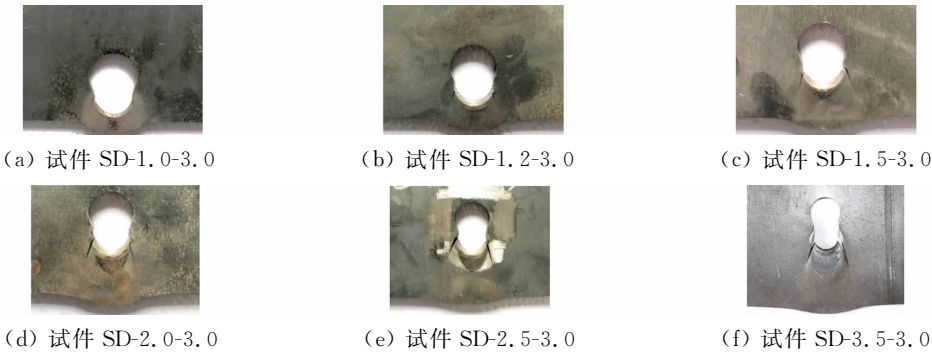


图 2 边距固定、端距变化的试件破坏形态

Fig. 2 Failure modes of specimens with varying end distance and fixed edge distance

端距固定($e_1 = 1.5d_0$),随着边距的增加,试件破坏形态如图 3 所示. 由图 3 可知:试件 SD-1.5-1.0, SD-1.5-1.2 发生净截面破坏,而试件 SD-1.5-1.5, SD-1.5-2.0 发生剪出破坏. 虽然试件 SD-1.5-1.0, SD-1.5-1.2 的破坏模式相同,但试件 SD-1.5-1.2 的螺栓孔伸长变形明显大于试件 SD-1.5-1.0. 产生这种现象的原因是试件 SD-1.5-1.2 的净截面强度与孔壁承压强度接近,受剪过程中螺栓孔侧和孔前均产生了显著变形,这种现象在试件 SD-1.5-1.5 中也有所体现.



(a) 试件 SD-1.5-1.0 (b) 试件 SD-1.5-1.2 (c) 试件 SD-1.5-1.5 (d) 试件 SD-1.5-2.0

图 3 端距固定、边距变化的试件破坏形态

Fig. 3 Failure modes of specimens with varying edge distance and fixed end distance

试验过程中,连续测量并记录施加的荷载和螺栓孔变形,试件的荷载(P)-位移(Δ)关系曲线,如图 4 所示. 由图 4 可知:在达到极值点之前,荷载-位移关系曲线由初始弹性段和非线性硬化段组成. 试件的抗剪承载力(F_u)及螺栓孔变形(δ_u)的试验结果,如表 2 所示.

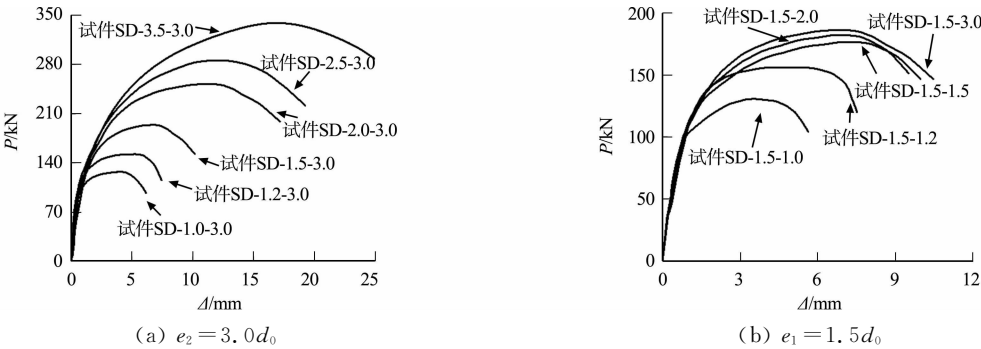


图 4 试件的荷载-位移关系曲线

Fig. 4 Load-displacement relationship curves of specimens

表 2 试件的抗剪承载力及螺栓孔变形的试验结果

Tab. 2 Experimental results of shear bearing capacity and bolt hole deformation of specimens

试件编号	F_u/kN	δ_u/mm	破坏形态	试件编号	F_u/kN	δ_u/mm	破坏形态
SD-1.0-3.0	127.7	4.5	剪出	SD-3.5-3.0	338.9	16.0	剪出-孔壁承压混合
SD-1.2-3.0	153.7	5.3	剪出	SD-1.5-1.0	130.7	4.1	净截面
SD-1.5-3.0	186.2	7.0	剪出	SD-1.5-1.2	154.2	6.9	净截面
SD-2.0-3.0	247.7	11.8	剪出-孔壁承压混合	SD-1.5-1.5	176.7	6.2	剪出
SD-2.5-3.0	286.2	13.6	剪出-孔壁承压混合	SD-1.5-2.0	182.2	5.9	剪出

由图 4 和表 2 可知:当边距固定为 $3.0d_0$ 时,试件的抗剪承载力和螺栓孔变形均随端距增加而增大;端距固定为 $1.5d_0$,当边距从 $1.0d_0$ 增加 $1.5d_0$ 时,试件抗剪承载力提高了 35%,之后随着边距的增加,试件抗剪承载力变化幅度很小。

边距固定,试件的抗剪承载力-端距关系曲线如图 5 所示。由图 5 可知:试件的抗剪承载力随端距增加呈线性增长,当端距 $2.5d_0 \leq e_1 \leq 3.5d_0$ 时,试件抗剪承载力随端距变化的比例系数小于端距 $1.0d_0 \leq e_1 \leq 2.0d_0$ 时的情况。产生这种现象原因是,试件 SD-2.5-3.0,SD-3.5-3.0 中出现的剪切裂缝减小了孔前钢板受剪面积,导致试件抗剪承载力下降,而端距较小时,试件抗剪承载力相对低,在达到峰值荷载时,孔前钢板尚未出现剪切裂缝。钢板具有良好延性是孔壁承压过程中螺栓孔伸长变形得以充分发展的前提条件,冷加工过程导致钢材延性下降,螺栓孔变形过程中孔前钢板可能出现剪切裂缝。剪切裂缝的出现不仅会降低试件的抗剪承载力,还会改变试件的破坏模式及不同破坏模式之间的界限判断条件。

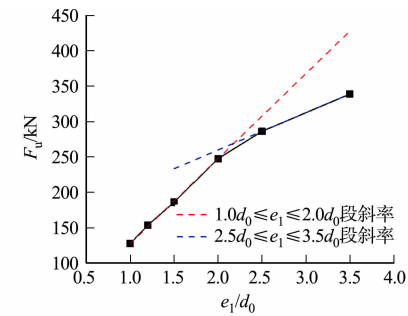


图 5 试件的抗剪承载力-端距关系曲线
Fig. 5 Shear bearing capacity-end distance relationship curves of specimens

2 冷弯厚壁型钢螺栓连接抗剪承载力计算

2.1 不同国家规范提出的计算方法

北美冷成型钢结构设计规范 AISI S100-16^[15]适用于厚度不超过 25.4 mm 的冷加工钢构件。但该规范的 J3 条(螺栓连接部分)中规定,当连接板的厚度超过 4.76 mm 时,螺栓连接件的设计计算和构造要求遵照美国规范 AISC 360-16^[16]执行。欧洲冷成型钢结构设计规范 EN 1993-1-3(以下简称欧洲规范 EN 1993-1-8)^[17]也做出类似规定,当连接板厚度超过 3 mm 时,螺栓连接件的设计计算和构造要求遵照欧洲规范 EN 1993-1-8^[18]执行。不同国家规范中提出的抗剪螺栓连接件在不同破坏模式下(除螺栓剪断)的承载力计算公式和不同破坏模式发生的边距、端距条件,如表 3 所示。表 3 中: f_u 为极限抗拉强度; R_s 为剪出破坏承载力; R_b 为孔壁承压破坏抗剪承载力; R_n 为净截面破坏抗剪承载力; R_m 为混合破坏抗剪承载力; d 为螺栓直径。

表 3 不同国家规范中的连接件承载力计算公式

Tab. 3 Calculation formulas of bearing capacity of connectors in different national codes

破坏模式	欧洲规范 EN 1993-1-8 ^[18]	美国规范 ANSI/AISC 360-16 ^[16]	中国规范 GB 50018—2002 ^[14]
剪出	$R_s=2.5(e_1/3d_0)f_u dt,$ $e_1<3d_0$ 且 $e_2\geq 1.5d_0$	$R_s=1.5(e_1-0.5d_0)tf_u,$ $e_1<2d+0.5d_0; e_2>0.75e_1+0.125d_0$	— $e_1<2d_0$
孔壁承压	$R_b=2.5f_u dt,$ $e_1\geq 3d_0$ 且 $e_2\geq 1.5d_0$	$R_b=3.0dtf_u,$ $e_1\geq 2d+0.5$ 且 $e_2\geq 1.5d+0.5d_0$	$R_b=d\sum tf_c^b,$ $e_1\geq 2d_0$
净截面破坏	$R_n=(2.8e_2/d_0-1.7)f_u dt,$ $e_1\geq 3d_0$ 且 $e_2<1.5d_0$	$R_n=(2e_2-d_0)f_u t,$ $e_2<0.75e_1+0.125d_0; e_2<1.5d+0.5d_0$	$R_n=(2e_2-d_0)f_u t,$ $R_n<R_b$
混合破坏	$R_m=\frac{(2.8e_2/d_0-1.7)e_1f_u dt}{3d_0},$ $e_1<3d_0$ 且 $e_2<1.5d_0$	— —	— —

美国规范 AISC 360-16^[16]给出剪出、孔壁承压和净截面拉断 3 种破坏模式下螺栓连接件的抗剪承载力计算公式。当端距 $e_1<2.0d+0.5d_0$ 时,连接件发生剪出破坏,此时,连接件的抗剪承载力随端距增加呈线性增长。当端距 $e_1\geq 2.0d+0.5d_0$ 时,连接件发生孔壁承压破坏,此时,连接件的抗剪承载力随端距增加保持恒定。根据欧洲规范 EN 1993-1-8^[18]给出的剪出和孔壁承压承载力计算公式可知,这两种破坏模式发生的界限端距为 $e_1=3.0d_0$ 。中国规范 GB 50018—2002^[14]通过规定端距的最小值($2.0d_0$)来避免剪出破坏的发生,孔壁承压承载力的计算方法与另外两种规范也有所不同。发生净截面破坏时,螺栓连接件抗剪承载力随边距增加呈线性增长,欧洲规范 EN 1993-1-8 给出的净截面破坏承载力计算结果恒大于美国规范 AISC 360-16 的计算结果。

2.2 基于实际剪切破坏面的剪出承载力计算公式

试件的剪出破坏面示意图,如图 6 所示.图 6 中: l_g 为毛截面长度; l_e 为受剪面长度.美国钢结构规范 AISC 360-16^[16] 提出的剪出破坏承载力计算公式(表 3)假设破坏面为净截面(图 6(a)),即 2 个破坏面重合且均处在螺栓孔中线上,抗剪强度取 $0.75f_u$.欧洲规范 EN 1993-1-8^[19] 提出的剪出破坏承载力计算公式假设破坏面为毛截面(图 6(b)),抗剪强度取 $0.5f_u$,剪出破坏承载力计算公式为

$$R_s=1.0l_gtf_u=1.0e_1tf_u. \tag{1}$$

从试件破坏形态(图 2)可以看出,剪出破坏面既非净截面,也非毛截面,而是在孔前 45° 和 135° 方向上 2 条近乎对称的受剪面(图 6(c)),受剪面起始于螺栓孔上与孔中心垂直距离 $0.25d_0$ 处.根据第四强度理论可知,材料的抗剪强度近似为抗拉压强度的 0.58 倍,由此提出根据实际受剪面修正后的剪出破坏承载力计算公式为

$$R_s=1.16l_e tf_u=1.16(e_1-0.25d_0)tf_u. \tag{2}$$

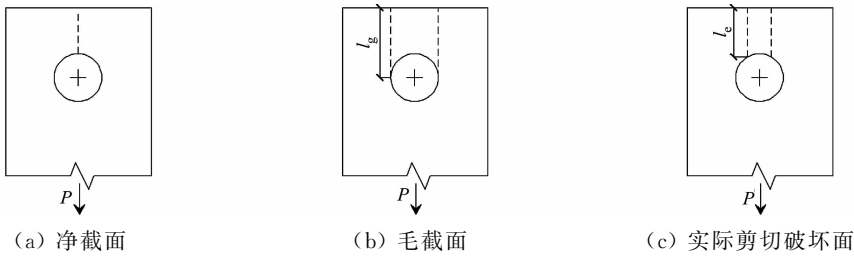


图 6 试件的剪出破坏面示意图

Fig. 6 Schematic diagrams of shear failure surface of specimens

2.3 不同规范计算结果与试验结果的对比

将试件抗剪承载力的试验结果与美国规范 AISC 360-16^[16](表 3)、针对剪出破坏修正后的美国规范 AISC 360-16(式(2))和欧洲规范 EN 1993-1-8^[18](表 3)的计算结果进行对比,结果如图 7 所示.图 7 中: F_{exp} , F_{cal} 分别为试件抗剪承载力的试验结果和计算结果.

由图 7 可知:修正后的美国规范 AISC 360-16 的计算结果与试验结果吻合最好,未修正的美国规范 AISC 360-16^[16] 次之,而欧洲规范 EN 1993-1-8^[18] 的计算结果偏于保守.采用式(2)计算试件发生剪出破坏的承载能力,物理概念清晰,计算精度高.中国规范 GB 50018—2002 的 6.2.4 条规定,螺栓连接件的端距不得小于螺栓孔径的 2 倍,边距不得小于螺栓孔径的 1.5 倍,满足该构造要求的试件只有试件 SD-2.0-3.0,SD-2.5-3.0 和 SD-3.5-3.0.因此,根据中国规范 GB 50018—2002,这 3 个试件可判断为发生孔壁承压破坏,该破坏模式下试件抗剪承载能力的计算结果为 112.8 kN,3 个试件承载能力的实测结果分别为 247.7,286.2,338.9 kN,可见规范我国 GB 50018—2002 的计算结果过于保守.

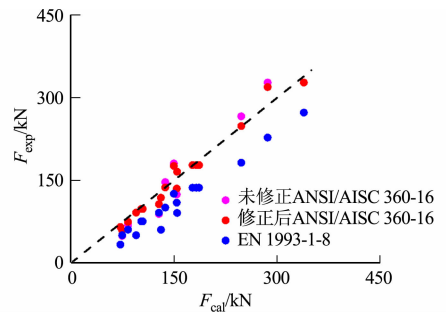


图 7 试件抗剪承载力的试验结果和计算结果的对比

Fig. 7 Comparison between experimental results and calculation results of shear bearing capacity of specimens

3 结论

1) 在考察的边距、端距条件下,未见试件发生孔壁承压破坏.固定边距为 $3.0d_0$,随端距增加,试件发生剪出破坏($e_1 \leq 1.5d_0$)和剪出与孔壁承压的混合破坏($1.5d_0 < e_1 \leq 3.5d_0$).固定端距为 $1.5d_0$,随边距增加,试件发生净截面破坏($e_2 < 1.5d_0$)和剪出破坏($1.5d_0 \leq e_1 < 3.0d_0$).

2) 当试件发生剪出和剪出与孔壁承压混合破坏时,在螺栓孔前 45° 和 135° 方向可见 2 条近乎对称的剪切裂缝.当端距较小($1.0d_0 \leq e_1 \leq 2.0d_0$)时,试件所受荷载小,孔前钢板挤压变形小,此时可认为剪切裂缝发生在试件达到极限承载力之后.随端距增加($e_1 = 2.5d_0$ 和 $e_1 = 3.5d_0$),试件所受荷载和孔前钢板挤压变形随之增大,在试件达到极限承载力之前出现的剪切裂缝减小了孔前钢板的受剪面积,进而导致试件抗剪承载力下降.

3) 当试件发生剪出破坏和剪出与孔壁承压混合破坏时,剪切破坏面介于净截面和毛截面之间,基

于该实际受剪面,对规范美国钢结构规范 AISC 360-16 建议公式进行了修正,修正后的公式概念清晰,计算精度也有所提高。

4) 修正后美国规范 AISC 360-16 的计算结果与试验结果吻合最好,未修正美国规范 AISC 360-16 次之,而欧洲规范 EN 1993-1-8 的计算结果偏保守。中国规范 GB 50018—2002 通过限制端距最小值避免剪出破坏发生,满足该规范边距、端距构造要求的 3 个试件的孔壁承压承载力的计算结果远小于实测结果,中国规范 GB 50018—2002 的计算结果过于保守。

参考文献:

- [1] 李黎明,姜忻良,陈志华,等. 冷弯厚壁型钢钢管冷作硬化效应[J]. 天津大学学报,2008,41(1):85-91. DOI:10.3969/j. issn. 0493-2137. 2008. 01. 016.
- [2] HU Shengde, YE Ben, LI Lixin. Materials properties of thick-wall cold-rolled welded tube with a rectangular or square hollow section[J]. Construction and Building Materials, 2011, 25: 2683-2689. DOI: 10. 1016/j. constrbuildmat. 2010. 12. 019.
- [3] 付小超,李元齐,沈祖炎. 卷边槽形截面冷弯厚壁型钢冷弯效应[J]. 同济大学学报(自然科学版),2016,44(12): 1819-1827. DOI:10. 11908/j. issn. 0253-374x. 2016. 12. 003.
- [4] 沈祖炎,温东辉,李元齐,等. 冷弯厚壁钢管截面不同部位材料特性分布模型[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2016,44(7):981-990. DOI:10. 11908/j. issn. 0253-374x. 2016. 07. 001.
- [5] 李元齐,李功文,沈祖炎. 残余应力对冷弯厚壁方矩管轴压承载力的影响[J]. 建筑钢结构进展,2017,19(6):43-50. DOI:10. 13969/j. cnki. cn31-1893. 2017. 06. 006.
- [6] 李元齐,李功文,沈祖炎,等. 冷弯厚壁型钢考虑冷弯效应的屈服强度计算方法研究[J]. 建筑结构学报,2015,36(5):1-7. DOI:10. 14006/j. jzjgxb. 2015. 05. 001.
- [7] GUO Yaojie, ZHU Aizhu, PI Yonglin, *et al.* Experimental study on compressive strengths of thick-walled cold-formed sections[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2007, 63: 718-723. DOI:10. 1016/j. jcsr. 2006. 08. 008.
- [8] 李元齐,李功文,沈祖炎,等. 冷弯厚壁型钢轴压构件设计可靠度分析[J]. 建筑结构学报,2015,36(5):8-17. DOI: 10. 14006/j. jzjgxb. 2015. 05. 002.
- [9] 温东辉,沈祖炎,李元齐,等. 冷弯厚壁钢管短柱试验及规范公式比较[J]. 同济大学学报(自然科学版),2016,44(8):1190-1198. DOI:10. 11908/j. issn. 0253-374x. 2016. 08. 008.
- [10] LIU Dongyu, LIU Hongbo, CHEN Zhihua, *et al.* Structural behavior of extreme thick-walled cold-formed square steel columns[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2017, 128: 371-379. DOI:10. 1016/j. jcsr. 2016. 09. 004.
- [11] LI Gongwen, LI Yuanqi. Overall stability behavior of axially compressed cold-formed thick-walled steel tubes[J]. Thin-Walled Structures, 2018, 125: 234-244. DOI:10. 1016/j. tws. 2018. 01. 032.
- [12] 付小超,李元齐,沈祖炎. 开口冷弯厚壁型钢轴压构件抗震性能研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版),2016, 33(3):1-7. DOI:10. 3969/j. issn. 1673-9469. 2016. 03. 001.
- [13] 温东辉. 冷弯厚壁钢管压弯构件抗震性能研究[D]. 上海:同济大学,2014.
- [14] 湖北省发展计划委员会. 冷弯薄壁型钢结构技术规范: GB 50018—2002[S]. 北京:中国计划出版社,2002.
- [15] AMERICAN IRON AND STEEL INSTITUTE. North American specification for the design of cold-formed steel structure members: ANSI S100-16[S]. Chicago: American Iron and Steel Institute, 2016.
- [16] AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION. Specification for structural steel buildings: ANSI/AISC 360-16[S]. Chicago: American Institute of Steel Construction, 2016.
- [17] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. Eurocode 3: Design of steel structures: Part 1-3: General rules-supplementary rules for cold-formed members and sheeting: EN 1993-1-3: 2001[S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2006.
- [18] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. Eurocode 3: Design of steel structures: Part 1-8: Design of joints: EN1993-1-8[S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2005.
- [19] AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION. Load and resistance factor design specification for structural steel buildings: AISC 1993[S]. Chicago: American Institute of Steel Construction, 1993.

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:方德平)