

# 冷弯薄壁型钢螺钉连接抗拔性能试验研究

邓 露<sup>1,2</sup>, 杨远亮<sup>1</sup>, 刘定荣<sup>3</sup>, 黄 远<sup>1</sup>

(1. 湖南大学 土木工程学院, 湖南长沙 410082; 2. 湖南大学 工程结构损伤诊断湖南省重点实验室, 湖南长沙 410082; 3. 北京定荣家科技有限公司, 北京 101100)

**摘要:** 为了研究钢板材料强度、厚度以及螺钉外直径、内直径、螺纹间距、钻头处直径对冷弯薄壁型钢螺钉连接的拔出破坏模式和抗拔承载力的影响, 选取板厚为 0.8、1.0、1.2 mm 的 LQ550 及板厚为 0.8、1.5、2.0 mm 的 S350 冷弯型钢, 采用不同螺钉参数, 进行了 287 个试件的拔出试验。结果表明: 1.0 mm 及以上厚度板件主要发生螺纹剪切破坏, 随着板厚增加, 螺纹剪切破坏越明显; 0.8 mm 厚超薄板件主要发生钉孔挤压破坏, 且螺钉直径越大、板材强度越低, 钉孔挤压变形越显著。螺纹间距对抗拔承载力影响较小, 抗拔承载力随着螺钉外直径增加而增大, 内直径增大而减小, 且二者对超薄板件的影响更大。对于自钻自攻螺钉应采用内直径与钻头处直径的较大值计算抗拔承载力, 螺钉钻头处直径越小承载力越大。我国 GB 50018—2002《冷弯薄壁型钢结构技术规范》中抗拔承载力计算公式对于螺钉连接 LQ550 高强度钢板偏于不安全, 尤其对于 0.8 mm 厚的超薄板件。最后, 提出考虑钢板材料强度、厚度以及螺钉外直径、内直径、螺纹间距、钻头处直径的设计承载力计算式, 其具有较好的适用性和可靠性。

**关键词:** 冷弯薄壁型钢; 螺钉连接; 静力试验; 破坏模式; 抗拔承载力; 设计承载力计算式

**中图分类号:** TU392.102 TU317.1 文献标志码: A

## Experimental study on pull-out capacity of screw connections for cold-formed thin-walled steel structures

DENG Lu<sup>1,2</sup>, YANG Yuanliang<sup>1</sup>, LIU Dingrong<sup>3</sup>, HUANG Yuan<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. Key Laboratory for Damage Diagnosis for Engineering Structures of Hunan Province, Hunan University, Changsha 410082, China; 3. DR. Home Technology Co., Ltd, Beijing 101100, China)

**Abstract:** In order to investigate the effects of the steel strength, the sheet thickness, the outer diameter and inner diameter of screws, the thread pitch and the diameter of drill points on the failure mode and pull-out capacity of screw connections for cold-formed thin-walled steels, the pull-out tests were carried out on 287 specimens using LQ550 steel with the thicknesses of 0.8 mm, 1.0 mm and 1.2 mm, and S350 cold-formed steels with the thicknesses of 0.8 mm, 1.5 mm and 2.0 mm in combination with various screw combinations. The experimental results show that the major failure mode of sheets with a thickness larger than 1.0 mm is thread shear failure, and the thread shear failure mode is more pronounced when the thickness is higher. For ultra-thin sheets with a thickness of 0.8 mm, the screw hole extrusion is the major failure mode, which becomes more significant when the outer diameter of screws is large and the steel strength is low. The influence of thread pitch on the pull-out capacity is small. The pull-out capacity increases with the increase of the outer diameter of screws and decreases with the increase of the inner diameter of screws, and this trend is more notable for ultra-thin sheets. For self-drilling screws, the pull-out capacity should be calculated with the larger value between the inner diameter and the diameter of the drill point, and the pull-out capacity increases with the decrease of the diameter of the drill point. It is indicated that the formula for the pull-out capacity of LQ550 high-strength steel sheets in the Chinese code gives unsafe results, especially for ultra-thin sheets with the thickness of 0.8 mm. Finally, a new formula for the pull-out capacity considering the steel strength, the sheet thickness, the outer diameter and inner diameter of screws, the thread pitch and the diameter of drill points was proposed with higher applicability and reliability.

**Keywords:** cold-formed thin-walled steel; screw connection; static test; failure mode; pull-out capacity; design capacity formula

基金项目: 湖南省重点研发计划(2018NK2053), 长沙市杰出创新青年培养计划(kq1802001)。

作者简介: 邓露, 出生于 1984 年, 男, 工学博士, 教授, 主要从事装配式钢结构研究。email: denglu@hnu.edu.cn

收稿日期: 2020 年 1 月

## 0 引言

由于冷成型钢具有质量轻、强度高、建造效率高、材料可回收等一系列优点<sup>[1-2]</sup>。近年来,冷弯薄壁型钢结构在住宅和商业建筑中被广泛用作受力体系。冷弯薄壁型钢结构的连接方式主要有螺钉、螺栓、铆钉、焊接和射钉连接,其中螺钉规格齐全,且施工效率较高,连接性能优,是常用的一种连接方式<sup>[3]</sup>。对螺钉连接性能的研究重点起初主要集中于单颗螺钉和螺钉群的受剪承载力<sup>[4-8]</sup>。然而,齐岩等<sup>[9]</sup>、李元齐等<sup>[10]</sup>进行的冷弯薄壁型钢住宅结构足尺模型振动台试验结果表明,结构破坏模式首先表现为螺钉被拔起脱落。此后,冷弯薄壁型钢螺钉连接的抗拔性能备受关注。

随着冷弯薄壁型钢结构体系的发展,高强超薄壁的构件应用越来越广泛<sup>[11]</sup>,因此,需要扩大现有规范中抗拔承载力计算公式的应用范围。然而,GB 50018—2002《冷弯薄壁型钢结构技术规范》及其最新征求意见稿、北美标准 AISI S100-16<sup>[12]</sup>、澳洲标准 AS/NZS 4600:2018<sup>[13]</sup>与英国标准 BS 5950-5:1998<sup>[14]</sup>中均限制被连接件的钢板厚度大于0.9 mm。此外,Mahendran 等<sup>[15]</sup>对风荷载作用下高强薄壁压型钢板螺钉连接的抗拔承载力进行研究,表明螺钉螺纹间距对螺钉连接抗拔承载力有影响,并提出考虑螺纹间距的抗拔承载力计算式。各国规范螺钉抗拔承载力设计公式中,仅欧洲规范 EN 1993-1-3:2006<sup>[16]</sup>的考虑了螺纹间距对承载力的影响,并且取消了被连接件的板厚限制条件。Sivapathasundaram 等<sup>[17]</sup>在欧洲规范考虑的参数基础上进一步增加螺钉外直径、内直径、钻头处直径的影响分析。但是,受限于螺钉参数设置的困难,尚未能完全确定对螺钉连接抗拔承载力的影响。

本文中采用板厚为0.8、1.0、1.2 mm的LQ550高强冷弯型钢板件和0.8、1.5、2.0 mm的S350冷弯型钢板件与不同螺钉组合,进行287个试件的抗拔试验。分析各国规范中抗拔承载力设计公式的适用性和可靠性。研究冷弯型钢板材强度和厚度以及螺钉螺纹间距、外直径、内直径、钻头处直径对螺钉抗拔承载力的影响。并基于试验结果和参数分析提出冷弯薄壁型钢螺钉连接抗拔承载力设计计算式,为规范修订提供依据。

## 1 试验概况

### 1.1 试件设计

试验中共设计了50组287个冷弯薄壁型钢螺钉连接试件。冷弯型钢板件采用了《冷弯型钢结构技

术规范》征求意见稿中推荐的LQ550钢材和S350钢材,由于冷弯薄壁型钢板件弯曲变形及板件跨度对螺钉连接抗拔破坏模式和抗拔承载力影响非常小<sup>[17]</sup>,因此,试验所有板件的尺寸均相同,依据 AISI S905-17 7.2.2.2 Table 4<sup>[18]</sup>将板件尺寸取为150 mm × 150 mm的正方形,厚度分别取0.8、1.0、1.2、1.5、2.0 mm。试验用螺钉采用GB/T 15856—2002《自钻自攻螺钉》中的6种自钻自攻螺钉与GB/T 846—2017《自攻螺钉》中的2种自攻螺钉,同时为了进行螺钉参数分析,选取了2种非标准螺钉,如图1、2及表1所示。其中 $d$ 为螺钉外直径, $p$ 为螺钉螺纹间距, $d_1$ 为螺钉内直径, $d_2$ 为螺钉钻头处直径。

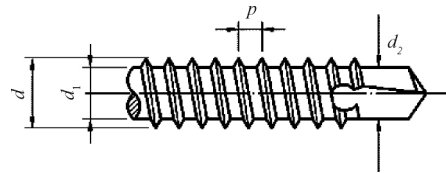


图1 螺钉尺寸示意

Fig. 1 Dimensions of screw



图2 试验用螺钉

Fig. 2 Screw fasteners used in tests

表1 自攻螺钉参数

Table 1 Parameters of screw

螺钉类型	螺钉编号	$d/\text{mm}$		$p/\text{mm}$		$d_1/\text{mm}$	$d_2/\text{mm}$
		名义值	实测值	名义值	实测值		
自钻自攻螺钉	SD2.9	2.9	3.02	1.1	1.05	2.06	2.39
	SD3.5	3.5	3.44	1.3	1.25	2.54	2.81
	SD4.2	4.2	4.19	1.4	1.44	2.85	3.41
	SD4.2T	4.2	4.10	0.8	0.78	2.92	3.58
	SD4.8	4.8	4.82	1.6	1.62	3.39	3.88
	SD5.5	5.5	5.41	1.8	1.83	3.94	4.72
自攻螺钉	SD5.5T	5.5	5.46	1.8	1.82	4.28	4.82
	SD6.3	6.3	6.18	1.8	1.81	4.26	5.46
	ST4.2	4.2	4.19	1.4	1.42	2.96	0
	ST4.8	4.8	4.66	1.6	1.64	3.41	0

各试件组参数设置及其编号见表2,试件编号形式为钢材类型-螺钉编号-同组试件在该组的序号,如试件L0.8-SD4.2T-1中“L”表示LQ550冷弯薄壁型钢,“S”表示S350冷弯薄壁型钢,“0.8”表示板件厚度为0.8 mm,“SD”表示螺钉类型为自钻自攻螺钉(“ST”表示自攻螺钉),“4.2”表示螺钉名义外直径

表2 试件主要参数及抗拔承载力试验值

Table 2 Parameters of specimen and experimental values of pull-out capacity

试件组别	试件数量	$t/mm$	$d/mm$	破坏模式	$P_u/N$	$P_u/P_s$				
						GB	AISI(AS)	BS	EC	式(6)
L0.8-SD2.9	5	0.784	3.02	E+S	1444.77	1.15	0.98	1.32	1.85	1.11
L0.8-SD3.5	5	0.784	3.44	S+E	1500.71	1.05	0.89	1.21	1.69	1.19
L0.8-SD4.2	6	0.784	4.19	S+E	1549.19	0.89	0.76	1.02	1.43	1.08
L0.8-SD4.2T	6	0.784	4.10	S	1644.76	0.96	0.82	1.11	1.07	1.16
L0.8-SD4.8	6	0.784	4.82	E	1897.57	0.94	0.81	1.09	1.52	1.20
L0.8-SD5.5	5	0.784	5.41	E	1744.88	0.77	0.66	0.89	1.25	1.27
L0.8-SD5.5T	6	0.784	5.46	S	1038.38	0.46	0.39	0.53	0.74	0.77
L0.8-SD6.3	6	0.784	6.18	E	1708.65	0.66	0.57	0.77	1.07	1.15
L0.8-ST4.2	6	0.784	4.19	E	1872.68	1.07	0.91	1.24	1.73	0.92
L0.8-ST4.8	6	0.784	4.66	E	2190.15	1.13	0.99	1.30	1.88	1.12
L1.0-SD2.9	6	0.984	3.02	S	1934.03	1.18	1.02	1.36	1.94	1.00
L1.0-SD3.5	6	0.984	3.44	S	1923.90	1.03	0.90	1.19	1.69	1.02
L1.0-SD4.2	6	0.984	4.19	S+E	2134.59	0.94	0.82	1.09	1.54	1.00
L1.0-SD4.2T	6	0.984	4.10	S	2204.49	0.99	0.86	1.15	1.13	1.05
L1.0-SD4.8	6	0.984	4.82	E	2685.33	1.03	0.89	1.19	1.68	1.14
L1.0-SD5.5	5	0.984	5.41	S	1999.17	0.68	0.59	0.79	1.12	0.98
L1.0-SD6.3	5	0.984	6.18	S	1924.05	0.57	0.50	0.66	0.94	0.87
L1.2-SD2.9	6	1.196	3.02	S	2235.80	1.49	1.28	1.72	1.68	1.01
L1.2-SD3.5	5	1.196	3.44	S	2175.99	1.27	1.10	1.47	2.07	1.01
L1.2-SD4.2	6	1.196	4.19	S	2437.85	1.17	1.01	1.35	1.91	1.00
L1.2-SD4.2T	6	1.196	4.10	S	2548.45	1.25	1.08	1.44	1.41	1.05
L1.2-SD4.8	6	1.196	4.82	E	2840.48	1.18	1.02	1.37	1.93	1.05
L1.2-SD5.5	6	1.196	5.41	S	2464.72	0.92	0.79	1.06	1.49	1.05
L1.2-SD5.5T	6	1.196	5.46	S	2157.79	0.79	0.69	0.92	1.30	0.94
L1.2-SD6.3	6	1.196	6.18	S	2430.81	0.79	0.68	0.91	1.29	0.96
L1.2-ST4.2	6	1.196	4.19	E	3052.17	1.46	1.26	1.69	2.39	0.87
L1.2-ST4.8	6	1.196	4.66	E	3475.74	1.50	1.29	1.73	2.44	1.04
S0.8-SD2.9	6	0.792	3.02	E	1039.80	1.47	1.07	1.70	2.03	1.07
S0.8-SD3.5	6	0.792	3.44	E+S	1007.26	1.25	0.91	1.44	1.72	1.06
S0.8-SD4.2	4	0.792	4.19	E+S	1131.01	1.15	0.84	1.33	1.59	1.05
S0.8-SD4.8	6	0.792	4.82	E	1264.68	1.12	0.82	1.29	1.54	1.06
S0.8-SD5.5	5	0.792	5.41	E	1090.58	0.86	0.63	0.99	1.19	1.06
S0.8-SD6.3	6	0.792	6.18	E	1248.89	0.86	0.63	1.00	1.19	1.12
S0.8-ST4.2	6	0.792	4.19	E	1234.92	1.26	0.92	1.45	1.73	0.80
S0.8-ST4.8	6	0.792	4.66	E	1518.32	1.39	1.01	1.61	1.92	1.03
S1.5-SD2.9	6	1.470	3.02	S	2173.16	1.62	1.30	1.87	1.70	0.97
S1.5-SD3.5	4	1.470	3.44	S	1981.29	1.30	1.04	1.50	1.36	0.91
S1.5-SD4.2	6	1.470	4.19	S	2615.37	1.40	1.13	1.62	1.48	1.06
S1.5-SD4.2T	6	1.470	4.10	S+E	2572.17	1.41	1.14	1.63	1.49	1.05
S1.5-SD4.8	6	1.470	4.82	E	2863.07	1.34	1.08	1.54	2.03	1.05
S1.5-SD5.5	6	1.470	5.41	S	2350.24	0.98	0.79	1.13	1.49	0.99
S1.5-SD6.3	4	1.470	6.18	S	2416.79	0.88	0.71	1.02	1.34	0.94
S2.0-SD2.9	6	1.996	3.02	S	3524.01	1.92	1.31	2.22	1.72	0.96
S2.0-SD3.5	6	1.996	3.44	S	3763.60	1.80	1.23	2.08	1.61	1.05
S2.0-SD4.2	6	1.996	4.19	S	4426.98	1.74	1.19	2.01	1.55	1.09
S2.0-SD4.2T	6	1.996	4.10	S	4288.27	1.72	1.18	1.99	1.54	1.07
S2.0-SD4.8	6	1.996	4.82	E	4693.37	1.60	1.10	1.85	1.43	1.04
S2.0-SD5.5	6	1.996	5.41	S	3936.45	1.20	0.82	1.38	1.07	1.01
S2.0-SD5.5T	6	1.996	5.46	S	3702.01	1.12	0.76	1.29	1.00	0.97
S2.0-SD6.3	6	1.996	6.18	S	3823.40	1.02	0.70	1.17	0.91	0.91
平均值						1.15	0.92	1.33	1.54	1.03
变异系数						0.277	0.244	0.277	0.237	0.092

注:  $t$  为实测板件厚度;  $d$  为实测螺钉外直径。

为 4.2 mm,“T”表示非标准螺钉,“1”表示该试件为同组中的第 1 号试件。

### 1.2 材料性能

材性试样与螺钉抗拔试验板件取自同一批钢材,根据 GB/T 228.1—2010《金属材料 拉伸试验:第 1 部分:室温试验方法》中推荐的试样尺寸,取不同厚度的钢材各制作 4 个标准拉伸试样,3 个用于材性拉伸试验,1 个为备用试样。表 3 为钢板的屈服强度  $f_y$  和抗拉强度  $f_u$  的试验结果,实测板厚取 4 个标准拉伸试样板厚的平均值。

表 3 钢板材性试验结果  
Table 3 Material properties of steel sheets

钢材牌号	钢板编号	板厚 $t$ /mm		$f_y$ /MPa	$f_u$ /MPa
		名义值	实测值		
LQ550	L0.8	0.8	0.784	709	733
LQ550	L1.0	1.0	0.984	734	747
LQ550	L1.2	1.2	1.196	555	567
S350	S0.8	0.8	0.792	394	477
S350	S1.5	1.5	1.470	403	442
S350	S2.0	2.0	1.996	406	524

### 1.3 试验方案

采用 AISI S905-17<sup>[18]</sup> 中推荐的螺钉抗拔试验装置(图 3),其中试验台座尺寸为 200 mm × 200 mm × 150 mm,顶面开直径为 80 mm 的圆形孔,试验台座底部焊接套管与 MTS Criterion Model 43 仪器下部的夹具座连接,试验夹具由套管、螺杆、螺母(共 8 个)三部分组成,带内螺纹的套管一端与试验机上部夹具座连接,一端与带有外螺纹的螺杆连接,螺杆另一端与带试件的螺母开口端连接,螺母封闭端中心处开孔,其直径略大于螺钉外直径。试验加载前,用电动钻机将穿过螺母的螺钉打入试验板件中心处,再将其置于试验台座,并将螺母与螺杆对中连接,移动试验机上夹具座以使板件紧密贴合台座面,同时调整螺钉垂直度以保证其受到轴心拉力作用。

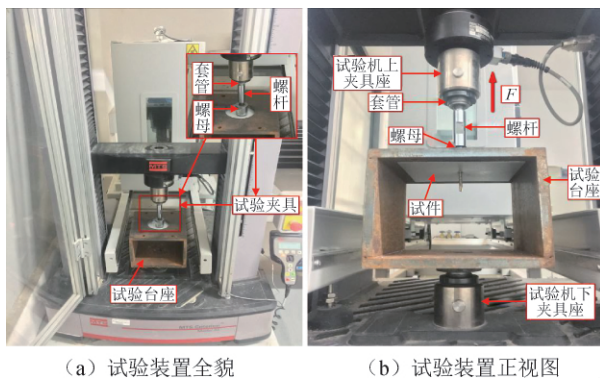


图 3 试验装置  
Fig. 3 Test setup

试验加载在湖南大学土木工程实验室进行,采用位移控制的单调连续加载方式对螺钉与冷弯薄壁型钢板件连接试件进行加载,试验机夹具张拉移动速率设置为 2 mm/min,各试件的抗拔承载力与位移的关系曲线由试验机直接绘出。

## 2 试验结果及其分析

### 2.1 试件破坏模式

所有试件未出现螺钉钉杆拉断情况,与规范要求一致。螺钉与冷成型钢板件的抗拔连接主要有钉孔挤压破坏和螺纹剪切破坏,全部试件的破坏模式见表 2。破坏模式中,字母“E”表示钉孔挤压破坏,“S”表示螺纹剪切破坏。图 4 为典型钉孔挤压破坏,板件钉孔周边发生弯曲变形,且板材强度越低、板件厚度越薄,弯曲变形越显著,孔边有被拔出的钢丝,螺钉螺纹较完整。较薄板件弯曲变形沿着孔边不均匀分布,钉孔附近拔出的钢丝主要成螺旋状,部分较薄板件与较大直径螺钉连接的试件钉孔边缘成撕裂状(图 4b)。

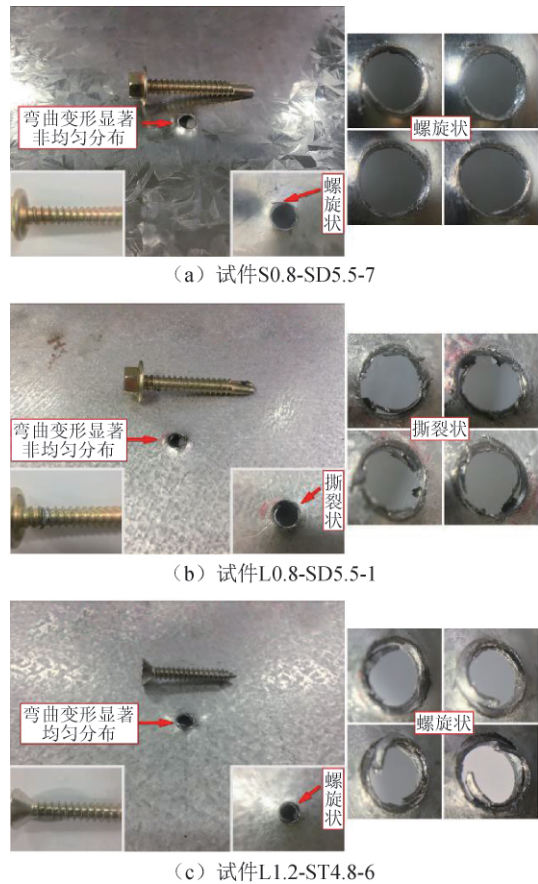


图 4 典型钉孔挤压破坏

Fig. 4 Typical hole extrusion failure of screw connection

图 5 为典型的螺纹剪切破坏,钉孔周边无明显弯曲变形,螺纹牙山较多处断裂,螺纹与板件挤压处



的钢丝被剪出。拔出的钢丝主要垂直板面成凸起状 部分试件钢丝成螺旋状(图 5a)、撕裂状(图 5b),而且较薄板件的钢丝沿着孔边不均匀分布。值得注意的是,对于自钻自攻螺钉,板件强度及厚度都相同时,与螺钉 SD4.8 相关的试件承载力最大且表现为钉孔挤压破坏。同组试件中钉孔挤压破坏越显著,则其抗拔承载力越高,同组试件中螺纹剪切破坏钉孔周边越平整光滑则承载力越低。



图 5 典型螺纹剪切破坏

Fig. 5 Typical thread shear failure of screw connection

## 2.2 抗拔连接荷载-位移曲线

图 6 为部分试件抗拔连接荷载-位移 ( $P-\Delta$ ) 曲线,加载初始阶段,可见曲线初始平台段,即螺钉与板件发生显著滑移,并且存在同组试件滑移程度相差较大(图 6c)的现象,主要是由于板件在加工过程产生的初始弯曲以及调整误差导致板件未能与试验台座顶紧而产生空载。图 6a 和图 6b 为典型钉孔挤压破坏试件的荷载-位移曲线,图 6c、6d 为典型螺纹剪切破坏试件的荷载-位移曲线,忽略试件滑移,可将试件受力过程分为 4 个阶段: 1) 弹性阶段。荷载与位移成线性增加,螺钉与板件挤压处初始螺纹未滑动,钉孔周边沿着拔出方向发生弹性变形。2) 弹塑性阶段。随着位移的增加,初始螺纹牙山断裂并发生

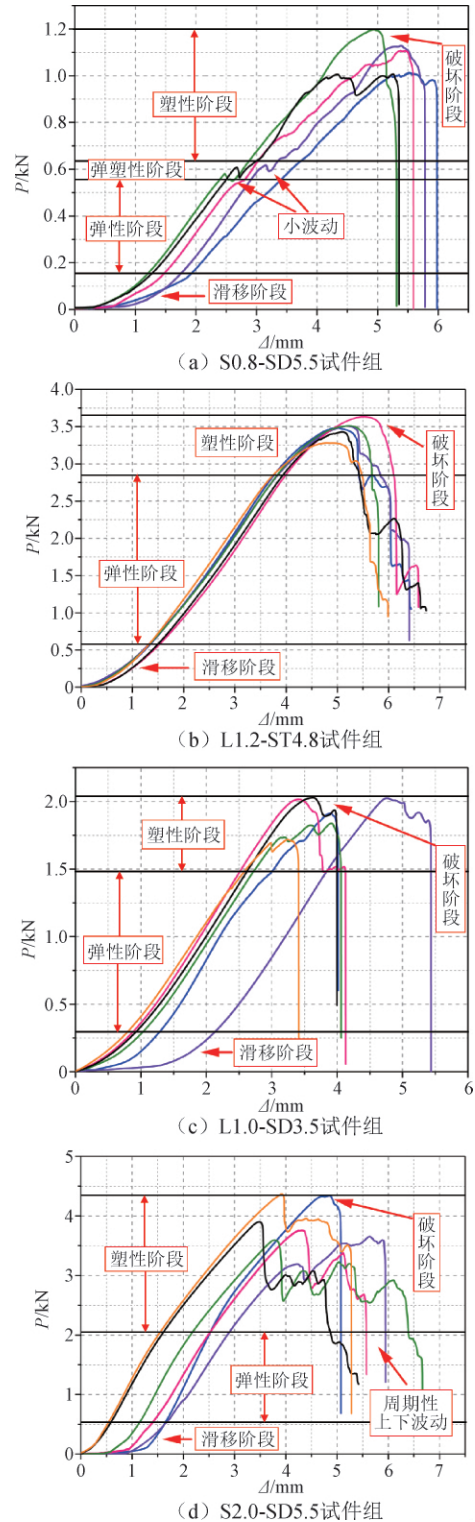


图 6 螺钉连接荷载-位移曲线

Fig. 6 Pull-out load versus displacement curves of screw connection

生滑动 部分较薄试件荷载突然下降并重新形成握紧力(图 6a)。3) 塑性阶段。荷载与位移成非线性增加,螺纹与板件之间的钢丝被拔出,钉孔挤压破坏试件的钉孔周边塑性变形发展迅速直至达到极限荷

载。而螺纹剪切破坏试件的钉孔周边未发生明显塑性变形。4) 破坏阶段。达到极限荷载后,高强度板件的荷载迅速下降,板件迅速弹回(图6a、6c),较低强度板件的荷载则缓慢降低(图6b、6d)。由于板件较厚以及被剪出的钢丝较细,部分钢碎屑可填充于螺纹之间,因此,部分螺纹剪切破坏试件的荷载-位移曲线破坏阶段呈现周期性的上下波动(图6d)。

### 2.3 抗拔承载力

#### 2.3.1 螺钉抗拔承载力规范设计公式

1) 中国规范 GB 50018—2002 及其修订版征求意见稿中,用于压型钢板之间和压型钢板或薄壁构件与冷弯型钢构件之间紧密连接的螺钉连接的抗拔承载力可按下式计算:

$$N_{tot} = 0.75t_cdf \quad (1)$$

式中:  $N_{tot}$  为单个螺钉的抗拔承载力设计值, N;  $d$  为螺钉直径, mm;  $t_c$  为钉杆的螺纹部分钻入基材中的深度, mm;  $t_c$  应大于 0.9 mm;  $f$  为基材的抗拉强度设计值, MPa。

2) 北美标准 AISI S100-16 中,用于钢板与钢板连接的螺钉抗拔承载力按下式计算:

$$P_{not} = 0.85t_1df_{u2} \quad (2)$$

式中:  $P_{not}$  为单个螺钉的名义抗拔承载力, mm;  $t_1$  为螺钉钻入基材深度与螺钉钉尖接触的板件厚度的较小值, mm;  $d$  为螺钉名义直径, mm, 应满足  $2.03 \text{ mm} < d < 6.35 \text{ mm}$ ;  $f_{u2}$  为与螺钉钉尖接触的板件的抗拉强度, MPa。

3) 澳洲标准 AS/NZS 4600: 2018 中,用于冷弯型钢结构构件之间紧密连接的螺钉连接的抗拔承载力可按下式计算:

$$N_{ou} = 0.85t_2d_f f_{u3} \quad (3)$$

式中:  $N_{ou}$  为单个螺钉的名义抗拔承载力, N;  $t_2$  为螺钉钉尖接触的板件厚度, mm;  $t_2$  应大于 0.9 mm;  $d_f$  为螺钉名义直径, mm, 应满足  $3.0 \text{ mm} < d_f < 7.0 \text{ mm}$ ;  $f_{u3}$  为与螺钉钉尖接触的板件的抗拉强度, MPa。

4) 英国规范 BS 5950-5: 1998 中,用于螺钉连接的抗拔承载力可按下式计算:

$$P_1 = 0.65t_3 dp_y \quad (4)$$

式中:  $P_1$  为单个螺钉的抗拔承载力, N;  $t_3$  为靠近螺钉钉尖的板件厚度, mm;  $t_3$  应大于 0.9 mm;  $d$  为螺钉名义直径, mm, 应满足  $3.0 \text{ mm} < d < 8.00 \text{ mm}$ ;  $p_y$  为板件的抗拉强度设计值, MPa。

5) 欧洲规范 EN 1993-1-3: 2006 中,用于螺钉连接抗拉强度不大于 550 MPa 钢板的抗拔承载力可按下式计算:

$$F_{o,rd} = \begin{cases} 0.45dt_{sup}f_{u,sup}/\gamma_{M2} & (t_{sup}/s < 1) \\ 0.65dt_{sup}f_{u,sup}/\gamma_{M2} & (t_{sup}/s \geq 1) \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $F_{o,rd}$  为单个螺钉的抗拔承载力设计值, N;  $d$  为螺钉的名义直径, mm, 应满足  $3.0 \text{ mm} < d < 8.00 \text{ mm}$ ;  $t_{sup}$  为与螺钉连接板件的厚度, mm;  $t_{sup}$  应不大于 4 mm;  $s$  为螺钉螺纹间距, mm;  $f_{u,sup}$  为与螺钉连接板件的抗拉强度, MPa;  $\gamma_{M2}$  为分项系数, 取 1.25。

#### 2.3.2 承载力试验值与规范设计公式计算值的比较

表 2 中列出了 50 组螺钉连接 LQ550、S350 钢板的抗拔承载力试验值(以最大荷载表征)与规范设计公式计算值的比较,其中  $P_u$  为同组试件抗拔承载力试验平均值,  $P_s$  为抗拔承载力设计公式计算值。“GB”表示中国规范 GB 50018—2002 及其最新修订版的征求意见稿,“AISI/AS”代表北美/澳洲标准<sup>[12-13]</sup>(二者公式相同,适用条件有别),“BS”代表英国标准<sup>[14]</sup>,“EC”表示欧洲标准<sup>[16]</sup>,  $P_u/P_s$  统计结果见表 4。所有 50 组试件试验平均值与中国、北美/澳洲<sup>[12-13]</sup>、英国<sup>[14]</sup>、欧洲标准<sup>[16]</sup>设计公式计算值之比的平均值  $\overline{P_u/P_s}$  与变异系数  $\delta$  分别为 1.15、27.7%、0.92、24.4%、1.33、27.7%、1.54、23.7%。由 LQ550 钢材试件可以得出螺钉连接高强冷弯型钢板件的  $P_u/P_s$  的平均值与变异系数分别为 1.01、25.72%、0.87、25.9%、1.17、25.7%、1.56、26.5%,统计 S350 钢材试件  $P_u/P_s$  的平均值与变异系数分别为 1.32、22.8%、0.97、21.6%、1.53、22.8%、1.51、19.5%。根据 10.8 组试件可以得出螺钉连接高强超薄冷弯型钢板件时的平均值与变异系数分别为 0.91、23.1%、0.78、23.4%、1.05、23.1%、1.42、25.5%。

由此可以得出: 1) 中国规范公式的计算值与试验值较为接近,其次为北美及澳洲标准的,英国标准

表 4 试验值与承载力相关设计公式比值结果统计  
Table 4 Statistics on ratio of test value to design formula of capacity

相关设计公式来源	所有试件(50组)		LQ550 钢材试件(27组)		S350 钢材试件(23组)		0.8 mm 高强超薄试件(10组)	
	$P_u/P_s$	$\delta/\%$	$P_u/P_s$	$\delta/\%$	$P_u/P_s$	$\delta/\%$	$P_u/P_s$	$\delta/\%$
GB	1.15	27.7	1.01	25.7	1.32	22.8	0.91	23.1
AISI / AS	0.92	24.4	0.87	25.9	0.97	21.6	0.78	23.4
BS	1.33	27.7	1.17	25.7	1.53	22.8	1.05	23.1
EC	1.54	23.7	1.56	26.5	1.51	19.5	1.42	25.5
文献[19]	—	—	1.27	25.7	—	—	1.13	23.1
文献[17]	0.89	12.9	0.91	14.6	0.87	9.7	0.92	14.9
式(6)	1.03	9.2	1.04	10.5	1.01	7.0	1.10	12.7

与欧洲标准的较为保守,承载力低估了33%和54%。从变异系数来看,中国与英国规范公式的计算值最大,北美及澳洲标准、欧洲标准的次之。2) 对于LQ550高强冷弯型钢板件,中国规范公式的计算值最接近试验值,其次为英国标准,二者变异系数相同且最小,北美及澳洲标准高估了13%,欧洲标准过于保守,承载力低估了56%。3) 针对板厚为0.8 mm的高强超薄试件,英国标准公式的计算值与试验值最接近,其变异系数也最小,中国规范与北美及澳洲标准公式均偏于不安全,承载力分别高估了9%和22%,欧洲标准则低估了42%。4) 对于S350冷弯型钢板件,北美及澳洲标准公式的计算值更为接近试验值,中国、英国、欧洲标准计算值分别低估了32%、53%、51%,中国及英国标准公式计算值的变异系数最大。5) 各国规范对于S350钢材的承载力计算较为保守,变异系数较小;而对LQ550钢材除了欧洲标准外其他各国规范对较多试件的承载力作出偏于不安全的估计,且随着板厚的减小,承载力过高估计的试件数量及程度均增加,变异系数平均值较之S350钢材试件的21.66%增加了4.28%。6) 螺钉类型对规范公式计算结果有显著影响,对于SD2.9、SD3.5,各国规范均可以较为安全估计承载力,但是随着板厚的增加,规范计算值越来越保守。对于SD5.5、SD6.3,除了欧洲标准外其他各国标准均高估了试件的承载力,并且对高强超薄板件高估程度更为明显(如试件L0.8-SD5.5、L0.8-SD6.3),高估程度以北美、澳洲及中国规范较为显著。

## 2.4 承载力影响参数分析

选取板材的强度及板件厚度和螺钉外直径、内直径、螺纹间距、钻头处直径等参数作为分析对象时,由于螺钉成型过程各参数的联动变化,无法保证参数分析时其余参数值完全一致,故文中大小接近的参数值近似认为相等。如螺钉SD4.2和螺钉SD4.2T的外直径(4.19、4.10 mm)、内直径(2.85、2.92 mm)、钻头处直径(3.41、3.58 mm)可看作相等,而二者的螺纹间距(1.44、0.78 mm)则相差较大。

### 2.4.1 钢材强度

以0.8 mm厚的LQ550、S350板件分别与不同型号螺钉连接研究钢材强度的影响,如图7所示,可以看出承载力随着钢板强度的增加而显著提高,且当钢材强度从477 MPa提高至733 MPa后,6种自钻自攻螺钉SD2.9~SD6.3以及2种自攻螺钉ST4.2、ST4.8的抗拔承载力平均提高了46%,接近钢材强度提升率53.7%,故设计公式中的承载力与钢材强度为线性关系是合理的。

### 2.4.2 钢板厚度

图8为不同板厚的LQ550、S350钢材与6种自钻自攻螺钉连接的抗拔承载力变化曲线,可以看出,抗

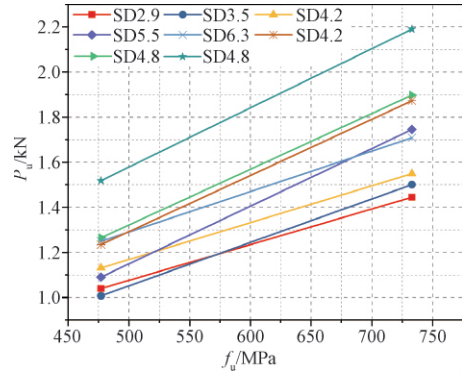
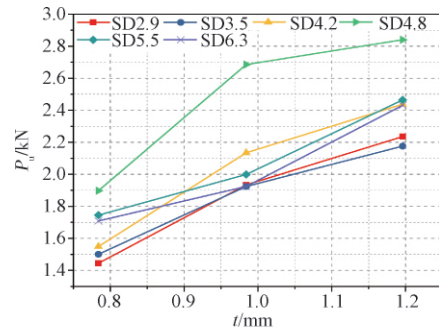
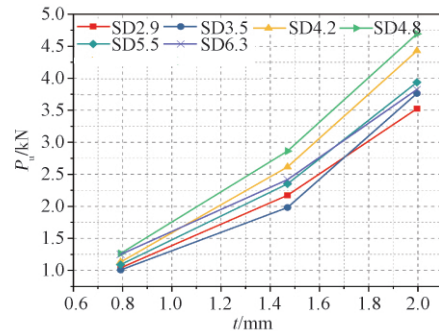


图7 钢材强度对抗拔承载力影响

Fig. 7 Effect of steel strength on pull-out capacity



(a) LQ550钢材



(b) S350钢材

图8 钢板厚度对抗拔承载力影响

Fig. 8 Effect of steel sheet thickness on pull-out capacity

拔承载力均随着板厚的增大而增大,不同的是LQ550钢板厚度超过1.0 mm时SD4.8及以下直径的螺钉试件抗拔承载力增幅逐渐变小,SD4.8以上直径的螺钉试件的则恰好相反;而S350钢板厚度超过1.5 mm时,抗拔承载力增加更加明显,说明抗拔承载力并不与板厚呈简单的线性关系。此外,SD4.8螺钉与不同材质及板厚连接的抗拔承载力均明显高于其他螺钉型号的,与现行规范中承载力与螺钉直径成正比的结论相悖。

### 2.4.3 螺纹间距

提取螺纹间距为0.78 mm的SD4.2T和1.44 mm的SD4.2与不同钢板连接试件数据,研究螺纹间距对抗拔承载力的影响,当螺纹间距增加84.6%时,如



表5所示,1.2 mm及以下板厚试件的承载力均有小幅减小,1.5 mm及以上板厚试件承载力则稍有增大,可知螺纹间距对抗拔承载力的影响较小。

表5 螺纹间距对抗拔承载力影响  
Table 5 Effect of thread pitch on pull-out capacity

钢板 编号	$t/$ mm	SD4.2T		SD4.2		$(P_{u2} - P_{u1}) /$ $P_{u1} / \%$
		$t/p$	$P_{u1} / \text{kN}$	$t/p$	$P_{u2} / \text{kN}$	
L0.8	0.784	1.01	1.644 76	0.54	1.549 19	-5.8
L1.0	0.984	1.26	2.204 49	0.68	2.134 59	-3.2
L1.2	1.196	1.53	2.548 45	0.83	2.437 85	-4.3
S1.5	1.470	1.88	2.572 17	1.02	2.615 37	1.7
S2.0	1.996	2.56	4.288 27	1.39	4.426 98	3.2

注:  $P_{u1}$ 、 $P_{u2}$ 分别为SD4.2T、SD4.2试件组实测承载力平均值。

由于钢材强度及厚度对承载力的显著影响,以相同板件不同螺纹间距下的承载力研究板厚与螺纹间距之比的影响,图9中给出了6种不同钢板的承载力随着板厚与螺纹间距之比( $t/p$ )变化的关系,可以看出板厚与螺纹间距比值对承载力影响不大,但比值靠近1时抗拔承载力较大,以试件S2.0-SD4.2和试件S2.0-SD4.2T为例分析其原因,前者板厚与螺纹间距比值为1.39,说明螺纹在板内螺旋圈数为1.39,后者则为2.56,然而二者破坏模式相同,承载力相近,且破坏后板内螺纹圈数均接近2圈,螺钉拔出过程中初始螺纹退出受力后后续螺纹重新与钢板挤压形成受力系统,由此说明板厚与螺纹间距比值大于1后对承载力的贡献较小。

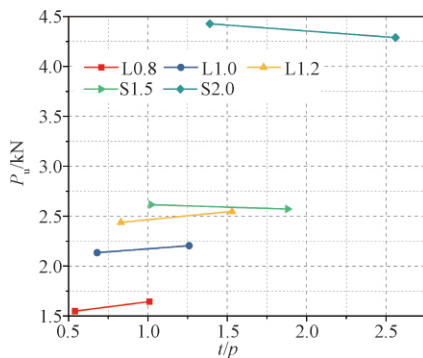


图9 板件厚度与螺纹间距比值对抗拔承载力影响  
Fig.9 Effect of steel sheet thickness to thread pitch ratio on pull-out capacity

#### 2.4.4 螺钉外直径

提取外直径为5.46 mm的SD5.5T和6.18 mm的SD6.3两种螺钉分别与L0.8、L1.2和S2.0钢板连接的数据,得到如图10所示的螺钉外直径对抗拔承载力影响关系,可知螺钉抗拔承载力随着螺钉外直径的增大而增大,对于高强超薄冷弯型钢板件,当螺钉外直径增大13.2%时承载力增加64.6%,而随着板厚增大承载力增幅逐渐减小,可见螺钉外直径对薄板试件的承载力的影响较之厚板试件的更大。

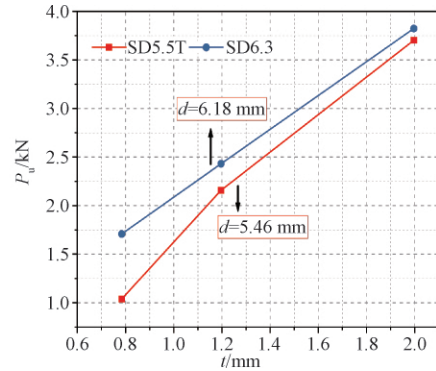


图10 螺钉外直径对抗拔承载力影响

Fig.10 Effect of screw outer diameter on pull-out capacity

#### 2.4.5 螺钉内直径

提取内直径为3.94 mm的SD5.5和4.28 mm的SD5.5T两种螺钉与L0.8、L1.2和S2.0钢板连接的数据,得到如图11所示螺钉内直径对抗拔承载力影响关系,可知承载力随着螺钉内直径的增大而减小,且内直径对薄板试件承载力的影响较之厚板试件的更加明显,如当螺钉内直径增大8.63%时,L0.8、L1.2和S2.0钢板试件的承载力分别降低了40.5%、12.5%和6.0%。

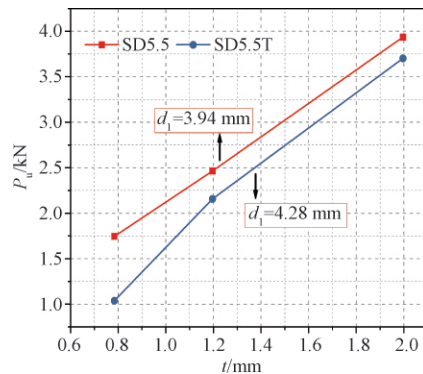


图11 螺钉内直径对抗拔承载力影响

Fig.11 Effect of screw inner diameter on pull-out capacity

#### 2.4.6 螺钉钻头处直径

冷弯型钢板件螺钉连接抗拔承载力主要是通过螺纹与钉孔周边板件紧密挤压形成受力,工程中为了自钻自攻螺钉方便攻入钢板板内,其钻头处的直径略大于内直径,致使钢板上的螺钉钉孔直径稍大于内直径,螺纹与板件挤压受力减弱,由此对螺钉承载力的形成有一定影响,故分别选取自钻自攻螺钉SD4.2、SD4.8与自攻螺钉ST4.2、ST4.8与3种钢板S0.8、L0.8、L1.2连接的试验数据,研究螺钉钻头处直径对承载力影响,结果如表6所示,可以看出自攻螺钉ST4.2、ST4.8抗拔承载力均显著高于相应直径自钻自攻螺钉的。因此,螺钉钻头处直径的影响不



表6 螺钉钻头处直径对抗拔承载力影响  
Table 6 Effect of drill point diameter on pull-out capacity

钢板 编号	$P'_{u1}$ / kN	$P'_{u2}$ / kN	$\alpha$ / %	$P'_{u3}$ / kN	$P'_{u4}$ / kN	$\beta$ / %
S0.8	1.131 01	1.234 92	6.2	1.264 68	1.518 32	20.1
I0.8	1.549 19	1.872 68	20.9	1.897 57	2.190 15	15.4
L1.2	2.437 85	3.052 17	25.2	2.840 48	3.475 74	22.4

注:  $P'_{u1}$ 、 $P'_{u2}$ 、 $P'_{u3}$ 、 $P'_{u4}$  分别为 SD4.2、ST4.2、SD4.8 及 ST4.8 组试件试验承载力均值;  $\alpha = (P'_{u2} - P'_{u1}) / P'_{u1} \times 100\%$ ;  $\beta = (P'_{u4} - P'_{u3}) / P'_{u3} \times 100\%$ 。

容忽视,且其他参数相同时,随着钻头处直径的减小抗拔承载力增加。考虑承载力形成的机理,自钻自攻螺钉抗拔承载力应考虑钻头处直径的影响,而自攻螺钉应考虑内直径的影响。

### 3 抗拔承载力设计建议计算式

基于2.4节分析,对50组试件承载力试验值与钢材强度和钢板厚度以及螺钉外直径、内直径、螺纹间距、钻头处直径等参数进行拟合,提出冷弯型钢板件螺钉连接抗拔承载力设计建议计算式(6),试验值与其比值见表2。

$$P = \frac{0.7kt_c^{1.6}d^{3.3}f_y}{d_0^{2.5}p^{0.3}} \quad (6)$$

式中:  $P$  为单个螺钉的抗拔承载力, N;  $t_c$  为螺钉螺纹部分钻入基材的深度, mm;  $d$  为螺钉外直径, mm;  $d_0$  为螺钉内直径与钻头处直径较大值, mm;  $p$  为螺钉螺纹间距, mm;  $f_y$  为基材屈服强度, MPa;  $k$  为无量纲系数,当基材采用1.0 mm及以下的高强薄钢板时取0.9,当采用1.0 mm及以下的普通强度钢板时取1.2,其余情况则取1.0。

式(6)中螺钉螺纹钻入基材深度  $t_c$  的指数1.6,表明钢板厚度对承载力影响较大,且不是简单的线性关系。螺钉外直径  $d$  的指数为3.3,与承载力成正相关,采用  $d_0$  表示螺钉内直径与钻头处直径的较大值,其指数为-2.5,表明承载力与其负相关,且螺钉外直径较内直径与钻头处直径对承载力影响大,二者的比值进一步降低了外直径的影响。螺纹间距  $p$  的指数-0.3,说明其对承载力影响较小。式(6)的拟合相关系数为0.96,也说明其计算结果较为合理,如图12所示。

表4中给出了50组试件试验值与式(6)、各国规范以及李元齐等<sup>[19]</sup>、Sivapathasundaram等<sup>[17]</sup>提出的抗拔承载力计算值统计结果,可以看出式(6)抗拔承载力计算值的变异系数最小。该式可适用于0.8 mm及以上板厚的冷弯薄壁型钢板件,尤其针对高强冷弯薄壁型钢板件具有良好的适用性。

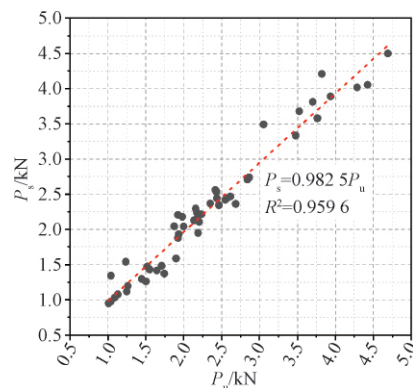


图12 螺钉抗拔承载力试验值与式(6)计算值的比较  
Fig. 12 Comparison of pull-out capacity obtained from tests and equation (6)

### 4 结论

1) 螺钉连接板厚为0.8 mm的超薄冷弯型钢板件主要发生钉孔挤压破坏,且螺钉直径越大、板材强度越低,钉孔挤压变形效应越显著。螺纹剪切破坏主要发生在1.0 mm及以上板厚试件,且螺纹剪切破坏钉孔周边越平整光滑则承载力越低。当板材强度及板件厚度均相同时,承载力越高则越靠近钉孔挤压破坏。

2) 与各国规范比较,我国规范GB 50018—2002抗拔承载力设计公式计算值变异系数27.7%为最大,欧洲规范EN 1993-1-3:2006公式计算结果变异系数最小,但是过于保守。对于LQ550高强钢材,中国规范GB 50018—2002及北美标准AISI S100-16、澳洲规范AS/NZS 4600:2018计算公式均偏于不安全,尤其针对0.8 mm的超薄板件。对于S350钢材,各国规范承载力公式均较为保守,变异系数较小。

3) 螺钉连接抗拔承载力随着板厚的增加而呈非线性增大,当S350级钢材板厚超过1.5 mm以后,承载力增大更显著。螺纹间距以及板厚与螺纹间距比值对抗拔承载力影响较小。

4) 螺钉连接抗拔承载力随着螺钉外直径的增加而增大,当螺钉的公称直径相同时,其抗拔承载力随着内直径的增大而减小,此效应在超薄板件的连接中更显著。钻头处直径对螺钉抗拔承载力的影响不容忽视,对于自攻螺钉,承载力计算时应考虑内直径,而自钻自攻螺钉应考虑钻头处直径,其他参数一致时,承载力随着钻头处直径的减小而增大。

5) 根据试验结果拟合的考虑钢材强度、板厚以及螺钉外直径、内直径、螺纹间距、钻头处直径的承载力设计公式的计算结果变异系数仅为9.2%,远小于各国规范及其他设计公式的小,该式针对0.8 mm的

超薄高强冷弯薄壁型钢板件与螺钉连接的抗拔承载力的计算具有较好的适用性和可靠性。

#### 参 考 文 献

- [1] YU Weiwen, LABOUBE Roger A. Cold-formed steel design [M]. 4th ed. Hoboken: Wiley, John & Sons, Incorporated, 2010: 1-2.
- [2] 周绪红, 石宇, 周天华, 等. 低层冷弯薄壁型钢结构住宅体系 [J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(2): 5-18. (ZHOU Xuhong, SHI Yu, ZHOU Tianhua, et al. Cold-formed steel framing system of low-rise residential building [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(2): 5-18. (in Chinese))
- [3] REYNAUD Serrette, DAVID Nolan. Pull-out strength of steel pins in cold-formed steel framing [J]. Journal of Structural Engineering, 2015, 141(5): 04014144.
- [4] 石宇, 王身伟, 刘永健. 冷弯薄壁型钢单颗自攻螺钉抗剪连接性能研究 [J]. 建筑科学与工程学报, 2014, 31(2): 57-64. (SHI Yu, WANG Shenwei, LIU Yongjian. Research on shear behavior of single tapping screw connection in cold-formed thin-wall steel structures [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2014, 31(2): 57-64. (in Chinese))
- [5] 李元齐, 马荣奎, 何慧文. 冷弯薄壁型钢与覆面钢板自攻螺钉连接性能试验研究 [J]. 建筑钢结构进展, 2017, 19(6): 60-64. (LI Yuanqi, MA Rongkui, HE Huiwen. Experimental study on behavior of screw connections for cold-formed thin-walled steel studs and steel sheathings [J]. Progress in Steel Building Structures, 2017, 19(6): 60-64. (in Chinese))
- [6] 卢林枫, 张亚平, 方文琦, 等. 冷弯薄壁型钢自攻螺钉连接抗剪性能试验研究 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(7): 2997-3005. (LU Linfeng, ZHANG Yaping, FANG Wenqi, et al. Experimental investigation on shear-bearing capacity for self-drilling screw connections of cold-formed thin-walled steel [J]. Journal of Central South University (Science and Technology) 2013, 44(7): 2997-3005. (in Chinese))
- [7] YE J, WANG X, ZHAO M. Experimental study on shear behavior of screw connections in CFS sheathing [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2016, 121: 1-12.
- [8] 王身伟, 石宇. 冷弯薄壁型钢自攻螺钉群连接抗剪承载力计算方法研究 [J]. 建筑结构, 2013(增刊1): 443-447. (WANG Shenwei, SHI Yu. Calculation on shear capacity of screws connection in cold-formed thin-wall steel structures [J]. Building Structure, 2013(Suppl. 1): 443-447. (in Chinese))
- [9] 齐岩, 苏明周, 张琳琳, 等. 低层冷弯薄壁型钢房屋振动台试验及有限元分析 [J]. 建筑科学与工程学报, 2009, 26(3): 71-75. (QI Yan, SU Mingzhou, ZHANG Linlin, et al. Shaking table test and finite element analysis of low-rise cold-formed thin-walled steel residential buildings [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2009, 26(3): 71-75. (in Chinese))
- [10] 李元齐, 刘飞, 沈祖炎, 等. 高强超薄壁冷弯型钢低层住宅足尺模型振动台试验 [J]. 建筑结构学报, 2013, 34(1): 36-43. (LI Yuanqi, LIU Fei, SHEN Zuyan, et al. Shaking table test on a full-scale model of low-rise high-strength cold-formed thin-walled steel framing buildings [J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(1): 36-43. (in Chinese))
- [11] 王树坤, 李元齐, 沈祖炎. 高强冷弯薄壁型钢研究现状 [C]//第六届全国现代结构工程学术研讨会论文集. 天津: 全国现代结构工程学术研讨会学术委员会, 2006: 5. (WANG Shukun, LI Yuanqi, SHEN Zuyan. Research status of high-strength cold-formed thin-walled steel [C]//Proceedings of the Sixth National Symposium on Modern Structural Engineering. Tianjin: Academic Committee of the National Symposium on Modern Structural Engineering 2006: 5. (in Chinese))
- [12] American Iron and Steel Institute. North American specification for the design of cold-formed steel structural members: AISI S100-16 [S]. Washington DC: American Iron and Steel Institute, 2016.
- [13] Standards Australia. Cold-formed steel structures: AS/NZS 4600: 2018 [S]. Sydney: Standards Australia, 2018.
- [14] British Standard Institution. Structural use of steelwork in building: part 5: code of practice for design of cold-formed thin gauge sections: BS 5950-5: 1998 [S]. London: British Standard Institution, 1998.
- [15] MAHENDRAN M, TANG R B. Pull-out strength of steel roof and wall cladding systems [J]. Journal of Structural Engineering, 1998, 124(10): 1192-1201.
- [16] 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: 2006 [S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2006.
- [17] SIVAPATHASUNDARAM M, MAHENDRAN M. New pull-out capacity equations for the design of screw fastener connections in steel cladding systems [J]. Thin-Walled Structures, 2018, 122: 439-451.
- [18] American Iron and Steel Institute. Test standard for determining the strength and deformation characteristics of cold-formed steel connections: AISI S905-17 [S]. Washington DC: American Iron and Steel Institute 2017.
- [19] 李元齐, 帅逸群, 沈祖炎, 等. 冷弯薄壁型钢自攻螺钉连接抗拉性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2015, 36(12): 143-152. (LI Yuanqi, SHUAI Yiqun, SHEN Zuyan, et al. Experimental study on tension behavior of self-drilling screw connections for cold-formed thin-walled steel structures [J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(12): 143-152. (in Chinese))