

# Q420 镀锌焊接圆管轴压整体稳定试验研究

施刚<sup>1</sup>, 姜雪<sup>2</sup>, 周文静<sup>1</sup>, 张勇<sup>3</sup>

(1. 清华大学 土木工程系 土木工程安全与耐久教育部重点实验室, 100084 北京;

2. 中国建筑西南设计研究院有限公司, 610041 成都; 3. 北京交通大学 土木建筑工程学院, 100044 北京)

**摘要:** 为了研究 Q420 高强度镀锌焊接圆钢管轴压柱的整体稳定性能, 进行了轴压静力试验, 研究了失稳破坏形态和极限承载力, 通过计算得到其稳定系数  $\varphi$ , 并与现行钢结构设计规范的柱子曲线进行对比. 结果表明, 试验实测得到的稳定系数  $\varphi$  明显高于我国现行钢结构设计规范所规定的焊接圆钢管所在的 b 类截面柱子曲线, 甚至高于 a 类截面柱子曲线; 同时, 对镀锌与未镀锌圆钢管柱的轴压受力性能进行对比分析, 结果表明, 焊接圆钢管试件经过热镀锌处理之后轴压整体稳定承载力有所提高.

**关键词:** 高强度钢材; 镀锌; 焊接圆钢管; 轴心受压; 整体稳定

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2013)10-0075-06

## Experimental study on overall buckling behavior of Q420 high strength welded galvanized tubes under axial compression

SHI Gang<sup>1</sup>, JIANG Xue<sup>2</sup>, ZHOU Wenjing<sup>1</sup>, ZHANG Yong<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Civil Engineering Safety and Durability of China Education Ministry, Department of Civil Engineering, Tsinghua University, 100084 Beijing, China; 2. China Southwest Architectural Design and Research Institute Co., Ltd., 610041 Chengdu, China; 3. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, 100044 Beijing, China)

**Abstract:** To investigate the overall buckling behavior of Q420 high strength welded galvanized steel tubes, an axial compression column test was conducted, the buckling modes and ultimate strength were analyzed, and the buckling strength of the specimens were calculated, which were compared with the column curves in the Chinese code. It shows that the stability factor  $\varphi$  calculated from test results is much higher than that calculated according to the Chinese code. At the same time, the comparison of axial compressive test result between galvanized round tubes and the ungalvanized ones is introduced, and the results show that the hot galvanizing processing improves the bearing capacity.

**Key words:** high strength steel; galvanized; welded tube; axial compression; overall buckling

高强度钢材(名义屈服强度大于 420 MPa)不仅在国内外的建筑和桥梁结构中得到应用<sup>[1-4]</sup>, 而且在一些高压、特高压输电线路和大截面导线输电线路的输电铁塔等结构中也逐渐采用<sup>[5]</sup>. 高强钢的应用是提高我国输电线路建设水平的一大突破, 国内大型输电铁塔中已逐步采用 Q420 高强度钢材.

随着高压、特高压输电线路以及大截面导线输

电线路的建设, 输电铁塔向大荷重、大构件方向发展. 在大荷载输电杆塔中合理应用钢管塔, 具有相对技术经济优势. 与角钢塔相比<sup>[6]</sup>, 钢管塔构件风压小、刚度大、结构简洁、传力清晰, 能够充分发挥材料的承载性能, 适合在荷载较大的铁塔中采用.

钢管塔中较多采用镀锌焊接圆钢管作为基本受力构件. 对于 Q420 高强焊接圆钢管轴压柱的整体稳定性试验研究, 目前国内外尚未见到相关报道. 本文针对 Q420 高强度镀锌焊接圆钢管进行了轴压试验研究. 以期对该类钢材轴压柱的失稳模态和稳定承载力有更准确的认识, 并为相关设计方法提供试验依据和建议.

收稿日期: 2013-01-04.

基金项目: 国家自然科学基金(51078205).

作者简介: 施刚(1977—), 男, 副教授, 博士生导师.

通信作者: 施刚, shigang@tsinghua.edu.cn.

## 1 试验概况

### 1.1 试件设计

试验对象为 Q420 镀锌直焊缝圆钢管, 研究其轴心受压整体稳定性能. 试件截面形式为  $\phi 273 \times 6$ , 试件共计 9 个. 试件的长度设计根据焊接钢管轴心受压柱的长细比不同来确定, 依次为 20、40、60 共 3 种, 每种长细比均有 3 个试件.

试件编号、名义尺寸规格以及实际测量的尺寸见表 1. 表 1 中所有钢管试件的名义尺寸规格均为  $\phi 273 \times 6$  埋弧焊接的镀锌直焊缝圆钢管. 表中实际长度  $l_0$  为两端带法兰盘的钢管的长度. 试件编号中 D420 代表钢管的名义屈服强度为 420 MPa, 中间数字代表名义长细比, 最后数字是序号.

表 1 试件名义尺寸规格和实际尺寸

规格	试件编号	理论长细比	内径/mm	壁厚/mm	实际长度/mm
Q420 $\phi 273 \times 6$ 径厚比 45.5 埋弧焊 镀锌	D420-20-4	20	261.94	6.013	1 890.1
	D420-20-5		261.85	6.013	1 890.2
	D420-20-6		261.83	5.867	1 889.7
	D420-40-4	40	261.05	5.942	3 775.9
	D420-40-5		263.48	6.107	3 776.6
	D420-40-6		256.98	6.147	3 775.7
	D420-60-4	60	259.85	5.990	5 662.2
	D420-60-5		262.78	6.002	5 662.4
	D420-60-6		260.50	5.807	5 662.7

### 1.2 材性试件

表 1 中 9 根钢管试件系从 8 根母材钢管上截取下来, 根据 GB/T 2975—1998《钢及钢产品力学性能试验取样位置及试样制备》<sup>[7]</sup> 及 Q-GDW 384—2009《输电线路钢管塔加工技术规程》<sup>[8]</sup> 的相关规定, 对直焊缝圆钢管的标准材性试件进行取样. 标准材性试件从每个母材钢管上分别取 3 个材性试件, 有 8 根母材钢管, 故共有 24 个标准材性试件. 根据 GB/T 228—2002《金属材料室温拉伸试验方法》<sup>[9]</sup> 的相关规定, 设计标准材性试件的尺寸. 通过标准材性拉伸试验, 得到 24 个材料试件的应力-应变曲线, 典型应力-应变曲线 (WMQ-1) 见图 1. 可以看出, 该种钢材有明显的屈服平台, 对于每一个材性试件取下屈服强度作为屈服强度. 每个材性试件的屈服强度和极限强度见表 2, 其中 WMQ-11B 因运送失误而丢失.

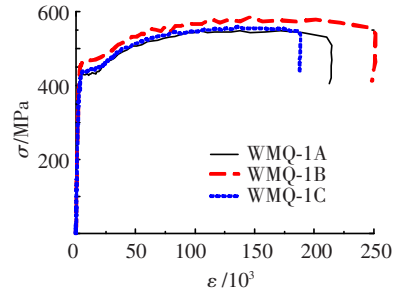


图 1 材性试验典型应力-应变曲线 (WMQ-1)

表 2 材性试验结果

拉伸试件编号	MPa			
	屈服强度 $f_y$	抗拉强度 $f_u$	屈服强度 $f_{y,ave}$	抗拉强度 $f_{u,ave}$
WMQ-1	A	428.15	547.59	
	B	449.60	585.85	438.33
	C	437.26	558.90	
WMQ-2	A	439.64	591.63	
	B	451.59	587.91	449.22
	C	456.42	585.57	
WMQ-6	A	457.05	558.87	
	B	431.27	548.00	435.74
	C	418.91	567.81	
WMQ-7	A	434.98	563.61	
	B	442.61	608.45	440.73
	C	444.60	568.26	
WMQ-8	A	451.15	582.48	
	B	444.81	567.61	440.58
	C	425.77	542.12	
WMQ-9	A	453.83	583.93	
	B	435.06	549.55	444.76
	C	445.40	558.56	
WMQ-10	A	476.70	584.44	
	B	473.48	592.19	463.62
	C	440.69	582.04	
WMQ-11	A	451.97	559.41	
	B	-	-	449.50
	C	447.03	579.89	

### 1.3 试验装置

采用 500T 液压式压力试验机进行竖向单调静力加载, 设备型号为 YES-500, 最大荷载 5 000 kN. 试验机上下两加载端均有球铰, 以释放轴压柱两端扭转和弯曲自由度, 即试件两端边界条件为铰接, 加载装置见图 2.

### 1.4 量测内容与方法

量测内容主要包括试件的实际尺寸、初始缺陷 (几何初始缺陷和初偏心)、钢材材料强度和受

压柱的变形、柱中截面应变以及稳定承载力。其中试件长度和截面尺寸见表 1。图 3 为试件端部和中部截面的应变片和位移计布置方案。图 3(a) 中 4-1 至 4-4 和图 3(b) 中 4-5、4-6、4-8 以及 4-10 分别表示测量柱底和柱顶荷载初偏心的 4 个应变片, 图 3(a)、(b) 中 1-9、2-6、2-7、2-8 表示 4 个测量试件纵向变形的位移计。图 3(c) 中 3-1 至 3-8 表示 8 个测量柱中截面应变发展的应变片, 2-2、2-3 表示测量柱中横向变形的位移计。

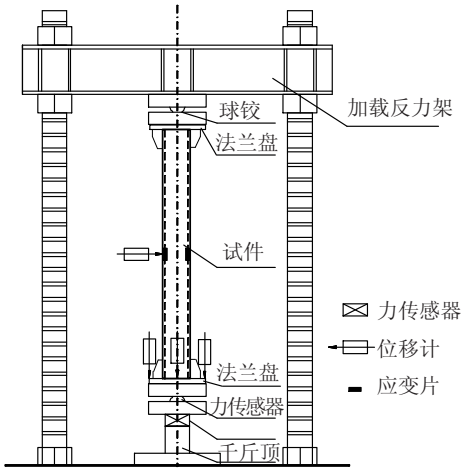
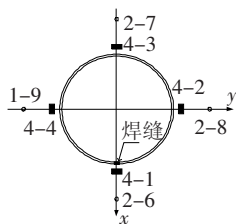
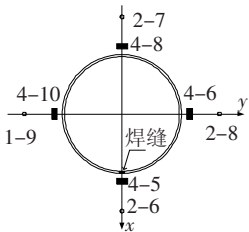


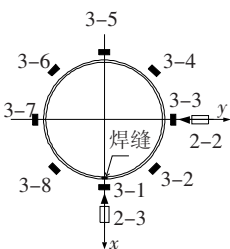
图 2 试验加载装置



(a) 柱顶截面



(b) 柱底截面



(c) 柱中截面

图 3 试验测点布置

对于试件的几何初始缺陷, 本文主要分别测量钢管试件的 4 条有代表性的母线(即图 4 所示 X 轴 Y 轴与钢管相交的 4 条母线)分别偏离其柱两端相应点连线的最大距离, 分别记做  $v_1$ 、 $v_2$ 、 $v_3$ , 对于试件的荷载初偏心, 本文主要通过图 3(a)、(b) 所示的柱顶和柱底各 4 个应变片的在弹性阶段的测量值分别反算出柱顶和柱底的荷载初偏心。

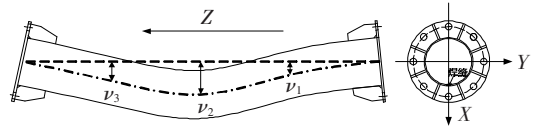


图 4 几何初始缺陷符号

## 2 试验结果

### 2.1 初始缺陷测量结果

各个试件的几何初始缺陷测量结果见表 3。测量中每根钢管试件共有 +X、-X、+Y 和 -Y 4 个方向母线的几何初始缺陷值, 而我们关心的是钢管试件中心轴偏离其柱两端相应点连线的最大距离, 所以测得的 4 条母线几何初始缺陷数据中 +X 和 -X 两个方向的数据取平均值作为试件中心轴 X 方向的几何初始缺陷, 同样 +Y 和 -Y 两个方向取平均值作为试件中心轴 Y 方向的几何初始缺陷, 而后与通过柱顶柱底应变片反算出来的相应方向的荷载初偏心进行叠加, 最终结果的最大值作为每一试件的几何初始缺陷。

表 3 中  $v_1$ 、 $v_2$ 、 $v_3$  表示试件最终初始缺陷结果最大的一条母线的几何初始缺陷(图 4 所示), 而  $v_0$  则表示 3 处缺陷的最大值。  $e_{0t}$ 、 $e_{0b}$  分别表示柱顶、柱底的荷载初偏心,  $e$  表示试件的总的缺陷 ( $e = v_0 + (e_{0t} + e_{0b})/2$ )。正负号表示缺陷的方向, 负号表示与坐标轴正方向相反(图 4 所示)。

### 2.2 失稳模式及变形

圆钢管轴心受压失稳主要表现出整体失稳和局部失稳两种模式, 部分圆钢管试件在出现整体失稳的同时也出现了局部失稳现象, 即相关失稳状态。圆钢管构件竖向变形是通过位于柱端截面的测点 1-9、2-6、2-7 以及 2-8(图 3 所示)的 4 个位移计测量结果取平均值得出的, 试件的横向变形是通过位于试件中间截面的测点 2-2 和 2-3 的位移计来测量, 图 5 所示为圆钢管试件 D420-60-6 的荷载-位移曲线。

轴压试验共 9 根试件, 长细比从  $\lambda = 20$  到  $\lambda = 60$ (见表 1), 总体上 Q420 高强直焊缝圆钢管轴心受压柱的失稳模式呈现如下特点:

表 3 几何初始缺陷测量结果

试件编号	初弯曲/mm				初偏心/mm		$(e/L_0) / \%$
	$\nu_1$	$\nu_2$	$\nu_3$	$\nu_0$	$e_{0t}$	$e_{0b}$	
D420-20-4	0.70	0.25	-0.45	0.70	-28.20	-30.45	12.12
D420-20-5	0.90	0.85	1.00	1.00	7.10	6.47	3.30
D420-20-6	-1.20	-2.50	-1.00	-2.50	6.53	20.59	4.68
D420-40-4	0.35	1.15	0.40	1.15	9.21	-4.70	0.80
D420-40-5	0.25	-0.10	-0.15	0.25	-1.50	4.44	0.40
D420-40-6	-1.20	-0.25	-0.25	-1.20	3.30	-3.00	0.25
D420-60-4	0.55	0.35	-0.05	0.55	7.40	1.20	0.79
D420-60-5	-0.60	-0.50	-0.75	-0.75	-5.00	-0.10	-0.54
D420-60-6	-0.50	-1.75	-1.00	-1.75	8.32	-2.43	0.19

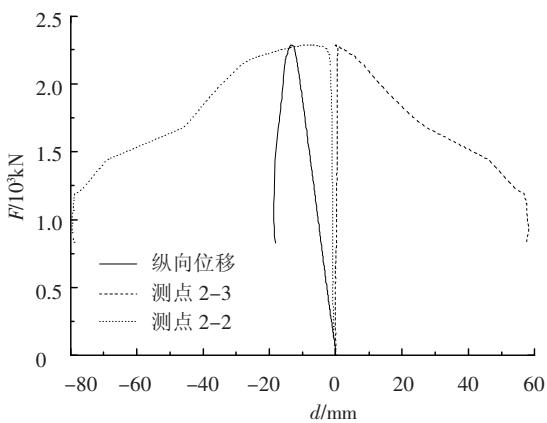


图 5 试件 D420-60-6 的荷载-位移曲线

1) 短柱试件 ( $\lambda = 20$ ) 主要表现为局部屈曲失稳, 柱端部鼓凸, 部分试件发生整体失稳的同时柱端部出现局部鼓凸, 如图 6(a) 所示; 2) 中长柱试件 ( $\lambda = 40$ ) 主要表现为整体失稳, 同时在柱端出现局部凹凸屈曲现象, 如图 6(b) 所示; 3) 长柱试件 ( $\lambda = 60$ ) 主要表现为整体失稳破坏模式, 一般在柱的 1/2 处或者 1/3 处发生整体破坏, 部分试件端部有不明显的局部屈曲, 如图 6(c) 所示。

### 2.3 稳定承载力

表 4 给出了所有试件的稳定承载力  $N$  的试验结果. 表中各试件的稳定系数  $\varphi$  试验值按公式 (1) 计算, 式中,  $A$  为试件的实测截面面积 (根据表 1 结果计算),  $f_y$  为钢材的屈服强度实测值, 即每个钢管试件对应的未镀锌的拉伸试件的屈服强度实测值 (见表 2、表 4).

$$\varphi = \frac{N}{Af_y} \quad (1)$$

将根据试验结果计算得到的整体稳定系数  $\varphi$  与 GB50017—2003《钢结构设计规范》(简称《规范》)<sup>[10]</sup> 采用的柱子曲线进行对比, 如表 4 和图 7 所示. 对于轴心受压镀锌焊接圆管构件, 《规范》将其归为 b 类截面. 从图 7 可看出, 其整体稳

定系数的试验结果要明显高于 b 类柱曲线, 甚至超过《规范》采用的最高的 a 类柱子曲线.



图 6 试件失稳破坏形态

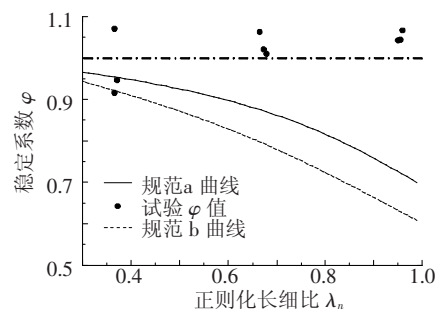


图 7 试验结果与《规范》柱子曲线对比

在实际工程设计中 Q420 直焊缝圆钢管轴压柱按《规范》中 b 类曲线计算过于保守, 不利于材料性能的充分利用, 而通过本文试验, 9 个试件试验得到  $\varphi$  值平均比规范按 a 类曲线计算的  $\varphi$  值高 22.1%. 由于试验中短长细比构件出现局部失稳现象 (图 6), 故整体稳定系数略低于 a 类曲线, 而长细比较

大的构件的整体稳定系数均高于 a 类曲线。

从表 4 和图 7 可看出, 在镀锌的 9 根试件中, 有出现稳定系数  $\varphi$  值大于 1 的情况, 主要因为: 一是镀锌后考虑镀锌层厚度, 钢管截面积略有增大,

承载力提高; 二是镀锌试件的整体稳定系数  $\varphi$  的计算, 采用的屈服强度为未镀锌的拉伸试件的屈服强度, 而构件经过镀锌工艺, 其屈服强度会有一定程度的提高。

表 4 稳定承载力试验结果

试件规格	试件编号	钢管对应拉伸试样编号	荷载最大值 N/ kN	试验值 $\varphi$	按规范 b 类截面		按规范 a 类截面	
					$\varphi_b$	$\varphi/\varphi_b$ 比值	$\varphi_a$	$\varphi/\varphi_a$ 比值
Q420 $\phi 273 \times 6$ 径厚比 45.5 埋弧焊 镀锌	Q420-20-4	WMQ-1A; WMQ-1B; WMQ-1C	2033.38	0.916	0.921	0.995	0.954	0.960
	Q420-20-5	WMQ-1A; WMQ-1B; WMQ-2C	2374.71	1.071	0.921	1.162	0.954	1.122
	Q420-20-6	WMQ-2A; WMQ-2B; WMQ-2C	2099.50	0.947	0.920	1.030	0.954	0.993
	Q420-40-4	WMQ-9A; WMQ-9B; WMQ-9C	2355.67	1.063	0.797	1.333	0.875	1.214
	Q420-40-5	WMQ-10A; WMQ-10B; WMQ-10C	2449.28	1.021	0.793	1.287	0.873	1.171
	Q420-40-6	WMQ-11A; WMQ-11C	2306.17	1.010	0.790	1.277	0.870	1.160
	Q420-60-4	WMQ-6A; WMQ-6B; WMQ-6C	2276.84	1.044	0.629	1.661	0.722	1.446
	Q420-60-5	WMQ-7A; WMQ-7B; WMQ-7C	2328.63	1.043	0.632	1.650	0.726	1.437
	Q420-60-6	WMQ-8A; WMQ-8B; WMQ-8C	2284.83	1.067	0.627	1.704	0.720	1.483
平均值					1.344		1.221	

### 3 与未镀锌试件对比分析

#### 3.1 材性试件

为了研究 Q420 圆钢管在镀锌前后的力学性能变化, 材性试件的其中 3 组试件做了镀锌处理, 镀锌后的材性试件力学性能见表 5。

表 5 镀锌试件材性试验结果

拉仲试件编号		镀锌	$f_y$	$f_u$	$f_{y,ave}$	$f_{u,ave}$
WMQ-9D	A	√	489.36	570.59		
	B	√	470.75	556.57	475.19	560.51
	C	√	465.45	554.37		
WMQ-10D	A	√	477.91	567.23		
	B	√	474.24	560.56	474.91	563.46
	C	√	472.59	562.59		
WMQ-11D	A	√	477.31	564.3		
	B	√	453.5	540.24	469.09	557.78
	C	√	476.47	568.79		

对镀锌前后的拉伸试样强度统计见表 6。镀锌拉伸试样屈服强度平均提高 5.05%, 但抗拉强度减小 1.80%, 主要原因是热镀锌处理对试验构件相当于热处理。

#### 3.2 承载力比较

在进行 9 根镀锌圆钢管轴压试验的同时, 本试验也同时进行了 15 根未镀锌的圆钢管轴压稳定试验研究。现将部分试验结果进行对比分析, 见表 7, 其中每种长细比镀锌试件与未镀锌试件各 3

根, 截面形式相同, 唯一不同之处即是否进行了镀锌处理。从表 7 可知, 试件经过镀锌处理之后, 承载力提高, 整体稳定系数  $\varphi$  提高。对于长细比为 20 的构件, 镀锌与不镀锌的钢管柱在试验加载的工程中, 主要的破坏现象是柱端局部鼓凸, 柱端法兰板没有加劲肋的构件还伴有法兰板下(上)翻的现象, 主要表现为局部屈曲破坏。因此才会导致

表 6 镀锌与未镀锌材性拉伸试件强度比较

内容	对应试样 编号	镀锌前	镀锌后	$((B-A)/A)/\%$		
		A/ MPa	B/ MPa	各试样	平均值	
屈服 强度	WMQ-9A	453.83	489.36	7.83		
	WMQ-9B	435.06	470.75	8.20		
	WMQ-9C	445.40	465.45	4.50		
	WMQ-10A	476.70	477.91	0.25		
	WMQ-10B	473.48	474.24	0.16	5.05	
	WMQ-10C	440.69	472.59	7.24		
	WMQ-11A	451.97	477.31	5.61		
	WMQ-11B	-	453.50	-		
	WMQ-11C	447.03	476.47	6.59		
	抗拉 强度	WMQ-9A	583.93	570.59	-2.28	
		WMQ-9B	549.55	556.57	1.28	
WMQ-9C		558.56	554.37	-0.75		
WMQ-10A		584.44	567.23	-2.94		
WMQ-10B		592.19	560.56	-5.34	-1.8	
WMQ-10C		582.04	562.59	-3.34		
WMQ-11A	559.41	564.30	0.87			
WMQ-11B	-	540.24	-			
WMQ-11C	579.89	568.79	-1.91			

表 7 镀锌与未镀锌轴压试件承载力比较

长细比	未镀锌				镀锌				稳定系数比较	
	对应试件编号	试件轴压承载力 $N/kN$	未镀锌试样屈服强度 $f_y/MPa$	整体稳定系数 $\varphi_A$	对应试件编号	试件轴压承载力 $N/kN$	未镀锌试样屈服强度 $f_y/MPa$	整体稳定系数 $\varphi_B$	$((\varphi_B - \varphi_A)/\varphi_A)/\%$	
										比较值
20	D420-20-1	2 094.82	438.30	0.944	D420-20-4	2 033.38	438.30	0.916	-2.97	
	D420-20-2	2 173.08	438.30	0.975	D420-20-5	2 374.71	438.30	1.071	9.85	1.11
	D420-20-3	2 178.10	449.20	0.982	D420-20-6	2 099.50	449.20	0.947	-3.56	
40	D420-40-1	2 027.24	444.80	0.916	D420-40-4	2 355.67	444.80	1.063	16.05	
	D420-40-2	2 099.50	463.60	0.917	D420-40-5	2 449.28	463.60	1.021	11.34	12.59
	D420-40-3	2 026.38	449.50	0.915	D420-40-6	2 306.17	449.50	1.010	10.38	
60	D420-60-1	1 956.83	450.30	0.884	D420-60-4	2 276.84	435.70	1.044	18.10	
	D420-60-2	1 974.01	457.10	0.863	D420-60-5	2 328.63	440.70	1.043	20.86	20.02
	D420-60-3	1 959.65	450.80	0.881	D420-60-6	2 284.83	440.60	1.067	21.11	

长细比为 20 的镀锌与未镀锌构件的承载力试验值较为接近,没有明显的规律性.对于长细比为 40、60 的构件,镀锌钢管柱的承载力试验值高于未镀锌钢管柱.从试验现象可知,长细比为 40、60 的构件主要发生整体失稳,少数构件在发生整体失稳的同时还伴有端部局部鼓凸的现象.热镀锌工艺提高了钢材的屈服强度,所以提高了试件的承载力.同时,热镀锌工艺使钢管构件表面的残余应力分布趋于平缓,因此残余应力会有一定程度的减小,这也会提高试件的承载力.

## 4 结 论

1) Q420 直焊缝镀锌圆钢管轴心压杆的失稳模式主要呈现以下特点:短柱( $\lambda = 20$ )主要为局部失稳;中长柱( $\lambda = 40$ )主要为相关失稳,即板件的局部屈曲和构件的整体屈曲耦合在一起;长柱( $\lambda = 60$ )主要为整体失稳,部分试件端部有不明显的局部屈曲.

2) Q420 直焊缝镀锌圆钢管轴心受压构件试验得到的稳定系数  $\varphi$  均大于规范中 b 类曲线的计算值,与 a 类曲线计算值较为接近,部分  $\varphi$  值高于 a 类曲线.由于试验中短长细比构件出现局部屈曲现象,整体稳定系数略低于 a 类曲线,而长细比较大的构件稳定系数高于 a 类曲线.所以有理由建议, Q420 直焊缝镀锌圆钢管轴心受压整体稳定可以采用 a 类曲线.

3) 试件经过镀锌处理之后,承载力提高,整体稳定系数  $\varphi$  提高.

4) 我国 GB50017—2003《钢结构设计规范》第 5.4.5 条关于圆钢管径厚比的限值规定有待进一步优化.在试验中,出现了满足径厚比限值要求

试件却先发生局部屈曲的现象,镀锌焊接圆钢管的径厚比限值需要进一步深入研究.

## 参考文献

- [1] International Association for Bridge and Structural Engineering. Use and application of high-performance steels for steel structures[M]. Zurich: IABSE, 2005.
- [2] POCOCK G. High strength steel use in Australia, Japan and the US[J]. The Structural Engineer, 2006, 84(21): 27-30.
- [3] 施刚, 石永久, 王元清. 超高强度钢材钢结构的工程应用[J]. 建筑钢结构进展, 2008, 10(4): 32-38.
- [4] 施刚, 王元清, 石永久. 高强度钢材轴心受压构件的受力性能[J]. 建筑结构学报, 2009, 30(2): 92-97.
- [5] 秦永坚, 王登科, 唐其练, 等. 500 kV 双回路输电线路铁塔采用 Q420 高强钢的研究[J]. 武汉大学学报: 工学版, 2007, 40(S1): 200-203.
- [6] 孙竹森, 程永锋, 张强, 等. 输电线路钢管塔的推广与应用[J]. 电网技术, 2010, 34(6): 186-192.
- [7] GB/T 2975—1998 钢及钢产品力学性能试验取样位置及试样制备[S]. 北京: 中国标准出版社, 1998.
- [8] Q-GDW 384—2009 输电线路钢管塔加工技术规程[S]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [9] GB/T 228—2002 金属材料室温拉伸试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [10] GB50017—2003 钢结构设计规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2003.
- [11] 班慧勇, 施刚, 邢海军, 等. Q420 等边角钢轴压杆稳定性研究(I)—残余应力的试验研究[J]. 土木工程学报, 2010, 43(7): 14-21.
- [12] TEBEDGE N, ALPSTEN G, TALL L. Residual-stress measurement by the sectioning method [J]. Experimental Mechanics, 1973, 13(2): 88-96.

(编辑 赵丽莹)