

圆钢管轴压构件开洞与补强研究报告

- 0 引言
- 1 机理研究
- 2 研究方法
- 3 参数分析
- 4 补强措施
- 5 结论

撰写人: 孟宪德 博士

联系方式: meng.xiande@ccdi.com.cn

工作单位: CCDI 联诚结构上海一部

二〇一三年十二月



圆钢管轴压构件开洞与补强研究

0 引言

无论在空间结构还是框架结构中，经常使用圆钢管截面的构件。有时不可避免的会在管壁上开圆洞，特别是立柱构件，以便于内置的雨水管或者电缆管穿出。如图 1 所示。

《高层民用建筑钢结构技术规程》(JGJ99-98)^[1] 给出了 H 型钢梁开孔的原则和补强的要求：不应在距离梁端 1 倍的梁高范围内开孔，开孔的高度/直径不应大于 1/2 倍的梁高。而对圆钢管截面构件，未见文献对开洞和补强有指导原则或者设计建议。

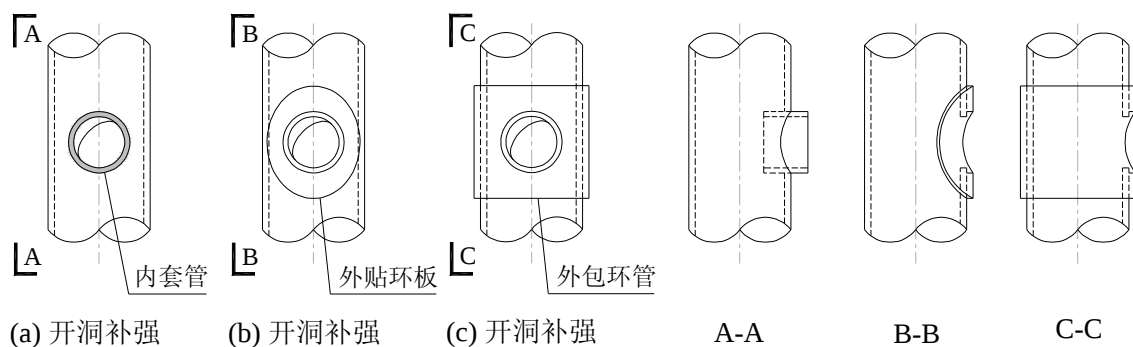


图 1 圆钢管开洞与补强

Fig 1 Circular hole and reinforcement on the CHS member

本报告对轴压工况下的热轧圆钢管截面构件，在侧壁开圆洞时的承载力削弱和补强措施进行研究。首先对洞口周边的受力机理进行研究，给出承载力削弱的力学机理分析。其次对研究方法—数值分析方法的有效性进行了论证。再次，通过参数分析模型对开洞情况下的承载力削弱进行分析，给出分析结果。第四，针对工程中常用的两种补强措施，建立参数模型，给出分析结果。最后，根据开洞和补强的分析结果，给出设计建议，以填补此方面的空白。

1 机理研究

从应力和变形两方面来进行侧壁开洞的机理分析。如图 2 所示，构件仅承受轴压力 N ，轴压力作用于截面形心，总体上轴压应力 σ_N 均匀分布。在开洞位置，净截面面积 A_n 较毛截面面积 A 小，面积削弱，造成开洞区域净截面轴压应力 σ_{Ne} 较 σ_N 大。另外，在开洞位置，轴力 N 作用位置与截面形心轴不一致，出现偏差，产生附加弯曲应力 σ_{Me} 。因此，洞口两侧正应力将增大，具体数值取决于洞口的尺寸。

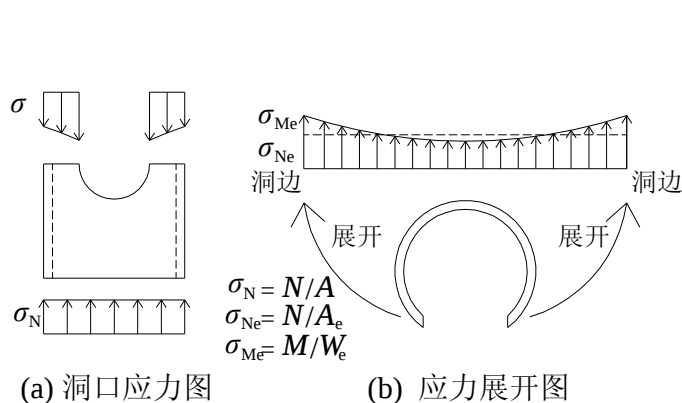


Fig 2 Axial stress distribution at the cross area near the hole

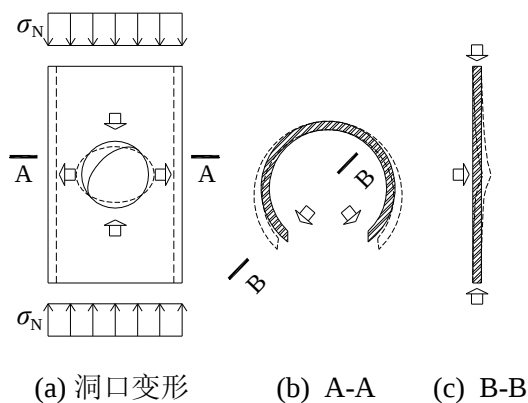


Fig 3 Deformation diagram around the hole

如图 3 所示，洞口边线为一条闭合的空间曲线。在受轴压力后，洞口上下有压缩的变形，在“拱”效应下，洞口左右两侧会产生向两边扩张的变形，如图 3(a)所示。对于有缺口的圆环，缺口处往两边扩张，如图 3 (b)，造成洞口两侧有出“平面”变形，形成“平面外”缺陷，如图 3 (c) 所示。在轴压力作用下，在二阶效应下此缺陷会被进一步放大，产生使洞口两侧屈曲的趋势。洞口左右两侧的管壁容易发生屈曲，致使承载力进一步降低。

2 研究方法

数值分析已广泛应用于结构的分析中，有限元法有效的力学问题的数值分析手段。有限元法得到的结果与试验结果比较，具有良好的精度，是一种快捷、实用的研究方法^{[2], [3]}。

影响构件稳定承载能力的主要因素为构件几何缺陷、荷载偏心、残余应力等。数值分析研究对构件的承载力研究较困难的因素是对残余应力的模拟。文献[4]指出，轧制圆钢管的纵向残余应力较小，可以等效为偏心率来施加，这种计算方法简便而且误差较小。在综合考虑残余应力、初始偏心和初始弯曲后，文献[2]给出等效偏心率 ε_0 的计算公式(1)，力学简图如图 4 所示。

$$\text{当 } l \leq 0.5l_s \text{ 时, } \varepsilon_0 = 0.1\left(\frac{\lambda}{\lambda_s}\right) + \frac{\sqrt{2}\lambda}{1000} \quad (1a)$$

$$\text{当 } 0.5l_s < l \leq l_s \text{ 时, } \varepsilon_0 = 0.05 + \frac{\sqrt{2}\lambda}{1000} \quad (1b)$$

$$\text{当 } l > l_s \text{ 时, } \varepsilon_0 = 0.05 + \frac{\sqrt{2}\lambda}{2000}\left(1 + \frac{\lambda}{50}\right) \quad (1c)$$

其中，偏心率 $\varepsilon_0 = 4e/D$ ， e 为荷载偏心距， D 为圆管直径，弹塑性屈曲的临界长细比 $l_s = \sqrt{\frac{p^2 E}{f_y}}$ 。

由下节的分析结果可知，根据文献[4]得到的结果与《钢结构设计规范》^[5]的值基本上是吻合的。

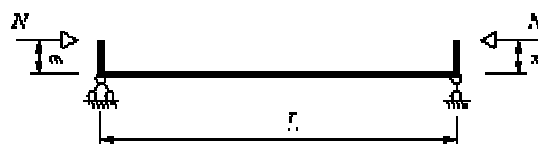


图 4 力学简图

Fig 4 Mechanic diagram

文献[6]对高强钢管的稳定性进行了研究,进行了试验研究和有限元分析研究,并进行了结果比较。有限元采用 ANSYS 的 SHELL181 单元,忽略残余应力,考虑初始弯曲和初始偏心。有限元结果与试验结构相当吻合,证明采用有限元方法对所需研究的杆件进行承载力研究是可行的。

3 参数分析

本文采用数值分析的方法进行热轧圆钢管构件开洞与补强的承载力研究。采用有限单元的方法建立带有此种开洞的构件参数模型,根据有限元参数分析结果,得到构件的承载力,与没有开洞的构件承载力模型分析结果进行比较。参数分析采用非线性分析,考虑材料非线性与几何非线性,给出构件加载和变形的全过程曲线。

影响构件承载力的主要几何因素包括:开洞与构件的直径比 $\beta (=d/D)$,开洞位置 $x(=l_c/L)$,构件长细比 λ ,构件截面径厚比 $\gamma (=D/(2T))$ 。参数模型的典型参数如图 5。

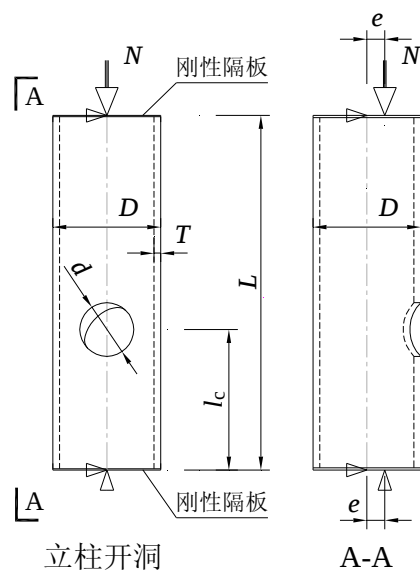


图 5 参数模型

Fig 5 Parameter model

参照工程中常用尺寸,选取基本可以覆盖常用开洞的参数范围,立柱直径 D 固定为 300mm。截面厚度 T : 5mm、8mm、16mm;开洞直径 d : 100mm、150mm、200mm;构件长度 L : 4000mm、8000mm、12000mm;开洞位置 l_c/L : $(300+0.5d)/L$ 、0.25、0.5。建立 90 个参数模型,如表 1 所示,即 81 个开洞的参数模型和 9 个没有开洞的参数模型,来考察节点极限承载力与洞径比 β 、径厚比 γ 、长细比 λ 、开洞位置 x 的关系。参数模型的命名原则示例:“T05L04d10x50”表示壁厚 T 为 05mm,长度 L 为 04m,洞口直径 d 为 100mm,位置 x 为 0.50。考虑到工程实际做法,洞口边距离构件端

部，最小距离为 D 。

表 1 参数模型列表

Tab.1 List of the parameter model

序号	参数模型	径厚比 γ $=D/(2T)$	洞径比 β $=d/D$	长细比 λ	开洞位置 x $=lc/L$	偏心 e (mm)	净截面率
1	T05L04d10x00	30	0.33	38	0.09	7.5	0.89
2	T05L04d10x25	30	0.33	38	0.25	7.5	0.89
3	T05L04d10x50	30	0.33	38	0.50	7.5	0.89
4	T05L04d15x00	30	0.50	38	0.09	7.5	0.83
5	T05L04d15x25	30	0.50	38	0.25	7.5	0.83
6	T05L04d15x50	30	0.50	38	0.50	7.5	0.83
7	T05L04d20x00	30	0.67	38	0.09	7.5	0.76
8	T05L04d20x25	30	0.67	38	0.25	7.5	0.76
9	T05L04d20x50	30	0.67	38	0.50	7.5	0.76
10	T05L08d10x00	30	0.33	77	0.04	12	0.89
11	T05L08d10x25	30	0.33	77	0.25	12	0.89
12	T05L08d10x50	30	0.33	77	0.50	12	0.89
13	T05L08d15x00	30	0.50	77	0.04	12	0.83
14	T05L08d15x25	30	0.50	77	0.25	12	0.83
15	T05L08d15x50	30	0.50	77	0.50	12	0.83
16	T05L08d20x00	30	0.67	77	0.04	12	0.76
17	T05L08d20x25	30	0.67	77	0.25	12	0.76
18	T05L08d20x50	30	0.67	77	0.50	12	0.76
19	T05L12d10x00	30	0.33	115	0.03	17.25	0.89
20	T05L12d10x25	30	0.33	115	0.25	17.25	0.89
21	T05L12d10x50	30	0.33	115	0.50	17.25	0.89
22	T05L12d15x00	30	0.50	115	0.03	17.25	0.83
23	T05L12d15x25	30	0.50	115	0.25	17.25	0.83
24	T05L12d15x50	30	0.50	115	0.50	17.25	0.83
25	T05L12d20x00	30	0.67	115	0.03	17.25	0.76
26	T05L12d20x25	30	0.67	115	0.25	17.25	0.76
27	T05L12d20x50	30	0.67	115	0.50	17.25	0.76
28	T08L04d10x00	18.75	0.33	39	0.09	7.5	0.89
29	T08L04d10x25	18.75	0.33	39	0.25	7.5	0.89
30	T08L04d10x50	18.75	0.33	39	0.50	7.5	0.89
31	T08L04d15x00	18.75	0.50	39	0.09	7.5	0.83
32	T08L04d15x25	18.75	0.50	39	0.25	7.5	0.83
33	T08L04d15x50	18.75	0.50	39	0.50	7.5	0.83
34	T08L04d20x00	18.75	0.67	39	0.09	7.5	0.76
35	T08L04d20x25	18.75	0.67	39	0.25	7.5	0.76
36	T08L04d20x50	18.75	0.67	39	0.50	7.5	0.76
37	T08L08d10x00	18.75	0.33	77	0.04	12	0.89
38	T08L08d10x25	18.75	0.33	77	0.25	12	0.89
39	T08L08d10x50	18.75	0.33	77	0.50	12	0.89
40	T08L08d15x00	18.75	0.50	77	0.04	12	0.83
41	T08L08d15x25	18.75	0.50	77	0.25	12	0.83
42	T08L08d15x50	18.75	0.50	77	0.50	12	0.83

43	T08L08d20x00	18.75	0.67	77	0.04	12	0.76
44	T08L08d20x25	18.75	0.67	77	0.25	12	0.76
45	T08L08d20x50	18.75	0.67	77	0.50	12	0.76
46	T08L12d10x00	18.75	0.33	116	0.03	17.25	0.89
47	T08L12d10x25	18.75	0.33	116	0.25	17.25	0.89
48	T08L12d10x50	18.75	0.33	116	0.50	17.25	0.89
49	T08L12d15x00	18.75	0.50	116	0.03	17.25	0.83
50	T08L12d15x25	18.75	0.50	116	0.25	17.25	0.83
51	T08L12d15x50	18.75	0.50	116	0.50	17.25	0.83
52	T08L12d20x00	18.75	0.67	116	0.03	17.25	0.76
53	T08L12d20x25	18.75	0.67	116	0.25	17.25	0.76
54	T08L12d20x50	18.75	0.67	116	0.50	17.25	0.76
55	T16L04d10x00	9.375	0.33	40	0.09	7.5	0.89
56	T16L04d10x25	9.375	0.33	40	0.25	7.5	0.89
57	T16L04d10x50	9.375	0.33	40	0.50	7.5	0.89
58	T16L04d15x00	9.375	0.50	40	0.09	7.5	0.82
59	T16L04d15x25	9.375	0.50	40	0.25	7.5	0.82
60	T16L04d15x50	9.375	0.50	40	0.50	7.5	0.82
61	T16L04d20x00	9.375	0.67	40	0.09	7.5	0.75
62	T16L04d20x25	9.375	0.67	40	0.25	7.5	0.75
63	T16L04d20x50	9.375	0.67	40	0.50	7.5	0.75
64	T16L08d10x00	9.375	0.33	80	0.04	12	0.89
65	T16L08d10x25	9.375	0.33	80	0.25	12	0.89
66	T16L08d10x50	9.375	0.33	80	0.50	12	0.89
67	T16L08d15x00	9.375	0.50	80	0.04	12	0.82
68	T16L08d15x25	9.375	0.50	80	0.25	12	0.82
69	T16L08d15x50	9.375	0.50	80	0.50	12	0.82
70	T16L08d20x00	9.375	0.67	80	0.04	12	0.75
71	T16L08d20x25	9.375	0.67	80	0.25	12	0.75
72	T16L08d20x50	9.375	0.67	80	0.50	12	0.75
73	T16L12d10x00	9.375	0.33	119	0.03	18	0.89
74	T16L12d10x25	9.375	0.33	119	0.25	18	0.89
75	T16L12d10x50	9.375	0.33	119	0.50	18	0.89
76	T16L12d15x00	9.375	0.50	119	0.03	18	0.82
77	T16L12d15x25	9.375	0.50	119	0.25	18	0.82
78	T16L12d15x50	9.375	0.50	119	0.50	18	0.82
79	T16L12d20x00	9.375	0.67	119	0.03	18	0.75
80	T16L12d20x25	9.375	0.67	119	0.25	18	0.75
81	T16L12d20x50	9.375	0.67	119	0.50	18	0.75
82	T05L04	30	-	38	-		
83	T05L08	30	-	77	-		
84	T05L12	30	-	115	-		
85	T08L04	18.75	-	39	-		
86	T08L08	18.75	-	77	-		
87	T08L12	18.75	-	116	-		
88	T16L04	9.375	-	40	-		
89	T16L08	9.375	-	80	-		
90	T16L12	9.375	-	119	-		

采用 ANSYS 有限元软件进行分析，采用 SHELL181 单元类型。有限元模型细部如图 7 所示。钢材屈服强度 f_y 为 235N/mm^2 ，弹性模量 E 为 $2.05 \times 10^5\text{N/mm}^2$ ，屈服后的折线模量 E_t 为 $1/2000E$ ，折线模量的取值原则是不影响理想弹塑性的本构关系又兼顾模型分析的收敛性。采用位移控制加载方法，以便于得到较完整的荷载—位移曲线。

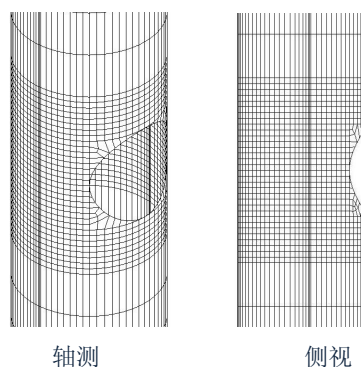
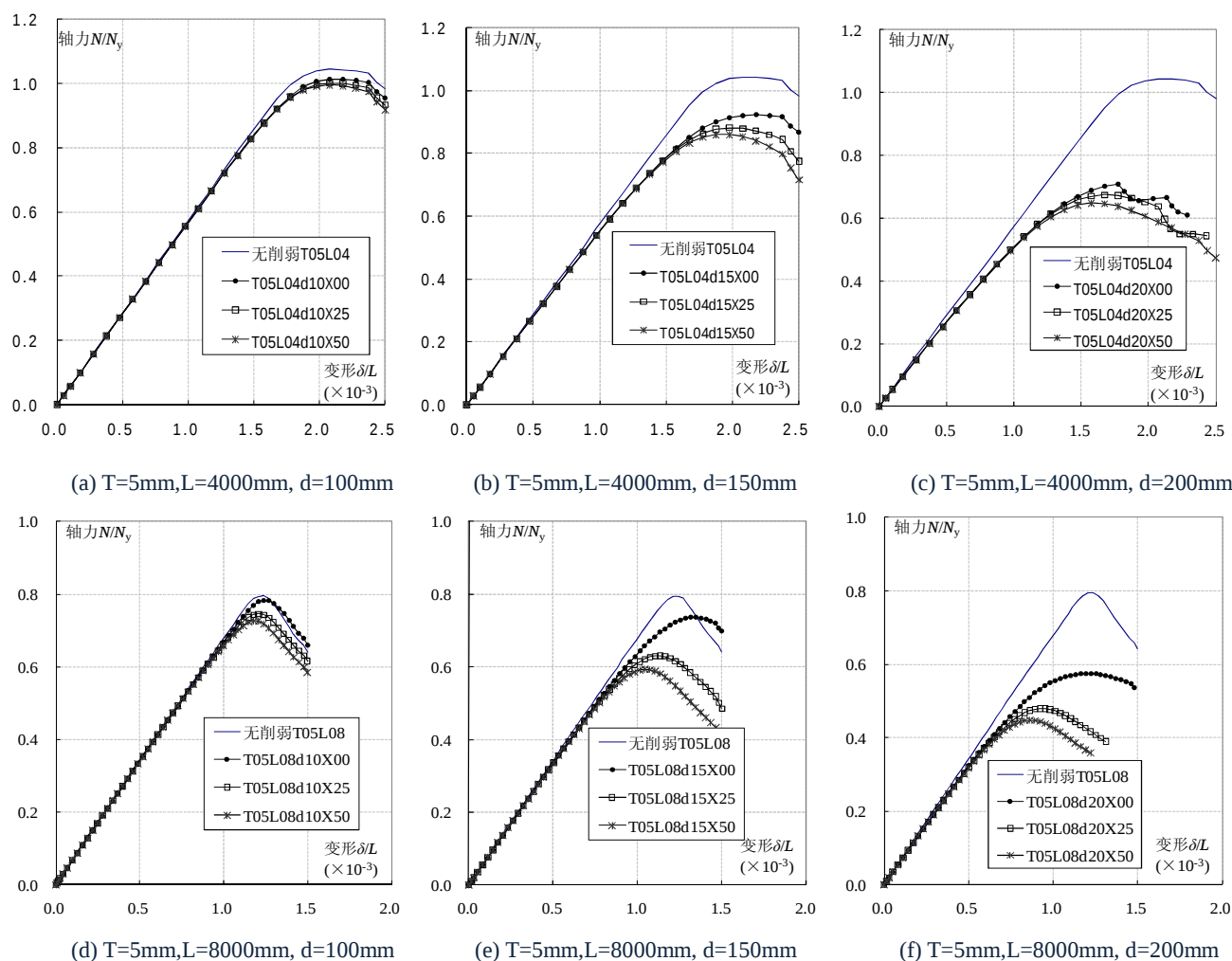
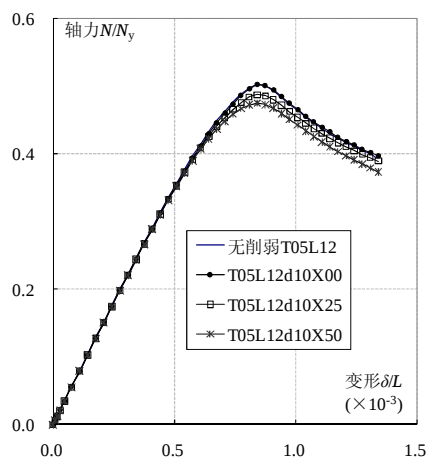


图 6 有限元模型洞口细部

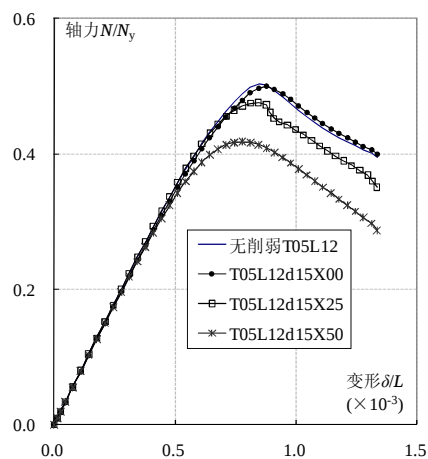
Fig 6 The hole detail of finite element model

根据上述参数模型，得到图 7、图 8、图 9 所示的荷载—位移曲线。图中，“位移 δ/L ”表示模型加载端的位移 δ 与构件长度 L 的比值，“轴力 N/N_y ”表示加载端的轴压力 N 与构件的截面屈服承载力计算值 $N_y (=Af_y)$ 的比值。

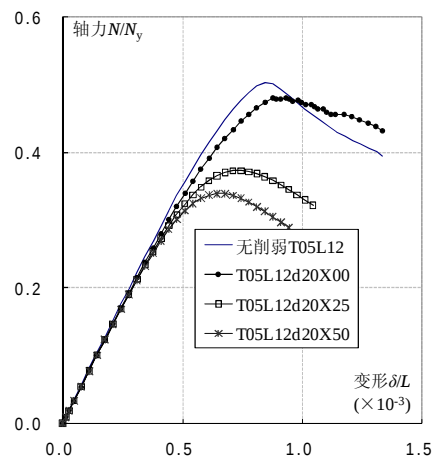




(g) T=5mm, L=12000mm, d=100mm



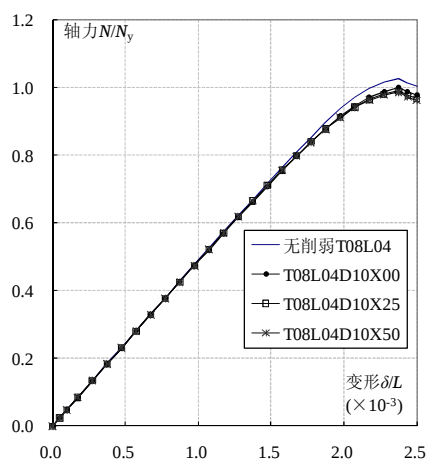
(h) T=5mm, L=12000mm, d=150mm



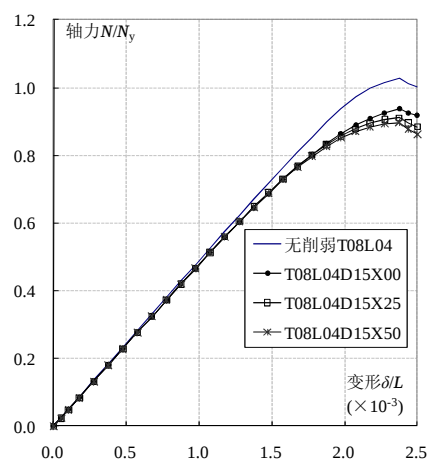
(i) T=5mm, L=12000mm, d=200mm

图 7 荷载-位移曲线(T=5mm)

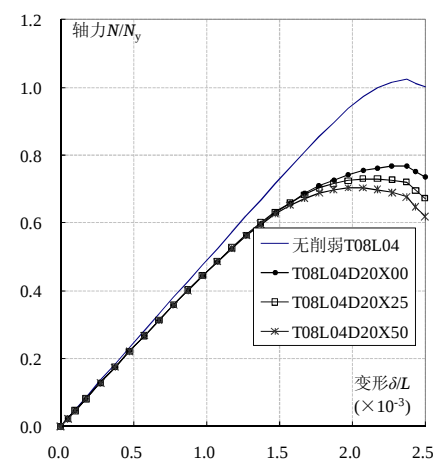
Fig 7 Load-Deformation curve (T=5mm)



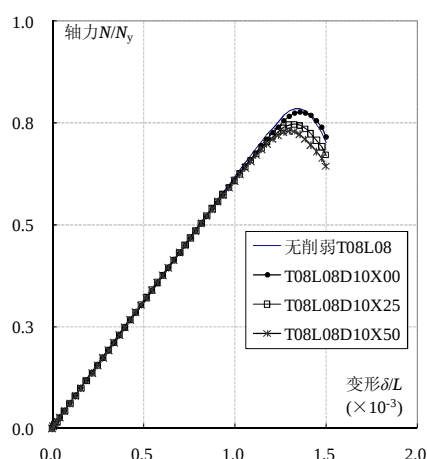
(a) T=8mm, L=4000mm, d=100mm



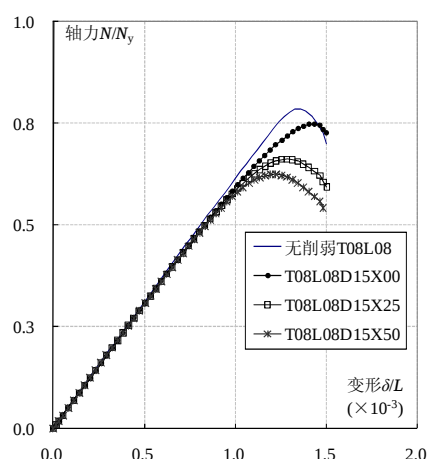
(b) T=8mm, L=4000mm, d=150mm



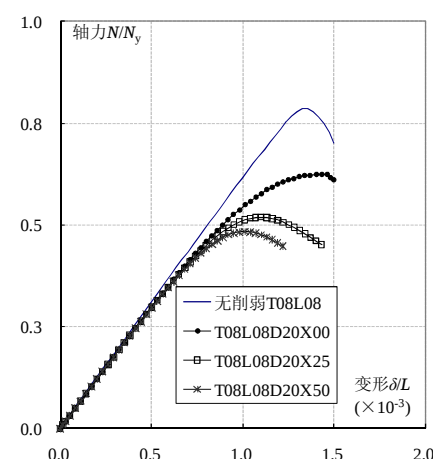
(c) T=8mm, L=4000mm, d=200mm



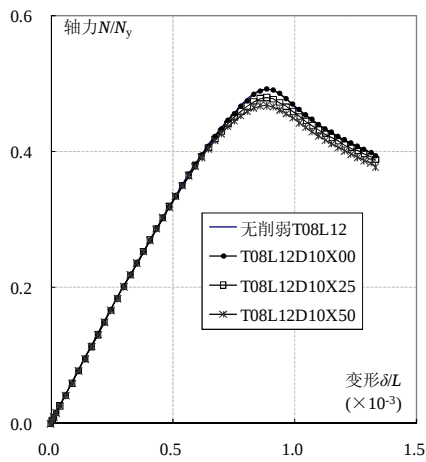
(d) T=8mm, L=8000mm, d=100mm



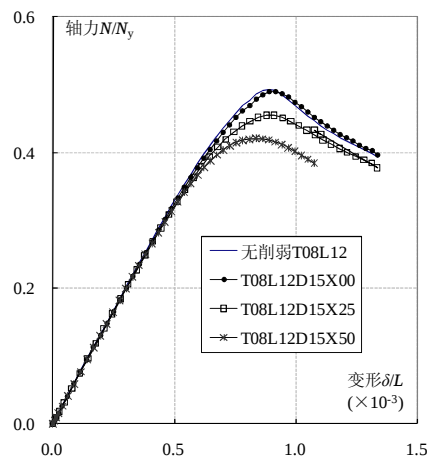
(e) T=8mm, L=8000mm, d=150mm



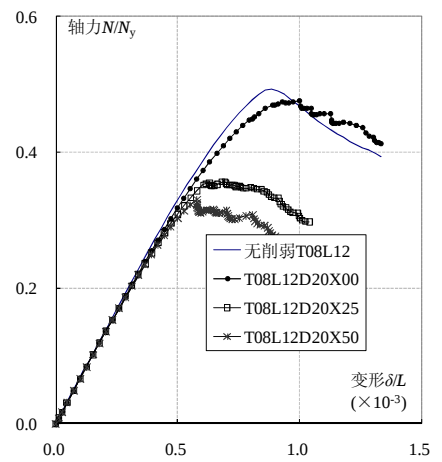
(f) T=8mm, L=8000mm, d=200mm



(d) T=8mm, L=12000mm, d=100mm

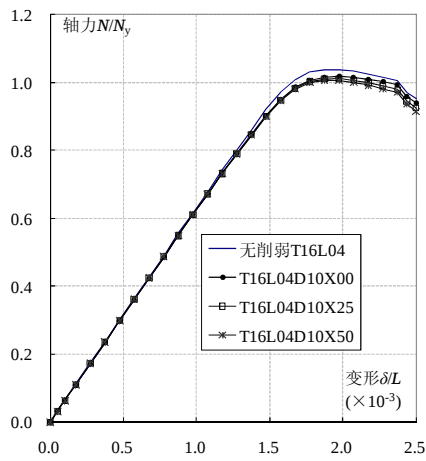


(e) T=8mm, L=12000mm, d=150mm

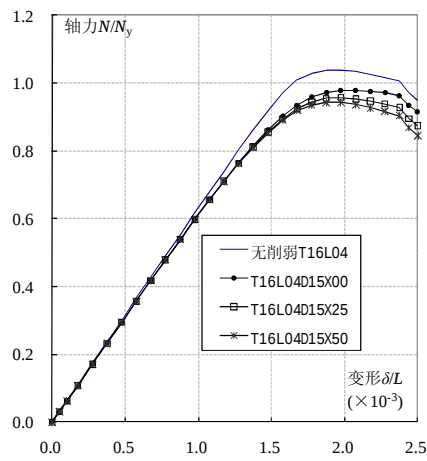


(f) T=8mm, L=12000mm, d=200mm

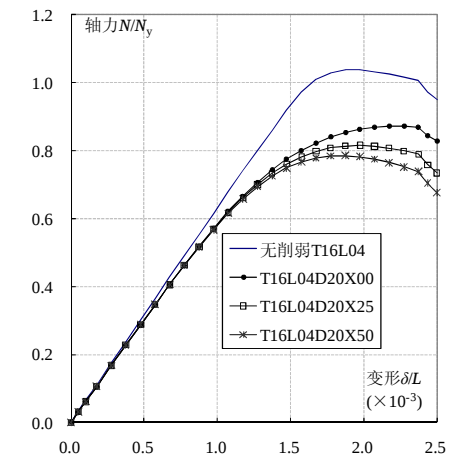
图 8 荷载-位移曲线(T=8mm)
Fig 8 Load-Deformation curve (T=8mm)



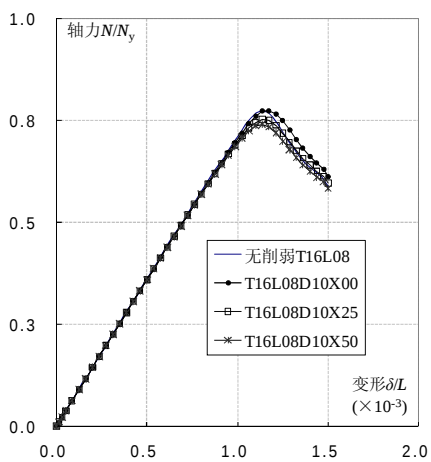
(a) T=16mm, L=4000mm, d=100mm



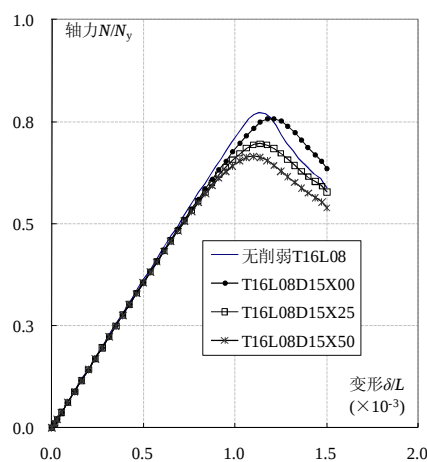
(b) T=16mm, L=4000mm, d=150mm



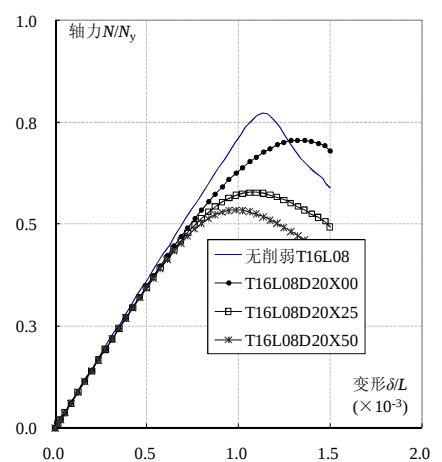
(c) T=16mm, L=4000mm, d=200mm



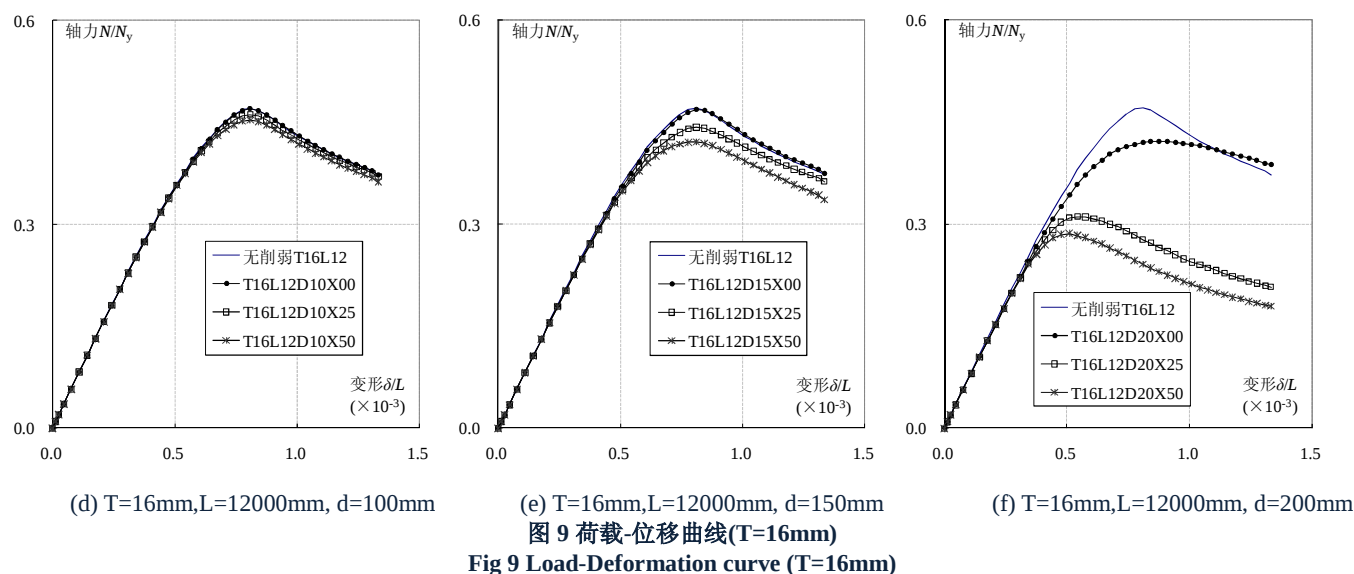
(d) T=16mm, L=8000mm, d=100mm



(e) T=16mm, L=8000mm, d=150mm



(f) T=16mm, L=8000mm, d=200mm



根据荷载一位移曲线，得到表 2 所示的无开洞削弱构件稳定系数 φ ，并且表中列出了规范给出的构件稳定系数 φ_{code} 。由表格数据可知，参数分析模型所得的极限承载力与规范计算得到的极限承载力基本吻合，进一步验证了此模型的有效性和精确性。在长细比较小时，稳定系数 φ 大于 1.0 的原因是由于模型的本构关系采用了折线模量（虽然已经尽量小）而不是理想弹塑性。

表 2 稳定系数 φ
Tab.2 Stability coefficient, φ

序号	参数模型	截面屈服轴 力计算值 N_y (kN)	参数分析极限 荷载 N_{ufull} (kN)	稳定系 φ $=N_{ufull}/N_y$	稳定系数 φ_{code} (规范值)
82	T05L04	1089	1137	1.04	0.95
83	T05L08	1089	866	0.80	0.80
84	T05L12	1089	548	0.50	0.53
85	T08L04	1725	1771	1.03	0.94
86	T08L08	1725	1355	0.79	0.80
87	T08L12	1725	851	0.49	0.52
88	T16L04	3355	3482	1.04	0.94
89	T16L08	3355	2592	0.77	0.78
90	T16L12	3355	1580	0.47	0.50

根据荷载一位移曲线，得到表 3 所示的开洞构件承载力削弱系数 η ，其中构件承载力削弱系数 η 定义为开洞削弱的构件承载力 N_u 与相应的无削弱构件承载力 N_{ufull} 的比值。为便于直观的进行数据比较，表 4~表 6 给出变换参数顺序的承载力削弱系数 η 。

表 3 承载力削弱系数 η (开洞位置变化)
Tab.3 Load-carrying efficiency η (varies of hole location)

序号	参数模型	径厚比 γ	洞径比 β	长细比 λ	开洞位置 x	极限荷载 N_u (kN)	承载力削弱 系数 η $=N_u/N_{ufull}$
1	T05L04d10lc00	30	0.33	38	0.09	1103	0.97
2	T05L04d10lc25	30	0.33	38	0.25	1090	0.96
3	T05L04d10lc50	30	0.33	38	0.50	1084	0.95
4	T05L04d15lc00	30	0.50	38	0.09	1006	0.88
5	T05L04d15lc25	30	0.50	38	0.25	961	0.85
6	T05L04d15lc50	30	0.50	38	0.50	936	0.82
7	T05L04d20lc00	30	0.67	38	0.09	771	0.68
8	T05L04d20lc25	30	0.67	38	0.25	734	0.65
9	T05L04d20lc50	30	0.67	38	0.50	706	0.62
10	T05L08d10lc00	30	0.33	77	0.04	853	0.98
11	T05L08d10lc25	30	0.33	77	0.25	813	0.94
12	T05L08d10lc50	30	0.33	77	0.50	791	0.91
13	T05L08d15lc00	30	0.50	77	0.04	802	0.93
14	T05L08d15lc25	30	0.50	77	0.25	687	0.79
15	T05L08d15lc50	30	0.50	77	0.50	646	0.75
16	T05L08d20lc00	30	0.67	77	0.04	626	0.72
17	T05L08d20lc25	30	0.67	77	0.25	520	0.60
18	T05L08d20lc50	30	0.67	77	0.50	488	0.56
19	T05L12d10lc00	30	0.33	115	0.03	547	1.00
20	T05L12d10lc25	30	0.33	115	0.25	532	0.97
21	T05L12d10lc50	30	0.33	115	0.50	518	0.95
22	T05L12d15lc00	30	0.50	115	0.03	542	0.99
23	T05L12d15lc25	30	0.50	115	0.25	508	0.93
24	T05L12d15lc50	30	0.50	115	0.50	445	0.81
25	T05L12d20lc00	30	0.67	115	0.03	511	0.93
26	T05L12d20lc25	30	0.67	115	0.25	359	0.66
27	T05L12d20lc50	30	0.67	115	0.50	331	0.60
28	T08L04d10lc00	18.75	0.33	39	0.09	1726	0.97
29	T08L04d10lc25	18.75	0.33	39	0.25	1709	0.96
30	T08L04d10lc50	18.75	0.33	39	0.50	1704	0.96
31	T08L04d15lc00	18.75	0.50	39	0.09	1615	0.91
32	T08L04d15lc25	18.75	0.50	39	0.25	1572	0.89
33	T08L04d15lc50	18.75	0.50	39	0.50	1546	0.87
34	T08L04d20lc00	18.75	0.67	39	0.09	1324	0.75
35	T08L04d20lc25	18.75	0.67	39	0.25	1260	0.71
36	T08L04d20lc50	18.75	0.67	39	0.50	1215	0.69
37	T08L08d10lc00	18.75	0.33	77	0.04	1341	0.99
38	T08L08d10lc25	18.75	0.33	77	0.25	1289	0.95
39	T08L08d10lc50	18.75	0.33	77	0.50	1261	0.93
40	T08L08d15lc00	18.75	0.50	77	0.04	1292	0.95

41	T08L08d15lc25	18.75	0.50	77	0.25	1143	0.84
42	T08L08d15lc50	18.75	0.50	77	0.50	1078	0.80
43	T08L08d20lc00	18.75	0.67	77	0.04	1071	0.79
44	T08L08d20lc25	18.75	0.67	77	0.25	891	0.66
45	T08L08d20lc50	18.75	0.67	77	0.50	834	0.62
46	T08L12d10lc00	18.75	0.33	116	0.03	850	1.00
47	T08L12d10lc25	18.75	0.33	116	0.25	828	0.97
48	T08L12d10lc50	18.75	0.33	116	0.50	807	0.95
49	T08L12d15lc00	18.75	0.50	116	0.03	845	0.99
50	T08L12d15lc25	18.75	0.50	116	0.25	785	0.92
51	T08L12d15lc50	18.75	0.50	116	0.50	729	0.86
52	T08L12d20lc00	18.75	0.67	116	0.03	801	0.94
53	T08L12d20lc25	18.75	0.67	116	0.25	613	0.72
54	T08L12d20lc50	18.75	0.67	116	0.50	571	0.67
55	T16L04d10lc00	9.375	0.33	40	0.09	3418	0.98
56	T16L04d10lc25	9.375	0.33	40	0.25	3393	0.97
57	T16L04d10lc50	9.375	0.33	40	0.50	3377	0.97
58	T16L04d15lc00	9.375	0.50	40	0.09	3285	0.94
59	T16L04d15lc25	9.375	0.50	40	0.25	3211	0.92
60	T16L04d15lc50	9.375	0.50	40	0.50	3164	0.91
61	T16L04d20lc00	9.375	0.67	40	0.09	2928	0.84
62	T16L04d20lc25	9.375	0.67	40	0.25	2737	0.79
63	T16L04d20lc50	9.375	0.67	40	0.50	2637	0.76
64	T16L08d10lc00	9.375	0.33	80	0.04	2592	1.00
65	T16L08d10lc25	9.375	0.33	80	0.25	2526	0.97
66	T16L08d10lc50	9.375	0.33	80	0.50	2485	0.96
67	T16L08d15lc00	9.375	0.50	80	0.04	2544	0.98
68	T16L08d15lc25	9.375	0.50	80	0.25	2336	0.90
69	T16L08d15lc50	9.375	0.50	80	0.50	2233	0.86
70	T16L08d20lc00	9.375	0.67	80	0.04	2369	0.91
71	T16L08d20lc25	9.375	0.67	80	0.25	1939	0.75
72	T16L08d20lc50	9.375	0.67	80	0.50	1795	0.69
73	T16L12d10lc00	9.375	0.33	119	0.03	1578	1.00
74	T16L12d10lc25	9.375	0.33	119	0.25	1549	0.98
75	T16L12d10lc50	9.375	0.33	119	0.50	1522	0.96
76	T16L12d15lc00	9.375	0.50	119	0.03	1574	1.00
77	T16L12d15lc25	9.375	0.50	119	0.25	1486	0.94
78	T16L12d15lc50	9.375	0.50	119	0.50	1414	0.89
79	T16L12d20lc00	9.375	0.67	119	0.03	1401	0.89
80	T16L12d20lc25	9.375	0.67	119	0.25	1044	0.66
81	T16L12d20lc50	9.375	0.67	119	0.50	962	0.61

表 4 承载力削弱系数 η (径厚比变化)
Tab.4 Load-carrying efficiency η (varies of diameter ratio to thickness)

序号	参数模型	径厚比 γ	洞径比 β	长细比 λ	开洞位置 x	承载力削弱系数 η $=N_u/N_{ufull}$
1	T05L04d10lc00	30.00	0.33	38.35	0.09	0.97
28	T08L04d10lc00	18.75	0.33	38.72	0.09	0.97
55	T16L04d10lc00	9.38	0.33	39.76	0.09	0.98
2	T05L04d10lc25	30.00	0.33	38.35	0.25	0.96
29	T08L04d10lc25	18.75	0.33	38.72	0.25	0.96
56	T16L04d10lc25	9.38	0.33	39.76	0.25	0.97
3	T05L04d10lc50	30.00	0.33	38.35	0.50	0.95
30	T08L04d10lc50	18.75	0.33	38.72	0.50	0.96
57	T16L04d10lc50	9.38	0.33	39.76	0.50	0.97
4	T05L04d15lc00	30.00	0.50	38.35	0.09	0.88
31	T08L04d15lc00	18.75	0.50	38.72	0.09	0.91
58	T16L04d15lc00	9.38	0.50	39.76	0.09	0.94
5	T05L04d15lc25	30.00	0.50	38.35	0.25	0.85
32	T08L04d15lc25	18.75	0.50	38.72	0.25	0.89
59	T16L04d15lc25	9.38	0.50	39.76	0.25	0.92
6	T05L04d15lc50	30.00	0.50	38.35	0.50	0.82
33	T08L04d15lc50	18.75	0.50	38.72	0.50	0.87
60	T16L04d15lc50	9.38	0.50	39.76	0.50	0.91
7	T05L04d20lc00	30.00	0.67	38.35	0.09	0.68
34	T08L04d20lc00	18.75	0.67	38.72	0.09	0.75
61	T16L04d20lc00	9.38	0.67	39.76	0.09	0.84
8	T05L04d20lc25	30.00	0.67	38.35	0.25	0.65
35	T08L04d20lc25	18.75	0.67	38.72	0.25	0.71
62	T16L04d20lc25	9.38	0.67	39.76	0.25	0.79
9	T05L04d20lc50	30.00	0.67	38.35	0.50	0.62
36	T08L04d20lc50	18.75	0.67	38.72	0.50	0.69
63	T16L04d20lc50	9.38	0.67	39.76	0.50	0.76
10	T05L08d10lc00	30.00	0.33	76.70	0.04	0.98
37	T08L08d10lc00	18.75	0.33	77.44	0.04	0.99
64	T16L08d10lc00	9.38	0.33	79.52	0.04	1.00
11	T05L08d10lc25	30.00	0.33	76.70	0.25	0.94
38	T08L08d10lc25	18.75	0.33	77.44	0.25	0.95
65	T16L08d10lc25	9.38	0.33	79.52	0.25	0.97
12	T05L08d10lc50	30.00	0.33	76.70	0.50	0.91
39	T08L08d10lc50	18.75	0.33	77.44	0.50	0.93
66	T16L08d10lc50	9.38	0.33	79.52	0.50	0.96
13	T05L08d15lc00	30.00	0.50	76.70	0.04	0.93
40	T08L08d15lc00	18.75	0.50	77.44	0.04	0.95
67	T16L08d15lc00	9.38	0.50	79.52	0.04	0.98
14	T05L08d15lc25	30.00	0.50	76.70	0.25	0.79

41	T08L08d15lc25	18.75	0.50	77.44	0.25	0.84
68	T16L08d15lc25	9.38	0.50	79.52	0.25	0.90
15	T05L08d15lc50	30.00	0.50	76.70	0.50	0.75
42	T08L08d15lc50	18.75	0.50	77.44	0.50	0.80
69	T16L08d15lc50	9.38	0.50	79.52	0.50	0.86
16	T05L08d20lc00	30.00	0.67	76.70	0.04	0.72
43	T08L08d20lc00	18.75	0.67	77.44	0.04	0.79
70	T16L08d20lc00	9.38	0.67	79.52	0.04	0.91
17	T05L08d20lc25	30.00	0.67	76.70	0.25	0.60
44	T08L08d20lc25	18.75	0.67	77.44	0.25	0.66
71	T16L08d20lc25	9.38	0.67	79.52	0.25	0.75
18	T05L08d20lc50	30.00	0.67	76.70	0.50	0.56
45	T08L08d20lc50	18.75	0.67	77.44	0.50	0.62
72	T16L08d20lc50	9.38	0.67	79.52	0.50	0.69
19	T05L12d10lc00	30.00	0.33	115.05	0.03	1.00
46	T08L12d10lc00	18.75	0.33	116.17	0.03	1.00
73	T16L12d10lc00	9.38	0.33	119.28	0.03	1.00
20	T05L12d10lc25	30.00	0.33	115.05	0.25	0.97
47	T08L12d10lc25	18.75	0.33	116.17	0.25	0.97
74	T16L12d10lc25	9.38	0.33	119.28	0.25	0.98
21	T05L12d10lc50	30.00	0.33	115.05	0.50	0.95
48	T08L12d10lc50	18.75	0.33	116.17	0.50	0.95
75	T16L12d10lc50	9.38	0.33	119.28	0.50	0.96
22	T05L12d15lc00	30.00	0.50	115.05	0.03	0.99
49	T08L12d15lc00	18.75	0.50	116.17	0.03	0.99
76	T16L12d15lc00	9.38	0.50	119.28	0.03	1.00
23	T05L12d15lc25	30.00	0.50	115.05	0.25	0.93
50	T08L12d15lc25	18.75	0.50	116.17	0.25	0.92
77	T16L12d15lc25	9.38	0.50	119.28	0.25	0.94
24	T05L12d15lc50	30.00	0.50	115.05	0.50	0.81
51	T08L12d15lc50	18.75	0.50	116.17	0.50	0.86
78	T16L12d15lc50	9.38	0.50	119.28	0.50	0.89
25	T05L12d20lc00	30.00	0.67	115.05	0.03	0.93
52	T08L12d20lc00	18.75	0.67	116.17	0.03	0.94
79	T16L12d20lc00	9.38	0.67	119.28	0.03	0.89
26	T05L12d20lc25	30.00	0.67	115.05	0.25	0.66
53	T08L12d20lc25	18.75	0.67	116.17	0.25	0.72
80	T16L12d20lc25	9.38	0.67	119.28	0.25	0.66
27	T05L12d20lc50	30.00	0.67	115.05	0.50	0.60
54	T08L12d20lc50	18.75	0.67	116.17	0.50	0.67
81	T16L12d20lc50	9.38	0.67	119.28	0.50	0.61

表 5 承载力削弱系数 η (长细比变化)
Tab.5 Load-carrying efficiency η (varies of slenderness)

序号	参数模型	径厚比 γ	洞径比 β	长细比 λ	开洞位置 x	承载力削弱系数 η $=N_u/N_{ufull}$
1	T05L04d10lc00	30.00	0.33	38.35	0.09	0.97
10	T05L08d10lc00	30.00	0.33	76.70	0.04	0.98
19	T05L12d10lc00	30.00	0.33	115.05	0.03	1.00
28	T08L04d10lc00	18.75	0.33	38.72	0.09	0.97
37	T08L08d10lc00	18.75	0.33	77.44	0.04	0.99
46	T08L12d10lc00	18.75	0.33	116.17	0.03	1.00
55	T16L04d10lc00	9.38	0.33	39.76	0.09	0.98
64	T16L08d10lc00	9.38	0.33	79.52	0.04	1.00
73	T16L12d10lc00	9.38	0.33	119.28	0.03	1.00
2	T05L04d10lc25	30.00	0.33	38.35	0.25	0.96
11	T05L08d10lc25	30.00	0.33	76.70	0.25	0.94
20	T05L12d10lc25	30.00	0.33	115.05	0.25	0.97
29	T08L04d10lc25	18.75	0.33	38.72	0.25	0.96
38	T08L08d10lc25	18.75	0.33	77.44	0.25	0.95
47	T08L12d10lc25	18.75	0.33	116.17	0.25	0.97
56	T16L04d10lc25	9.38	0.33	39.76	0.25	0.97
65	T16L08d10lc25	9.38	0.33	79.52	0.25	0.97
74	T16L12d10lc25	9.38	0.33	119.28	0.25	0.98
3	T05L04d10lc50	30.00	0.33	38.35	0.50	0.95
12	T05L08d10lc50	30.00	0.33	76.70	0.50	0.91
21	T05L12d10lc50	30.00	0.33	115.05	0.50	0.95
30	T08L04d10lc50	18.75	0.33	38.72	0.50	0.96
39	T08L08d10lc50	18.75	0.33	77.44	0.50	0.93
48	T08L12d10lc50	18.75	0.33	116.17	0.50	0.95
57	T16L04d10lc50	9.38	0.33	39.76	0.50	0.97
66	T16L08d10lc50	9.38	0.33	79.52	0.50	0.96
75	T16L12d10lc50	9.38	0.33	119.28	0.50	0.96
4	T05L04d15lc00	30.00	0.50	38.35	0.09	0.88
13	T05L08d15lc00	30.00	0.50	76.70	0.04	0.93
22	T05L12d15lc00	30.00	0.50	115.05	0.03	0.99
31	T08L04d15lc00	18.75	0.50	38.72	0.09	0.91
40	T08L08d15lc00	18.75	0.50	77.44	0.04	0.95
49	T08L12d15lc00	18.75	0.50	116.17	0.03	0.99
58	T16L04d15lc00	9.38	0.50	39.76	0.09	0.94
67	T16L08d15lc00	9.38	0.50	79.52	0.04	0.98
76	T16L12d15lc00	9.38	0.50	119.28	0.03	1.00
5	T05L04d15lc25	30.00	0.50	38.35	0.25	0.85
14	T05L08d15lc25	30.00	0.50	76.70	0.25	0.79
23	T05L12d15lc25	30.00	0.50	115.05	0.25	0.93

32	T08L04d15lc25	18.75	0.50	38.72	0.25	0.89
41	T08L08d15lc25	18.75	0.50	77.44	0.25	0.84
50	T08L12d15lc25	18.75	0.50	116.17	0.25	0.92
59	T16L04d15lc25	9.38	0.50	39.76	0.25	0.92
68	T16L08d15lc25	9.38	0.50	79.52	0.25	0.90
77	T16L12d15lc25	9.38	0.50	119.28	0.25	0.94
6	T05L04d15lc50	30.00	0.50	38.35	0.50	0.82
15	T05L08d15lc50	30.00	0.50	76.70	0.50	0.75
24	T05L12d15lc50	30.00	0.50	115.05	0.50	0.81
33	T08L04d15lc50	18.75	0.50	38.72	0.50	0.87
42	T08L08d15lc50	18.75	0.50	77.44	0.50	0.80
51	T08L12d15lc50	18.75	0.50	116.17	0.50	0.86
60	T16L04d15lc50	9.38	0.50	39.76	0.50	0.91
69	T16L08d15lc50	9.38	0.50	79.52	0.50	0.86
78	T16L12d15lc50	9.38	0.50	119.28	0.50	0.89
7	T05L04d20lc00	30.00	0.67	38.35	0.09	0.68
16	T05L08d20lc00	30.00	0.67	76.70	0.04	0.72
25	T05L12d20lc00	30.00	0.67	115.05	0.03	0.93
34	T08L04d20lc00	18.75	0.67	38.72	0.09	0.75
43	T08L08d20lc00	18.75	0.67	77.44	0.04	0.79
52	T08L12d20lc00	18.75	0.67	116.17	0.03	0.94
61	T16L04d20lc00	9.38	0.67	39.76	0.09	0.84
70	T16L08d20lc00	9.38	0.67	79.52	0.04	0.91
79	T16L12d20lc00	9.38	0.67	119.28	0.03	0.89
8	T05L04d20lc25	30.00	0.67	38.35	0.25	0.65
17	T05L08d20lc25	30.00	0.67	76.70	0.25	0.60
26	T05L12d20lc25	30.00	0.67	115.05	0.25	0.66
35	T08L04d20lc25	18.75	0.67	38.72	0.25	0.71
44	T08L08d20lc25	18.75	0.67	77.44	0.25	0.66
53	T08L12d20lc25	18.75	0.67	116.17	0.25	0.72
62	T16L04d20lc25	9.38	0.67	39.76	0.25	0.79
71	T16L08d20lc25	9.38	0.67	79.52	0.25	0.75
80	T16L12d20lc25	9.38	0.67	119.28	0.25	0.66
9	T05L04d20lc50	30.00	0.67	38.35	0.50	0.62
18	T05L08d20lc50	30.00	0.67	76.70	0.50	0.56
27	T05L12d20lc50	30.00	0.67	115.05	0.50	0.60
36	T08L04d20lc50	18.75	0.67	38.72	0.50	0.69
45	T08L08d20lc50	18.75	0.67	77.44	0.50	0.62
54	T08L12d20lc50	18.75	0.67	116.17	0.50	0.67
63	T16L04d20lc50	9.38	0.67	39.76	0.50	0.76
72	T16L08d20lc50	9.38	0.67	79.52	0.50	0.69
81	T16L12d20lc50	9.38	0.67	119.28	0.50	0.61

表 6 承载力削弱系数 η (洞径比变化)
Tab.6 Load-carrying efficiency η (varies of hole diameter ratio to member diameter)

序号	参数模型	径厚比 γ	洞径比 β	长细比 λ	开洞位置 x	承载力削弱系数 η $=N_u/N_{ufull}$
1	T05L04d10lc00	30.00	0.33	38.35	0.09	0.97
4	T05L04d15lc00	30.00	0.50	38.35	0.09	0.88
7	T05L04d20lc00	30.00	0.67	38.35	0.09	0.68
10	T05L08d10lc00	30.00	0.33	76.70	0.04	0.98
13	T05L08d15lc00	30.00	0.50	76.70	0.04	0.93
16	T05L08d20lc00	30.00	0.67	76.70	0.04	0.72
19	T05L12d10lc00	30.00	0.33	115.05	0.03	1.00
22	T05L12d15lc00	30.00	0.50	115.05	0.03	0.99
25	T05L12d20lc00	30.00	0.67	115.05	0.03	0.93
28	T08L04d10lc00	18.75	0.33	38.72	0.09	0.97
31	T08L04d15lc00	18.75	0.50	38.72	0.09	0.91
34	T08L04d20lc00	18.75	0.67	38.72	0.09	0.75
37	T08L08d10lc00	18.75	0.33	77.44	0.04	0.99
40	T08L08d15lc00	18.75	0.50	77.44	0.04	0.95
43	T08L08d20lc00	18.75	0.67	77.44	0.04	0.79
46	T08L12d10lc00	18.75	0.33	116.17	0.03	1.00
49	T08L12d15lc00	18.75	0.50	116.17	0.03	0.99
52	T08L12d20lc00	18.75	0.67	116.17	0.03	0.94
55	T16L04d10lc00	9.38	0.33	39.76	0.09	0.98
58	T16L04d15lc00	9.38	0.50	39.76	0.09	0.94
61	T16L04d20lc00	9.38	0.67	39.76	0.09	0.84
64	T16L08d10lc00	9.38	0.33	79.52	0.04	1.00
67	T16L08d15lc00	9.38	0.50	79.52	0.04	0.98
70	T16L08d20lc00	9.38	0.67	79.52	0.04	0.91
73	T16L12d10lc00	9.38	0.33	119.28	0.03	1.00
76	T16L12d15lc00	9.38	0.50	119.28	0.03	1.00
79	T16L12d20lc00	9.38	0.67	119.28	0.03	0.89
2	T05L04d10lc25	30.00	0.33	38.35	0.25	0.96
5	T05L04d15lc25	30.00	0.50	38.35	0.25	0.85
8	T05L04d20lc25	30.00	0.67	38.35	0.25	0.65
11	T05L08d10lc25	30.00	0.33	76.70	0.25	0.94
14	T05L08d15lc25	30.00	0.50	76.70	0.25	0.79
17	T05L08d20lc25	30.00	0.67	76.70	0.25	0.60
20	T05L12d10lc25	30.00	0.33	115.05	0.25	0.97
23	T05L12d15lc25	30.00	0.50	115.05	0.25	0.93
26	T05L12d20lc25	30.00	0.67	115.05	0.25	0.66
29	T08L04d10lc25	18.75	0.33	38.72	0.25	0.96
32	T08L04d15lc25	18.75	0.50	38.72	0.25	0.89
35	T08L04d20lc25	18.75	0.67	38.72	0.25	0.71
38	T08L08d10lc25	18.75	0.33	77.44	0.25	0.95

41	T08L08d15lc25	18.75	0.50	77.44	0.25	0.84
44	T08L08d20lc25	18.75	0.67	77.44	0.25	0.66
47	T08L12d10lc25	18.75	0.33	116.17	0.25	0.97
50	T08L12d15lc25	18.75	0.50	116.17	0.25	0.92
53	T08L12d20lc25	18.75	0.67	116.17	0.25	0.72
56	T16L04d10lc25	9.38	0.33	39.76	0.25	0.97
59	T16L04d15lc25	9.38	0.50	39.76	0.25	0.92
62	T16L04d20lc25	9.38	0.67	39.76	0.25	0.79
65	T16L08d10lc25	9.38	0.33	79.52	0.25	0.97
68	T16L08d15lc25	9.38	0.50	79.52	0.25	0.90
71	T16L08d20lc25	9.38	0.67	79.52	0.25	0.75
74	T16L12d10lc25	9.38	0.33	119.28	0.25	0.98
77	T16L12d15lc25	9.38	0.50	119.28	0.25	0.94
80	T16L12d20lc25	9.38	0.67	119.28	0.25	0.66
3	T05L04d10lc50	30.00	0.33	38.35	0.50	0.95
6	T05L04d15lc50	30.00	0.50	38.35	0.50	0.82
9	T05L04d20lc50	30.00	0.67	38.35	0.50	0.62
12	T05L08d10lc50	30.00	0.33	76.70	0.50	0.91
15	T05L08d15lc50	30.00	0.50	76.70	0.50	0.75
18	T05L08d20lc50	30.00	0.67	76.70	0.50	0.56
21	T05L12d10lc50	30.00	0.33	115.05	0.50	0.95
24	T05L12d15lc50	30.00	0.50	115.05	0.50	0.81
27	T05L12d20lc50	30.00	0.67	115.05	0.50	0.60
30	T08L04d10lc50	18.75	0.33	38.72	0.50	0.96
33	T08L04d15lc50	18.75	0.50	38.72	0.50	0.87
36	T08L04d20lc50	18.75	0.67	38.72	0.50	0.69
39	T08L08d10lc50	18.75	0.33	77.44	0.50	0.93
42	T08L08d15lc50	18.75	0.50	77.44	0.50	0.80
45	T08L08d20lc50	18.75	0.67	77.44	0.50	0.62
48	T08L12d10lc50	18.75	0.33	116.17	0.50	0.95
51	T08L12d15lc50	18.75	0.50	116.17	0.50	0.86
54	T08L12d20lc50	18.75	0.67	116.17	0.50	0.67
57	T16L04d10lc50	9.38	0.33	39.76	0.50	0.97
60	T16L04d15lc50	9.38	0.50	39.76	0.50	0.91
63	T16L04d20lc50	9.38	0.67	39.76	0.50	0.76
66	T16L08d10lc50	9.38	0.33	79.52	0.50	0.96
69	T16L08d15lc50	9.38	0.50	79.52	0.50	0.86
72	T16L08d20lc50	9.38	0.67	79.52	0.50	0.69
75	T16L12d10lc50	9.38	0.33	119.28	0.50	0.96
78	T16L12d15lc50	9.38	0.50	119.28	0.50	0.89
81	T16L12d20lc50	9.38	0.67	119.28	0.50	0.61

以上的参数有分析采用 Q235 材料。对于 Q345 材料，补充 8 个模型进行验证，其中 6 个开洞模型，2 个无开洞模型。分析结果详见表 7。由表 7 可知，虽然材料不同，但是承载力削弱程度是类似的，基本相同。

表 7 承载力削弱系数 η (材料变化)
Tab.7 Load-carrying efficiency η (varies of material)

序号	参数模型	承载力削弱系数 η $=N_u/N_{ufull}$	
		Q345	Q235
91	T05L08d15lc00	0.93	0.93
92	T05L08d15lc25	0.80	0.79
93	T05L08d15lc50	0.77	0.75
94	T08L12d20lc00	0.99	0.94
95	T08L12d20lc25	0.75	0.72
96	T08L12d20lc50	0.69	0.67

由表 3~表 7 可知：

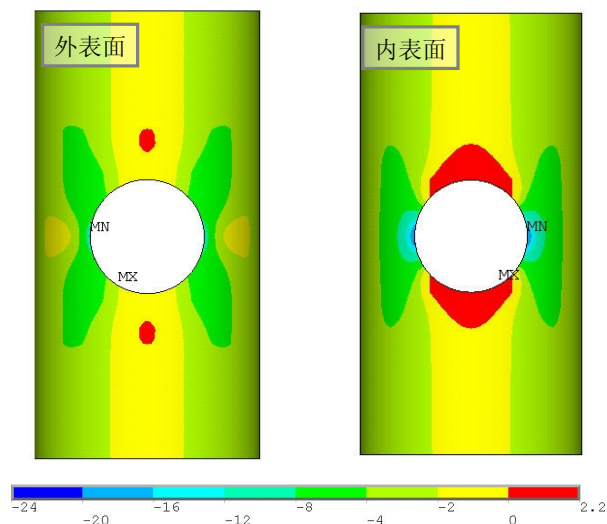
a) 开洞尺寸对承载力的影响较大。洞径比 β 等于 1/3 时，对构件的轴压承载力影响较小，承载力削弱系数皆在 0.9 以上。洞径比 β 等于 1/2 时，对构件的轴压承载力影响可控，承载力削弱系数最小为 0.75，且为开洞位置在构件中间位置时。洞径比 β 等于 2/3 时，对构件的轴压承载力影响较大，当开洞位置位于构件中间时承载力削弱系数最小为 0.56，即使开洞位置位于构件端部承载力削弱系数也较小。因此，开洞直径 d 不宜大于构件直径 D 的 0.5 倍，不应大于构件直径 D 的 0.66 倍，否则对构件的承载力削弱将较大，特别是开洞位置位于构件跨中时。

b) 开洞位置位于构件端部时，对构件的轴压承载力影响较小；位于构件的中点时，对构件的轴压承载力影响越大。当开洞尺寸较大时，开洞的位置对承载力的影响较明显。例如，跨中开较大洞口时，承载力明显削弱。因此，轴压圆钢管构件开洞位置宜在构件端部，特别是洞口尺寸较大时。当然，构件端部应该离开节点影响区。

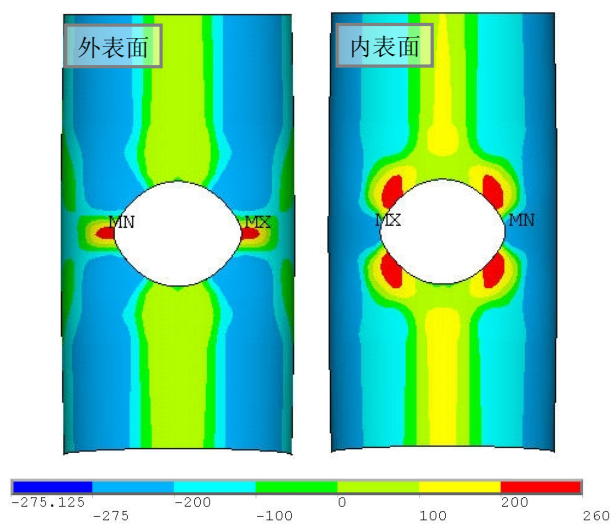
c) 径厚比 γ 在常用的 10~30 的范围内，截面的径厚比 γ 越大，即构件壁板越薄，开洞对圆钢管构件的轴压承载力影响越大。径厚比 γ 对承载力的影响不显著，只有在洞口尺寸较大时，构件的径厚比 γ 对构件的承载力影响才会较明显。

d) 构件的长细比 λ 越大，即构件越细长，开洞对构件的承载力影响越小。只有在洞口较大时，长细比 λ 对承载力的影响才会较明显。

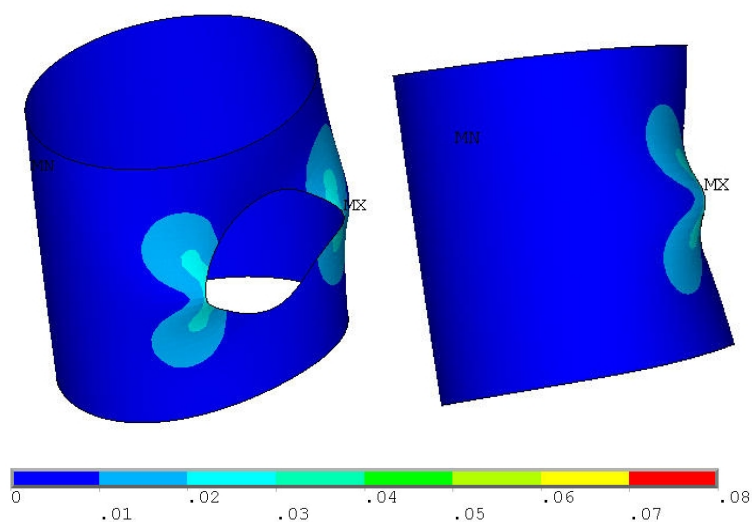
为直观理解图 2、图 3 所示的力学机理，图 10 给出了参数模型其中某一荷载步的轴向压应力云图和塑性等效应变云图。由图可知，与上一节的机理分析完全吻合：洞口左右两侧的轴向应力较大，洞口上下两侧的轴向应力较小；洞口周边的变形加剧了构件的壁板屈曲，削弱了承载力。



(a) T05L12d15lc25 轴向应力(第一荷载步)



(b) T05L12d15lc25 轴向应力(最后荷载步)



(c) T05L12d15lc25 洞口周边等效塑性应变(某一荷载步)

图 10 参数分析结果

Fig 10 The parametric analysis results

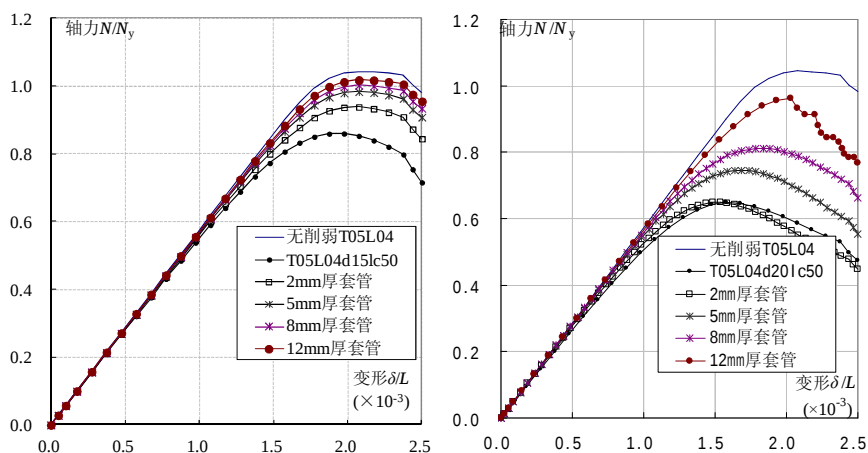
4 补强措施

圆钢管构件侧壁开洞，常用的几种补强方式为：加内套管，俗称加导管；外贴环板，俗称贴补丁；外包环管，俗称套戒指，如图 1 所示。本文对开洞补强有较强针对性的两种方法-加内套管和外贴环板，进行参数分析研究，给出对设计有指导意义的结果。

根据工程实际：内套管的长度 l_t 不会小于开洞直径 d 的 0.5 倍，外贴环板宽度 l_t 一般不会小于开洞直径 d 的 0.5 倍。本文就以内套管长度 l_t 约为 $0.5d$ ，环板宽度 l_t 约为 $0.5d$ ，展开研究。

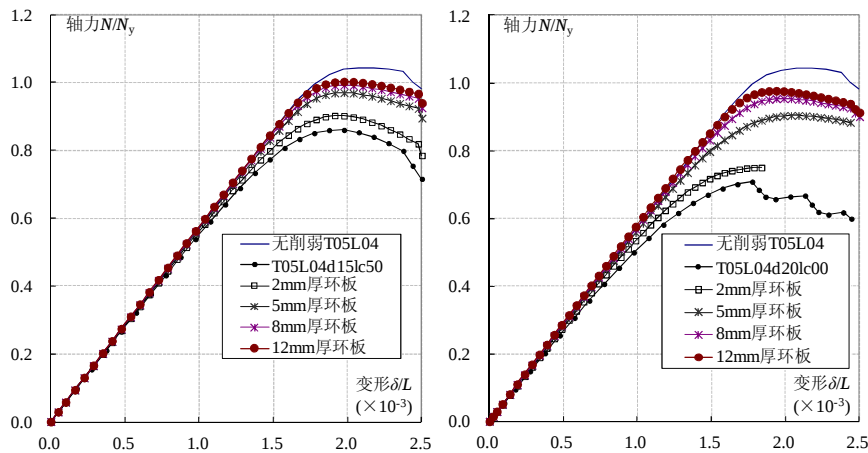
根据上一节的分析结果可知，长细比较大时，开洞对承载力的影响不敏感；开洞位置位于构件端部时，开洞对承载力的影响不明显，选用长细比较小且开洞位置位于构件中部的模型进行研究。

对上一节的参数模型 T05L04d15lc50、T05L04d20lc50、T08L04d15lc50、T08L04d20lc50，即对上节的管壁厚 T 分别等于 5mm 和 8mm，开洞直径 d 分别等于 150mm 和 200mm 的模型进行研究。对直径 d 为 150mm 和 200mm 的洞口，内套管的长度 l_t 分别为 73mm 和 94mm，外贴环板宽度分别为 75mm 和 100mm，约为洞口直径 d 的 0.5 倍。得到如图 11 所示的荷载-位移曲线，经过整理得到的承载力折减系数 η 如表 7 所示。



(a) T05L04d15lc50 内套管模型

(b) T05L04d20lc50 内套管模型



(c) T05L04d15lc50 外贴环板模型

(d) T05L04d20lc50 外贴环板模型

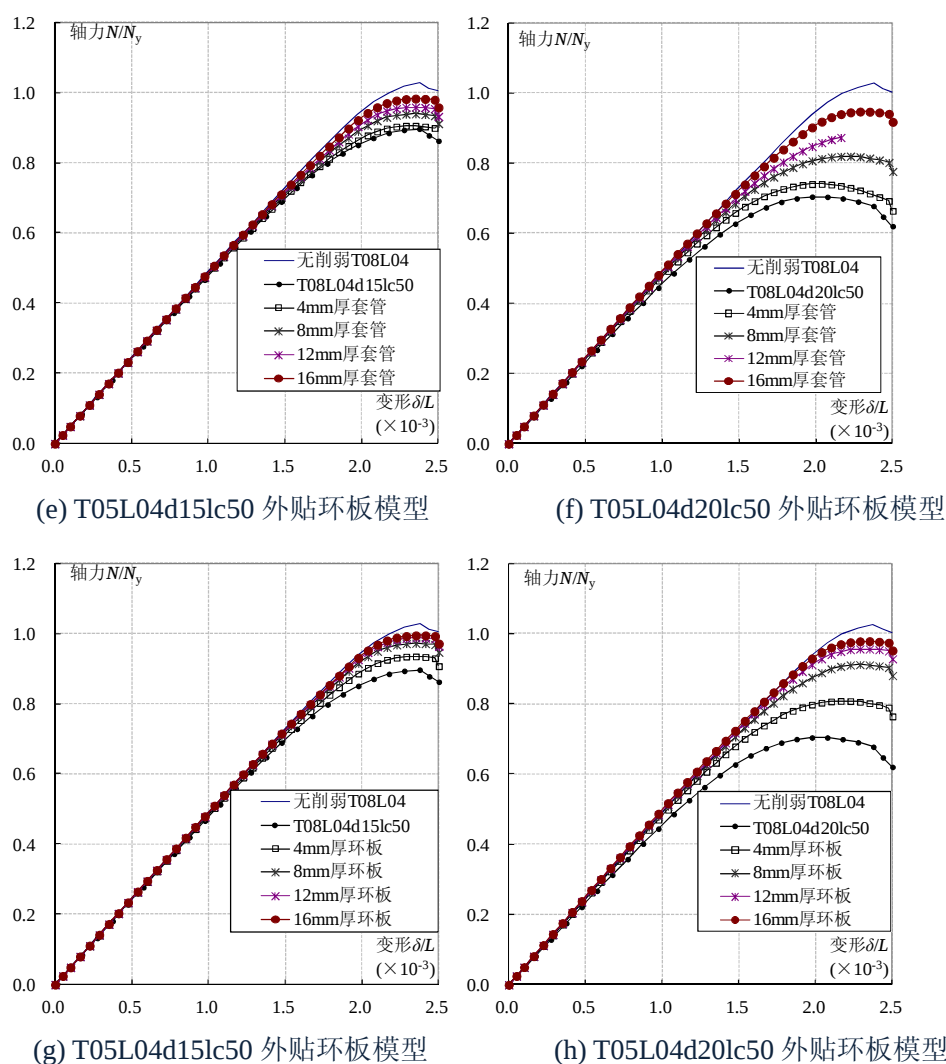


图 11 补强模型荷载-位移曲线

Fig 11 Load-Deformation curve of reinforcing model

表 8 承载力削弱系数 η Tab.8 Load-carrying efficiency η

参数模型	无措施	洞口内套管				外贴环板			
		厚 2mm (4mm)	厚 5mm (8mm)	厚 8mm (12mm)	厚 12mm (16mm)	厚 2mm (4mm)	厚 5mm (8mm)	厚 8mm (12mm)	厚 12mm (16mm)
T05L04d15lc50	83%	90%	95%	96%	98%	87%	93%	95%	96%
T05L04d20lc50	62%	62%	72%	78%	93%	67%	82%	90%	93%
T08L04d15lc50	87%	(88%)	(91%)	(93%)	(96%)	(91%)	(95%)	(96%)	(97%)
T08L04d20lc50	69%	(72%)	(80%)	(85%)	(92%)	(79%)	(89%)	(93%)	(95%)

由图 11 和表 8 可知：(a)在内套管的长度和外贴环板的宽度相等的前提下，环板厚度和套管厚度相等时，内套管和外贴环板的补强效果基本相同；(b)当洞口直径 d 小于等于 0.5 倍的构件管径 D ，且内套管和外环板厚度 t 等于构件厚度 T 时，洞口内套管和外贴环板的补强方法皆可满足承载力折减系数 η 皆大于 0.9，约为 0.95；(c) 当洞口直径 d 为 0.66 倍的构件管径 D 时，且内套管和外环板

厚度 t 等于构件厚度 $2T$ 时，洞口内套管和外贴环板的补强方法皆可满足承载力折减系数 η 皆大于 0.9。

另外，对内套管长度 l_t 进行比较，如图 12 所示。限于模型的复杂性和可操作性，对环板的宽度 l_r 不做进一步的研究比较。由图可知，套管长度 l_t 在 0.5 倍的洞口直径 d 基础上加长，承载力的提高不敏感，即说明内套管长度 l_t 为 $0.5d$ 比较合适。

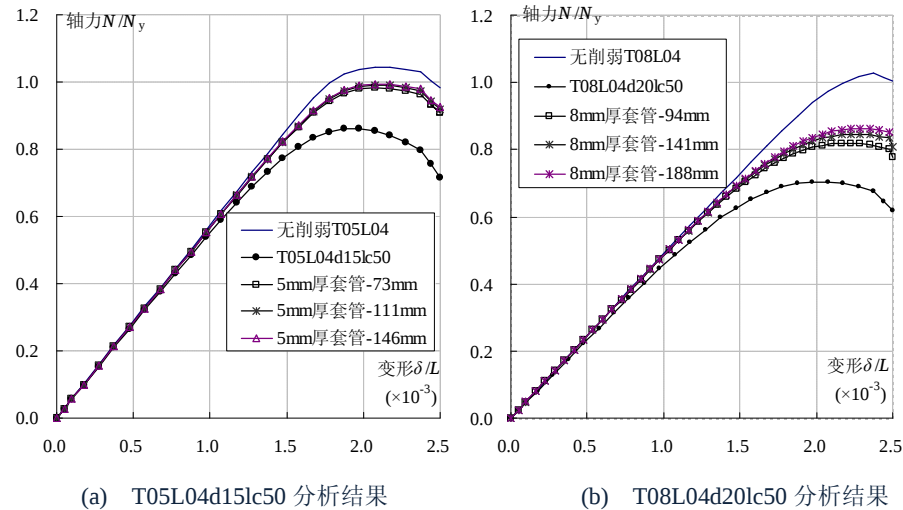
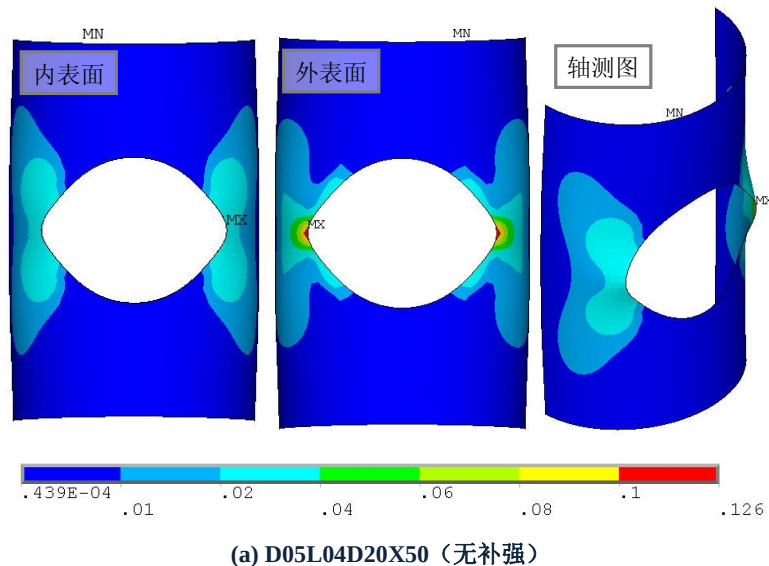
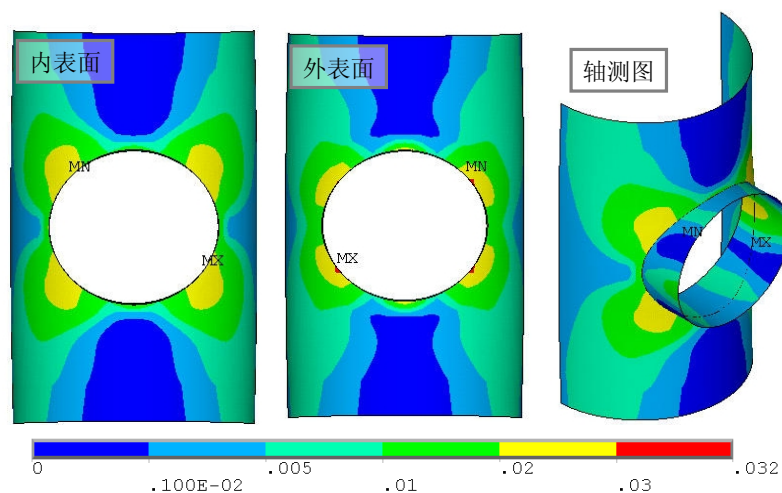


图 12 参数分析结果

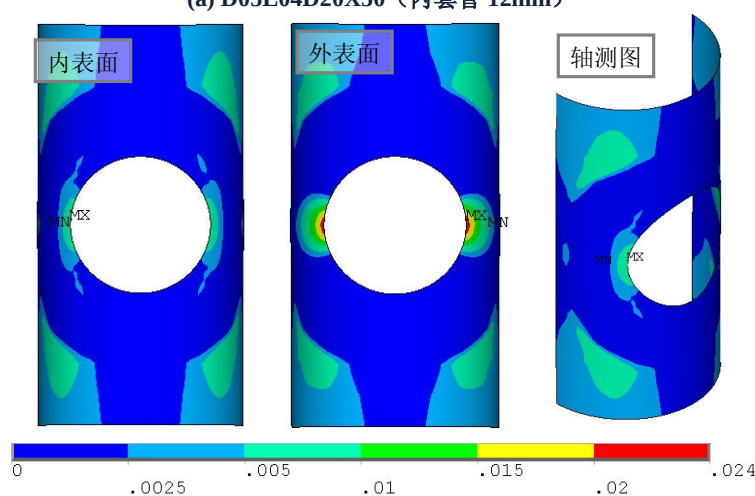
Fig 12 The parametric analysis results

为更进一步直观理解补强后开洞区域的应力和应变分布，图 13 给出 T05L04d20lc50 的内套管补强模型和外贴环板模型的最后一个加载步的等效塑性应变云图。有应变云图可知，在补强后，应力应变数值较大的区域转移到补强区域以外。塑性应变降低，应变更趋于均匀。





(a) D05L04D20X50 (内套管 12mm)



(b) D05L04D20X50 (外贴环板 12mm)

图 13 等效塑性应变云图

Fig 13 Equivalent strain nephogram

由以上的分析结果可知：a)文中的补强措施，能够有效提高构件承载力。b)在开洞尺寸较大时，补强措施的代价较大，且效果不明显。c)开洞补强建议：当洞口直径 d 小于等于 $0.5D$ 时，内套管或外环板厚度 t 等于构件厚度 T ；当洞口直径 d 不大于 $0.66D$ 且大于 $0.5D$ 时，内套管或外环板厚度 t 等于构件厚度 $2T$ ；内套管的长度 l_r 和外环板的宽度 l_r 不小于 $0.5d$ 。如图 14 所示。

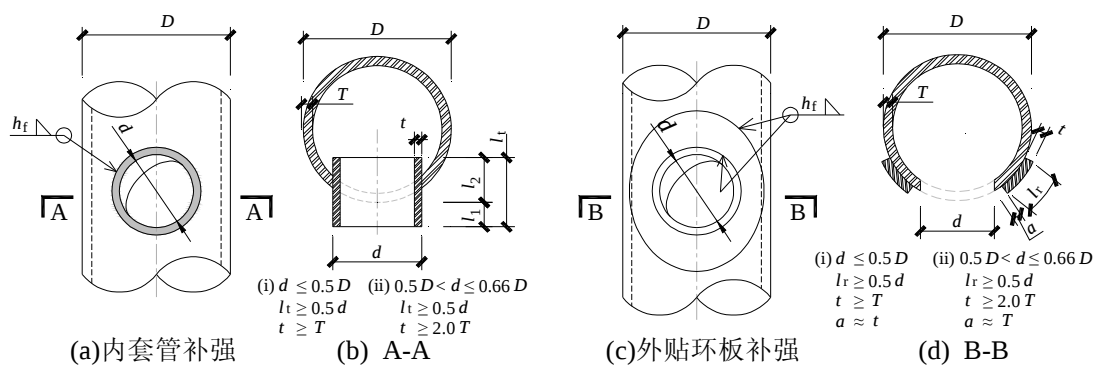


图 14 开洞补强建议

Fig 14 Hole reinforcement suggestion

5 结论

由以上的分析结果可知：

轴压情况下，圆钢管构件开洞的原则：(a) 开洞尺寸对承载力的影响较大。开洞直径 d 不宜大于 0.5 倍的构件外径 D ，不应大于 0.66 倍的构件外径 D 。(b) 开洞位置位于构件端部时，对构件的轴压承载力影响较小；位于构件的中点时，对构件的轴压承载力影响越大。构件开洞应尽量在构件的端部且离开节点影响区。(c) 截面径厚比 γ 和长细比对开洞构件的承载力影响不明显。

针对轴压圆钢管构件开洞，本报告研究的两种补强措施-内套管和外贴环板的设计建议：(a) 当洞口直径 d 小于等于 $0.5D$ 时，内套管或外环板厚度 t 等于构件厚度 T 。(b) 当洞口直径 d 不大于 $0.66D$ 且大于 $0.5D$ 时，内套管或外环板厚度 t 等于构件厚度 $2T$ 。(c) 内套管的长度 l_t 和外环板的宽度 l_r 不小于 $0.5d$ 。如图 14 所示。

本报告研究的局限：(a) 仅仅给出热轧圆钢管构件的开洞和补强研究，对于直缝管等构件，没有给出研究，预计结论会类似。(b) 仅仅对承受轴压荷载工况进行研究，没有对受弯、压弯工况进行研究，但结论基本相同的可能性较大。(c) 仅仅为数值分析研究，没有进行试验研究，但根据有限元法的对钢结构分析的可靠性来判断，结论发生变化的概率极低。

参考文献：

- [1] JGJ99-98 高层民用建筑钢结构技术规程[S]
- [2] 张圣坤. 不确定性问题的有限元方法及应用. 固体力学学报[J]. 1987.3:277-281
- [3] 李国强, 王彦博, 陈素文等. Q460 高强度焊接箱形柱轴心受压极限承载力参数分析. 建筑结构学报[J]. 2011.32(11):149-155
- [4] 陈骥. 圆管截面钢压杆稳定计算. 西安建筑科技大学学报(自然科学版) [J]. 1982.3: 1-12
- [5] GB50017-2003 钢结构设计规范[S]
- [6] 包春晓. 高强度钢管的稳定承载力研究[D]. 重庆: 重庆大学土木工程学院, 2012.

致谢：

感谢赵博、顾博、龙坪，一些想法是在与他们的讨论过程中完善的。

文件名: 圆钢管轴压立柱开洞削弱与补强措施设计探讨一分
析报告.doc
目录: G:\Research\圆钢管轴压立柱开洞与补强承载力研究
模板: C:\Documents and Settings\Owner\Application
Data\Microsoft\Templates\Normal.dot
标题: 第 4 章 X 型圆钢管相贯节点平面外受弯的骨架曲计
算公式
主题:
作者: mengxiande
关键词:
备注:
创建日期: 2013-12-4 10:05:00
修订号: 79
上次保存日期: 2014-1-2 23:16:00
上次保存者: User
编辑时间总计: 889 分钟
上次打印时间: 2014-1-2 23:16:00
打印最终结果
页数: 25
字数: 4,245 (约)
字符数: 24,201 (约)