

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201904076

铝合金毂式节点轴向拉压受力性能有限元分析

曹正罡^{1,2}, 李 亮^{1,2}, 汪天旻^{1,2}, 王志成^{1,2}

(1. 结构工程灾变与控制教育部重点实验室(哈尔滨工业大学), 哈尔滨 150090;
2. 哈尔滨工业大学 土木工程学院, 哈尔滨 150090)

摘 要: 为探究空间结构体系中铝合金毂式节点受力性能, 采用非线性有限元软件 ABAQUS 建立了 25 个不同尺寸的铝合金毂式节点精细化数值模型研究其受拉和受压性能, 并分析了毂体槽间距、齿间距、齿宽度、齿深度等因素对节点受力性能的影响. 分析结果表明: 节点受拉承载力主要由毂体与杆件嵌入部分之间凹凸齿槽承担; 改变主要参数, 节点受拉极限状态共出现毂体凸齿弯剪破坏、毂体最内侧槽部弯剪破坏、毂体最外侧槽部弯剪破坏和毂体凸齿剪切破坏 4 种破坏模式; 在研究范围内增大毂体槽间距和齿宽度, 节点抗拉极限承载力增加 71.3% 和 112.9%; 节点受压极限状态主要为失稳破坏, 主要参数的改变对其承压性能影响较小. 最终给出研究范围内节点抗拉极限承载力公式和设计建议.

关键词: 空间结构体系; 铝合金毂式节点; 破坏模式; 受力性能; 有限元分析

中图分类号: TU395 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2020)08-0184-08

Finite element analysis of axial tension and compression behavior of aluminum alloy hub joints

CAO Zhenggang^{1,2}, LI Liang^{1,2}, WANG Tianyang^{1,2}, WANG Zhicheng^{1,2}

(1. Key Lab of Structures Dynamic Behavior and Control (Harbin Institute of Technology), Ministry of Education, Harbin 150090, China; 2. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: To explore the mechanical performance of aluminum alloy hub joints in spatial structure system, nonlinear finite element software ABAQUS is used to establish refined numerical models for 25 aluminum alloy hub joints with different sizes to study the tensile and compressive properties. The effects of hub body groove spacing, tooth spacing, tooth width, tooth depth, and other factors on the mechanical performance of the nodes are studied. Results show that the tensile bearing capacity of the joint is mainly borne by the concave and convex grooves between the hub body and the embedded part of the rod. When the parameters are changed, there are four failure modes in the tensile limit state: hub body convex tooth flexural shear failure, hub body innermost groove flexural shear failure, hub body outermost groove flexural shear failure, and hub body convex tooth shear failure. Within the range of study, if the hub body groove spacing and tooth width are increased, the tensile ultimate bearing capacity of the nodes increase by 71.3% and 112.9% respectively. The stress of joints is mainly caused by instability, and the change of parameters have little effect on the pressure of joints. Finally, the formula of ultimate bearing capacity and the design suggestion are given.

Keywords: spatial structural system; aluminum alloy hub joint; failure mode; mechanical performance; finite element analysis

20 世纪 50 年代, 国外学者提出可将管件的末端用鸠尾榫与匹配的连接器的连接来作为金属连接器, 用其建造联锁三角形金属骨架来替代横梁做为建设架构支撑广阔空间^[1]. 随后的几十年里这个最初的设想被不断地完善, 形成了目前铝合金网格结构常见节点中的铝合金毂式节点, 其凭借成型简单、传力可靠、综合成本低等优势被广泛应用于全球超过 35 个国家的网格结构工程中, 见图 1(a).

针对铝合金毂式节点, 国外有学者对于节点的抗拉、抗压和抗弯等基本性能做了试验研究^[2-4]. 拉伸试验表明, 通过调整构件材性可以保证节点受拉时极限荷载近似等于管材抗拉强度与管面积乘积; 压缩试验表明节点受压性能良好, 极限荷载转换为管的应力强度时, 其安全系数是允许压应力强度的两倍; 弯曲试验则证明了沿管端强轴方向节点半刚性的正确性. 国内相关研究多集中于对钢制单层网壳嵌入式毂节点基本受力性能研究^[5-9]. 如姜栋等^[6]对嵌入式毂式节点做了多组试验, 分析了毂体直径、起拱角度等对节点的抗弯刚度和弹性阶段极限弯矩的影响; 赵才其等^[8-9]提出了两种嵌入式毂

收稿日期: 2019-04-09
基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51878218)
作者简介: 曹正罡(1975—), 男, 教授, 博士生导师
通信作者: 汪天旻, hitwangty@163.com

节点,并对其进行了拉、压性能试验研究等.然而铝合金毂式节点的材质、拼接方式、嵌入构造形式等相对钢制单层网壳嵌入式毂节点有明显不同,见图 1(b)、(c).因此实际上国内外对于空间结构体系中铝合金毂式节点的公开研究较少,对节点几何参数影响效应还缺乏系统的分析和研究.

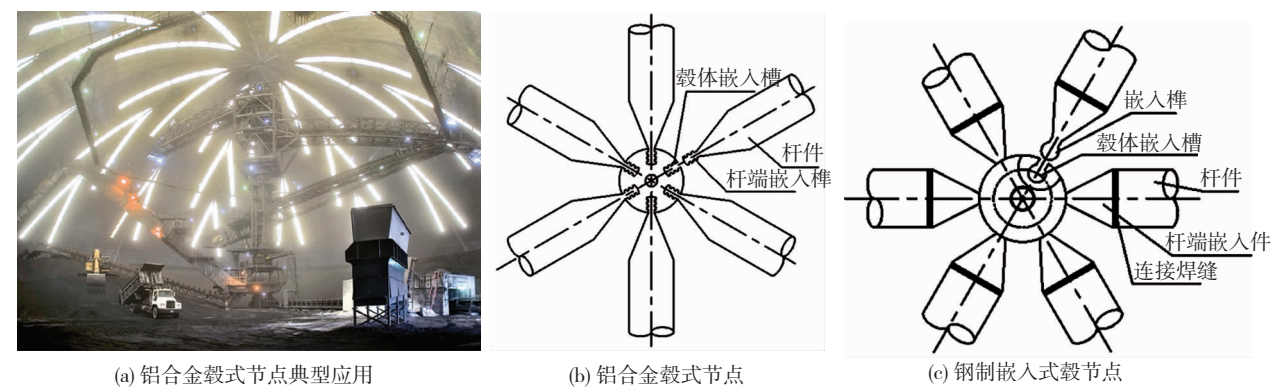


图 1 铝合金毂式节点应用及与嵌入式毂节点对比

Fig. 1 Application of aluminum alloy hub node and comparison with embedded hub node

1 铝合金毂式节点构造

铝合金毂式节点构造见图 2(a),由柱状毂体、杆端嵌入件、盖板、中心螺栓等零件组成.毂体为一圆柱体,是节点的核心构件,它由带沟槽的圆柱形铝合金挤压形成,根据连接杆件的数量和相互位置不同,其上有多个带凹凸纹的锁槽.运用毂式节点连接杆件时,将杆件端头在工厂用特制模具压扁成带有与锁槽相应凹凸纹扁平状的杆端嵌入件,插入毂体上与之相匹配的沟槽内,再在毂体上下端部安置盖板,最后用一根沿毂体轴线方向的螺栓拧紧.节点的细部尺寸及各研究因素见图 2(b),铝合金圆管采用 75 mm×10 mm 的规格圆管,毂体直径为 120 mm,高度为 105 mm,螺栓孔直径为 20 mm.以算例 CD12

为标准算例,其余算例编号及主要几何参数见表 1,除去与标准算例 CD12 相同尺寸 4 个(TL3、TW3、TD1.5、TN4)外,共计 25 个不同尺寸算例.

表 1 算例主要几何参数

Tab. 1 Main geometric parameters of the example						
算例编号	算例数	槽间距/ mm	齿间距/ mm	齿宽度/ mm	齿深度/ mm	齿组数
CD12 (标准算例)	1	12	3	3	1.5	4
CD3 ~ CD30	10	3 ~ 30	3	3	1.5	4
TL1 ~ TL5	5	12	1 ~ 5	3	1.5	4
TW1 ~ TW5	5	12	3	1 ~ 5	1.5	4
TD1.0 ~ TD3.5	6	12	3	3	1 ~ 3.5	4
TN2 ~ TN6	3	12	3	3	1.5	2 ~ 6

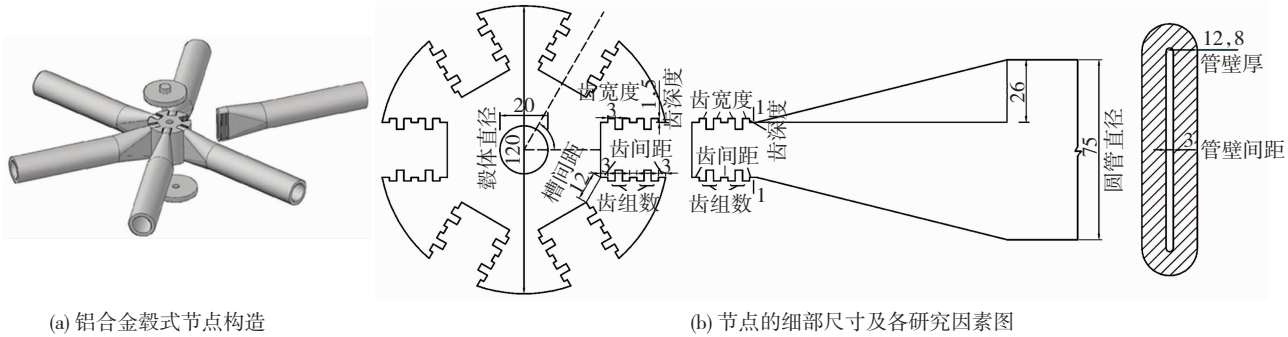


图 2 铝合金毂式节点构造详图

Fig. 2 Diagram of aluminum alloy hub node construction

2 铝合金毂式节点有限元模拟

2.1 节点有限元模型

参考文献[5]简化建模方式,根据本文所述节

点几何上的对称性,运用有限元软件 ABAQUS 建立简化后 1/2 模型,见图 3.

对于节点有限元模型采用结构化六面体网格,并选用单元类型为适用于接触分析、克服剪力自锁

问题且对应力及中部位节点计算较精确的八节点六面体非协调模式单元 C3D81。为获得节点域更精确的应力分布情况,将重点研究的节点内部区域网格尺寸细化,单元布置及网格划分情况见图 3。节点内部壳体与嵌入件凹凸齿之间、壳体与螺栓、壳体与盖板之间均采设置接触对,切向采用摩擦接触,摩擦系数取为 0.15,法向属性为硬接触^[10]。

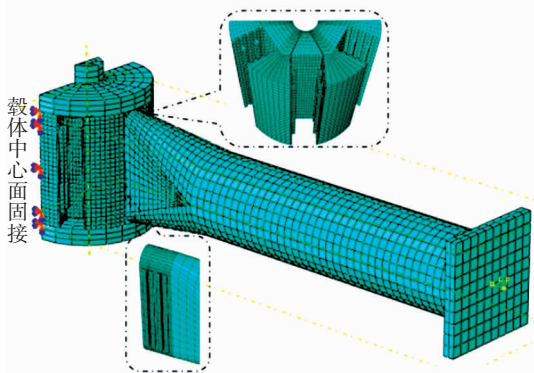
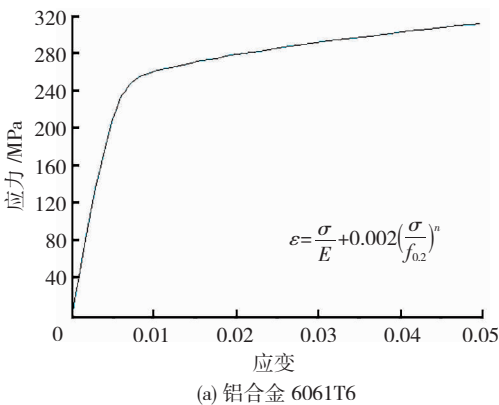


图 3 节点有限元模型及网格划分

Fig. 3 Finite element model and mesh division of nodes
为模拟节点受轴向荷载作用,如图 3 所示对简化 1/2 模型中半壳体的中心面施加固定约束,考虑



(a) 铝合金 6061T6

几何非线性,采用荷载加载控制法,避免加载点处的应力集中,对杆件末端加载点处放置一块刚度足够大的加载板,对此加载板施加轴向荷载。对于螺栓预紧力则通过施加螺栓荷载方式来模拟。

节点极限承载力采用极限荷载准则,取荷载 - 位移曲线中的峰值荷载作为节点极限承载力^[11]。

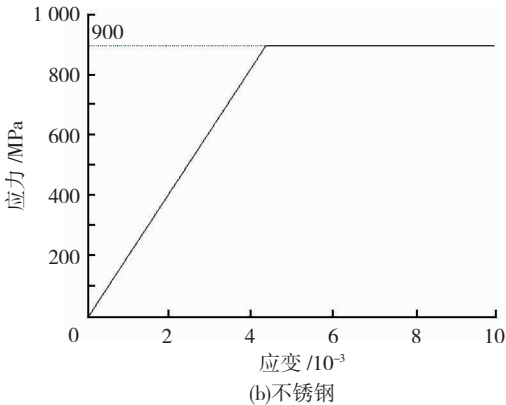
2.2 材料本构关系

圆柱形壳体、杆件和盖板均采用 6061T6 铝合金,采用图 4 所示 Ramberg-Osgood 模型,具体参数见表 2。螺栓选用 10.9 级高强螺栓,屈服强度按 GB/T 3098.6—2014 规范规定为 900 MPa,强度准则采用 von Mises 屈服准则,选用理想弹塑性本构关系模型,见图 4(b)。

表 2 材料参数表

Tab. 2 Material parameters

材料	弹性模量/ MPa	屈服强度/ MPa	极限强度/ MPa	泊松比
铝合金	68 000	245	265	0.33
高强螺栓	206 000	900	1 000	0.30



(b) 不锈钢

图 4 铝合金和不锈钢材料模型

Fig. 4 Material models of aluminum and stainless steel

3 有限元参数分析结果

3.1 节点受拉极限状态破坏模式

铝合金毂式节点受拉承载力主要是由壳体与杆件嵌入部分之间凹凸齿槽承担,齿根部受力主要为弯、剪复合受力。不同尺寸下节点受拉一共出现 4 种破坏模式,见图 5,灰色为屈服区域。破坏模式一为大多数尺寸下的破坏情况,壳体凸齿处弯剪破坏;破坏模式二为壳体槽间距较小时的破坏情况,在两槽之间有较大范围屈服区汇聚在一起,壳体最内侧齿槽发生弯剪破坏;破坏模式三为齿间距较小时的破坏情况,壳体最外侧齿槽处有较大范围屈服区汇聚,壳体最外齿槽弯剪破坏;破坏模式四为齿深度较小时的破坏情况,壳体凸齿处剪切破坏。

3.2 壳体槽间距 $L_{槽}$ 对节点受拉性能影响

本节共计算了 10 个不同槽间距(算例 CD3 ~ CD30)下节点受拉情况,见表 3。采用节点受拉时杆件末端的轴向位移和对应荷载,绘制荷载 - 位移曲线见图 6(a),不同槽间距对应节点抗拉极限荷载见图 6(b)。

表 3 不同壳体槽间距对应节点受拉极限荷载

Tab. 1 Different hub-body groove spacing corresponding to ultimate tensile load on nodes

槽间距/mm	极限荷载/kN	槽间距/mm	极限荷载/kN
3	165.95	18	280.67
6	224.48	21	282.10
9	260.12	24	283.12
12	273.09	27	283.35
15	278.23	30	284.34

由表 3 和图 6 可知,槽间距从 3 mm 增至 15 mm,节点抗拉极限荷载增加了 67.67%;槽间距从 18 mm 增至 30 mm,极限荷载增加了 1.31%;结果表明毂体槽间距小于 15 mm 时,提高槽间距能较大幅度增加节点抗拉极限荷载,大于 15 mm 时,加大槽间距对抗拉极限荷载影响不大。

选择三种不同槽间距下节点受拉极限状态应力云图对比,见图 7,当毂体槽间距较小时,在两槽之间呈现较大范围屈服区域汇聚,毂体最内侧凹槽变形明显(破坏模式二),导致极限荷载较低。随着槽间距离的增大,极限荷载下破坏部位由最内侧凹槽变为毂体凸齿部位(破坏模式一),承载力随之增大。

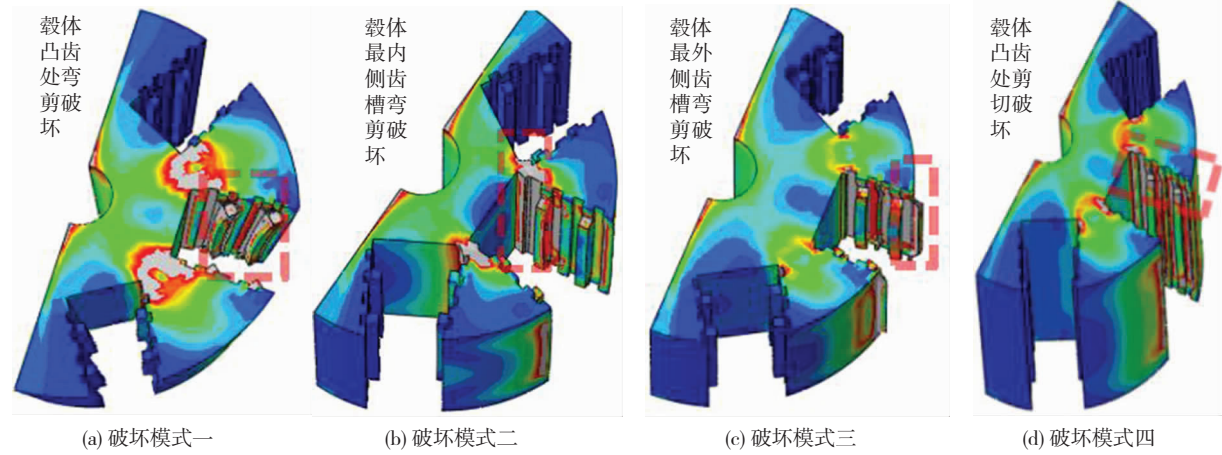


图 5 节点受拉典型破坏模式
Fig. 5 Typical failure mode of nodes under tension

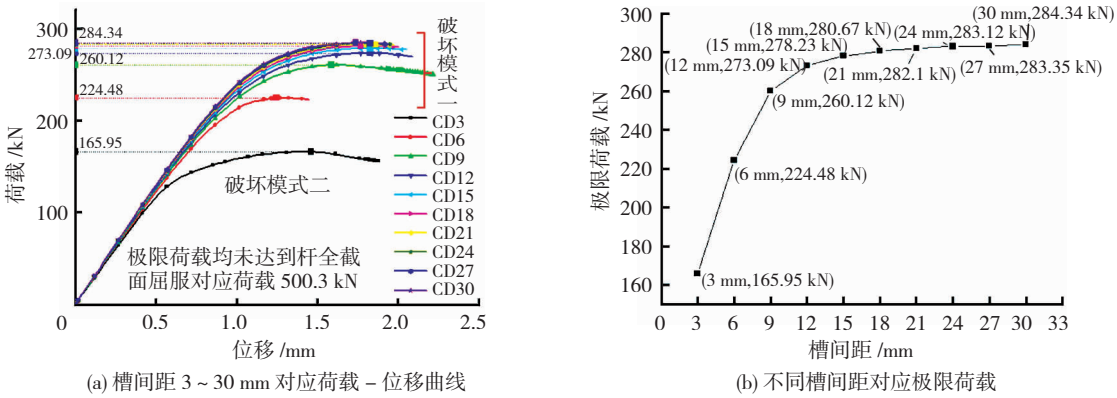


图 6 毂体槽间距对节点受拉影响
Fig. 6 Effects of hub-body groove spacing on the tension of the nodes

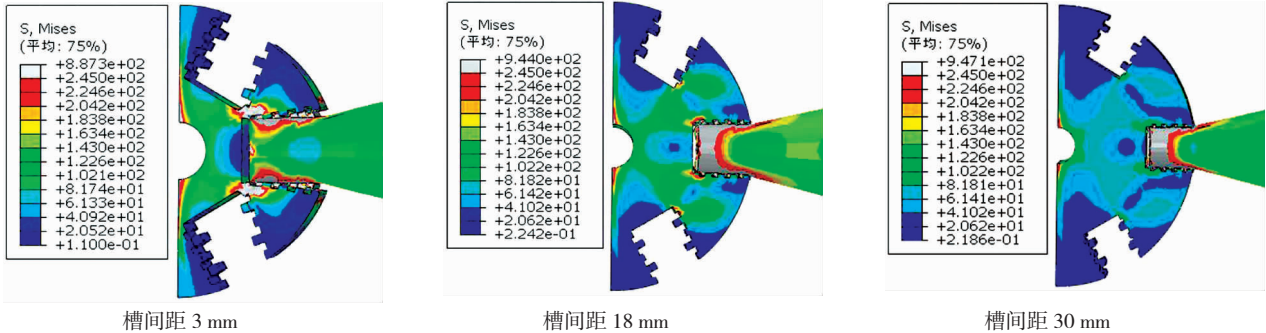


图 7 不同槽间距下节点应力云图(MPa)

Fig. 7 Stress nephogram of nodes with different groove spacing (MPa)

3.3 齿间距 $L_{\text{齿}}$ 对节点受拉性能影响

本节共计算了 5 个不同齿间距(算例 TL1 ~ TL5)下节点受拉的情况,见表 4。采用节点受拉时杆件末端的轴向位移和对应荷载,绘制荷载-位移曲线见图 8(a),不同齿间距对应节点抗拉极限荷载见

图 8(b)。

由表 4 和图 8 可知,齿间距从 1 mm 增至 5 mm,节点抗拉极限荷载增加了 45.11%,其中每增大 1 mm 对应荷载分别增大 17.83%、14.98%、3.88%、3.10%,可见齿间距从 1 mm 增至 3 mm 时,由于破

坏位置不同对其抗拉极限承载力增加较多,超过 3 mm 时,增大齿间距对其影响稍小,但凸齿部屈服面积增大,极限荷载略微增大.

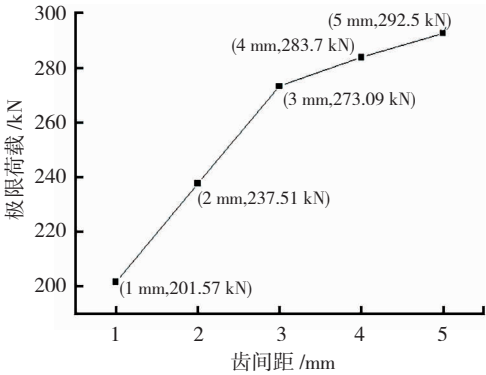
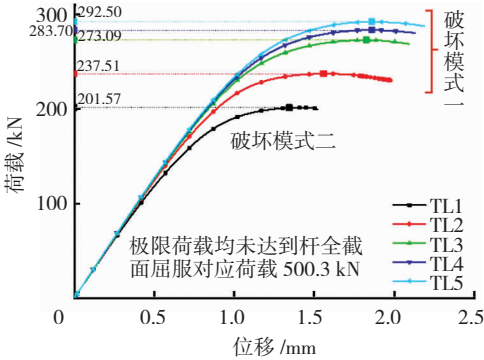
选择 3 种不同齿间距下节点受拉极限状态应力云图对比,见图 9,当齿间距较小时,壳体最外侧齿槽处呈现较大范围屈服区汇聚,壳体最外侧凹槽变形明显(破坏模式三),导致极限荷载较低.随着齿间距离的增大,杆件嵌入件端部屈服区域增大,极限荷载下破坏部位由最外侧凹槽变为壳体凸齿部位

(破坏模式一),承载力随之增大.

表 4 不同齿间距对应节点受拉极限荷载

Tab. 4 Different tooth spacing corresponding to ultimate tensile load of nodes

齿间距/mm	极限荷载/kN	齿间距/mm	极限荷载/kN
1	201.57	4	283.70
2	237.51	5	292.50
3	273.09		



(a) 齿间距 1 ~ 5 mm 对应荷载 - 位移曲线 (b) 不同齿间距对应极限荷载

图 8 齿间距对节点受拉影响

Fig. 8 Effects of tooth spacing on the tension of the nodes

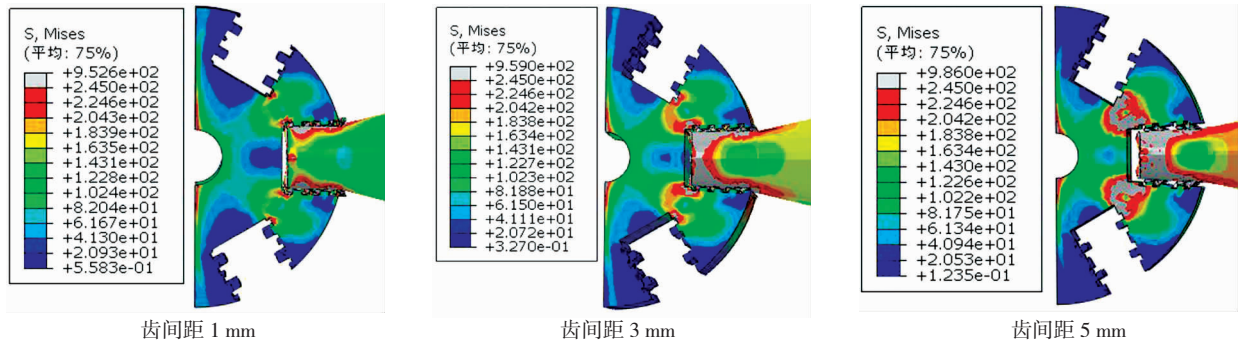


图 9 不同齿间距下节点应力云图(MPa)

Fig. 9 Stress nephogram of nodes with different tooth spacing (MPa)

3.4 齿宽度 d 对节点受拉性能影响

本节共计算了 5 个不同齿宽度(算例 TW1 ~ TW5)下节点受拉的情况,见表 5.采用节点受拉时杆件末端的轴向位移和对应荷载,绘制荷载 - 位移曲线见图 10(a),不同齿宽度对应节点抗拉极限荷载见图 10(b).

由表 5 和图 10 可知,齿宽度从 1 mm 增至 5 mm,节点抗拉极限承载力增加了 112.94%,其中每增大 1 mm 对应荷载分别增大 37.97%、23.00%、14.31%、9.76%,结合此前分析可得节点受拉主要靠凹凸齿槽部承载,齿宽度增加使得齿槽部受剪的面积增大,带来抗拉极限荷载明显的增大.齿宽度的变化对节点破坏模式没有明显影响,仍属于破坏模式一,即壳体相应凸齿处弯剪破坏.

表 5 不同齿宽度对应节点受拉极限荷载

Tab. 5 Different tooth widths corresponding to ultimate tensile load of nodes

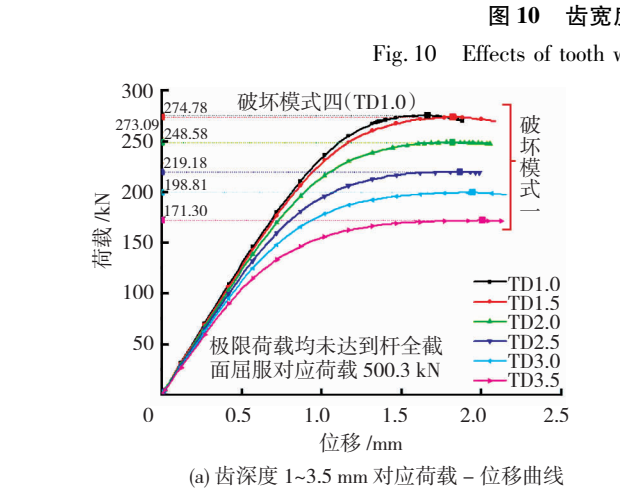
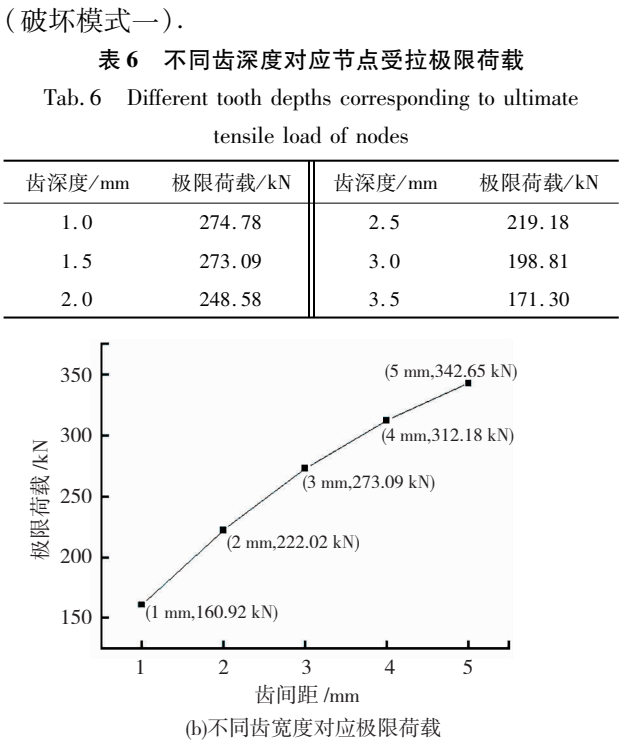
齿宽度/mm	极限荷载/kN	齿宽度/mm	极限荷载/kN
1	160.20	4	312.18
2	222.02	5	342.65
3	273.09		

3.5 齿深度 h 对节点受拉性能影响

共计算了 6 个不同齿深度(算例 TD1.0 ~ TD3.5)下节点受拉的情况,见表 6.采用节点受拉时杆件末端的轴向位移和对应荷载,绘制荷载 - 位移曲线见图 11(a),不同齿深度对应节点抗拉极限荷载见图 11(b).

由表 6 和图 11 可知,齿深度从 1 mm 增至 3.5 mm,

节点抗拉极限荷载减少了 37.66%,每增大 0.5 mm 对应荷载分别减少 0.62%、8.98%、11.83%、9.29%、13.84%。由前述分析可知,节点受拉时齿根部为弯剪破坏,齿深度的增加导致弯矩作用增大,因此节点抗拉极限荷载减少。当齿深度较小时,深度带来的弯矩效应可以忽略,极限状态时,节点表现为毂体凸齿剪切破坏(破坏模式四),齿深度的增大导致极限状态时节点破坏模式转变为毂体凸齿弯剪破坏



3.6 齿组数 n 对节点受拉性能影响

本节共计算了 3 个不同齿组数(算例 TN2 ~ TN6)下节点受拉的情况,见表 7。采用节点受拉时杆件末端的轴向位移和对应荷载,绘制荷载 - 位移曲线见图 12(a),不同齿组数对应节点抗拉极限荷载见图 12(b)。随着齿组数的增加,节点抗拉极限荷载增加 122.87%,破坏模式未发生变化,仍属于破坏模式一,即毂体相应凸齿处弯剪破坏。

表 7 不同齿组数对应节点受拉极限荷载

Tab.7 Different tooth groups corresponding to the ultimate tensile load of the nodes

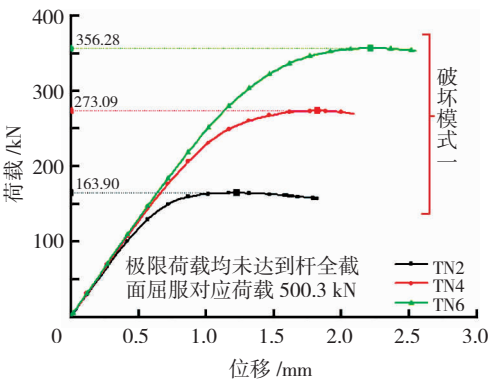
齿组数/组	极限荷载/kN
2	163.90
4	273.09
6	356.28

3.7 节点抗拉极限承载力公式拟合及设计建议

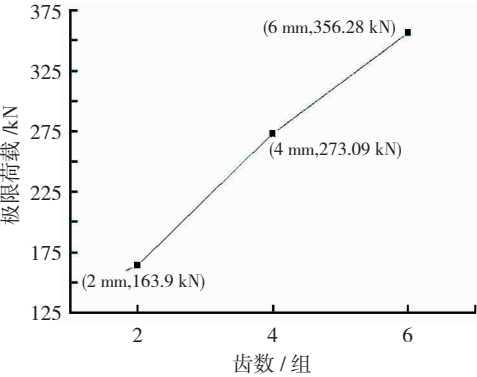
在上述分析基础上,本文采用多元回归的方法拟合节点抗拉极限承载力的计算公式。经过参数分析可知,槽间距 $L_{槽}$ 、齿间距 $L_{齿}$ 、齿宽度 d 、齿深度 h 、齿组数 n ,皆对节点抗拉极限承载力有显著影响。最终拟合时以无量纲参数形式为自变量,设定铝管壁厚 t 为定值, F_0 为铝管全截面屈服对应荷载,采用的影响参数有: $\xi_1 = L_{槽}/t$ 、 $\xi_2 = L_{齿}/t$ 、 $\xi_3 = d/t$ 、 $\xi_4 = h/t$ 、 n ,经过拟合整理后得节点承载力公式为

$$F_t = e^{-1.55\xi_1^{0.21}\xi_2^{0.23}\xi_3^{0.45}\xi_4^{-0.38}n^{0.69}} \times F_0, \quad (1)$$

对拟合公式进行误差分析,见图 13。可见图中各数据点均位于直线 $y = x$ 周围,且绝大多数点均处于 10% 误差带范围内。经计算,公式拟合数据和数值模拟结果平均误差为 4.44%,拟合公式准确性较高。



(a) 齿组数 2~6 组对应荷载 - 位移曲线



(b) 不同齿组数对应极限荷载

图 12 齿组数对节点受拉影响

Fig. 12 Effects of the number of teeth on the tension of the joint

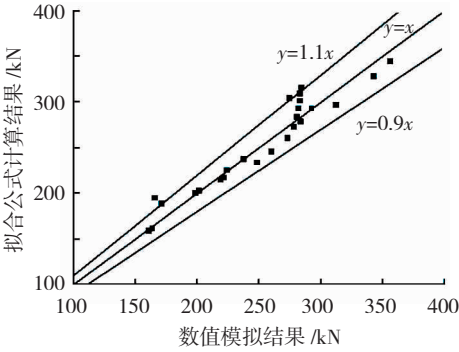


图 13 极限承载力公式拟合结果误差分析

Fig. 13 Error analysis of formula fitting result of ultimate bearing capacity

在本文所选各参数计算范围内,节点受拉极限状态共出现 4 种破坏模式,应避免破坏模式二和破坏模式三的发生,这两种情况下毂体中凸齿部分未能充分承载,节点已在其他部位发生破坏,抗拉极限承载力较低.最终根据计算结果给出各影响参数的适宜选择范围: ξ_1 为 1.2 ~ 1.8, ξ_2 为 0.3 ~ 0.5, ξ_3 为 0.3 ~ 0.5, ξ_4 为 0.1 ~ 0.2, n 为 6 组.当各参数影响系数小于适宜范围下限值时,节点抗拉极限承载力下降较多,大于上限值时承载力提高不明显,出于节点受力性能和各部件经济性考虑,给出各影响参数的适宜选择范围.

毂体直径应保证相邻嵌入槽中各部件不相碰,

通过各影响参数与毂体直径的几何关系,给出毂体直径核算公式为

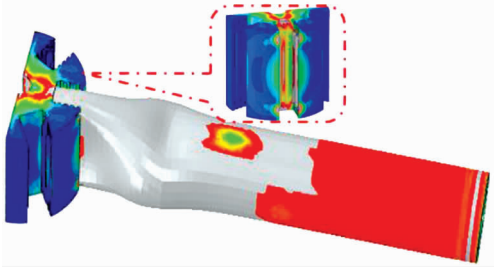
$$D \geq (\xi_2 t + 3 \xi_3 t) n + \xi_1 t / \sin \frac{\theta}{2} + 2(2t + \lambda t + 2 \xi_4 t) / \sin \theta, \quad (2)$$

式中: D 为毂体直径,mm; θ 为毂体中两相邻嵌入槽中轴线之间夹角(两相邻铝管中轴线之间夹角),rad; λ 为嵌入件中两管壁间隔距离与铝管壁厚之间的比值,可取为 0.3.

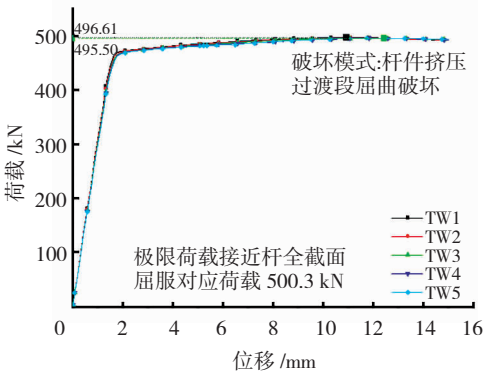
当相邻嵌入槽中轴线之间夹角 θ 较小时,尚应根据相邻嵌入槽中各部件不相碰的要求核算毂体直径.此时可通过检查可能相碰点至毂体中心的连线与相邻嵌入槽中轴线间的夹角不大于 θ 的条件进行核算.

3.8 铝合金毂式节点受压

经过有限元分析可知,铝合金毂式节点受压承载力主要由毂体与杆件嵌入部分之间的凹凸齿槽和端面共同承担.极限状态时,杆件挤压过渡部位发生屈曲变形导致失稳破坏,见图 14(a),灰色为屈服区域.本文选用的研究因素的改变对节点受压极限荷载影响较小,见图 14(b),以齿宽度变化为例,节点抗压极限承载力最大值和最小值仅相差 0.22%,且其数值接近杆件全截面屈服对应荷载,受压性能明显优于受拉性能.



(a) 节点受压时破坏情况



(b) 齿宽度对节点受压影响

图 14 铝合金毂式节点受压破坏情况及齿宽度对节点承压影响

Fig. 14 Damage of aluminum alloy hub joints under compression and the influence of tooth width on the joints under compression

4 结 论

1) 铝合金毂式节点受拉承载力主要由毂体与杆件嵌入部分之间凹凸齿槽承担,齿根部受力主要为弯、剪复合受力;节点域内槽间距、齿间距、齿宽度、齿深度和齿组数的改变对节点抗拉极限荷载有明显影响,极限状态共出现 4 种破坏模式.

2) 铝合金毂式节点受压承载力主要由毂体与杆件嵌入部分之间的凹凸齿槽和端面共同承担;极限状态为失稳破坏;节点受压性能好于受拉性能.

3) 在各参数计算范围内,本文给出节点受拉时各因素适宜选择范围: ξ_1 为 1.2 ~ 1.8, ξ_2 为 0.3 ~ 0.5, ξ_3 为 0.3 ~ 0.5, ξ_4 为 0.1 ~ 0.2, n 为 6,并给出了毂体直径设计建议.

4) 根据计算结果,本文给出了各参数计算范围内的节点抗拉极限承载力公式.公式的适用性将通过后续试验得到进一步验证.

参考文献

[1] 贾光华,贾思然. 铝合金毂节点网架在全封闭煤场中的应用[J]. 电站辅机,2018,39(3):48
JIA Guanghua, JIA Siran. Application of aluminum alloy hub node grid frame in closed coal yard[J]. Power plant auxiliary,2018, 39 (3):48

[2] FUJIMORI T, SUGIZAKI K. Large span structural system using new materials[J]. Materials In Civil Engineering,1998,10(4): 203

[3] SUGIZAKI K, KOHMURA S. Experimental study on buckling behavior of a triodetic aluminum space frame[C]//John F. Abel. Proceedings of the IASS – ASCE International Symposium. New York;American Society of Civil Engineers,1994:478

[4] YONEMARU K, FUJISAKI T, NAKATSUJI T, SUGIZAKI K. Development of space truss structure with CFRP [C]//M. B. Leeming. Innovation in Composite Materials and Structures. Edinburgh: Civil-Comp Press, 1997:81

[5] 单晨. 毂形节点承载力分析及其对单层球面网壳整体稳定性影响[D]. 天津:天津大学,2010

SHAN Chen. Analysis of hub-shape inlay joint and its influence on the stability of single-layer lattice domes [D]. Tianjin: Tianjin University, 2010

[6] 姜栋. 单层网壳节点半刚性及其对结构整体稳定性影响的研究 [D]. 杭州:浙江大学,2016
JIANG Dong. Study on joint semi-rigidity of single-layer reticulated shell and influence on overall stability [D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2016

[7] 王先铁,郝际平,钟炜辉,等. 一种新型网壳结构节点的试验研究与有限元分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2005, 37(3): 316
WANG Xiantie, HAO Jiping, ZHONG Weihui, et al. Experimental research and finite element analysis on a new joint of reticulated shells [J]. Journal of Xi ' an University of Architecture and Technology (Natural Science Edition), 2005, 37(3): 316

[8] 赵才其,刘文学,赵惠麟. 新型网壳节点的弹塑性分析及试验研究[J]. 东南大学学报,1998,28(2):72
ZHAO Caiqi, LIU Wenxue, ZHAO Huilin. Elastoplastic analysis and experimental study of new reticulated shell joints[J]. Journal of Southeast University, 1998, 28(2): 72

[9] 赵才其,刘文学,赵惠麟. 单槽齿承插式节点的弹塑性试验研究 [J]. 工业建筑,1999,29(7):34
ZHAO Caiqi, LIU Wenxue, ZHAO Huilin. Experimental study on elastoplastic behavior of single slot tooth socket joints[J]. Industrial Construction, 1999, 29(7): 34

[10] 王元清,柳晓晨,石永久,等. 铝合金网壳结构盘式节点受力性能有限元分析[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2015, 48(增刊1): 1
WANG Yuanqing, LIU Xiaochen, SHI Yongjiu, et al. Finite element analysis on mechanical performance of TEMCOR joints in aluminum alloy shell structures[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2015, 48(S1): 1

[11] 戎芹,曾宇声,侯晓萌,等. 圆钢管 RPC 轴压短柱有限元分析与承载力计算[J]. 哈尔滨工业大学学报,2018,50(12):63
RONG Qin, ZENG Yusheng, HOU Xiaomeng, et al. Finite element analysis and bearing capacity calculation for RPC-filled circular steel tube columns under axial compression[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2018, 50(12):63

(编辑 赵丽莹)