

文章编号:1671-6833(2006)03-0025-05

空间网架焊接空心球节点承载力研究

秦力一, 许德刚, 周爱民

(郑州大学工程力学系, 郑州, 450002)

摘要:对焊接空心球节点,采用ANSYS9.0程序进行了承载力的模拟分析计算,获得了球节点受拉压时壳面弹塑性应力和变形分布规律,定出了破坏带区域在球壳中的确切位置.根据焊接空心球节点的受拉失效机理,提出了球节点塑性失效破坏的三维应力状态分析模型.进而研究了球体-焊缝-钢管一体复杂应力状态下的极限受力分析.应用极限状态计算理论得到焊接空心球节点抗拉承载力计算公式.基于空心球节点受压破坏机理的探讨和试验数据的统计分析,以若干变参数的线性回归方法,获得球节点受压承载力计算公式.数据结果表明,所得空心球节点承载力公式计算值与试验值拟合精度较好.

关键词:焊接空心球;有限元分析;承载力;破坏机理

中图分类号: TU 356; TU 4376

文献标识码: A

0 引言

除螺纹空心球节点外,焊接空心球节点型式广泛用于网架结构工程中.现有网架结构中,多有采用此类节点.由于球壳-焊缝-管杆连接系统的破坏机理尚未十分明了,冲切或冲压破坏是一个复杂的三向应力状态,其计算方法还须进一步完善^[1].文献[2]依据理想弹塑性模型和 Von-Mises 屈服准则对不同直径的焊接空心球节点进行了非线性有限元分析.根据试验情况对有限元计算结果进行二元回归分析,从而得到影响空心球节点承载力的主要因素与承载能力之间的关系式.文献[3]也采用理想弹塑性应力-应变关系和 Von-Mises 屈服准则,同时考虑几何非线性的影响,建立了焊接空心球节点的有限元分析模型,对承受弯矩、轴力及两者共同作用的球节点进行了非线性分析.文献[4]采用三维退化曲壳有限元计算了焊接空心球节点的极限承载力,在对试验结果进行数值模拟的基础上,提出了有关的强度破坏准则和极限准则.

但是在目前有关研究工作中,对破坏区域在球壳中的确切位置尚未有较明确深入的探讨,极限分析公式中也未考虑破坏区域焊缝宽度因素的影响.为建立精确度较高的焊接空心球节点承载力计算公式,作者建立了球节点受力计算模型,对

节点承载及失效过程进行了弹塑性数值全程模拟试验,获得了球节点壳面弹塑性应力和变形分布规律.定出了破坏带区域在球壳中的确切位置.进一步根据极限状态分析理论,考虑了焊缝宽度对空心球节点受拉极限破坏计算面面积的影响,导出焊接空心球节点受拉承载力计算公式.又以现有试验结果数据及空心球节点受压失效机理为主要依据,通过若干主要影响参数的统计回归分析,得到空心球节点受压承载力计算公式.本文公式结果与网架规程^[1]公式所算出的承载力值较为接近,且与试验值更为吻合.

1 焊接空心球节点弹塑性数值模拟

1.1 计算方法及过程

在通用软件 ANSYS9.0 分析平台上,对焊接空心球节点受拉受压状态的有限元非线性分析.在实际网架结构工程中,焊接空心球往往与多根钢管多向相连,当属空间受力状态.但由节点数值分析所得结果(电阻应变测量也可得出类似结果)看,当节点荷载达一定水平时,各钢管之间对节点的相互影响甚小,即单向与多向状态下空心球节点承载力相差不大^[5].固仍采用节点单向受力状态计算模型.

焊接空心球节点及相连钢管的本构关系以 Q235 钢的实验曲线为依据,采用了多线性等向强

收稿日期:2006-02-10;修订日期:2006-04-10

基金项目:河南省自然科学基金资助项目(954051500)

作者简介:秦力一(1952-),男,山东昌乐人,郑州大学副教授,主要从事工程力学方面的教学和科研工作.

化模型(MISO). 当球节点的应力产生一无限小增量时, 设应变可分成弹性及塑性两部分变化, 由施加的应变变化计算应力变化的显式表达为^[6]

$$\begin{cases} d\sigma = E_{ep}^* d\epsilon \\ d\epsilon = d\epsilon_e + d\epsilon_p \end{cases} \quad (1)$$

$$E_{ep}^* = E - E \left\{ \frac{\partial Q}{\partial \sigma} \right\} \left\{ \frac{\partial F}{\partial \sigma} \right\}^T E \left[A + \left\{ \frac{\partial F}{\partial \sigma} \right\}^T E \right]^{-1} \left\{ \frac{\partial Q}{\partial \sigma} \right\} \quad (2)$$

式中, E 和 E_{ep}^* 分别为常弹性矩阵和弹塑性矩阵; F 和 Q 分别为屈服面函数和塑性位势.

焊接空心球节点的弹塑性分析采用增量-迭代格式. 在真实解的邻近区域内, Newton-Raphson 迭代方法可收敛; 但初始解若与真实解相差较大, 则求解过程可能发散. 为得到收敛解, 须将荷载增量步细分至足够小, 采用切线矩阵并对每个荷载增量步进行有限次迭代. 对第 m 次增量和 Newton-Raphson 法的第 $n+1$ 次迭代应力^[6]:

$$\sigma_m^{n+1} = \sigma_m^n + \Delta \sigma_m^n \quad (3)$$

其中,

$$\Delta \sigma_m^n = (E_{ep}^*)_{m+\theta}^n \Delta \epsilon_m^n \quad (4)$$

$(E_{ep}^*)_{m+\theta}^n$ 是根据介于 σ_m^n 和 σ_m^{n+1} 之间的某应力算出的切线矩阵.

材料的线弹性模量取为 210GPa, Poisson 比为 0.26. 球壳和钢管均采用柔顺性较好的 SOLID92 (10 节点) 单元; 采用网格自动剖分技术对实体模型进行自由网格剖分(设定精度为 1, 总单元个数为 8642)为防止管-壳交界处因几何形状急剧突变引起的单元畸形, 计算模型中焊缝(见图 1)上下趾进行了适度倒角处理.

由于计算模型及荷载的轴对称性, 仅取整个焊接空心球节点的 1/4 计算(见图 2), 截开的对称面上施加轴对称约束. 荷载子步数为 10, 参照试验结果的极限值, 以均布面荷载加于管口横截面上.

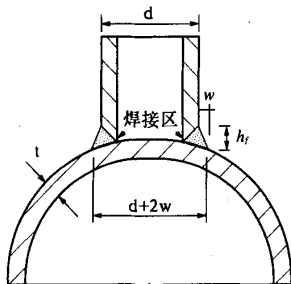


图 1 空心球节点几何模型

Fig.1 Geometry model of the hollow sphere joint

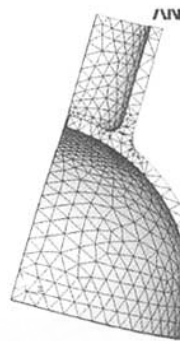


图 2 空心球节点网格模型

Fig.2 The meshing model of the hollow sphere joint

1.2 计算结果分析

从计算所得等效应力分布云图、等值线及变形图(图 3~图 5)可以看出:

(1) 应力集中峰值区域位于壳面焊趾附近处(图 3、4 中自动标示 MX 点), 该环形带区应力值远高于其它大部分区域, 远离焊趾处球面应力随其距离的渐远而急剧下落. 这表明焊趾环带区应力集中相当剧烈; 同时也表明, 若焊接空心球节点有多向管杆相连, 只要彼此相距不是很近则相互影响很小, 按单向承载建立计算模型仍在合理范围内.

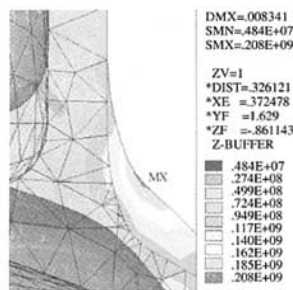


图 3 von.Mises 等效应力分布图(拉)

Fig.3 The Mises equivalent stress distribution of the sphere joint in tension

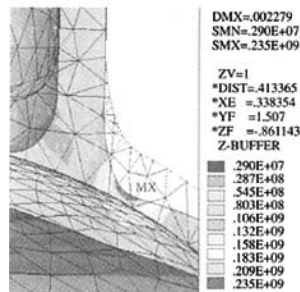


图 4 von.Mises 等效应力分布图(压)

Fig.4 The Mises equivalent stress distribution of the sphere joint under compression

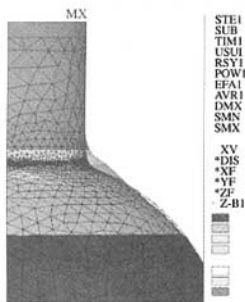


图5 球节点变形分布图(拉)

Fig.5 The deformation distribution of the sphere joint in tension

(2) 计算数值表明,该区域的点同时存在经向与纬向应力——处于三向复杂应力状态。受拉球节点壳面经向全为拉应变,受压则壳面经向全为压应变,这与试验现象相吻合。当施加荷载达到预设极限荷载(试验值)的40%左右,焊趾处已出现屈服线,此时远离焊趾处球面应力仍不大。

(3) 当计算荷载临近预设极限荷载(试验值),壳面焊趾附近环形带状区域塑性变形很大,变形图中有明显的向外鼓凸(拉荷载下,图5)或向内凹陷(压荷载下)。在球壳受压破坏计算中,当计算荷载接近或达到预设极限荷载,变形图会出现显著屈曲凹陷(此时应力平衡计算已发散),这与试验球壳管周焊趾附近发生较大塑性变形而壳面压曲下陷最后局部失稳现象^[7]相当符合。

2 焊接空心球节点受拉承载力分析

根据FEM计算和试验结果对受拉破坏区域的观察:受拉破坏计算面应取在焊趾外端(球壳一侧)如图3所示,钢管与球壳的交界处应考虑焊缝宽度。球壳破坏面上的点则处于复杂应力状态。另外,承载力公式的推导还假设球壳与钢管间的焊缝强度与球壳相同。

由此建立如图1所示的受拉球节点极限破坏受力模型。按单向轴心受拉状态考虑,焊接空心球节点的极限承载力为 F 。计算简图中将球壳以管径加两倍焊缝宽为直径截取脱离体。其受力属轴向对称的空间应力状态。根据极限平衡分析,可得球壳破坏面上极限承载力为

$$F = \int_A \sigma_{eq} dA^* = \int_S \sigma_{eq} t dS^* \quad (5)$$

其中, F 为焊接空心球节点受拉极限承载力, N 为球壳破坏面内等效应力(Equivalent stress),MPa;

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}$$

式中: A^* ,为球壳破坏面面积, mm^2 ; S^* 为圆周(纬线)长度 mm ; t 为球壳壁厚, mm 。

焊接空心球节点通常采用薄壁球壳,(球壳壁厚) $t < D$ (球壳直径)。当球壳破坏面接近或达到极限状态时,破坏面上应力峰值点将因材料的屈服流动而出现应力重分配——进而破坏面各点应力将趋于均匀。因而可认为此状态下各点等效应力相同,于是由(5)式可得

$$F = \sigma_{eq} \pi \bar{d} \quad (6)$$

式中, \bar{d} 为球壳破坏面圆周(纬线)等效直径, mm 。 $\bar{d} = d + 2w$, w 为焊缝等效宽度。

由Mises屈服准则,球壳破坏面上各点等效应力都达到材料的屈服极限而至极限状态时,空心球节点抗拉极限承载力:

$$F = f_y \pi \bar{d}$$

式中: f_y 为钢材抗拉屈服强度,MPa;

若将上式中钢材的屈服强度 f_y 换算为设计强度 f ,应按《网架规程》的资料,乘以材料强度系数1.1。再根据极限状态计算理论考虑几个分项系数,即相当取总安全系数 $K=2$,可得焊接空心球节点抗拉设计承载力计算公式为

$$N_t = 0.55 f \pi \bar{d} \quad (7)$$

式中: N_t 为抗拉设计承载力 N ; f 为钢材抗拉设计强度,MPa; $\bar{d} = d + 2w$, mm ; w 为球壳—管焊缝等效宽度,取 $2w = 10 \frac{d}{D}$;

考虑到实际焊缝情况较复杂,且焊缝强度要低于球壳材料,经数据统计分析后 $2w$ 取以上值。

3 焊接空心球节点受压承载力分析

焊接空心球节点受压承载力计算公式也较为繁多。但作为经验公式,统计基础尚不充分,不少公式与试验数据的拟合程度偏差过大。一些有限元计算分析结果与球壳试验结果^{[4][5]}都表明:受压球壳与受拉球壳的破坏机理有所区别。受拉情况下,球壳破坏机理主要表现为冲切强度失效;而受压工况下破坏,冲压过程伴有失稳,为弹塑性压缩破坏。在轴向受压荷载下,球面管周焊趾附近区域较大的经向及环向压应力引起该区域较大的塑性变形,壳面压屈下陷而有局部失稳现象发生。ANSYS计算图形分析的最后破坏形态也呈现明显的弹塑性压曲破坏现象。

对球壳局部失稳影响最大的因素是球壳壁厚 t 和管径 d 。 t 反映了“压屈构件”截面尺寸对“柔度”的影响;而 d 则反映了约束范围和“压屈构

件”高度对该“柔度”的影响.球径 D 也一定程度反映该“压屈构件”高度对“柔度”的影响.试验及计算数据表明: D 与 N_c 呈反增长趋势,但在球径不太大的情况($D \leq 500$ mm)下影响较弱.

3.1 受压承载力直接回归公式

本文试用了三种类型回归模式对部分试验数据拟合以期得出逼近度较好的算式:

$$(1) N_c = a \cdot t \cdot d + c,$$

$$(2) N_c = a \cdot t \cdot d + b \frac{1}{D} + c,$$

$$(3) N_c = \frac{t \cdot d}{D} \cdot a + b$$

经回归分析的结果比较表明:几种模式模拟承载力与各因素间关系的逼近程度都相当好,其中模式(1)形式较为简洁.将 N_c 和 td 分别设为随机变量和变量,经一元线性回归分析后可得

$$N_c = 0.5td + 44 \quad (8)$$

为反映球壳直径 D 对承载力的影响,对模式(2)进行二元回归分析后可得

$$N_c = 0.5td + \frac{1600}{D} + 37 \quad (9)$$

其中, N_c 为抗压设计承载力, kN; t , d 分别为球壳壁厚, mm 和管径, mm; D 为球壳直径, mm.

3.2 受压承载力折减因数公式

由于焊接空心球节点破坏有压屈失稳的特点,还可将球结点抗压承载力写作抗拉设计承载力与一个随 (td) 、 D 而改变的稳定因数之乘积,以反映焊接空心球节点抗压承载力随 (td) 、 D 而变这一特点:

$$N_c = 0.55f_t \bar{\varphi} \quad (10)$$

与前述方法类似,分别经一个和两个主因素统计回归分析后可得稳定因数 φ 的 2 种模式:

$$\varphi = 0.82 - 1.14 \times 10^{-4}(t \cdot d) \quad (11)$$

$$\varphi = 0.76 - 10^{-4}(t \cdot d) + \frac{12}{D} \quad (12)$$

其中,各长度单位取 mm. 后一式考虑了球壳直径 D 对承载力的反增长趋势影响.

4 与网架规程公式的对比

将网架规程公式、本文推导公式与其它资料提供的试验值^[5]、实测值比较(见表 1,表 2)可知,本文推导公式更接近试验值、实测值.特别在受压情况球径较大时,网架规程公式与试验值、实测值有较大的偏差,而本文推导公式仍相当逼近,未见有大的偏离.

表 1 球壳节点受拉极限承载力值比较

Tab.1 Comparison of the bearing capacity of the sphere joint in tension

编号	空心球节点规格/mm	“网架规程”值/kN	本文公式值/kN	试验值 ^[5] /kN
1	200 × 6 - 89	394	415	432
2	300 × 10 - 108	797	828	864
3	400 × 12 - 130	1 152	1 183	1 250
4	400 × 18 - 130	1 727	1 770	1 815
5	450 × 12 - 159	1 409	1 447	1 540
6	450 × 16 - 159	1 878	1 929	1 980
7	500 × 14 - 160	1 654	1 688	1 650
8	500 × 16 - 160	1 899	1 929	1 925

表 2 球壳节点受压极限承载力值比较

Tab.2 Comparison of the bearing capacity of the sphere joint under compression

编号	空心球节点规格/mm	“网架规程”值/kN	本文公式值/kN		试验值 ^[5] /kN
			(8)式	(10)、(12)式	
1	200 × 6 - 60	219	224	223	224
2	250 × 6 - 76	277	272	271	268
3	220 × 6 - 76	275	272	273	274
4	200 × 6 - 89	315	311	316	314
5	280 × 6 - 108	387	368	367	369
6	250 × 8 - 108	494	476	478	480
7	280 × 6 - 159	547	521	512	522
8	300 × 10 - 108	615	584	583	583

5 结论

(1) 用 ANSYS9.0 程序对焊接空心球节点拉压承载状况进行了弹塑性分析,给出了球壳应力和应变分布规律,再次验证了以往根据试验、实测及计算结果对焊接空心球节点失效机理的分析.特别对应力集中峰值区域(焊趾处)的判断给出了较确切的说明.

(2) 焊接空心球节点受拉承载力可用公式(7)计算.

(3) 焊接空心球节点受压承载力可用直接回归公式(8)、(9)或折减因数公式(10)~(12)计算.

若考虑对大直径空心球加肋,则上列各式前还应参照《网壳结构技术规程》乘以相应的加肋增强系数 η_d ^[8].

(4) 由于冲切或冲压破坏区域处于三向复杂应力状态,应力变形情况都极为复杂,冲切或冲压破坏机理还须深入探讨.上列各式参照的试验数据和观测值数量仍有限,有待进一步的研究分析工作.

参考文献:

- [1] JGJ7—91,网架结构设计施工规程[S].中国建筑工业出版社,1991:16~18.
- [2] 姚念亮,董明,杨联萍,等.焊接空心球节点的承载能力分析[J].建筑结构,2000,(4):37~39.
- [3] 董石麟,唐海军,赵阳,等.轴力和弯矩共同作用下焊接空心球节点承载力研究与实用计算方法[J].土木工程学报,2005,38(11):21~30.
- [4] 韩庆华,潘延东,刘锡良.焊接空心球节点的拉压极限承载力分析[J].土木工程学报,2003,36(10):1~6.
- [5] 刘锡良,陈志华.网架焊接空心球失效机理分析及承载力试验研究[J].建筑结构学报,1994,15(3):38~43.
- [6] ZIENKIEWICH O C. The finite element method (third edition) [M]. McGraw-Hill, 1977: 474~497.
- [7] 刘锡良.平板网架设计[M].北京:中国建筑工业出版社,1979:128~133.
- [8] JGJ61—61,网壳结构技术规程[S].北京:中国建筑工业出版社,2003.

Study on Bearing Capacity of Welded Hollow Sphere in Space Truss

QIN Li-yi, XU De-gang, ZHOU Ai-min

(Department of Engineering Mechanics, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: In this paper, the welded hollow sphere joint was analyzed by using of commercial code ANSYS 9.0. The elastoplastic stress and distortion distributions on sphere surface of the joint under tension and compression were obtained. The collapse zone position in the sphere shell was located. According to the collapse mechanism of the joint in tension, a new elastoplastic analysis model in the three-D state of stress was proposed. Further study on the static ultimate analysis of hollow sphere-welding seams-steel tube in their entirety was presented, and the bearing capacity formula of the hollow sphere in tension was derived using the limit state theory. Based on a discussion about the collapse mechanism of the hollow sphere under compression and on the statistical analysis of the experimental data, the bearing capacity formulas of the sphere joint were established with the linear regression method. The results show that the formulas agree well with the test.

Key words: welded hollow sphere; FEM analysis; bearing capacity; collapse mechanism