

文章编号:1000-582X(2010)12-071-07

大型铸钢节点极限荷载及破坏机理分析

卢云祥,蔡元奇,李明方,廖凤莲

(武汉大学 土木建筑工程学院,湖北 武汉 430072)

摘要:结合成都某工程管桁架屋盖的大型铸钢节点,运用有限元技术采用线性强化弹塑性本构模型对铸钢节点进行极限状态分析。结果表明,铸钢节点在极限荷载下会产生很大的累积塑性应变;且随着塑性区的开展,节点应力极值位置与弹性阶段不同。在铸钢节点极限承载机理研究中,首次提出了采用速率型张量的大应变几何非线性问题;给出了铸钢节点破坏失效的判别标准;并指明铸钢节点设计必需进行极限状态分析才能确定其最薄弱位置,为正确认识铸钢节点的破坏形式、破坏机理以及铸钢节点设计提供依据。

关键词:铸钢节点;极限荷载;材料非线性;线性强化;累积塑性应变;几何非线性;大应变

中图分类号:TU392.6,TU312

文献标志码:A

Analysis of ultimate load and mechanisms of failure in large cast steel joints

LU Yun-xiang, CAI Yuan-qi, LI Ming-fang, LIAO Feng-lian

(Wuhan University School of Civil Engineering, Wuhan 430072, China)

Abstract: Based on a project of pipe truss roof framing in Chengdu, the ultimate limit state analysis is performed on cast steel joints by using FEM, in which Linear hardening elastic-plastic constitutive model is considered. The results show that, the joint has a great accumulation of plastic strain in ultimate loads, and the point of maximum stress is different from that in elastic with the development of the yielding zone. The paper proposes to use rate-type tensor for the large strain geometric nonlinear problem, shows the criterion of failure formation, and indicates that its essential to apply limit state analysis to the determination of the weakest location on cast steel joint design, which provides basis for understanding the failure modes and failure mechanism of cast steel joint and the cast steel joint design.

Key words: cast steel joint; ultimate load; material nonlinear; linear hardening; accumulated plastic strain; geometric nonlinear; large strain

随着铸造工艺水平的提高,铸钢节点在现代空间结构中表现出造型优美、受力明确、传力直接、承载安全等特点,越来越受到工程界的青睐^[1-2]。特别是在构件体型大、多根杆件交汇复杂、呈不规则状

的相交节点处,若采用常规的节点焊接方式,由于焊缝过于集中必然导致焊接应力过大,且复杂的相贯线给节点的制作也造成了很大困难。铸钢节点以其良好的适用性及其独特的整体浇铸特点,免去了相贯线切割及重叠焊缝的应力集中问题。铸钢节点材料化学成分严格限制了C、S、P的含量,具有良好的塑

收稿日期:2010-06-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50979083)

作者简介:卢云祥(1984-),男,武汉大学博士研究生,主要从事计算力学、结构动力学与数值仿真技术研究,
(E-mail)anson02201@163.com。

性和韧性,抗震性能较常规的焊接节点有显著提高^[3-6]。因其特有的性能,铸钢节点已被广泛运用于桥梁、剧院、体育馆等大跨度结构中。

目前,国内关于铸钢节点的理论研究和力学分析尚处于起步阶段。“如何判别铸钢节点的破坏失效”以及“铸钢节点进入塑性屈服后的工作状态和破坏机理”是现阶段铸钢节点研究的主要问题。文献[7-8]采用畸变能密度准则作为铸钢节点的强度判别准则,分析了节点处于线弹性状态下的工作性能;文献[9]采用理想弹塑性本构模型对铸钢节点进行非线性有限元分析,未考虑铸钢材料塑性变形时强度与刚度提高的特性。笔者以成都某工程管桁架屋盖结构中的复杂铸钢节点(如图1)为对象,采用线性强化弹塑性本构模型对铸钢节点的受力性能进行研究分析,根据塑性区的开展情况提出了铸钢节点失效的判别标准;通过弹性阶段与极限状态的对比分析,指出对铸钢节点破坏失效起决定作用的薄弱位置,并得到节点的极限承载力。分析表明铸钢节点极限荷载下塑性区开展会产生很大的累积塑性应变,因此将大应变问题引入到铸钢节点破坏机理的研究是十分必要的。文中对铸钢节点的工作特性进行了较为全面的研究,为铸钢节点的理论研究和规范设计提供借鉴。

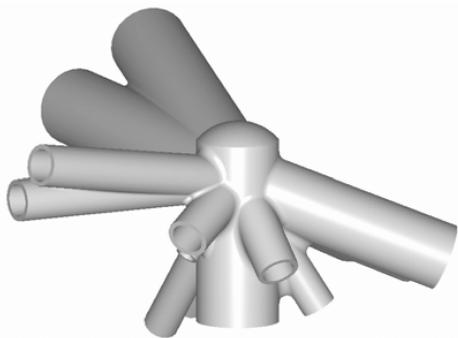


图1 管桁架屋盖铸钢节点

1 工程概况及研究内容

1.1 工程概况

成都某工程屋盖形状为宝石形,总平面尺寸为 $162\text{ m}\times 126.5\text{ m}$,屋盖高 42 m ,最大跨度 62.5 m ,屋盖结构形式采用钢管桁架结构。为满足结构安全和建筑美观要求,在屋盖结构设计方案中采用了大量铸钢节点。参照德国规范DIN17182,以GS-20Mn5V调质钢材为铸钢材料,屈服强度 $\geq 360\text{ MPa}$,抗拉强度 $500\sim 600\text{ MPa}$ 。

屋盖主桁架上弦铸钢节点体积庞大,外形复杂。外包尺寸 $2.4\text{ m}\times 2.2\text{ m}\times 1.4\text{ m}$,重达 3.7 t ,由16根支管以不同角度错综交汇,节点类型为半空心半实心的铸钢相贯节点。与以往铸钢节点相比^[10-11],该节点呈现出连接复杂、实体庞大的特点。

1.2 研究内容

1)研究铸钢节点在最不利设计荷载工况下的静力工作性能,对屋盖结构体系的安全可靠性做出评价;指出铸钢节点承载时的薄弱部位,并提出相应的改进措施,确保铸钢节点在设计荷载下处于弹性工作状态。

2)对铸钢节点进行弹塑性分析,尤其是节点进入塑性后的工作状态、破坏形式和破坏机理的研究分析。对于受力复杂的铸钢节点,只有进行弹塑性分析,才能从本质上了解铸钢节点的受力性能,从而得到铸钢节点的极限承载力及其影响因素。

3)鉴于现阶段对铸钢节点的失效准则没有全面统一的认识,采用线性强化弹塑性本构模型进行非线性大变形有限元分析,对铸钢节点的失效判别标准提出一些建议。

2 大应变下非弹性材料本构关系

铸钢节点是保证整个结构体系安全可靠的关键环节,在荷载作用下,铸钢节点的应力状态十分复杂,属于空间应力问题。大量实验^[12-17]表明,铸钢节点在荷载作用下应力集中现象十分明显,并具有良好的延性性能,完全按照弹性方法设计偏于严格。铸钢节点本身有很大的强度储备,当局部位置应力达到屈服时,会形成塑性区使应力重分布,承载力能够继续增加,直到节点出现显著的塑性变形或裂缝才破坏失效。因此,当铸钢节点破坏失效时,可能会出现很大的塑性应变,这类问题属于几何非线性问题中的大应变情况。对铸钢节点的大应变几何非线性问题进行了比较研究,肯定了几何非线性分析方法对铸钢节点破坏机理和极限荷载研究的意义。

实验^[15-18]表明:铸钢节点的极限荷载是初始屈服荷载的好几倍,线性强化弹塑性本构模型能够更好地体现铸钢节点的实际工作特性。因此,铸钢节点极限状态下的力学性能研究不仅要考虑材料非线性,还需考虑几何非线性;对铸钢节点进行线性强化非线性大变形有限元计算是十分必要的。

2.1 应力应变的度量

对于依赖材料变形历史的非弹性问题,通常情况下需要采用增量理论进行分析,其中材料本构关

系应采用微分型或速率型的。连续性介质力学中定义了一种其分量不随材料刚体转动而变化的速率型应力张量,即 Jaumann 应力速率张量 ${}^t\dot{\sigma}_{ij}^J$

$${}^t\dot{\sigma}_{ij}^J = {}^t\dot{\tau}_{ij} - {}^t\tau_{ip}{}^t\Omega_{pj} - {}^t\tau_{jp}{}^t\Omega_{pi}, \quad (1)$$

式中:“ \cdot ”表示物质时间导数; ${}^t\tau_{ij}$ 是当前构形的应力分量,即欧拉应力分量; Ω_{ij} 是旋转张量,其物理意义是表示材料的角速度,表达式为

$${}^t\Omega_{ij} = \frac{1}{2}({}^t\dot{u}_{j,i} - {}^t\dot{u}_{i,j}), \quad (2)$$

与 Jaumann 应力速率张量 ${}^t\dot{\sigma}_{ij}^J$ 共轭的应变速率张量是 ${}^t\dot{e}_{ij}$,其表达式为

$${}^t\dot{e}_{ij} = \frac{1}{2}({}^t\dot{u}_{i,j} + {}^t\dot{u}_{j,i}), \quad (3)$$

应当指出, ${}^t\dot{\sigma}_{ij}^J$ 和 ${}^t\dot{e}_{ij}$ 都是对称张量,且为不随材料微元的刚体旋转而发生变化的客观张量。

2.2 大应变下非弹性材料本构关系

大应变(通常指累积塑性应变 $\int_0^t \left(\frac{2}{3}d_0^p\right)^{\frac{1}{2}} > 2$ 的情况^[19])用联系 ${}^t\dot{\sigma}_{ij}^J$ 和 ${}^t\dot{e}_{ij}$ 的本构关系是一种合理的选择,因为 ${}^t\dot{\sigma}_{ij}^J$ 和 ${}^t\dot{e}_{ij}$ 在物理上分别代表真应力速率张量和真应变速率张量。它们可以表示为

$${}^t\dot{\sigma}_{ij}^J = {}^tD_{ijkl}{}^t\dot{e}_{kl}, \quad (4)$$

对于各向同性硬化材料有

$${}^tD_{ijkl}^J = {}^tD_{ijkl}^e - {}^tD_{ijkl}^p, \quad (5)$$

其中,

$${}^tD_{ijkl}^e = 2G(\delta_{ik}\delta_{jl} + \frac{\nu}{1-2\nu}\delta_{ij}\delta_{kl}).$$

式中, ${}^t\tau'_{ij}$ 是时间 t 的欧拉应力的偏张量; E_p 是材料的塑性模量,是内变量的函数,可以从材料单向受力试验得到的真应力~真应变曲线导出。

屈服函数和流动法则表示为,采用相关联的流动法则

$${}^tF({}^t\tau_{ij}, {}^t k) = \frac{1}{2}{}^t\tau_{ij}{}^t\tau_{ij} - \frac{1}{3}\sigma_s^2({}^t\bar{e}_p), \quad (6)$$

$$d{}^t\bar{e}_{ij}^p = {}^t d\lambda \frac{\partial {}^tF}{\partial {}^t\tau_{ij}}, \quad (7)$$

式(6)和式(7)中,

$${}^t\bar{e}_p = \int_0^t \left(\frac{2}{3}d{}^t\bar{e}_{ij}^p\right), \quad (8)$$

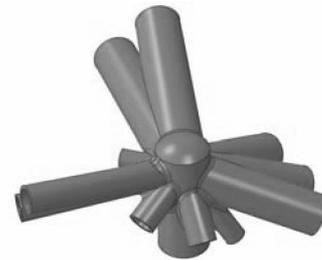
$${}^t d\lambda = \frac{{}^t\tau'_{ij}d{}^t\bar{e}_{ij}}{\left(\frac{2}{9}\right)\left(\frac{\sigma_s^2}{G}\right)(3G + E_p)}, \quad (9)$$

需要指出的是,各向同性硬化法则主要适用于单调加载的情形,如果用于卸载情形,它只适用于反向屈服应力 σ_{s1} 数值上等于应力反转点 σ_{r1} 的材料。

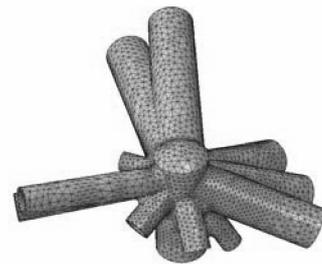
3 计算模型

3.1 建模及单元划分

连接复杂、实体庞大的铸钢节点在空间力系作用下应力分布复杂,计算分析时不能简单近似为薄壁壳体,应作为三维实体结构处理。为了符合实际情况和提高分析精度,在建立数值模型时需考虑铸钢节点杆件交汇处的倒角关系,否则这些部位会产生较大的应力集中,使仿真结果严重失真。铸钢节点有限元模型如图 2 所示。



(a)几何模型



(b)单元部分

图 2 铸钢节点有限元计算模型

3.2 加载及边界条件

节点荷载的施加是将轴向力转化为铸钢管端部的面荷载,分级单调加载。荷载大小应确保大于铸钢节点的极限荷载,一般取设计荷载的 3~10 倍。该铸钢节点是屋盖结构中的非支座节点,节点各交汇杆件的轴力为空间汇交力系,为消除有限元计算中刚度矩阵的奇异性,对其中的 3 根管件施加轴向的位移约束。这是基于空间汇交力系平衡方程考虑的,能保证仿真结果反映节点的真实受力状态。

采用线性强化弹塑性本构模型时,根据该材料单向受力试验结果,材料的弹性模量为 2.06×10^5 MPa,屈服强度为 360 MPa,强化阶段的切线模量为 1 000 MPa,极限应变为 0.24。金属材料的强度校核常采用第四强度理论,第四强度理论的应力折算值为 Mises 应力。为此,在分析中采用 von Mises 屈服准则及相关联的流动法则。

4 计算结果分析

4.1 设计荷载作用下铸钢节点有限元计算

将最不利设计荷载工况下各管件轴力施加到有限元模型中,得到 Mises 应力计算结果如图 3 所示,节点的应力分布规律如下:

1) 管件交汇区域有明显的应力集中现象,区域内应力梯度较大。管件交汇处设置倒角可有效地缓解节点的应力集中现象,改善应力分布情况^[20]。节点设计时,应根据倒角半径的允许范围,在不影响结构功能的条件下,适当加大倒角半径。

2) 铸钢节点中受力较大的支管管口局部应力较大。该铸钢节点 10 号管(如图 3 所示)管口内壁变截面处最大应力值达 147.2 MPa。节点设计时,应考虑铸钢节点与钢管的焊接接口形式,特别是对管口局部应力较大的管件,要保证焊接质量,确保铸钢节点与钢管接口平滑过渡,以改善节点的应力分布。

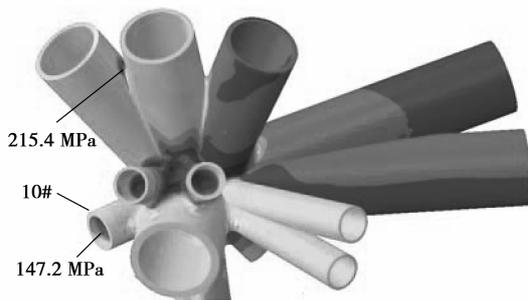


图 3 铸钢节点设计荷载下 Mises 应力

3) 根据《钢结构设计规范》(GB 50017—2003),铸钢节点的设计强度可根据下式得到

$$f = \beta \frac{f_y}{1.1\gamma_R}, \quad (10)$$

式中: β 为考虑塑性区域开展的有效应力系数,可取 1.1; f_y 是材料的屈服强度; γ_R 是钢材的抗力分项系数,取 1.282;根据规定,当结构较重要时,安全等级提高一级,相应的结构可靠度指标提高 0.5,结构抗力除以 1.1。

对于该铸钢节点,屈服强度 ≥ 360 MPa,可计算其强度设计值为

$$f = 1.1 \times \frac{360}{1.1 \times 1.282} = 281 \text{ MPa}.$$

由应力图可知,铸钢节点的应力峰值出现在管件交汇倒角处的应力集中位置,应力值为 215.4 MPa $<$ 281 MPa。可见,铸钢节点设计荷载工况下的应力值均小于设计强度,处于弹性工作状态,节点

设计满足要求。

4.2 初始屈服荷载作用下铸钢节点有限元计算

按设计荷载等比例持续加载,直至 1.75 倍的设计荷载时,铸钢节点达到初始屈服强度,得到 Mises 应力计算结果如图 4。

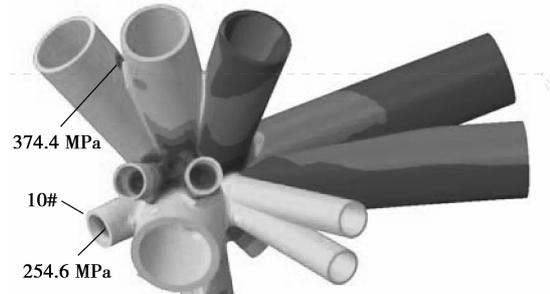


图 4 铸钢节点初始屈服荷载下 Mises 应力

在模型的加载过程中,应力幅值逐渐增大,但分布规律基本保持一致。初始屈服点出现在管件交汇倒角处的应力集中位置,应力值达 374.4 MPa;各支管外壁应力从管口到管底逐渐减小;支管内壁应力变截面处最大,四周逐渐减小。该铸钢节点 10 号管荷载较大,内壁变截面处最大应力达 254.6 MPa。

可见,在弹性阶段,铸钢节点管件交汇处应力集中现象十分明显,是应力峰值的所在位置。将铸钢节点的计算分析仅控制在弹性范围内,会导致认为弹性阶段出现应力峰值的区域即是结构破坏失效的薄弱位置。为了进一步研究铸钢节点进入塑性后的工作状态和破坏机理,必须应进行极限荷载下的有限元分析。

4.3 极限荷载作用下铸钢节点有限元分析

4.3.1 铸钢节点的破坏失效判别

目前对铸钢节点的破坏失效准则还没有统一标准,相关的理论研究还比较少。铸钢节点的破坏与节点进入屈服后的塑性区开展情况密切相关,且节点管件交汇的相贯线区域和承载较大支管的变截面处往往首先出现应力峰值,是铸钢节点破坏关心的薄弱位置。

对于这种相贯节点而言,随着荷载不断增加,节点进入屈服阶段后,塑性区不断开展,从而产生过度变形不适于继续承载,导致节点失效。这类显著塑性变形的破坏形式主要分为两类:1) 铸钢管相贯线区域塑性屈服,导致节点破坏失效。2) 铸钢节点单支管整体塑性屈服导致节点破坏失效。

当比例加载至 3.74 倍设计荷载时,铸钢节点 10 号支管完全进入塑性屈服状态,节点的荷载-变

形曲线见图 6(a)。可见,铸钢节点刚度从曲线拐点处开始显著减小,取荷载~变形曲线中刚度首次减小为初始刚度的 10% 为极限荷载^[21]。即 3.74 倍设计荷载时,铸钢节点丧失承载能力,达到破坏失效状态。因此,将该铸钢节点单支管整体屈服作为节点的失效判别标准,属于上述第二类情况。极限荷载下的节点 Mises 应力分布如图 5。



图 5 铸钢节点极限荷载下 Mises 应力

4.3.2 铸钢节点极限荷载下应力分布特点

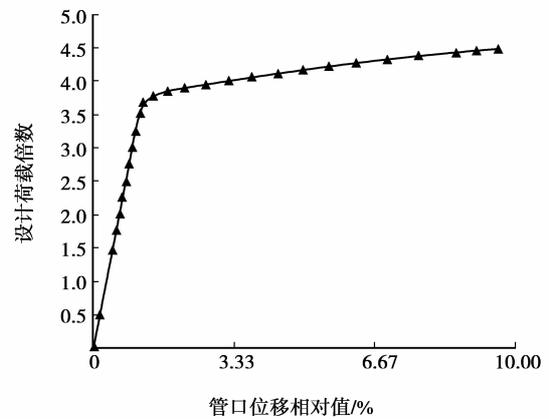
铸钢节点从开始进入塑性屈服状态至破坏失效过程中,各支管交汇倒角处均出现明显的应力集中现象,且应力峰值从管件交汇倒角处的应力集中位置转变为 10 号单支管变截面处,应力峰值达 433.8 MPa,此时整个支管全部塑性屈服,节点丧失承载能力。随着荷载不断增加,塑性区不断开展,弹性阶段中出现应力峰值区域的最大应力达 418.2 MPa,但除此小部分区域外,临近区域应力下降很快,不会导致节点在此破坏。

由此可见,对铸钢节点采用弹性分析,只能判别其在弹性阶段时的最大应力位置,但该处并不能简单地认为是节点破坏失效的控制区域。对铸钢节点的破坏形式和破坏机理研究采用弹塑性分析是十分必要的。

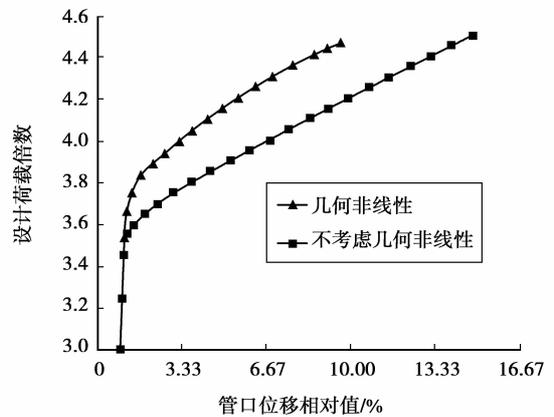
4.3.3 铸钢节点计算的大应变问题

结合铸钢节点的材质及受力性能采用合适的本构模型是有限元计算的关键,目前在铸钢节点的非线性有限元计算中,通常采用的是理想弹塑性本构模型或线性强化弹塑性本构模型。这两种本构模型均只考虑了材料非线性而忽略了几何非线性。实际上,铸钢节点在极限荷载作用下随着塑性区的开展,节点会产生较大的累积塑性应变。以文中铸钢节点为例,极限荷载作用下,铸钢节点的应力峰值为 433.8 MPa(小于抗拉强度 500~600 MPa),节点并不会发生局部拉裂破坏;但 10 号支管管口的累积塑性应变达 0.021 4 \geq 2%,属于大应变问题,因此,采

用连续介质力学中的速率型应力应变张量构造本构模型是必要的。



(a)节点的荷载-变形曲线



(b)结果比较

图 6 铸钢节点荷载-位移曲线及结果比较图

为讨论几何非线性分析对铸钢节点工程应用的意义,在考虑材料非线性的基础上,将几何非线性与不考虑几何非线性结果进行了比较研究。荷载-变形曲线见图 6(b),图中横轴是指 10 号支管管口变形与支管长度的比值,纵轴是支管进入屈服段后所施加设计荷载的倍数。取刚度首次减小为初始刚度的 10% 为极限荷载,分别为 3.74 倍设计荷载和 3.52 倍设计荷载;几何非线性结果比不考虑几何非线性时大 6.25%,铸钢节点的极限承载力在只考虑材料非线性的弹塑性分析基础上还有提高的潜力。可见,几何非线性分析方法可对铸钢节点的理论研究和规范设计提供借鉴和参考。

在以往的铸钢节点极限承载力研究中,均缺乏对铸钢节点大应变问题的说明和分析。考虑到线性强化弹塑性本构模型能够更好地体现铸钢节点的实际工作特性,为了确保有限元计算的合理性和可靠性,对铸钢节点考虑材料非线性和几何非线性的线

性强化大变形有限元分析是十分必要的。

5 结 语

由于铸钢节点的优异特性,在现代空间结构中越来越广泛地被采用。通过对一复杂的铸钢节点的受力性能和工作状态分析研究认为:

在设计荷载作用下,铸钢节点处于弹性工作状态,其应力峰值出现在管件交汇处。

通过对铸钢节点极限承载能力分析发现,节点失效的位置与弹性分析的位置不同。弹性分析以弹性阶段最大应力出现的位置作为铸钢节点的薄弱位置,即失效破坏位置,在管件交汇处。分析表明,节点失效的控制位置经塑性区开展后发生变化,出现在管件上。因此,只有对铸钢节点进行极限状态分析,才能真正认识节点的破坏机理和破坏形式,为铸钢节点的设计、制造和安装以及运行提供科学依据。

对铸钢节点进行极限状态分析时,不仅要考虑材料非线性问题,由于塑性区开展过程产生的累积塑性应变很大,因此还需考虑大应变的几何非线性问题。这样的分析结果更为符合实际。

参考文献:

- [1] GOLANSKI, GRZEQORZ. Mechanical properties of G17 CrMoV5-10 cast steel after regenerative heat treatment [J]. *Solid State Phenomena*, 2009, 147/149: 732-737.
- [2] WU L J, ZHOU W G, SU Y L, et al. Experimental and operational thermal studies on blast furnace cast steel staves [J]. *Ironmaking and Steelmaking*, 2008, 35(3): 179-182.
- [3] OLIVEIRA D E, WILLIBALD S, PACKER J A, et al. Cast steel nodes in tubular construction-canadian experience [J]. *Welding in the World*, 2006, 50: 471-477.
- [4] DE OLIVEIRA J C, GRAY M G, PACKER J A, et al. Standardized cast steel connectors for tubular hollow structural sections [C] // *Proceedings of the Annual Conference-Canadian Society for Civil Engineering*, Quebec, June 10-13, 2008: 1018-1027.
- [5] NUSSBAUMER A, HALDIMANN-STURM S C, SCHUMACHER A. Fatigue of bridge joints using welded tubes or cast steel node solutions [J]. *Welding in the World*, 2006, 50: 56-63.
- [6] VESELCIC M, HERION S, PUTHLI R. Cast steel and hollow section-new application and technologies [C] // *Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference*, Lisbon, Portugal, July 1-6, 2007: 3395-3402.
- [7] TONG L W, ZHENG H Z, CHEN Y Y. Comparison between a cast steel joint and a welded circular hollow section joint [J]. *Materials Science and Technology*, 2007, 23(4): 460-465.
- [8] 蔡建国,冯健,顾洪波,等.大型铸钢节点的工程应用和分析[J]. *钢结构*, 2008, 23(106): 13-16.
CAI JIAN-GUO, FENG JIAN, GU HONG-BO, et al. Practical application and analysis of complex cast-steel joint [J]. *Steel Construction*, 2008, 23(106): 13-16.
- [9] 陈海洲,张慎伟,张其林.45°轴承组合支座铸钢节点试验和有限元分析[J]. *钢结构*, 2008, 23(106): 8-13.
CHEN HAI-ZHOU, ZHANG SHEN-WEI, ZHANG QI-LIN. Experiment and FEM analysis of cast-steel joints for the bearing composite support [J]. *Steel Construction*, 2008, 23(106): 8-13.
- [10] 卞若宁,陈义一,赵宪忠,等.空间结构大型铸钢节点试验研究[J]. *建筑结构*, 2002, 32(12): 45-47.
BIAN RUO-NING, CHEN YI-YI, ZHAO XIAN-ZHOU, et al. Experimental research on cast steel joint with large size used in space structure [J]. *Building Structure*, 2002, 32(12): 45-47.
- [11] 戴国欣,李万伟,邢世建,等.重庆江北国际机场新航站楼大跨钢桁架铸钢节点性能研究[J]. *建筑结构学报*, 2005, 26(4): 70-75.
DAI GUO-XIN, LI WAN-WEI, XING SHI-JIAN, et al. Experimental study on cast steel joint of large span steel truss of Jiangbei International Airport in Chongqing [J]. *Journal of Building Structures*, 2005, 26(4): 70-75.
- [12] 李俊,卫星,李小珍,等.大型钢网壳结构铸钢节点复杂受力的试验研究[J]. *土木工程学报*, 2005, 38(6): 8-19.
LI JUN, WEI XING, LI XIAO-ZHEN, et al. Experiment of complex loading on the cast-steel joint of large steel-reticulated shell structure [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2005, 38(6): 8-19.
- [13] 王朝波,赵宪忠,陈义一,等.上海铁路南站外柱异性铸钢节点承载性能研究[J]. *土木工程学报*, 2008, 41(1): 18-23.
WANG ZHAO-BO, ZHAO XIAN-ZHONG, CHEN YI-YI, et al. Bearing capacity of the special-shape cast-steel joint for Shanghai south railway station [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2008, 41(1): 18-23.
- [14] 顾敏,童乐为,陈以一,等.空间多支管铸钢节点性能研究[J]. *结构工程师*, 2006, 22(3): 63-67.
GU MIN, TONG LE-WEI, CHEN YI-YI, et al. Study on static behavior of multiplanar cast steel joints [J]. *Structural Engineers*, 2006, 22(3): 63-67.
- [15] 罗旭斌,马军,彭桂平.南通市体育会展中心分叉柱底

- 铸钢支座节点有限元分析[J]. 钢结构, 2006, 21(87): 46-49.
- LUO XU-BIN, MA JUN, PENG GUI-PING. Finite element analysis of cast-steel joints at bottom of exhibition and sports in nantong [J]. Steel Construction, 2006, 21(87):46-49.
- [16] 丁阳,张向荣,王志远,等. 天津奥林匹克中心体育场铸钢节点试验研究[J]. 建筑结构学报, 2008, 29(5): 8-12.
- DING YANG, ZHANG XIANG-RONG, WANG ZHI-YUAN, et al. Experimental study on cast-steel joints used in the Tianjin Olympic Stadium[J]. Journal of Building Structures, 2008, 29(5): 8-12.
- [17] LI J, WEI X. Research on bearing safety of cast-steel joint of large steel reticulated shells [C]// Progress in Science and Technology Volume 4: Proceedings of the 2004 international Symposium on Safety Science and Technology, n PART A, 2004, 533-538.
- [18] 马洪涛,孙亚龙,顾建,等. 南通市体育会展中心铸钢节点模型的非线性有限元分析[J]. 建筑钢结构进展, 2007, 9(2): 38-42.
- MA HONG-TAO, SUN YA-LONG, GU JIAN, et al. Nonlinear analysis of cast-steel joints for the center of exhibition and sport in Nantong[J]. Progress in Steel Building Structures, 2007, 9(2): 38-42.
- [19] 王勖成. 有限单元法[M]. 北京:清华大学出版社, 2006.
- [20] CAI J G, FENG J, WANG J, et al. Numerical analysis of Y-type cast steel joint for Guangzhou new railway station [C]// 2009 2nd IEEE international Conference on Computer Science and Information Technology, Beijing, China, August 8-11, I 2009.
- [21] 同济大学、清华大学、中国钢结构协会专家委员会. 铸钢节点应用技术规程[S]. 北京:中国计划出版社, 2008.
- (编辑 陈移峰)

~~~~~

(上接第 53 页)

- [9] 姜思杰,徐晓飞,战德臣,等. 大型单件小批生产的计划与控制模式[J]. 计算机集成制造系统, 2001, 7(2): 1-5.
- JIANG SI-JIE, XU XIAO-FEI, ZHAN DE-CHEN, et al. The PPC mode of large-piece OKP [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2001, 7(2): 1-5.
- [10] 李小平,徐晓飞,战德臣,等. 单件小批生产的网络计划/ MRP 研究与实现[J]. 计算机集成制造系统, 2002, 8(6): 425-428.
- LI XIAO-PING, XU XIAO-FEI, ZHAN DE-CHEN, et al. Network planning/MRP method in single-piece and small-batch production [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2002, 8(6): 425-428.
- [11] What is ETO/Project-based Manufacturing . Brian Watson & Associates, 2009 [EB/OL]. www. bwatsonassociates. com/man\_overview. php.
- [12] 李双跃,龙红能,殷国富,等. 基于特征的制造工艺资源建模与检索方法研究[J]. 计算机集成制造系统, 2007, 13(6): 1062-1067.
- LI SHUANG-YUE, LONG HONG-NENG, YIN GUO-FU. Manufacturing process resource modeling & retrieval method based on features [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2007, 13(6): 1062-1067.
- [13] 韦韞,李东波,苑明海. 基于多 Agent 的敏捷化可重组装配资源制造执行系统研究[J]. 机床与液压, 2008, 36(2): 44-47.
- WEI YUN, LI DONG-BO, YUAN MING-HAI. Research on manufacturing execution system for agile assembling resource reconfiguration based on agent[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2008, 36(2): 44-47.
- [14] FENG C X, KUSIAK A. Constraint-based design of parts [J]. Computer-Aided Design, 1995, 27(5): 343-352.
- [15] MEYOR M H, LEHNERD A P. The power of product platforms: build value and cost leadership[M]. New York: The Free Press, 1997.
- [16] 朱弘毅. 网络计划技术[M]. 上海:复旦大学出版社, 1999.
- [17] 范玉顺,王刚,高展,等. 企业建模理论与方法学导论[M]. 北京:清华大学出版社, 2001.
- [18] LUBE H, VOGEL H. Project Manufacturing Method and System; United States, US20050149218A1 [P]. 2005-07-07.
- (编辑 张小强)