汶川地震钢混框排架主厂房反应特性分析

贾立哲，陈德珅

（哈尔滨工业大学 土木工程学院，150090 哈尔滨）

摘 要：在对比 El Centro 波、Taft 波、汶川-江油波等不同强震主厂房反应特性的基础上，直接采用不同峰值的汶川-江油波开展动力弹塑性时程分析，探究主厂房这类典型结构在汶川这类特殊地震动下的响应特性和震损机理.结果表明：汶川-江油波作用下结构的响应偏小，但变化更不规律；主厂房能够抵御远超设防烈度的汶川-江油地震作用而不发生严重的失效破坏；结构扭转效应显著，煤斗层始终为结构薄弱层；框架部分刚度衰退快于排架部分，排架部分承担总地震作用比例先提高后不变，总体比例处于较低水平，无法成为结构的第二道抗震防线；虽汽机房网架屋面不会因杆件强度破坏而垮塌，但由于支座处承受剪力巨大且变形过大，支座的率先破坏将引发屋盖系统的失稳破坏；主厂房率先进入塑性的构件主要集中在底层和煤斗层，表现为明显的“强梁弱柱”特点.

关键词：汶川地震；框排架；主厂房；屋盖系统；地震反应

中图分类号：TU375 **文献标志码**：A **文章编号**：0367-6234(2014)06-0008-06

Seismic response characteristics for R.C. frame-bent main building under Wenchuan earthquake

JIA Lizhe, CHEN Deshen

(School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China)

Abstract: The responses of main building under different strong earthquakes, such as El Centro, Taft, Wenchuan-Jiangyou were compared, and dynamic time history analysis based on Wenchuan-Jiangyou record with different peak values was used to reveal the damage mechanism of this typical structure. The results indicate that the response of Wenchuan-Jiangyou record is the smallest, but variability is the biggest. Wenchuan earthquake, which is more than design intensity, does not cause serious damage of main building. The torsional effect is remarkable, and coal scuttle layer is always weak layer. The stiffness degradation of frame is faster than the bent part, and the proportion of bent part within total earthquake action is enhanced firstly and then remains same. But the overall proportion is still in low level and bent part is unable to become the second resistance component. Although space grid roof system in turbine hall does not collapse because of strength failure of components, the bearing carries over huge shearing force with oversized distortion, and the failure of bearing will lead to collapse of roof system. Plastic deformations mainly concentrate in the first floor and coal scuttle layer, and "strong beam and weak column" are exposed.

Keywords: wenchuan earthquake; frame-bent structure; main building; roof system; seismic response

汶川地震震级大、震源浅、烈度高，释放的能量特别大，破坏性极强.与一般点源地震动圆形衰减规律不同，其衰减特征为瘦长形衰减[1-2]，其加速度反应谱中长周期成分较多，持时特别长[3]，波及范围特别广，造成灾难性的破坏.大型火力发电厂是重要的生命线工程，其核心主厂房为了适应生产工艺的要求，通常采用钢筋混凝土框排架结构体系.由于结构的不规则性，在汶川地震中遭受了不同程度破坏，直接和间接损失惨重[4-5].因

收稿日期：2013-07-13.

基金项目：国家自然科学基金资助项目(51008100)；
中国博士后科学基金特别资助项目(201104413).

作者简介：贾立哲(1978—)，男，副教授，硕士生导师.

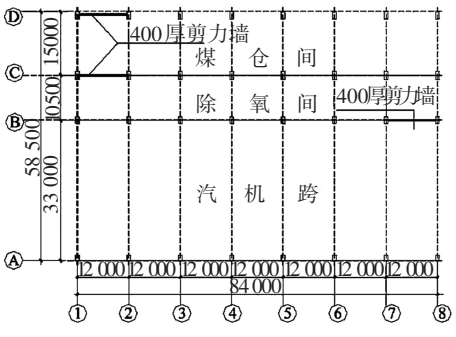
通信作者：贾立哲，jializhe@hit.edu.cn.

此，研究钢混框排架主厂房这类典型结构在汶川地震这类特殊地震动作用下的响应具有重要现实意义.现有研究中，吴涛等[6-7]对于钢混框排架结构的设计方法、单双向地震作用效应、子结构拟动力试验、结构体系创新等方面进行了系统深入的研究，但未涉及该类结构在汶川强震作用下的反应特征.

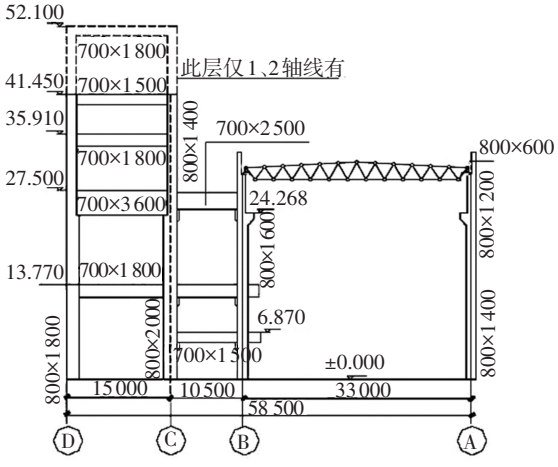
本文基于 ANSYS 软件首先通过对比不同强震作用下主厂房的变形和内力响应，揭示钢混框排架主厂房这类典型结构在汶川地震动下的响应特性.然后直接采用江油地震台记录的地震动进行弹塑性时程分析，以期模拟主厂房在汶川地震中的真实受力状态，通过对其位移反应、内力响应、框排架协同工作性、汽机房屋面网架的破坏情况及结构塑性发展情况的分析，以探究该类结构的震损原因.

1　框排架主厂房结构模型

以单机容量 600 MW 的某已投产火电厂钢混框排架主厂房为原型[7]，结构布置见图 1，横向为框排架结构，纵向为框架-剪力墙和框架-支撑体系，工程按 7 度设防，8 度抗震构造要求，汽机房屋面为变厚度双面起坡网架，面板为现浇钢筋混凝土板.选用 BEAM188 单元模拟框架梁、柱，按配筋面积相等的原则将钢筋均匀分配在截面边缘来模拟钢筋混凝土组合截面；选用 LINK8 单元模拟汽机房网架，对于仅考虑受拉的支撑选用 LINK10 单元模拟；选用 SHELL181 单元模拟楼板、屋面板及剪力墙；选用 MASS21 单元模拟非结构构件的质量，将其分布到相应楼层上.混凝土和钢材的应力-应变关系分别采用 GB50010—2010《混凝土结构设计规范》[8]中分段式模型和理想弹塑性模型.



(a)整体平面图



(b)横向立面图

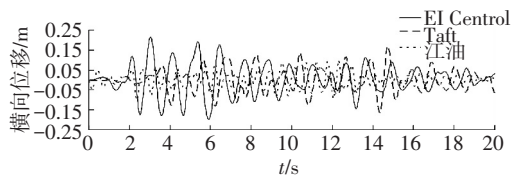
图 1　原型主厂房结构布置(mm)

2　不同地震作用下主厂房地震响应

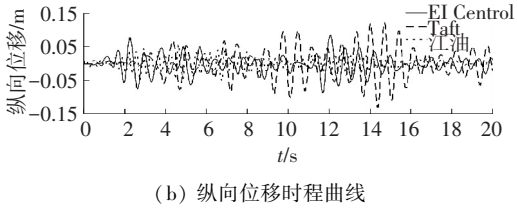
考虑到框排架结构抗震性能分析的普遍适用性，地震动选择考虑Ⅱ、Ⅲ类场地条件，取 El Centro 波、Taft 波、汶川-江油波三条实际地震动进行计算，地震动持时为 20 s，按抗震规范调整有效峰值加速度至设防烈度 7 度(0.15 g)罕遇地震所对应的 310 Gal.每条地震动水平加速度记录中峰值较大的沿结构横向、峰值较小的沿结构纵向，竖向加速度记录沿结构高度方向同时输入[9-10].

2.1　位移反应

结构顶层纵横向位移时程曲线见图 2，位移反应对比统计见图 3.可看出，结构位移反应相差较大，顶层纵横向位移在不同时刻达到最大值，波形曲线形状变化较大；El Centro 波作用下结构横向位移反应最为突出，Taft 波作用下结构纵向位移反应最为突出，汶川-江油波作用下结构纵横向位移反应相对较小，但排架柱横向变形更不均匀.



(a) 横向位移时程曲线



(b) 纵向位移时程曲线

图 2　不同地震动作用顶层位移时程曲线

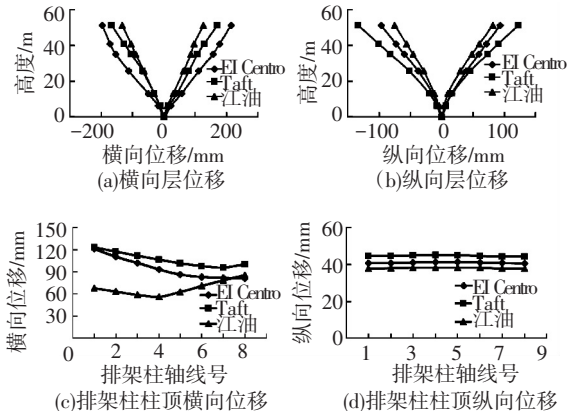


图 3 不同强震作用结构位移反应对比统计

2.2 内力响应

框架部分层间剪力及排架柱剪力对比统计见图 4,总体上汶川-江油波作用下结构内力响应较其他波小,但框架底层横向层间剪力大于其他强震作用的情况,结构均在第四层煤斗层发生突变,煤斗层始终为结构薄弱层;排架柱剪力始终为 Taft 波作用时最大,El Centro 波作用时次之,汶川-江油波作用时最小,顶层与底层排架柱剪力差别相比中间位置大,由于汽机房采用面内刚度较大网架上覆钢筋混凝土板的形式,水平地震作用通过支座直接传递到柱顶,故排架柱顶层剪力较中间部位大.

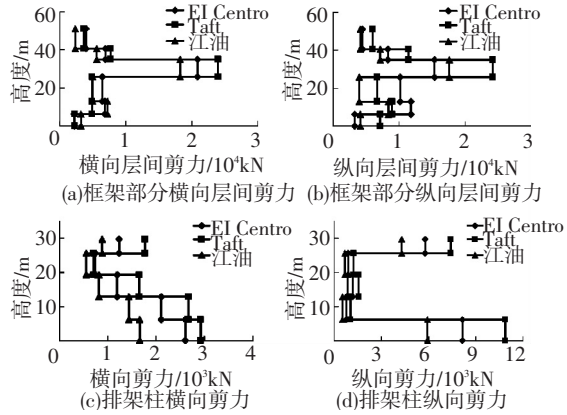


图 4 不同地震动作用结构各层剪力对比统计

3 汶川地震主厂房地震反应分析

3.1 位移反应

以汶川-江油实际地震动为激励,对比分析峰值加速度为小震 55 Gal、大震 310 Gal 和实际地震 511 Gal 时,结构框架部分纵横向的层位移、层间位移角及排架柱柱顶纵横向位移见图 5.从图中可看出:结构纵横向位移反应相差明显,横向较纵向位移反应大得多.由于结构横向的不规则性问题较纵向突出,地震作用引起结构薄弱部位变形集中,率先进入塑性受力状态,甚至提前发生破坏.中国抗震规范[11]要求钢筋混凝土框架-抗震墙结构弹性及弹塑性最大层间位移角应分别小于 1/800 和 1/100,横向层间位移角曲线在第四层煤斗层位置位移角有明显突变,弹性阶段结构最大层间位移角为 1/1 299,弹塑性阶段结构最大层间位移角为 1/214,均能满足规范要求.随着地震作用的增大,排架柱横向变形不均匀程度增加,这种趋势加剧了屋盖系统扭转效应,对屋盖系统支座受力极为不利.

3.2 内力响应

框排架主厂房模型框架部分层间剪力分布、排架柱各层剪力分布见图 6.层间剪力最大值都出现在煤仓间第四层煤斗层,由于煤斗大梁为大尺寸深梁,局部刚度、质量过分悬殊,在层间刚度分配中容易吸收较大地震作用,在设计验算中应予以足够重视.由于排架柱纵向靠连梁和柱间支撑连成一体,刚度较排架横向平面外刚度大得多,排架柱纵向剪力明显大于横向剪力;屋盖系统水平地震作用由支座直接传递到排架柱柱顶,故排架柱上部剪力较中间部位大,如果支座强度或构造不满足要求将率先破坏,危及屋盖整体安全.

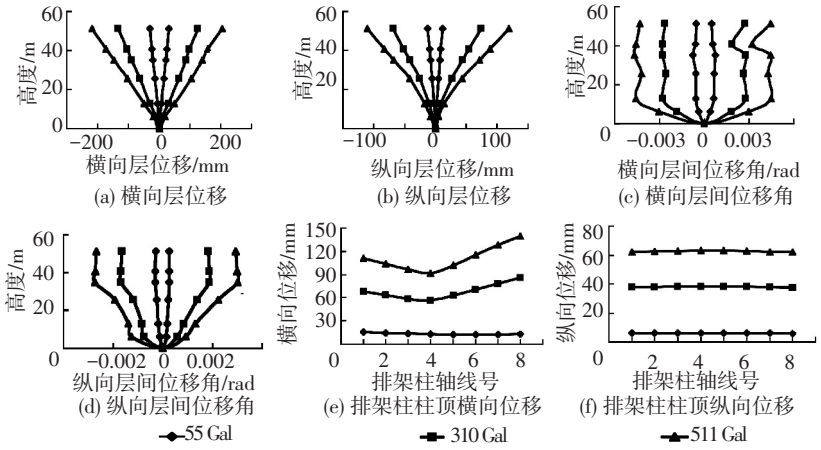


图 5 不同强度地震动作用结构位移反应对比统计

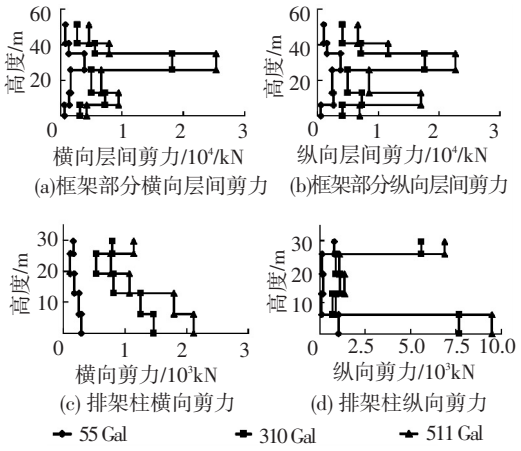


图 6　不同强度地震动作用结构各层剪力对比统计

3.3　框排架协同工作性能

钢混框排架结构在遭受地震作用时，框架部分与排架部分按刚度比和变形协调条件分配地震作用.在端部设有剪力墙的钢混框排架结构中，剪力墙能够吸收纵向结构体系 90% 以上的地震剪力，分析中只考虑框排架柱的基底剪力.不同峰值加速度的汶川-江油波作用下，排架承担的地震剪力与基底总剪力之间统计关系见图 7(a)、(b).在结构弹性阶段，各模型中排架承担的纵、横向地震剪力分别占结构基底纵、横向总剪力的 18.99% 和 4.02%；随着地震动峰值加速度的提高，框架部分刚度退化快于排架部分，在罕遇地震作用下，排架部分承担的纵横向地震作用占总地震作用的比例较多遇地震时均有提高，分别提高到 24.07% 和 4.63%，但进入塑性阶段后比例基本不变，分别为 24.19% 和 4.69%.各排架柱承担纵横向剪力与所在轴线基底总剪力比见图 7(c)、(d)，由图中结果可知，排架柱纵向剪力与相应轴线基底剪力的比例明显大于横向，① 、② 和⑦ 、⑧ 轴线排架柱纵向剪力占所在轴线总剪力比例低于其他轴线，主要由于该处设有剪力墙，与剪力墙相连的框架柱剪力较大，① 、② 和⑦ 、⑧ 轴线总剪力明显大于其他轴线.结构在塑性阶段，框架与排架塑性内力重分布不明显，总体上排架部分仍处于较低水平，几乎无法起到继框架-剪力墙之后第二道抗震防线作用.

3.4　汽机房屋面网架破坏分析

通过构件强度验算和整体变形验算来评估屋盖系统的地震安全性.由于罕遇地震属于偶然荷载，构件截面强度验算及结构变形验算均采用重力荷载和罕遇地震作用组合的标准值.构件强度验算以应力比为衡量指标，构件验算应力值与材料设计应力之比为构件应力比，其表达式为

$$\rho = \frac{N}{\phi A f}. \tag{1}$$

式中：N 为构件轴力，ϕ 为轴心受压构件稳定系数，其值按 GB50017—2003《钢结构设计规范》要求计算(受拉构件 $\phi = 1.0$)，A 为构件截面面积，f 为钢材屈服强度设计值，屋架结构钢材为 Q235 级，屈服强度设计值取 215 MPa.

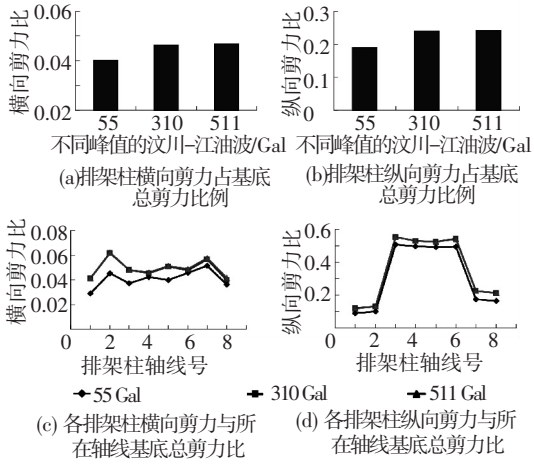
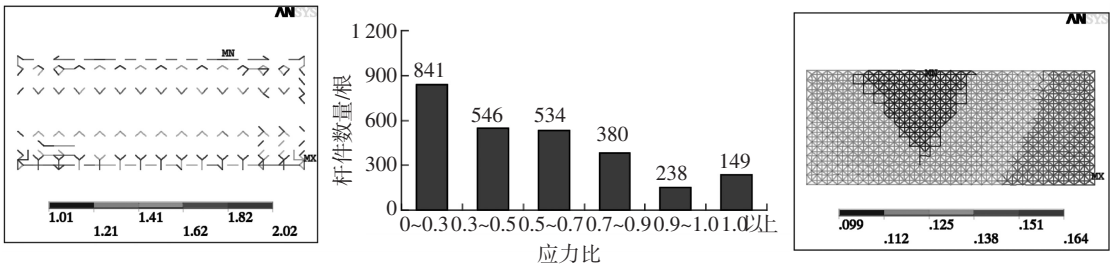


图 7　不同强度地震动作用框排架承担纵横向剪力情况统计

网架屋面超限杆件(应力比大于 1.0)应力比云图及其统计图见图 8(a)、(b).应力比云图为正放四角锥网架水平投影图，水平和竖直杆件为上、下弦杆，倾斜杆件均为腹杆.从图 8(a)可看出，网架超限杆件总数为 238 根，占杆件总数比例达到 8.85%，超限杆件大部分为腹杆，少量弦杆超限破坏，主要受力杆件应力水平仍在安全范围内，网架屋面体系因杆件强度破坏而导致整体垮塌的可能性较小.但由于屋盖系统采用无檩体系，钢筋混凝土板直接铺设在支撑系统上弦，对上弦杆件起到有利保护作用.在极罕遇地震作用下，如果屋面板由于连接失效等原因破坏后，结构上弦杆件应力水平将迅速升高，还将有部分上弦杆件发生强度破坏.

网架屋面总位移极值云图见图 8(c).图中上部深色位移值最小，图右侧灰色位移值最大.由计算结果可知：屋盖整体位移极值发生于边榀排架柱支座处，其值为 0.164 m，横向位移极值亦为该处值为0.151 m，排架柱支承侧纵向位移明显大于框架柱支承侧，其最大值为 0.063 m，扭转变形趋势相当明显.竖向位移极值发生于边跨跨中，其值为 0.078 m.网架屋面排架柱顶支座附近位移极为不均匀，两端支座位移大于中间支座，支座平面扭转效应显著.网架支座为平板压力支座，连接螺栓为 4M24(8.8 级普通螺栓)，支座抗剪承载力为 451.8 kN.本文计算得出网架支座承担最大地震剪力高达975 kN，超出其抗剪承载力一倍以上，因此

强度或构造不满足要求的支座必然率先发生破坏，改变了网架原有的受力状态，最终导致了屋盖系统失去稳定直至垮塌.这在一定程度上证明了汶川地震中江油电厂汽机房网架屋面的破坏原因.



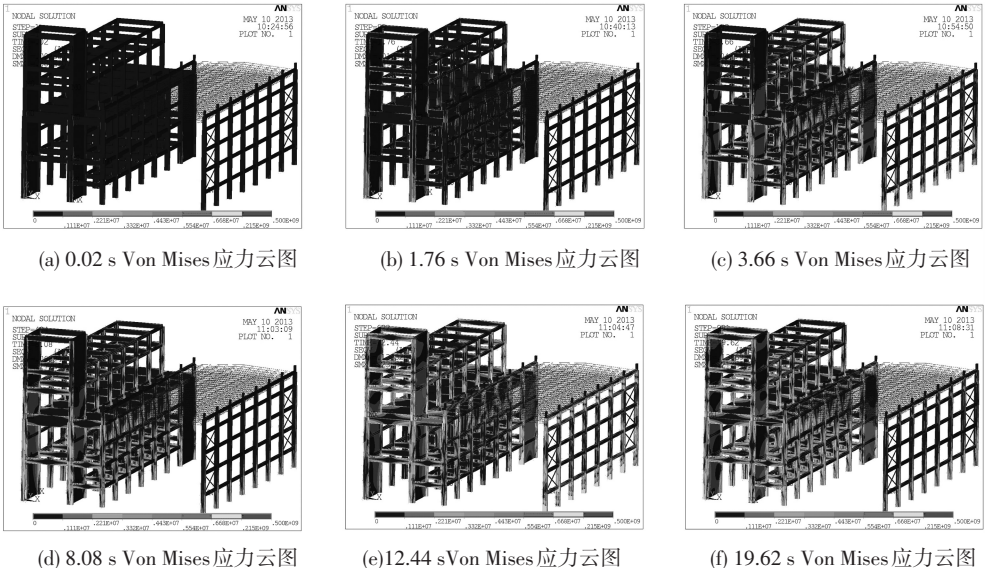
(a) 网架超限杆件(应力比大于1.0)应力比云图　(b) 网架杆件应力比统计图　(c) 总位移极值云图

图8　网架屋面强度校核和整体变形

3.5　结构塑性发展情况

以时间间隔0.02 s的汶川-江油实际地震动作为激励，定性研究主厂房结构构件应力变化发展顺序，借此判断结构中的薄弱构件.由于构件处于复杂应力状态，取Von Mises应力作为衡量指标.

不同时刻结构应力分布情况见图9.在瞬态分析初期所有构件均未出现较大的应力区域；随着加载的持续进行，1.76 s时刻底层柱底、煤仓间大梁梁柱节点、除氧间大梁梁柱节点逐步出现应力集中的现象；在3.66 s时刻，结构底层及关键梁柱节点区应力区域逐步扩大，剪力墙、煤斗层柱端及排架柱柱底应力逐步提高；在8.08 s时刻，与剪力墙相连的框架柱底层柱端及煤斗层梁柱节点区应力水平提高较快，结构两端边榀构件应力明显大于相应中间榀构件，柱尤其是梁柱节点部位应力水平明显高于梁；随后加载至12.44 s时，煤斗层柱端、除氧器大梁梁柱节点、排架柱柱底应力水平显著提高，剪力墙与框架交接处应力水平高于墙身内部；随着时间推移到19.62 s时刻，原有高应力区域逐步扩展.



(a) 0.02 s Von Mises应力云图　(b) 1.76 s Von Mises应力云图　(c) 3.66 s Von Mises应力云图

(d) 8.08 s Von Mises应力云图　(e)12.44 sVon Mises应力云图　(f) 19.62 s Von Mises应力云图

图9　不同时刻结构应力分布云图(未显示楼板与屋面板)

端部设有剪力墙的钢混框排架结构体系在汶川-江油实际地震动作用下，主体结构安全性是能够得到保证的.由于结构错层、局部缩进等特殊构造，各层间竖向承载力变化较大，各层破坏程度差异明显，底层和煤斗层构件应力明显高于其他部位.由此上述分析可定性判断此类结构总体上的屈服顺序：与剪力墙相连的框架柱底端-煤仓间大梁、除氧间大梁梁柱节点区-煤仓间大梁所在的第四层柱端-框架主梁、底层其他柱柱底-剪力墙与框架交接处，表现为明显的“强梁弱柱”特点.为满足煤斗层的特殊工艺要求，煤斗大梁宽700 mm，高3 600 mm，跨度12 m，跨高比小于5，属深受弯构件，在层间刚度分配中，由于刚度过大在地震过程中承担了绝大部分的层间地震作用，并通过梁柱节点传递给相邻的框架柱，“塑性铰”难以在梁上形成，梁柱节点及柱端位置成为薄弱环节.

中国建筑抗震设计通常强调“强柱弱梁、强节点弱构件”[11]，保证结构的屈服顺序为“先梁后柱再节点”，使结构在地震作用下能够反复吸收、耗散地震能量，不至于在短时间内形成破坏机构. 而钢混框排架结构的屈服顺序显然不能满足要求，结构薄弱层为结构底层和煤斗层，但由于整体结构刚度大、安全储备极高，在极罕遇地震中主体结构仍能保证安全. 汶川地震中江油电厂震害也证明了这一点：主体结构基本安全，除汽机房屋面垮塌和填充墙大量破坏外，结构底层柱混凝土剥落钢筋外露，部分支承梁的牛腿局压破坏，部分梁柱节点开裂严重.

4　结　论

1）与 El Centro 波、Taft 波相比，汶川-江油波作用下结构的位移响应和内力响应偏小，但其变化趋势更不规律.

2）框排架主厂房能够抵御远超设防烈度的实际汶川地震作用而不发生严重的失效破坏. 结构扭转效应显著，煤斗层始终为结构薄弱层. 随地震作用增大排架柱横向变形不均匀程度增加，加剧了屋盖系统扭转效应，对屋盖支座受力极为不利.

3）随地震动峰值提高，框架部分刚度衰退快于排架部分，排架部分承担总地震作用比例提高. 但结构进入塑性阶段后，排架部分承担总体地震作用的比例几乎不变，总体比例处于较低水平，无法成为继框架-剪力墙之后的第二道抗震防线.

4）汽机房屋面网架强度超限杆件比例为 8.85%，大部分为次要受力杆件腹杆，不会因大量杆件强度破坏而导致屋盖整体垮塌. 但网架支座处承受剪力最大值超出其抗剪承载力一倍以上，加之屋盖扭转导致支座变形过大，强度或构造不满足要求的支座率先破坏，将引发屋盖系统的失稳破坏. 从数值模拟的角度给出了汶川地震中江油电厂汽机房网架屋面的垮塌原因.

5）主厂房结构各层破坏程度差异明显，底层和煤斗层构件应力明显高于其他部位. 定性分析此类结构的屈服顺序为：与剪力墙相连的框架柱底端-煤仓间大梁、除氧间大梁梁柱节点区-煤仓间大梁所在的第四层柱端-框架主梁、底层其他柱柱底-剪力墙与框架交接处，表现为明显的“强梁弱柱”特点.

参考文献

[1] 刘浪，李小军. 汶川 8.0 级地震地震动峰值加速度衰减特性分析[J]. 北京工业大学大学学报，2012，38(2)：173-179.

[2] LI Xiaojun. Strong motions and engineering structure performances in recent major earthquakes [J]. Earthquake Science，2010，23(1)：1-3.

[3] WEN Zengping，XIE Junju. Near-source strong ground motion characteristics of the 2008 Wenchuan earthquake [J]. Bulletin of the Seismological Society of America，2008，100(5B)：2425-2439.

[4] KRAUSMANN E，CRUZ A M，AFFELTRANGER B. The impact of the 12 may 2008 Wenchuan earthquake on industrial facilities[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries，2010，23(2)：242-248.

[5] 姜云甫，黄佑验. 江油电厂主厂房震害分析[J]. 武汉大学学报：工学版，2009，42：172-176.

[6] 吴涛. 大型火力发电厂钢筋混凝土框排架结构抗震性能及设计方法研究[D]. 西安：西安建筑科技大学，2003.

[7] WU Tao，BAI Guoliang，LIU Boquan. Experimental study on seismic behavior of RC frame-bent structure of a large-scale power plant [J]. Journal of Building Structures，2007，28(3)：46-52.

[8] GB50010—2010 混凝土结构设计规范[S].北京：中国建筑工业出版社，2010.

[9] CHOPRA A K. Dynamics of structures：theory and applications to earthquake engineering[M]. 3rd ed. New York：Pearson Education Inc，2007.

[10] NAKAMURA N，AKITA S，SUZUKI T，et al. Study of ultimate seismic response and fragility evaluation of nuclear power building using nonlinear three-dimensional finite element model [J]. Nuclear Engineering and Design，2010，240(1)：166-180.

[11] GB50011—2010 建筑抗震设计规范[S].北京：中国建筑工业出版社，2010.

（**编辑**　赵丽莹）