

# TU1 无氧铜轴心受压圆管柱 整体稳定的有限元分析

张天雄<sup>1</sup>, 王元清<sup>2</sup>, 陈志华<sup>1</sup>, 王综轶<sup>3</sup>, 衡月昆<sup>4</sup>

(1. 天津大学建筑工程学院, 天津 300072; 2. 清华大学土木工程安全与耐久教育部重点实验室, 北京 100084;  
3. 武汉大学土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430072; 4. 中国科学院高能物理研究所, 北京 100049)

**摘要** 目的 研究 TU1 无氧铜轴心受压构件的整体稳定性能, 以填补金属铜工程力学性能研究领域的空白. 方法 运用有限元软件 ABAQUS 建立有限元模型, 准确模拟构件的材料非线性与几何初始缺陷, 对 7 个 TU1 无氧铜圆管柱试件进行有限元分析, 并与相应的试验结果进行对比. 结果 有限元计算得到的极限承载力与试验得到的极限承载力的比值的平均值为 0.964, 标准差为 0.049. 结论 建立的有限元模型能够准确地分析 TU1 无氧铜轴心受压圆管柱的整体稳定性能, 为进一步运用该有限元模型对各类截面的 TU1 无氧铜轴心受压构件的整体稳定性能进行参数化分析提供了参考.

**关键词** 无氧铜; 轴心受压; 整体稳定; 圆管柱; 有限元分析

中图分类号 TU391

文献标志码 A

## Finite Element Analysis on Overall Buckling of TU1 Oxygen Free Copper Tubular Columns under Axial Compression

ZHANG Tianxiong<sup>1</sup>, WANG Yuanqing<sup>2</sup>, CHEN Zhihua<sup>1</sup>, WANG Zongyi<sup>3</sup>,  
HENG Yuekun<sup>4</sup>

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin, China, 300072; 2. Key Laboratory of Civil Engineering Safety and Durability of Ministry of Education, Tsinghua University, Beijing, China, 100084; 3. School of Civil and Architectural Engineering, Wuhan University, Wuhan, China, 430072; 4. Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, 100049)

**Abstract:** This paper investigated the overall buckling behavior of TU1 oxygen free copper (OFC) axial compression members, to supplement the research in the engineering mechanical properties of metal copper. By using the general-purpose finite element software, ABAQUS, finite element models (FEMs) were developed. After considering the material nonlinearity and initial geometric imperfections of the specimens, finite element analyses (FEAs) were performed on seven TU1 OFC tubu-

收稿日期: 2016-10-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(51678339); 清华大学自主科研计划课题(学科交叉专项)项目(20131089288); 中国科学院战略性先导科技专项(A类)项目(XDA10010200)

作者简介: 张天雄(1992—), 男, 博士研究生, 主要从事钢结构的研究.

lar columns under axial compression. FEA results were compared with experimental results. It was found that for ultimate bearing capacity, the average ratio of FEA results to corresponding test results was 0.964, and the standard deviation was 0.049. Conclusion was that the FEM created in this paper can accurately analyze the overall buckling behavior of TU1 OFC tubular columns under axial compression. Meanwhile, it was verified that the proposed model provided the basis of validity and reliability for further finite element parametric analysis on the overall buckling behavior of TU1 OFC axial compression members with different cross sections.

**Key words:** oxygen free copper; axial compression; overall buckling; tubular column; finite element analysis

铜是人类最早使用的金属之一,对人类文明的进步影响深远.自古以来,铜因自身经久耐用、可循环利用、极抗腐蚀等特点,被广泛应用于建筑结构中<sup>[1-12]</sup>.近年来,铜及铜合金已逐渐成为倡导建筑节能环保的关键材料<sup>[4]</sup>,但目前国内外有关金属铜的研究大都还停留在材料科学的领域,而对其工程力学性能的研究较少,诸如受压构件整体或局部稳定性能的研究几乎为空白,这严重阻碍了铜材料在建筑结构领域的应用与发展,不符合节能环保的发展战略.随着有限元理论和计算机技术的发展,有限元分析已经可以准确地计算试件的受力性能.笔者采用大型通用有限元软件 ABAQUS 建立有限元模型,对 7 根国产 TU1 无氧铜轴心受压圆管柱的整体稳定性能进行有限元分析,并与相应的试验结果进行了比较,验证了有限元模型的正确性与可靠性.

1 有限元模型的建立

1.1 试件

笔者采用国产 TU1 无氧铜圆管柱轴心受压试验的结果来验证有限元模型的正确性与可靠性.轴心受压构件共计 7 个(TU1—30 ~ TU1—90),具体测量尺寸见表 1.其中  $D$  为试件外径; $t$  为试件壁厚; $L$  为试件进行端部截断后的几何长度; $L_0$  为试件的有效计算长度,包含两端防屈曲装置端板的厚度以及铰支座转动中心至表面的距离,满足关系式  $L_0 = L + 30 + 210$ ;  $\lambda_0$  为计算长细比.

表 1 试件的实测尺寸

Table 1 Measured specimen dimensions

试件	$D/mm$	$t/mm$	$L/mm$	$L_0/mm$	$\lambda_0$
TU1-30	160.4	6.16	969	1 209	22.2
TU1-40	160.1	6.28	1 529	1 769	32.5
TU1-50	160.2	6.22	2 201	2 441	44.8
TU1-60	160.0	6.24	2 802	3 042	55.9
TU1-70	160.5	6.20	3 364	3 604	66.0
TU1-80	160.1	6.22	3 922	4 162	76.4
TU1-90	160.3	6.18	4 428	4 668	85.6

首次试验在试件两端焊接了端板和加劲肋以进行端部加强,但高温焊接会导致无氧铜材性的退化,因此将焊接部分截断后进行了二次试验.二次试验使用 Q345 钢制作了 2 套端部防屈曲装置嵌入铜管内壁以进行端部加强(见图 1).

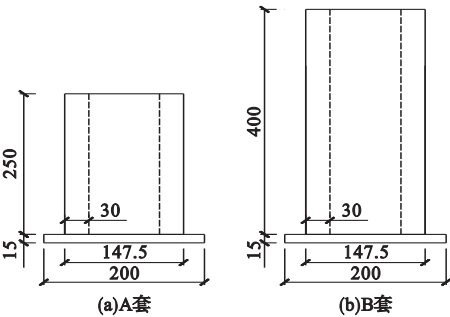


图 1 端部防屈曲装置加工图

Fig. 1 Machining dimensions of buckling restrained devices at both ends

1.2 单元类型与网格划分

采用通用有限元分析软件 ABAQUS 建立数值模型.在综合考虑计算精度与适用性的前提下<sup>[13]</sup>,选用 ABAQUS 单元库中的

S4R 壳单元对轴压构件和防屈曲装置进行建模,这是一种有限薄膜应变的线性减缩积分单元,属于 4 节点的四边形单元,每个节点有 6 个自由度,并设置有沙漏控制选项<sup>[14]</sup>. S4R 单元可以有效求解材料和几何非线性问题,而且可以进行局部和整体屈曲的分析,已经成功应用于多种薄壁结构的稳定性分析中<sup>[15-20]</sup>.

有限元模型的网格划分采用结构化网格,环向尺寸取为 10 mm,纵向尺寸取为 15 mm,经过网格加密分析后可确认该密度能够达到求解精度与时间代价之间的最优折中.

1.3 材料属性

从同一批次生产的、截面形式相同的另一根铜管两侧管壁对称地截取 6 个标准材性试件(TU1—1 ~ TU1—6)进行静力拉伸试验<sup>[21]</sup>,材料属性的平均值见表 2. 静力拉伸试验的结果表明,TU1 无氧铜在屈服前具有明显的非线性,在屈服后无明显强化,因此可分别选择 Ramberg - Osgood 模型和理想塑性模型对屈服前和屈服后的本构关系进行描述<sup>[22]</sup>.

$$\begin{cases} \varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \alpha \frac{\sigma_y}{E} \left( \frac{\sigma}{\sigma_y} \right)^n, & \sigma \leq \sigma_y, \\ \sigma = \sigma_y, & \sigma_y < \sigma \leq \sigma_u. \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\sigma$  为应力; $\varepsilon$  为应变; $E$  为弹性模量; $\sigma_y$  为屈服强度; $\sigma_u$  为极限抗拉强度; $\alpha$  为待定参数; $n$  为材料的硬化指数. 其中  $E$ 、 $\sigma_y$ 、 $\sigma_u$  由静力拉伸试验直接测定, $\alpha$ 、 $n$  通过最小二乘法拟合而得.

表 2 材料属性

Table 2 Material properties

$E/\text{MPa}$	$\sigma_y/\text{MPa}$	$\sigma_u/\text{MPa}$	$\alpha$	$n$
133 472	307.37	310.93	1.457	8.90

在 ABAQUS 中输入材性数据时,所有模型的材性参数均采用表 2 中的平均值,泊松比取 0.32,而且需要将材料的名义应力 - 应变曲线转换为真实应力 - 塑性应变曲线后再以多段线的形式输入,转换式为

$$\begin{cases} \sigma_{\text{true}} = \sigma(1 + \varepsilon), \\ \varepsilon_{\text{true}}^{\text{pl}} = \ln(1 + \varepsilon) - \frac{\sigma_{\text{true}}}{E}. \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\sigma_{\text{true}}$  为真实应力; $\varepsilon_{\text{true}}^{\text{pl}}$  为真实塑性应变.

对于防屈曲装置的数值模型,设其材料为理想弹塑性,屈服强度取 345 MPa,弹性模量取  $2.06 \times 10^5$  MPa,泊松比取 0.3.

1.4 边界条件与加载制度

根据试验中试件两端与单刀铰相连接的构造,认为其满足两端铰支的边界约束条件,在有限元模型中,可通过约束防屈曲装置端板  $y$  方向对称轴上节点的自由度来进行模拟. 具体操作方式为:约束下端板对称轴除绕  $y$  轴转动之外的 5 个平动和转动自由度;约束上端板对称轴除绕  $y$  轴转动和沿  $z$  轴平动之外的 4 个平动和转动自由度. 加载过程采用力控制加载,轴向荷载以压强的形式施加在防屈曲装置的上端板处,以消除应力集中的影响.

1.5 初始缺陷

试件的初始缺陷主要包括残余应力和几何初始缺陷,其中几何初始缺陷包括几何初弯曲与荷载初偏心. 由于试件经冷拉而得,其残余应力很小,可忽略不计,因此在 ABAQUS 中,仅需输入几何初始缺陷. 笔者通过 \* IMPERFECTION 命令更新有限元模型节点的几何坐标来施加几何初始缺陷. 实测结果如表 3 所示,表中  $v_0$  为几何初弯曲, $e_0$  为荷载初偏心,将二者叠加即为最终的几何初始缺陷值  $e(e = v_0 + e_0)$ .

表 3 试件的几何初始缺陷

Table 3 Measured initial geometric imperfections of specimens

试件	$v_0/\text{mm}$	$e_0/\text{mm}$	$e/\text{mm}$
TU1 - 30	1.770	1.533	3.303
TU1 - 40	1.580	-0.633	0.947
TU1 - 50	5.224	-6.685	-1.461
TU1 - 60	-0.927	0.560	-0.367
TU1 - 70	-4.731	-5.604	-10.335
TU1 - 80	2.144	-3.382	-1.238
TU1 - 90	-2.038	-3.912	-5.950

1.6 分析步骤

有限元模型的分析过程分为以下两步进行: 第一步, 对未施加几何初始缺陷的模型进行特征值屈曲分析, 提取其一阶屈曲模态作为初始缺陷的形式 (见图 2); 第二步, 施加几何初始缺陷, 使用与第一步中相同的边界条件与网格划分, 打开几何非线性以考虑几何变形二阶效应的影响, 采用修正的 Riks 弧长法<sup>[14-16]</sup>进行非线性屈曲分析, 所得值即为轴压构件的极限承载力。



图 2 一阶屈曲模态  
Fig. 2 First buckling mode

2 有限元分析结果

2.1 极限承载力对比

表 4 给出了全部轴压构件极限承载力的有限元分析结果与试验结果的对比情况, 其中  $N_{FE}$  为整体稳定承载力的有限元计算值,  $N_{Exp}$  为整体稳定承载力的试验值,  $N_{FE}/N_{Exp}$  为二者的比值。

表 4 试验结果与有限元结果的对比

Table 4 Comparison of test and FEA results			
试件	$N_{Exp}/kN$	$N_{FE}/kN$	$N_{FE}/N_{Exp}$
TU1-30	810.970	815.032	1.005
TU1-40	881.006	796.740	0.904
TU1-50	715.126	691.851	0.967
TU1-60	737.247	659.361	0.894
TU1-70	464.464	474.263	1.021
TU1-80	560.203	540.051	0.964
TU1-90	405.483	402.496	0.993

通过表 4 对极限承载力试验结果与有限元结果的对比可得: ①试件的稳定承载力大

致遵循了当柱子长细比增大时, 承载力随之减小的规律。对于部分不服从该规律的试件, 是其几何初始缺陷相对较小导致的。②7 个试件  $N_{FE}/N_{Exp}$  的平均值为 0.964, 标准差为 0.049。  $N_{FE}$  与  $N_{Exp}$  的最大偏差为 10.6%, 原因是该试件加载时, 端部单刀铰的转动不够灵活, 导致实际的边界条件未达到理想铰接, 从而引起了实际承载力  $N_{Exp}$  的增大。③有限元结果与试验结果的吻合程度较好, 表明利用 ABAQUS 建立的有限元模型能够较好地预测无氧铜轴心受压圆管柱的整体稳定承载力, 可将其应用于进一步的数值分析和参数化研究。

2.2 破坏形态对比

试件在极限荷载状态下典型的破坏形态如图 3~图 5 所示。笔者给出了长细比具有代表性的 3 个试件 TU1-30、TU1-60 和 TU1-90 的试验与有限元分析中试件的破坏形态。

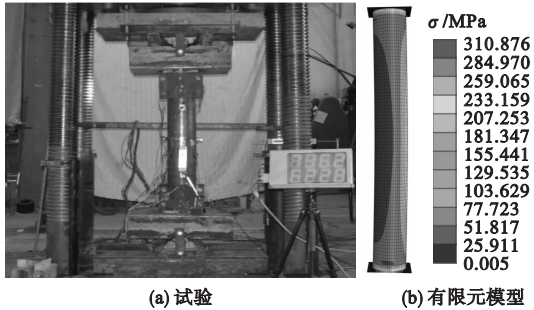


图 3 试件 TU1-30 试验与有限元分析破坏形态的对比  
Fig. 3 Comparison of experimental and FEA failure mode for specimen TU1-30

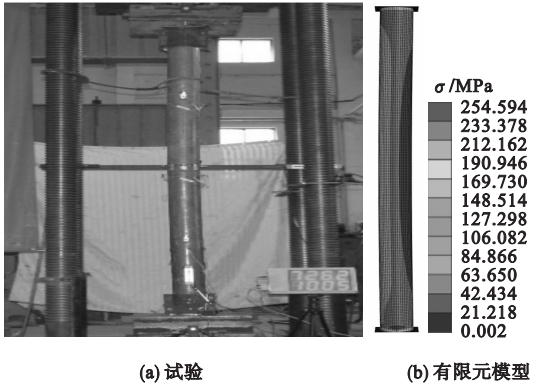


图 4 试件 TU1-60 试验与有限元分析破坏形态的对比  
Fig. 4 Comparison of experimental and FEA failure mode for specimen TU1-60

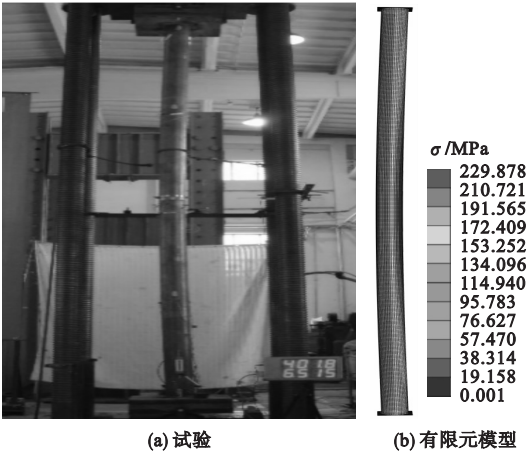


图5 试件 TU1-90 试验与有限元分析破坏形态的对比

Fig.5 Comparison of experimental and FEA failure mode for specimen TU1-90

通过对比分析图 3 ~ 图 5 可以看出,数值模拟得到的试件破坏形态与实际加载试验得到的试件破坏形态完全一致,即全部试件均在轴向荷载达到峰值点时发生整体失稳,且失稳临界截面出现在柱中截面.表明有限元模型能够准确地模拟试件的破坏形态.

2.3 荷载 - 位移曲线对比

图 6 ~ 图 8 给出了长细比具有代表性的 3 个试件 TU1 - 30、TU1 - 60 和 TU1 - 90 通过有限元模拟得到的荷载 - 位移曲线与试验实测曲线的对比情况.

通过对比图 6 ~ 图 8 的有限元曲线与试验曲线可以发现:①对于荷载 - 水平位移曲线,有限元曲线与试验曲线的吻合程度良好.

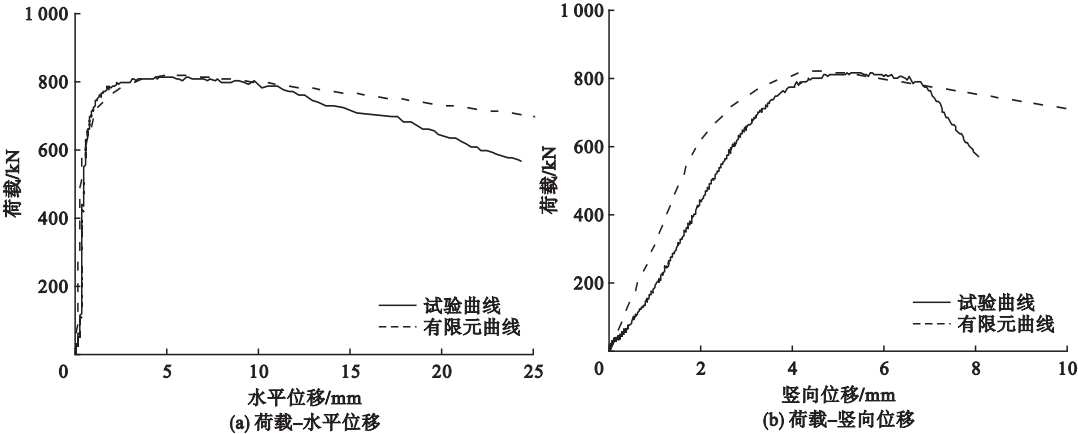


图6 试件 TU1 - 30 试验与有限元分析荷载 - 位移曲线的对比

Fig.6 Comparison of experimental and FEA load-deformation curves for specimen TU1-30

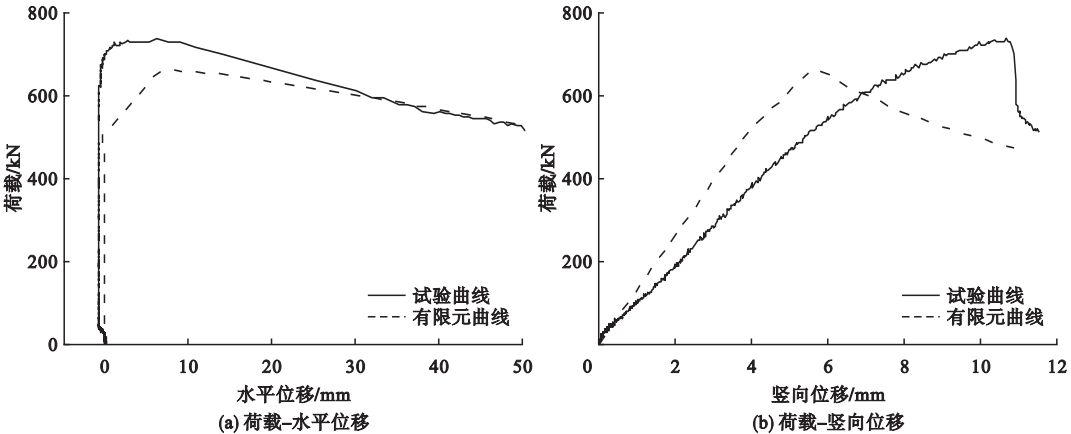


图7 试件 TU1 - 60 试验与有限元分析荷载 - 位移曲线的对比

Fig.7 Comparison of experimental and FEA load-deformation curves for specimen TU1-60



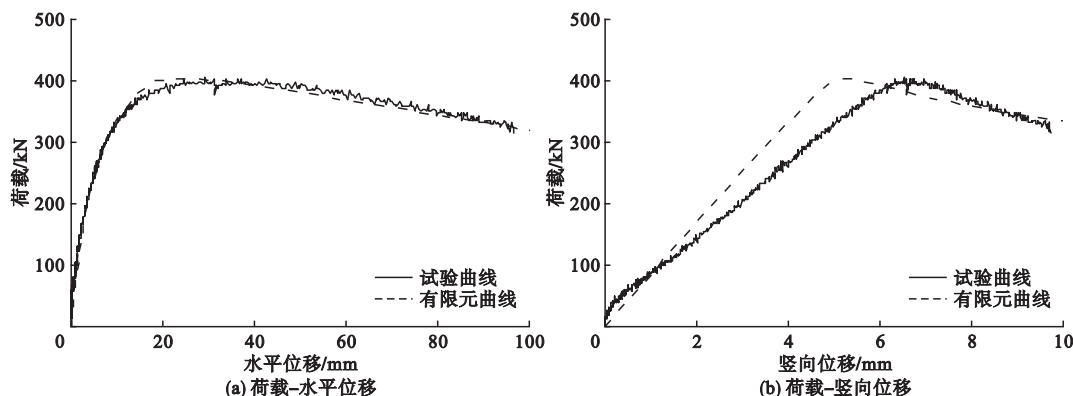


图8 试件 TU1-90 试验与有限元分析荷载-位移曲线的对比

Fig. 8 Comparison of experimental and FEA load-deformation curves for specimen TU1-90

②对于荷载-竖向位移曲线,二者位移发展的趋势基本一致,但初始轴向刚度有一定差别——实际试件的刚度小于有限元模型的刚度.原因主要在于试件经端部截断后,未能完全消除高温焊接的影响,残留的焊接热影响区内的无氧铜材性能退化,导致了端部初始刚度的减小;同时,有限元软件也无法精确模拟实际试件的几何初始缺陷和试验设备的系统误差,这也会导致荷载-位移曲线产生偏差.

③有限元模型可以较好地预测试验加载过程中荷载-位移曲线的发展趋势.

### 3 结论

(1)为研究 TU1 无氧铜轴心受压构件的整体稳定性能,利用 ABAQUS 软件对 7 根国产 TU1 无氧铜轴心受压圆管柱建立了数值模型,准确模拟了材料非线性、边界条件和几何初始缺陷等对试件整体稳定性能的影响.

(2)将有限元分析结果与轴压试验结果对比,有限元计算得到的极限承载力  $N_{FE}$  与试验得到的极限承载力  $N_{Exp}$  二者比值的平均值为 0.964,标准差为 0.049,且数值模型的试件破坏形态和荷载-位移曲线的发展趋势均与试验所得结果保持一致.证明有限元模型能够准确地预测试件的整体稳定承载力、破坏形态以及荷载-位移曲线.这为进一步运用该有限元模型对各类截面的 TU1 无氧铜轴心受压构件的整体稳定性能进行参数化

分析提供了正确性与可靠性的依据.

### 参考文献

- [1] DAYIS J R. ASM specialty handbook: copper and copper alloys [M]. USA: ASM International, 2001.
- [2] 张天雄,王元清,陈志华. 金属铜的力学性能及工程应用[J]. 工业建筑, 2015, 45(增刊): 1590-1598.  
(ZHANG Tianxiong, WANG Yuanqing, CHEN Zhihua. The mechanical properties and engineering application of metal copper[J]. Industrial construction, 2015, 45(S): 1590-1598.)
- [3] 张坤禹. 金属材料的建筑应用与美学表达[D]. 天津:天津大学, 2012.  
(ZHANG Kunyu. The architectural application and the aesthetic perform[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.)
- [4] KHAZANOV L. Copper, brass, and bronze: trends in production and use[J]. Metallurgist, 2014, 57(11/12): 1130-1133.
- [5] 张剑葳. 中国现存最早的铜建筑: 武当山元代小铜殿研究[J]. 建筑史, 2011(12): 80-106.  
(ZHANG Jianwei. Research on the earliest copper architecture in China: the little bronze hall of Yuan dynasty at Mount Wudang[J]. History of architecture, 2011(12): 80-106.)
- [6] 王琰. 铜的建筑材料语言探究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2009.  
(WANG Yan. The exploration of the architecture material language of copper[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2009.)
- [7] LU W, XIONG B, ZHANG X Z, et al. Progress

- of a room temperature electron cyclotron resonance ion source using evaporative cooling technology at Institute of Modern Physics [J]. Review of scientific instruments, 2014, 85 (2): 02A926.
- [8] KANAZAWA K, NAKAYAMA H, OGITSU T, et al. The interaction region of KEKB [J]. Nuclear instruments and methods in physics research section A: accelerators, spectrometers, detectors and associated equipment, 2003, 499 (1): 75 – 99.
- [9] HE Yun, LI Yulin, MISTRY N B, et al. Cornell Electron Storage Ring phase-III interaction region vacuum chamber [J]. Journal of vacuum science & technology A: vacuum, surfaces, and films, 2001, 19(4): 1699 – 1703.
- [10] LI Xunfeng, JI Quan, WANG Li, et al. Design and cooling of BESIII beryllium beam pipe [J]. Nuclear instruments and methods in physics research section A: accelerators, spectrometers, detectors and associated equipment, 2008, 585(1): 40 – 47.
- [11] ZENG Z M, GONG H, YUE Q, et al. Thermal neutron background measurement in CJPL [J]. Nuclear instruments and methods in physics research section A: accelerators, spectrometers, detectors and associated equipment, 2015, 804: 108 – 112.
- [12] NIU Shunli, CAI Xiao, WU Zhenzhong, et al. Simulation of background reduction and Compton suppression in a low-background hpge spectrometer at a surface laboratory [J]. Chinese physics C, 2015, 39(8): 086002.
- [13] SARAWIT A T, KIM Y, BAKKER M C M, et al. The finite element method for thin-walled members-applications [J]. Thin-walled structures, 2003, 41(2): 191 – 206.
- [14] HIBBITT H, KARLSSON B, SORENSEN P. ABAQUS analysis user's manual version 6. 10 [M]. Providence, RI, USA: Dassault Systèmes Simulia Corp, 2011.
- [15] PATTON M L, SINGH K D. Numerical modeling of lean duplex stainless steel hollow columns of square, L-, T-, and + -shaped cross sections under pure axial compression [J]. Thin-walled structures, 2012, 53: 1 – 8.
- [16] THEOFANOUS M, GARDNER L. Testing and numerical modelling of lean duplex stainless steel hollow section columns [J]. Engineering structures, 2009, 31(12): 3047 – 3058.
- [17] ZHAO Ou, ROSSI B, GARDNER L, et al. Behaviour of structural stainless steel cross-sections under combined loading-Part II: Numerical modelling and design approach [J]. Engineering structures, 2015, 89: 247 – 259.
- [18] ZHU Jihua, YOUNG B. Numerical investigation and design of aluminum alloy circular hollow section columns [J]. Thin-walled structures, 2008, 46(12): 1437 – 1449.
- [19] SU Meini, YOUNG B, GARDNER L. Continuous beams of aluminum alloy tubular cross sections. I: tests and FE model validation [J]. Journal of structural engineering, 2014, 141(9): 04014232.
- [20] ZHAO Ou, GARDNER L, YOUNG B. Structural performance of stainless steel circular hollow sections under combined axial load and bending-Part 1: Experiments and numerical modelling [J]. Thin-walled structures, 2016, 101: 231 – 239.
- [21] 中华人民共和国国家技术监督局. 金属材料拉伸试验(第1部分)室温试验方法: GB/T 228. 1—2010 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.  
(Administration of Technology Supervision of the People's Republic of China. Metallic materials-Tensile testing (Part 1) Method of test at room temperature: GB/T 228. 1—2010 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2010.)
- [22] 张天雄. 铜的力学性能及其在中微子探测器中的应用研究 [D]. 天津: 天津大学, 2015.  
(ZHANG Tianxiong. Research on mechanical property of copper and its application in neutrino detector [D]. Tianjin: Tianjin University, 2015.)