

ISSN 1000-4750  
CN11-2595/O3

**第17届  
全国结构工程学术会议  
论文集**

**第Ⅲ册**

**PROCEEDINGS OF THE SEVENTEENTH NATIONAL  
CONFERENCE ON STRUCTURAL ENGINEERING**

**No. III**

**主编：崔京浩**

**《工程力学》杂志社  
2008.8**

# 序

2008 年金秋时节, 举世瞩目的北京奥运刚刚闭幕, 凭借“同一个世界, 同一个梦想”的强劲东风, 踏着“和平、友谊、进步”的北京乐章, 迎来了第 17 届全国结构工程学术会议, 使我们的会议平添了几分喜庆和昂扬。

这次会议出版论文集 3 册, 共收录论文 352 篇, 内容包括: 力学分析与计算; 钢结构、材料与构件; 钢筋混凝土结构、材料与构件; 岩土、地基与基础、隧道及地下结构; 公路、铁路、桥梁、水工与港工; 抗震、爆炸、冲击、动力与稳定; 设计、施工、加固、优化、可靠度及事故分析; 舰船、车辆、航空航天结构及交叉学科等 8 个方面, 几乎囊括了国民经济的各个行业和技术科学的各个领域。

本届会议的主办单位之一华中科技大学, 是直属教育部领导, 涵盖文、理、工、医、农等多达 11 个学科门类的综合性高校, 是国家“211 工程”和“985 工程”重点建设的高水平大学。它的土木工程与力学学院是学校传统的重点学院, 众所周知的《固体力学学报》由该院承办, 该学报的英文版是我国最早被 Sci 收录的期刊之一, 是我国力学界公认的历史悠久的上乘学术刊物。

本届会议的大量会务工作是由学校土木工程与力学学院承担的, 对他们的辛勤劳动, 我们表示衷心的感谢。

今年(2008 年)正值中国力学学会结构工程专业委员会成立 10 周年, 为此我们撰写了一篇祝贺结构工程专业委员会成立 10 周年的文章“十年铸剑 初见成效”, 发表在论文集第 I 册的前面, 它既是一份汇报, 又是一份征求意见的公示书。热诚欢迎专家们建言献策。

崔京浩



2008 年 8 月

# 第 17 届全国结构工程学术会议论文集

本次会议论文集收录论文 352 篇，共计 1940 页，分装成 3 册，每册独立编页。第 I 册载入全套论文集的总目录，第 II、III 册则只载本册目录。

第 I 册论文 99 篇（共 692 页），包括：特邀报告；1. 力学分析与计算；  
2. 钢结构、材料与构件

第 II 册论文 127 篇（共 630 页），包括：3. 钢筋混凝土结构、材料与构件；4. 岩土、地基与基础、隧道及地下结构；5. 公路、铁路、桥梁、水工与港工

第 III 册论文 126 篇（共 618 页），包括：6. 抗震、爆炸、冲击、动力与稳定；7. 设计、施工、加固、优化、可靠度及事故分析；8. 舰船、车辆、航空航天结构及交叉学科

# 第 17 届

## 全国结构工程学术会议

中国 武汉  
WUHAN CHINA  
11.8 ~ 11.12, 2008

主办单位 中国力学学会结构工程专业委员会  
华中科技大学土木工程与力学学院(武汉)  
中国力学学会《工程力学》编委会  
清华大学土木工程系  
清华大学结构工程与振动重点实验室

### 学术委员会

主 席 : 袁 驷

委 员 : (按姓氏拼音为序)

陈以一 陈永灿 崔京浩 范 重 方 秦 扶名福 韩林海 胡和平 江见鲸 金 峰  
瞿伟廉 李 慧 李 黎 刘德富 刘光栋 刘宏民 楼梦麟 骆清铭 聂建国 秦顺全  
茹继平 石永久 宋二祥 隋允康 韦树英 吴胜兴 张维嶽 赵达基 郑建岚 周新刚  
周绪红 朱宏平 庄 茁

### 组织委员会

主 席 : 骆清铭

常务副主席: 崔京浩

副 主 席 : 朱宏平

委 员 : (按姓氏拼音为序)

曹万林 陈政清 高 波 黄 斌 金文成 李 珠 李振环 李正良 岑 松 刘洪玉  
刘有军 骆汉宾 罗建辉 钱 勤 王怀中 王克海 王杏根 吴 波 吴瑞麟 辛克贵  
谢伟平 熊世树 许 斌 徐礼华 徐世烺 杨亚政 叶康生 余锡平 张国栋 张建民  
张建平 张先进 张耀庭 张正威 张仲先 赵挺生 郑俊杰 邹志云

### 秘 书 处

秘书长 : 朱宏平

副秘书长 : 张仲先 李运提 钱 勤

秘书组 : (按姓氏拼音为序)

陈 翰 陈志军 樊 剑 房慧明 高 飞 高荣雄 江宜城 黄劲松 黄丽艳 胡莉莉  
李 林 李 誉 骆 晶 龙晓鸿 吕加玲 秦亚伟 苗 雨 万 飞 王丹生 叶 昆  
袁 涌 张 伟

# 第17届全国结构工程学术会议论文集目录

## 第III册目录

### 6. 抗震、爆炸、冲击、动力与稳定

|                                  |                           |
|----------------------------------|---------------------------|
| 14.5mm 钨合金脱壳穿甲弹斜侵彻钢靶板数值模拟研究..... | 鲍 涛 陈 斌 曾首义 杨跃能 (001)     |
| 防屈曲和特殊中心支撑钢框架结构抗震性能分析.....       | 丁玉坤 于海丰 张文元 孙雨宋 张耀春 (005) |
| 长周期高层隔震建筑的减震效果探讨.....            | 杜东升 王曙光 刘伟庆 刘鹏飞 (010)     |
| 地震波的时频特征及其对结构地震反应的影响.....        | 樊 剑 吕 超 张 辉 (014)         |
| 组合热轧角钢防屈曲支撑恢复力模型.....            | 高向宇 张 慧 杜海燕 梁 峰 (019)     |
| 圆弧滑道辊轴摩擦摆隔震理论的研究.....            | 葛 楠 苏幼坡 王兴国 (026)         |
| 单层球面网壳结构在地震作用下的动力稳定性.....        | 桂国庆 英金贵 王玉娥 (031)         |
| U 型钢板软碰撞限位实验隔震层位移回归分析.....       | 韩 淼 杜红凯 刘健兵 (037)         |
| 穿甲子弹击穿陶瓷板后续侵彻能力的数值模拟.....        | 侯二永 蒋志刚 曾首义 (042)         |
| 大跨结构地震多点输入响应研究进展.....            | 江 洋 石永久 王元清 (047)         |
| 活性粉末混凝土的冲击压缩性能.....              | 赖建中 孙 伟 (057)             |
| 框架—剪力墙结构地震响应弹塑性时程分析.....         | 黎雪环 裴星洙 (061)             |
| 方钢管高强混凝土柱抗震性能试验研究.....           | 李 斌 马恺泽 刘惠东 (066)         |
| 输电线微风振动分析方法能量平衡法的改进研究.....       | 李 黎 叶志雄 孔德怡 (071)         |
| 钢管混凝土高层混合结构抗震分析方法初探.....         | 李 威 韩林海 (077)             |
| 侧向冲击荷载作用下两端固定钢管混凝土构件的试验研究.....   | 李 珠 王 兆 (081)             |
| 双向地震下高架曲线桥动力反应分析.....            | 李青宁 胡景龙 赵志刚 (085)         |
| 悬臂结构仪器支架碰撞振动响应分析.....            | 梁天锡 赵登峰 黄 鑫 (089)         |
| 30 弹偏心入射陶瓷复合靶板机理研究.....          | 刘 飞 曾首义 晏麓辉 蒋志刚 (095)     |
| 地震波的自适应时频分析方法对比研究.....           | 刘 铁 樊 剑 钟秀蓉 (100)         |
| 某大跨度网壳结构的稳定性分析.....              | 刘文静 李 黎 龙晓鸿 (104)         |
| 火炬塔架的动力特性及风振响应分析.....            | 刘迎春 张文福 马昌恒 李静娥 (110)     |
| 山区大跨度悬索桥考虑空间变异性的地震响应.....        | 龙晓鸿 陈恩友 李 黎 (114)         |
| 全钢防屈曲支撑抗震性能足尺构件试验.....           | 马 宁 吴 斌 赵俊贤 李 惠 欧进萍 (118) |
| 液体罐箱多欧拉域流固耦合碰撞过程数值模拟.....        | 孟庆国 马 钧 袁文清 (126)         |
| 桥梁隔震支座水平屈服力相关性试验研究.....          | 聂肃非 李 黎 (131)             |
| 悬挂结构竖向地震作用动态性能研究.....            | 聂志华 刘 凯 刘洪兵 (135)         |
| 多质点弹性体系地震作用下结构动力特征分析及工程应用.....   | 彭荣生 (142)                 |
| 方钢管混凝土偏压中、长柱受力性能的试验研究.....       | 李 斌 王 斌 刘英达 (148)         |
| 轴向冲击下钢管混凝土短柱的变形研究.....           | 任够平 李 珠 王 蕊 (153)         |
| 陶瓷复合靶板有效防护区域研究.....              | 邵明哲 晏麓晖 曾首义 (157)         |
| 一种新型滚轴隔震支座研究.....                | 隋杰英 刘文锋 张扬扬 (161)         |
| 结构振动半主动控制的时滞效应.....              | 孙 清 伍晓红 刘正伟 李 鹏 (165)     |

|                                       |                           |
|---------------------------------------|---------------------------|
| 冲击荷载作用下钢管超高强混凝土(简称钢管 RPC)轴压构件的性能..... | 田志敏 吴平安 (170)             |
| 实时耦联动力试验方法述评.....                     | 汪 强 王进廷 金 峰 张楚汉 (178)     |
| K8 单层球面网壳在冲击荷载下的破坏模式研究.....           | 王多智 支旭东 范 峰 沈世钊 (187)     |
| 扁球薄壳在大挠度下的非线性动力学问题.....               | 王新志 王 钢 韩明君 李 林 (192)     |
| 折算阻尼法在混凝土房屋及顶上钢塔结构的适用性.....           | 王依群 田 慧 (197)             |
| 强地面运动的反应谱特性对钢筋混凝土桥墩地震需求的影响.....       | 吴 坚 熊健民 余天庆 张 伟 陈 亮 (201) |
| RBF 神经网络在检测 PRC 简支梁预应力中的应用.....       | 伍雪南 孙宗光 毕 波 (208)         |
| 中等口径火炮侵彻双硬度钢复合装甲的试验研究及数值仿真.....       | 武竞雄 何 煌 曾首义 (212)         |
| 方钢管混凝土柱外加强环节点抗震性能试验研究.....            | 李 斌 王晨飞 (218)             |
| 7.62mm 普通子弹侵彻低碳钢固定靶研究.....            | 肖 华 何 煌 曾首义 (222)         |
| 大跨悬索桥地震损伤后的抗震性能评价.....                | 谢 旭 赵俊亮 (227)             |
| 耗能分灾在基于性能的抗震设计中的研究.....               | 许晨明 隋杰英 翟瑞华 (233)         |
| SPH-FEM 方法对 PELE 斜侵彻靶板的数值模拟.....      | 荀 扬 晏麓晖 曾首义 (237)         |
| 爆炸荷载作用下框架结构的连续倒塌机理分析.....             | 阎 石 王积慧 王 丹 张 亮 (242)     |
| 改进的 Kelvin 碰撞分析模型.....                | 叶 昆 李 黎 (248)             |
| 地震动输入方法研究.....                        | 于海丰 张耀春 (252)             |
| 钢和 CFRP 拉索在支点随机激励下的非线性振动响应研究.....     | 张 鹤 谢 旭 (258)             |
| 高轴压比下内藏桁架的混凝土组合中高剪力墙抗震性能研究.....       | 张建伟 曹万林 王志惠 (262)         |
| 三维隔震抗倾覆支座力学性能试验研究.....                | 张永山 颜学渊 王焕定 魏陆顺 (267)     |
| 隔震桥梁单墩模型地震响应参数分析.....                 | 郑 伟 袁万城 (273)             |
| 杆式穿甲弹侵彻金属靶板的试验与数值模拟研究.....            | 武竞雄 何 煌 曾首义 (277)         |
| 基于结构-桩-土相互作用的 MR 控制.....              | 周占学 李延涛 张 海 毕全超 (282)     |
| 巨型结构自振特性的影响因素分析.....                  | 邹 昀 (288)                 |

## 7. 设计、施工、加固、优化、可靠度及事故分析

|                               |                           |
|-------------------------------|---------------------------|
| 能力谱法在既有建筑消能加固中的应用研究.....      | 曹炳政 (292)                 |
| 冻融与氯盐作用下预应力构件耐久性.....         | 陈 好 刘荣桂 付 凯 (297)         |
| 大跨度空间结构双层网壳屋盖拆卸卸载技术研究.....    | 邓 浩 黄 达 徐 劲 (301)         |
| 石淙河大桥地面裂缝原因探测与分析.....         | 邓洪亮 张先哲 宋建军 董来启 (305)     |
| 既有老建筑移位结构设计方案.....            | 董海林 卢文胜 刘中华 (309)         |
| 某狭窄场地过街楼重建项目的结构设计思路与工程实践..... | 高 峰 任晓崧 (315)             |
| 小议碳纤维加固混凝土梁的试验研究.....         | 高 亮 金 华 宋东辉 康洪涛 张 黎 (320) |
| 强度检测结果置信评定公式.....             | 高素新 佟晓君 马 群 张秀伟 (323)     |
| 给定烈度下剪力墙结构的抗侧刚度优化及其应用.....    | 贺海斌 宋 娟 张 明 沈蒲生 (328)     |
| 深基坑围护桩配筋优化设计初探.....           | 贺维庚 (333)                 |
| 法门寺合十舍利塔施工过程模拟与实测分析.....      | 胡长明 曾凡奎 (336)             |
| 多高层混凝土结构钢结构加层设计与施工问题的研究.....  | 李锦普 许 庆 蔡 铭 (342)         |
| 会展类建筑的性能化防火设计探讨.....          | 李淑婷 李 进 李青宁 (346)         |
| 溢洪道底板水毁事故形成机理及预防措施.....       | 李学海 陈素红 渠立光 (350)         |
| 考虑低应力细节损伤的结构耐久性分析方法.....      | 梁 超 董 鹏 贺小帆 (354)         |
| 张拉式膜结构考虑索滑移的整体施工成形分析.....     | 刘 凯 高维成 (358)             |

|                               |                           |
|-------------------------------|---------------------------|
| 钢管混凝土施工的监控要点.....             | 刘 香 周 平 (363)             |
| 人型构件吊装最佳绳系方案研究.....           | 刘艳琼 邹心勇 赵纪生 (367)         |
| 旧预应力板拉桥静力性能研究.....            | 马 亮 张亚军 王 彤 梁 力 (375)     |
| 混凝土受压构件可靠性对随机参数的敏感性研究.....    | 马德云 左勇志 霍 达 滕海文 (379)     |
| 内外载下桁架结构位移与应力约束的性质.....       | 欧笛声 陈树勋 (389)             |
| 应变电测技术新发展及其在各种工程结构试验中的应用..... | 沈观林 李松林 (393)             |
| 无人直升机起落架可靠性分析的矩方法.....        | 宋 军 姜年朝 张志清 戴 勇 谢勤伟 (396) |
| 基于有限元法的沥青路面结构可靠度研究.....       | 宋云连 刘东风 魏 渊 (400)         |
| 建筑物旋转移位的设计与施工.....            | 孙 肃 侯 伟 程向阳 (404)         |
| 基于随机加权法的结构可靠性评估.....          | 王 学 高普云 冯志刚 李 静 (408)     |
| 旧桥桩基再利用鉴定实例分析.....            | 王叔宝 张献民 (414)             |
| 某高校风雨球场张拉膜结构分析.....           | 肖天崑 陈超核 (418)             |
| 广州西塔塔吊支撑架施工安全监控及有限元分析.....    | 徐 劲 黄 达 邓 浩 (423)         |
| 张家口气象局雷达楼掏土纠偏的数值模拟.....       | 许 茜 傅 娟 车 文 徐俊峰 武建勋 (427) |
| 某钢棚倒塌原因分析.....                | 郑玉庆 刘华波 (431)             |
| 超高层建筑承台大体积混凝土施工裂缝的控制.....     | 姚 涛 孙香红 宁学联 (435)         |
| 石子性能不良引起的砖混结构裂缝实例.....        | 俞通洲 (439)                 |
| 混凝土结构碳纤维加固技术及其展望.....         | 张 黎 高 亮 王 澈 孙晓哲 (443)     |
| 海洋环境下 CFRP 与混凝土粘结耐久性试验研究..... | 张玲玲 张 陵 马建勋 付国洋 刘宏军 (447) |
| 某烟囱火灾后结构鉴定及加固处理.....          | 张文革 朱丽华 李永录 (451)         |
| 基桩缺陷小波变换应用效果的模型桩试验分析.....     | 张献民 吴扣军 王叔宝 (456)         |
| 异方差双向线性回归方法.....              | 张秀伟 马 群 佟晓君 高素新 (460)     |
| 砌体结构房屋的抗震鉴定和加固方法研究.....       | 赵益成 郑 云 (465)             |
| 低层民居台风可靠度分析初探.....            | 郑小宇 陈朝晖 (468)             |
| 钢结构火灾后检测中遇到的问题.....           | 郑玉庆 俞通洲 (474)             |
| 基于结构模态参数的损伤识别方法研究.....        | 钟军军 董 聪 夏开全 (478)         |
| 某煤气管道主干线检测鉴定.....             | 朱丽华 张文革 李晓东 (483)         |

## 8. 舰船、车辆、航空航天结构及交叉学科

|                                |                               |
|--------------------------------|-------------------------------|
| 激光光学微变形监测装置.....               | 蔡汉生 (488)                     |
| 基于 Monte-Carlo 法的极值风速模型研究..... | 陈朝晖 汤海涛 (491)                 |
| 生态型透水路面及其典型结构应用研究.....         | 邓洪亮 廖 丹 王正念 尹春荣 高 博 (496)     |
| 多处损伤壁板的剩余强度分析.....             | 葛 森 李 仲 张积广 肖迎春 (500)         |
| 基于逐步扩大网格法的重力坝地震响应分析.....       | 贺向丽 李同春 任 灏 (504)             |
| 倒虹吸与土体相互作用研究.....              | 胡 钢 付 强 (510)                 |
| 航空薄壁结构有限元网格划分原则.....           | 姜年朝 王克选 戴 勇 谢勤伟 张志清 宋 军 (516) |
| 分形理论在土木工程领域中的应用.....           | 姜绍飞 苏 莹 (519)                 |
| 支持向量机技术在可靠度分析中的应用.....         | 蒋友宝 贺艺华 (524)                 |
| 输电线微风振动的 CFD 数值仿真.....         | 李 黎 孔德怡 龙晓鸿 梁政平 (528)         |
| 基于振动的土木工程结构损伤诊断研究进展.....       | 李黎明 施卫星 (534)                 |
| 圆柱形壳液耦合系统重力波的测量分析.....         | 梁臣杰 刘习军 贾启芬 郭季平 腾小军 刘龙霞 (538) |
| 基于 UML/MFC 的索结构分析前后处理软件开发..... | 刘慧鹏 傅向荣 王文婕 赵 东 (542)         |

|                                |                       |
|--------------------------------|-----------------------|
| 日本风力发电研究热点和对我国的启示.....         | 刘庆宽 乔富贵 张 峰 (547)     |
| 新型 T 形钢管混凝土组合构件纯弯试验研究.....     | 刘胜兵 徐礼华 温 芳 (551)     |
| 不同浮重比的水中悬浮隧道在波流载荷下的动力响应.....   | 龙 旭 葛 斐 王 雷 洪友士 (556) |
| 板结构的吻合频率和临界频率特性研究.....         | 王海军 郭杏林 (562)         |
| 基于 RBF 神经网络的平面桁架损伤识别方法研究.....  | 王建萍 栾焕强 (568)         |
| 导线脱冰跳跃数值仿真.....                | 夏正春 李 黎 陈 勇 胡 伟 (573) |
| 磁流变阻尼器的一种智能模型.....             | 肖志荣 孙炳楠 (579)         |
| 再论附加质量对结构模态试验分析频率的影响.....      | 徐有刚 杜 强 周帮友 王玉军 (583) |
| 基于图像的射弹斜侵彻碰撞角测量方法研究.....       | 杨跃能 陈 斌 曾首义 鲍 涛 (587) |
| 航空 CAE 发展的里程碑、机遇与瓶颈.....       | 岳中第 (592)             |
| 适于超高压容器材料的应力应变解析式.....         | 张尚先 张于贤 王 红 (598)     |
| 紊流数值模拟方法研究进展.....              | 赵雪峰 茅泽育 (604)         |
| 吸气方法在高层建筑风荷载减阻中的应用.....        | 郑朝荣 张耀春 (608)         |
| 基于 ZigBee 无线网络技术的结构健康监测系统..... | 周晋宇 董 聪 夏开全 (614)     |
| 论文撰写要求.....                    | 黄丽艳 (1)               |



# 14.5mm 钨合金脱壳穿甲弹斜侵彻钢靶板 数值模拟研究

鲍 涛\*, 陈 斌, 曾首义, 杨跃能

(国防科学技术大学, 湖南 长沙 410072)

**摘要:** 采用非线性有限元分析软件 ANSYS/LS-DYNY 模拟 14.5mm 脱壳穿甲弹的斜侵彻钢靶板过程, 模拟结果与试验结果吻合较好。在此基础上研究钨合金弹头的破坏形式, 讨论在高应变率条件下钨合金弹体中存在“绝热剪切带” (adiabatic shear band, ASB) 和由此而带来的“自锐效应” (self-sharpening), 结果表明它们提高了弹体的侵彻能力。本文结果对研究钨合金穿甲弹侵彻问题具有一定的参考价值。

**关键字:** 侵彻 穿甲子弹 自锐效应 绝热剪切带

## Numerical Simulation of Oblique Perforation of Steel Plates by 14.5 mm Tungsten APP

Bao Tao, Chen Bin, Zeng Shou-yi, Yang Yue-neng

(National university of defense technology, changsha hunan 410072)

**Abstract:** Using ANSYS/LS-DYNA code, a general purpose finite element code, the process of 14.5mm armour-piercing projectile (APP) is simulated. The simulated results are in good agreement with the experimental results. Basing on the simulation, the paper also analyses the adiabatic shear band in the projectile and the influence of the self-sharpening effect on projectile crack. That is valuable to investigation of tungsten armour-piercing projectile in penetration problem.

**Keywords:** penetration; armour-piercing projectile; self-sharpening; adiabatic shear band

### 1 引言

穿甲弹是依靠自身的动能来击穿钢甲的, 常以穿甲弹在一定条件下的穿透厚度作为弹丸威力的指标, 有时也常用“极限穿透速度”的概念<sup>[1]</sup>。对于动能穿甲弹, 要想提高穿甲威力, 就要设法提高弹丸的着靶速度。而提高弹丸着速的方法有二: 一是提高弹丸的初速; 二是减小弹丸飞行的速度降 (减小C)。对于全包裹弹来说, 高初速与低速度降是不可兼得的。14.5mm钨芯脱壳穿甲弹正是应上述要求而研制的。该弹采用高密度的钨合金材料制成, 是一种次口径旋转稳定穿甲弹。

14.5mm钨合金脱壳穿甲子弹是在2002年批准定型的, 关于它的穿甲性能研究非常少, 目前已公开的文献资料基本没有, 而以往的研究重点是硬质钢芯穿甲子弹; 由于两种材料的力学性能有着很大的差异, 故进行关于14.5mm钨合金穿甲子弹穿甲性能的研究是十分必要的。本文采用有限元的方法建立三维模型, 模

作者简介: \*鲍 涛 (1984—), 男, 安徽人, 硕士研究生, 主要从事防护工程冲击侵彻效应的研究 (E-mail: baotao-007@163.com);

陈 斌 (1964—), 男, 湖南人, 教授, 主要从事固体力学教学及防护工程研究;

曾首义 (1948—), 男, 湖南人, 教授, 主要从事工程力学及防护工程研究。

拟14.5mm钨合金脱壳穿甲弹斜侵彻钢靶,并结合实验研究了14.5mm钨合金脱壳穿甲弹斜侵彻钢板过程中绝热剪切带的产生、发展过程,讨论了由此而带来的对穿甲性能的影响。

2 14.5mm 钨合金脱壳穿甲弹

14.5mm钨合金脱壳穿甲弹的结构如图1所示,它是由弹托、闭气环、弹芯三部分组成;其中穿甲弹尾部的弹托直径为14.5mm。弹头出枪口后,在离心力作用下塑料弹托沿预制槽分成3瓣,以10°~17°角飞散落在离枪口约50m的地面上。弹托脱开后,由于弹芯质量大、阻力小,而闭气环质量小、阻力大,因此在弹芯与闭气环之间形成空气阻力差,阻力差将闭气环与弹芯分开,闭气环落在离枪口150m~200m的地面上,而弹芯则飞向目标完成穿甲作用,整个脱壳的情况见图2。

弹芯是由圆柱与圆锥接合而成,其中弹芯长为46.4mm,弹芯尾部直径为9.5mm。在圆柱体的尾部挖出一个长为10.25mm、直径为5mm的柱状空穴。

14.5mm脱壳穿甲弹弹芯所采用的材料是锻造态钨合金,  $\rho=18.5\text{g/cm}^3$ , 弹芯质量为35.67g。其抗拉强度 $\geq 1900\text{N/mm}^2$ ,冲击韧性 $\geq 12\text{N/cm}$ ,延伸率 $\geq 5\%$ ,硬度(HRC): 27~32,弹芯材料参数见表1<sup>[3]</sup>。

表1 弹芯材料参数

| 密度                      | 杨氏弹性模量                  | 泊松比  | 屈服应力                   | 失效应变 |
|-------------------------|-------------------------|------|------------------------|------|
| 18500 kg/m <sup>3</sup> | 3.6×10 <sup>11</sup> Pa | 0.22 | 1.9×10 <sup>9</sup> Pa | 0.8  |

与硬质钢芯或碳化钨弹芯在侵彻过程中整体破碎相反,钨合金弹芯可展性较好,以飞溅式穿甲,具有极好的二次侵彻特性,对大着角、夹层或多层结构复合装甲的穿甲效果更为优良。

3 仿真模型及材料参数

弹芯为锻造态钨合金材料,直径为9.5mm,长度为46.4mm,靶板为20mm厚的weldox460 E钢,钢板的四周施加固定约束,且钢板与弹芯直径呈50°夹角。因结构形状、荷载对称,故取二分之一结构进行计算。弹靶模型如图4所示,弹芯和靶板均采用8节点三维实体有限元,其中弹芯与靶板的单元数分别为1600和144000。

由于钨合金和钢材料均是对温度和应变率敏感的材料,故采用Johnson\_cook模型,该模型综合了材料强化、应变率、和绝热软化效应。

本构方程: 
$$\sigma_y = (A + B\bar{\epsilon}_p^n)(1 + C \ln \dot{\epsilon}^*) (1 - T^{*m}) \tag{1}$$

式中  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $n$ 、 $m$  为材料参数;  $\bar{\epsilon}_p$  为等效塑性应变;  $\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon}_p / \dot{\epsilon}_0$  为塑性应变率比值,一般取  $\dot{\epsilon}_0 = 1.0\text{s}^{-1}$ ;  $T^* = (T - T_r) / (T_m - T_r)$  为相对温度,  $T_r$  为室温,  $T_m$  为熔点温度。

断裂应变: 
$$\epsilon_f = (D_1 + D_2 \exp D_3 \sigma^*) (1 + D_4 \ln \dot{\epsilon}^*) (1 + D_5 T^*) \tag{2}$$

式中  $\sigma^* = p / \bar{\sigma}$  为静水压力与等效应力之比;  $D_i (i=1 \sim 5)$  为常数。

弹靶系统的材料模型参数如表 2 和表 3 所示。

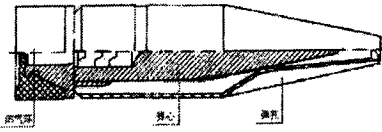


图 1 弹体结构示意图

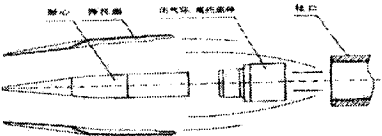


图 2 脱壳弹脱壳示意图

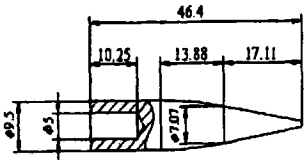


图 3 弹芯尺寸结构



图 4 计算模型

表 2 弹芯材料 Johnson\_Cook 模型参数

| $\rho(\text{kg}/\text{m}^3)$ | $E(\text{GPa})$ | $\nu$           | $A(\text{MPa})$ | $B(\text{MPa})$ | $n$   | $C$    | $m$   |
|------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------|--------|-------|
| 18500                        | 150             | 0.33            | 175             | 177             | 0.12  | 0.016  | 1.00  |
| $C_p(\text{J}/\text{kgK})$   | $T_m(\text{K})$ | $T_0(\text{K})$ | $D_1$           | $D_2$           | $D_3$ | $D_4$  | $D_5$ |
| 52                           | 3400            | 293             | 0.0705          | 1.732           | -0.54 | -0.015 | 0     |

表 3 靶板材料 Johnson\_Cook 模型参数

| $\rho(\text{kg}/\text{m}^3)$ | $E(\text{GPa})$ | $\nu$           | $A(\text{MPa})$ | $B(\text{MPa})$ | $n$   | $C$    | $m$   |
|------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------|--------|-------|
| 7850                         | 200             | 0.33            | 490             | 807             | 0.73  | 0.0114 | 0.94  |
| $C_p(\text{J}/\text{kgK})$   | $T_m(\text{K})$ | $T_0(\text{K})$ | $D_1$           | $D_2$           | $D_3$ | $D_4$  | $D_5$ |
| 52                           | 1800            | 293             | 0.0705          | 1.732           | -0.54 | -0.015 | 0     |

## 4 结果及分析

### 4.1 有限元与实验对比

图 5 为采用有限元方法模拟 14.5mm 钨合金穿甲弹斜侵彻钢靶板过程图, 数值模拟得到的极限速度为 990m/s; 图 6 为 14.5mm 钨合金穿甲子弹研制厂家提供的试验图片, 实际测量得到的极限速度为  $V_{25}=1018\text{m/s}$  -1024m/s, 极限速度误差约为 2.8%-3.4%。对比两组图片发现模拟结果与试验情况吻合较好。因此该数值模拟是可靠的。

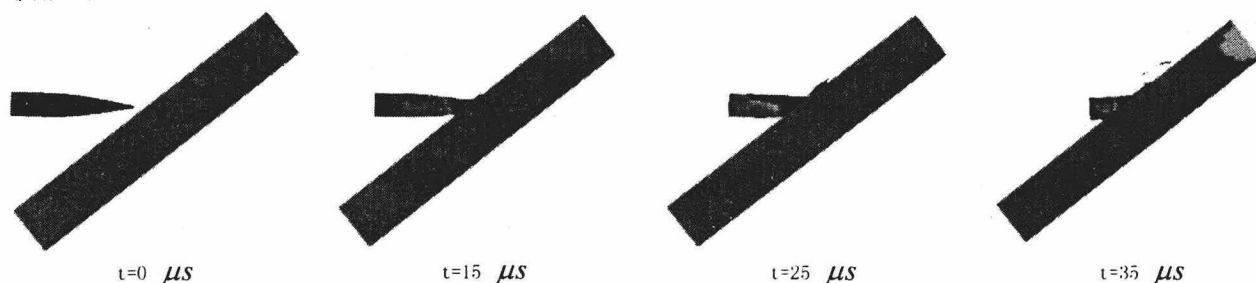


图 5 数值模拟

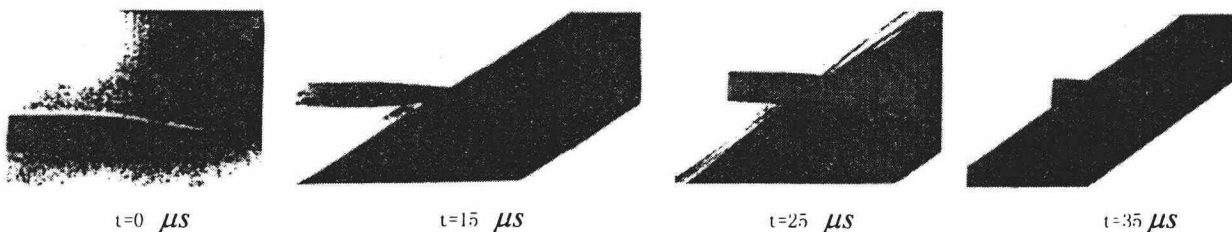


图 6 实验图片

### 4.2 绝热剪切与自锐效应

钨合金材料密度高, 弹性模量大, 14.5mm 钨芯脱壳穿甲弹以 990m/s 的速度撞击钢板时, 产生的冲击压力高达 17 万个大气压, 引起弹芯和钢板急剧压缩变形, 产生很高的热能。由于钨合金熔点高 (3410℃), 比热小 (0.034), 穿甲过程温升高, 有利于提高穿甲威力。经估算, 14.5mm 钨合金弹芯撞击钢板后产生 1866℃-1943℃的温升<sup>[1]</sup>。近 2000℃的高温足以使钢板熔化, 在高速、高压、高温的条件下, 钢板被穿透

的几率得到极大的提高,这也是14.5mm钨芯脱壳穿甲弹的远距离穿甲威力大的因素之一。

由图5可以看出,在侵彻的过程中,弹芯与靶板接触的边缘处存在一个明显的等应力带状区域。这一等应力带的宽度很细,基本平行于弹靶作用面。在等应力带周围的弹芯变形很小,等应力带由弹靶作用面向弹芯内部扩展。图6为位于弹芯不同位置五个特征点的等效应力时程图,五个特征点的位置如图5所示。由图5-6可以发现,特征点1-4位于同一剪切带上,在侵彻过程中几乎同时失效。弹靶在 $0\mu s$ 发生碰撞,由方程(1)可知,在前 $15\mu s$ 特征点1-4在应变和应变率的强化效应下,等效应力增加,在此阶段温度引起的软化效应影响还很小。在 $15\mu s-40\mu s$ ,等应力带处出现明显的温度效应,使材料发生大应变而失效,特征点1-4的等效应力迅速下降,一直减小到零。因此可以确定在弹芯磨蚀过程中发生了绝热剪切(Adiabatic Shear)<sup>[5-6]</sup>。沿弹芯的直径方向,特征点5的位置相对特征点1-4要靠后,由图6可知,在 $t=50\mu s-75\mu s$ 处,特征点5所在的临近区域将出现绝热剪切现象。

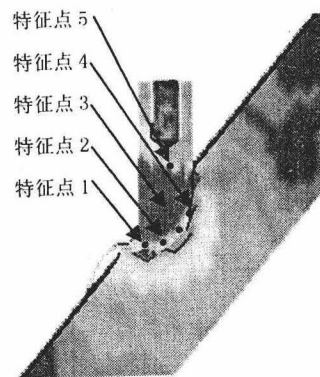


图5 弹靶作用

侵彻过程中,弹芯出现绝热剪切现象有助于提高穿甲弹的侵彻能力。这是因为由于绝热剪切带的存在,裂纹沿着剪切带扩展,弹体的头部材料就会容易发生塌落,这就相当于削尖了磨损的弹头,阻止了“蘑菇头”的出现,能够使弹靶之间保持一个很小的作用面积,减小了侵彻阻力并延长了作用时间,此即为“自锐效应”<sup>[7-8]</sup>。值得指出自锐效应是钨合金弹头侵彻靶板的一个显著特征。

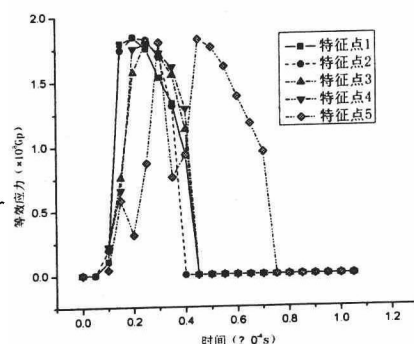


图6 等效应力时程图

## 5 结论

1 ANSYS/LS-DYNA 大型非线性有限元软件可以为14.5mm钨合金脱壳穿甲弹侵彻问题的研究提供一个很好的数值模拟平台,实践证明合理地选择材料模型及参数可以得到较好的数值模拟结果。

2 高密度的钨合金材料的使用不仅提高了弹体的断面密度,而且它具有对应变率和温度的敏感性。这一特性使其在侵彻靶板的过程中,弹体内部出现绝热剪切带,产生自锐效应,进一步提高了穿甲子弹的侵彻性能。

3 采用易于发生绝热剪切的钨合金材料来做弹芯是穿甲子弹发展的一个方向,而以往关于硬质钢芯穿甲子弹的研究成果不适应于钨合金穿甲子弹,因此开展各类靶板抗钨合金穿甲子弹的侵彻研究是必要的。

## 参考文献:

- [1] 赵强. 12.7mm 钨芯脱壳穿甲弹穿甲威力分析[J]. 产品设计与开发, 2004, 1, 34-36.
- [3] 龚若来. 穿甲弹侵彻金属靶板的数值模拟[D]. 南京理工大学, 2003.
- [4] 杨超, 张宝平, 李灿波, 田时雨. 侵彻过程中穿甲弹温升机制的研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2003, 26(1): 29-31.
- [5] Bai Y, Dodd B. Adiabatic shear localization: occurrence, theories and applications[M]. Oxford: Pergamon Press, 1992.
- [6] Roessing, K. M., Mason, J. J., Adiabatic shear localization in the dynamic punch test, part II: numerical simulations[J]. Int J Plasticity 15, 1999, 263-283.
- [7] Ramesh, K. T., Localization in Tungsten Heavy Alloys Subjected to Shearing Deformations Under Superimposed High Pressures[J]. 1995 Metal Powder Industries Federation. 3-9.
- [8] Bose, A., and R. M. German. Developments in the Sintering of Tungsten Heavy Alloys. Sintering Theory and Practice. New York, NY: John Wiley & Sons, INC., 1996.

# 防屈曲和特殊中心支撑钢框架结构抗震性能分析

丁玉坤<sup>1</sup>, 于海丰<sup>1</sup>, 张文元<sup>1</sup>, 孙雨宋<sup>2</sup>, 张耀春<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨工业大学土木工程学院, 哈尔滨 150090; 2. 东北电力设计院, 长春 130021)

**摘要:** 对采用特殊中心支撑或防屈曲支撑的某发电厂主厂房的横向框架结构的抗震性能进行了对比分析, 结果表明, 然后者的层间侧移及楼层侧移并不总小于前者, 但其结构的楼层加速度和基底剪力却大大低于前者。罕遇地震下, 两种结构中的柱子保持弹性, 多数特殊中心支撑出现了平面外失稳, 而防屈曲支撑在拉压作用下均进入屈服, 滞回曲线稳定饱满, 具有较好的耗能能力。

**关键词:** 防屈曲支撑; 防屈曲支撑框架; 特殊中心支撑; 地震反应分析; 滞回性能

## Seismic response analysis of buckling-restrained braced or special concentrically braced steel frames

DING Yukun<sup>1</sup>, YU Haifeng<sup>1</sup>, ZHANG Wenyuan<sup>1</sup>, SUN Yusong<sup>2</sup>, ZHANG Yaochun<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China

2. Northeast Electric Power Design Institute, Changchun 130021, China)

**Abstract:** A seismic response analysis has been carried out in order to compare the aseismic performance of the buckling-restrained braced frame (BRBF) and the special concentrically braced frame (SCBF) used in the transverse direction of a thermal power plant's main building. The analysis reveals that, although the floor displacement and the story drift of the BRBF are not always smaller than those of the SCBF, the floor acceleration and the first story shear force of the former are greatly smaller than those of the latter. Under severe earthquake, columns in two kinds of the structures remain elastic. For most special concentrically braces, the out-of-plane flexural buckling occurs. Whereas, the buckling-restrained braces can yield in tension and compression, and the hysteretic loops are plump and stable, exhibiting better energy dissipation capacity.

**Key words:** buckling-restrained brace; buckling-restrained braced frame; special concentrically brace; seismic response analysis; hysteretic behavior

## 1 引言

因特殊中心支撑的板件宽厚比控制较严而长细比适当放宽, 使其累积耗能和抗疲劳性能均较普通中心支撑有所提高, 所以在国外的抗震钢结构中得到推广应用<sup>[1,2]</sup>。但中心支撑受压时可能失稳, 将影响其承载及耗能性能的充分发挥。防屈曲支撑系由钢支撑外包与之无粘结的约束构件组成, 可避免钢支撑受压整体和局部大幅失稳, 使其在拉、压作用下均能进入屈服, 达到耗能和提高承载力的目的。因支撑与约束构件间无粘结, 能沿其轴向相对于约束构件自由伸缩变形而独立承载, 刚度和承载力易于控制, 且便于与钢框架连接, 故近年来也在地震区的钢结构中得到推广应用<sup>[1,3]</sup>。

在火力发电厂的钢结构中, 梁和柱子在平面内铰接, 并采用特殊中心支撑作为抗侧力构件的框架结构已成为一种较常见的结构形式。本文结合某一火力发电厂主厂房中的横向框架钢结构的初步设计方案, 应用 ANSYS8.0 建模, 保持除支撑外的其他构件不变, 对分别采用防屈曲支撑(BRB)和特殊中心支撑(SCB)的两种结构的抗震性能做了对比分析。分析表明, 前者的抗震性能较后者优越。

作者简介: \* 丁玉坤 (1979-), 男, 内蒙古人, 博士生, 主要从事钢结构方面的研究(E-mail: dingyukun.student@sina.com);

于海丰 (1980-), 男, 辽宁人, 博士生, 主要从事钢结构方面的研究;

张文元 (1972-), 男, 辽宁人, 副教授, 主要从事高层钢结构方面的研究;

孙雨宋 (1941-), 男, 吉林人, 教授级高工, 主要从事钢结构设计方面的工作;

张耀春 (1937-), 男, 山东人, 教授, 博导, 从事轻钢结构、轻钢混凝土结构、钢结构稳定、高层钢结构的抗震和抗风方面的研究。

2 工程概况

2.1 结构布置及荷载

发电厂主厂房由多榀横向特殊中心支撑框架连接纵向钢梁和纵向支撑构成，由于结构在纵向布置均匀，选取其中典型的一榀横向支撑框架进行分析，结构布置如图 1 所示。

按照火力发电厂土建结构设计技术规定<sup>[4]</sup>，将荷载折算成重力荷载代表值，并在分析中以集中质量块和增大钢梁密度的形式施加在结构上，质量块的质量以及增大密度的钢梁的密度的具体数值见图 1。

为简化对屋架的模拟，将屋架简化为一根截面积为  $0.564\text{m}^2$  的杆件，弹性模量取  $2.06\times 10^5\text{MPa}$ ，也采用增大杆件密度的方法考虑其承受的荷载，杆件的密度为  $1870.8\text{kg/m}^3$ 。为了考虑汽机房内平台梁上设置楼板后使两侧的框架协同受力，将楼板的作用等价于两根截面积  $0.01\text{m}^2$  的钢杆。简化后的框架结构和杆件截面编号如图 2 所示。杆件截面见表 1。

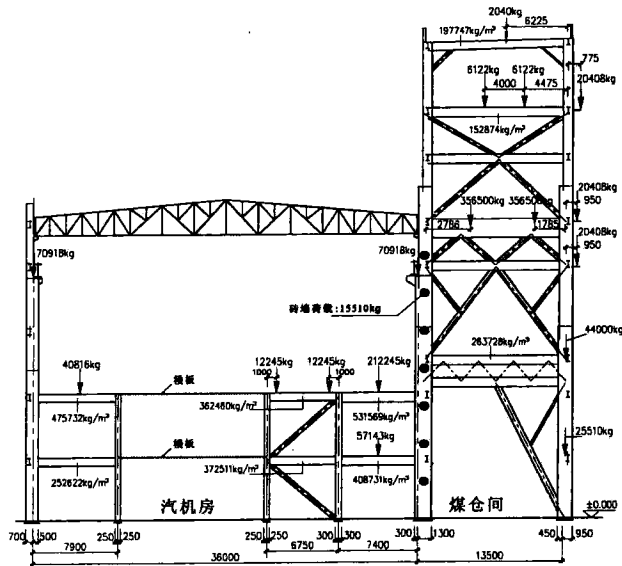


图 1 框架结构及荷载

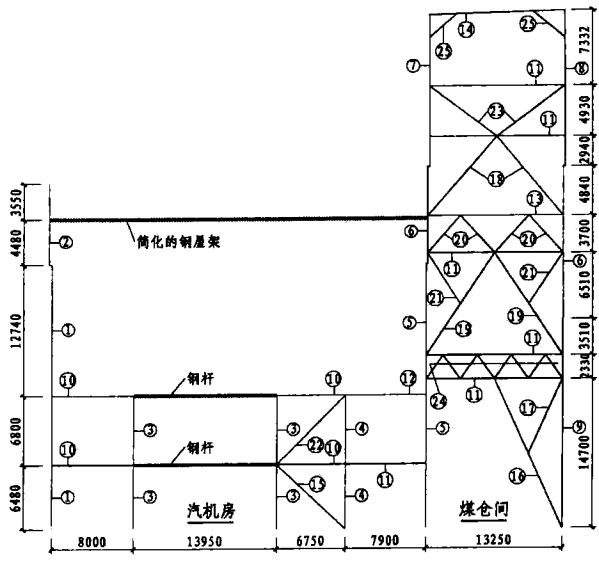


图 2 杆件截面编号

表 1 构件截面(单位: mm)

| 编号 | 截面              | 编号 | 截面              | 编号          | 截面             |
|----|-----------------|----|-----------------|-------------|----------------|
| 1  | H1200×600×30×50 | 8  | H950×400×30×50  | 15,20,22,24 | H300×350×20×28 |
| 2  | H700×500×25×40  | 9  | H1400×600×40×60 | 16          | H350×600×25×40 |
| 3  | H500×500×20×30  | 10 | H900×500×20×40  | 17          | HW250×250×9×14 |
| 4  | H600×600×30×40  | 11 | H1000×500×20×40 | 18, 23      | H200×250×14×18 |
| 5  | H1600×700×40×80 | 12 | H1100×500×20×40 | 19          | H300×450×20×30 |
| 6  | H1300×600×40×60 | 13 | H2800×600×40×60 | 21          | H200×200×8×12  |
| 7  | H900×400×30×50  | 14 | H900×400×20×35  | 25          | 2L160×14 (隅撑)  |

2.2 材料及节点连接

不计汽机房内钢杆的密度，除了简化的屋架和图 1 中给出具体密度数值的增大密度的钢梁，其余所有构件密度为  $7850\text{ kg/m}^3$ 。特殊中心支撑框架结构中所有构件钢材均采用 Q345。支撑框架结构中所有梁柱节点均为铰接，柱脚也为铰接。依据支撑两端连接构造，支撑在平面内为刚接、平面外为铰接。

3 结构的有限元模型及动力特性

3.1 分析模型

a) 特殊中心支撑结构

应用 ANSYS 建模分析，柱子、梁和支撑均采用 beam188 梁单元，屋架和两根钢杆用 Link8 杆元模

拟。对集中质量块用 Mass21 质量元模拟。划分单元后的有限元分析模型如图 3 所示。时程分析中, 取支撑中点平面外位移为其长度的 1/1000 做为初始几何缺陷。所有构件屈服点取 345Mpa, 泊松比为 0.3, 弹性模量  $E=2.06 \times 10^5 \text{MPa}$ , 切线模量  $E_t=0.02E$ , 钢材的本构选用双线性的随动强化模型。

b) 防屈曲支撑框架结构

将图 2 中编号 15~24 的特殊中心支撑均换为 BRB, 其余构件均与原结构相同。汽机房内的两根 BRB 屈服强度取 345Mpa, 其余 BRB 屈服强度取 235Mpa。编号 16、19 的原特殊中心支撑在其中部又设置了支撑, 以减小支撑平面内的计算长度。当采用 BRB 后, 因其长细比不受此限制, 故不再额外设置中部的支撑。

结合振型反应谱方法对采用 BRB 的结构进行了重新设计以确定支撑横截面积。设计中对 BRB 截面进行反复调整, 使各支撑的最大设计轴力与其轴向屈服承载力之比约为 0.9, 以实现 BRB 在小震作用下不屈服, 而在大震作用下较早进入屈服耗能。与原支撑编号对应的 BRB 的截面列于表 2。在时程分析中, BRB 用杆单元 Link8 模拟, 除屈服强度外, 其余材性均与原结构相同。

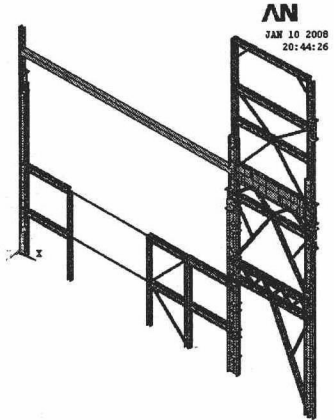


图 3 结构的有限元模型

表 2 BRB 构件截面(单位:  $\text{mm}^2$ )

| 编号 | 截面面积  | 编号 | 截面面积  | 编号 | 截面面积  | 编号 | 截面面积  |
|----|-------|----|-------|----|-------|----|-------|
| 15 | 1327  | 18 | 3181  | 20 | 26271 | 23 | 4471  |
| 16 | 30544 | 19 | 17554 | 22 | 1270  | 24 | 30907 |

3.2 结构的模态分析

两种结构的自振频率列于表 3。图 4a~c、图 4d~f 分别为 SCBF、BRBF 的前三阶振型。

表 3 结构自振频率(单位: Hz)

|      | 一阶频率   | 二阶频率   | 三阶频率   |
|------|--------|--------|--------|
| SCBF | 1.0355 | 2.1141 | 3.1513 |
| BRBF | 0.5645 | 1.2674 | 2.1315 |

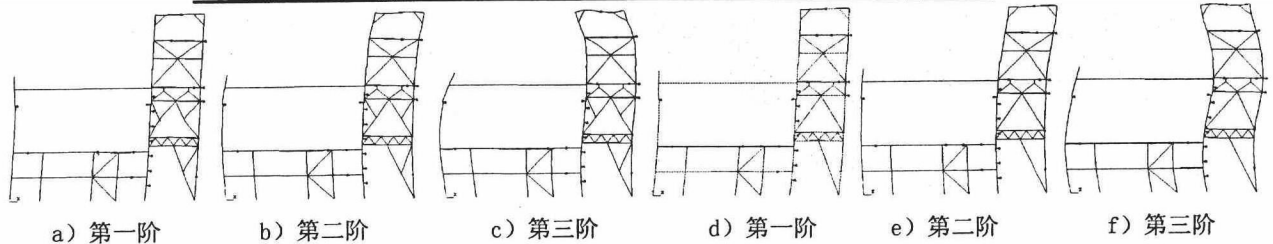


图 4 两种结构的前三阶振型

4 结构的动力反应分析

结构的抗震设防烈度为 8 度, 设计基本地震加速度 0.2g; III 类场地土, 按建筑抗震设计规范<sup>[5]</sup>规定: 弹、塑性时程分析所用加速度时程曲线峰值取 70gal、400gal。根据结构的自振周期, 按建筑工程抗震性态设计通则<sup>[6]</sup>建议, 对特殊中心支撑框架结构选取 El-Centro(1940, El Centro- Imp. Vall. Irr. Dist, El Centro,180)、Cholame Shandon(1966, Cholame Shandon Array 2, Parkfield CA, N65E)加速度记录进行时程分析; 而对防屈曲支撑框架结构选取 El-Centro、Taft(1952, Taft, Kern County, S69E) 加速度记录。此外, 还附加一条人工波输入。为论述方便, 四种波分别简称为 El、Cl、Tf 和 RG 波。加速度峰值 400gal 的 RG 波的时程曲线如图 5 所示。

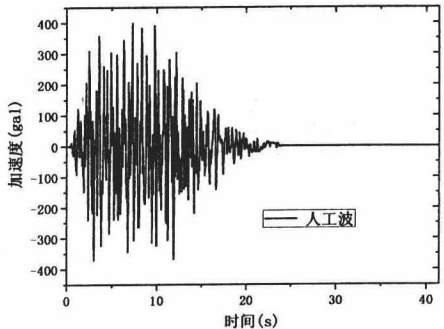


图 5 RG 波的加速度时程曲线

#### 4.1 结构在多遇地震作用下的响应

两种结构在多遇地震下均处于弹性,各地震作用下煤仓间 7 个楼层的层间侧移角包络值如图 6 所示,均满足规范限值<sup>[5,7]</sup>。

#### 4.2 结构在罕遇地震作用下的响应

在罕遇地震作用下,两种结构中的柱子都保持弹性。对应用 SCB 的结构,仅隅撑和汽机房内紧靠煤仓间的二层钢梁在 RG 波作用下局部进入屈服,除此之外,在各地震作用下,多数支撑出现平面外受压失稳且在支撑中部发展了塑性,其余构件均处于弹性;对应用 BRB 的结构,仅隅撑在 Tf 和 RG 波作用下在较短的时刻发展了塑性。除此之外,在各地震作用下,支撑进入屈服耗能,其余构件均处于弹性。

各地震作用下煤仓间 7 个楼层的层间侧移角包络值如图 7 所示,均满足规范限值<sup>[5,7]</sup>。楼层加速度的包络值如图 8 所示。两种结构在相同地震作用(EI 和 RG 波)下结构顶层侧移时程曲线如图 9 所示,顶层加速度的时程曲线如图 10 所示。

与特殊中心支撑框架相比,防屈曲支撑框架的楼层加速度较小,但从第三层起,防屈曲支撑框架的层间侧移较大。这是由于支撑不失稳,其设计承载力仅由强度控制,截面面积较小,使结构的刚度减小,减小了地震作用,但支撑截面面积的减小使结构层间刚度减小,故层间侧移在某时刻较大。

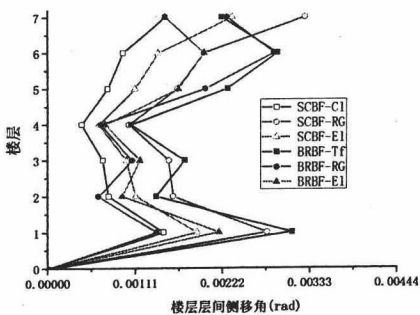


图 6 多遇地震下结构的层间侧移角

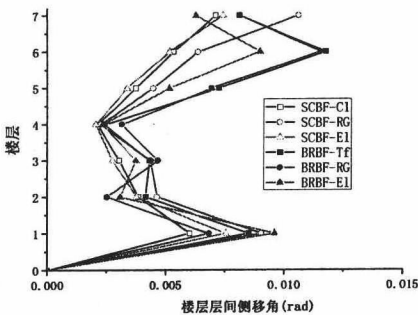


图 7 罕遇地震下结构的层间侧移角

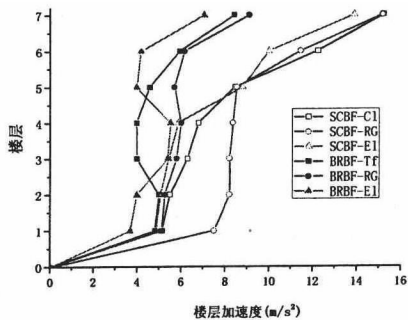
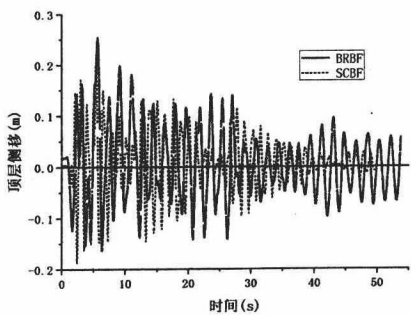
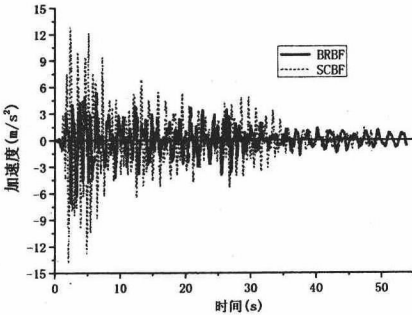


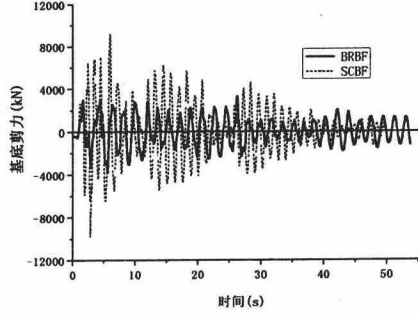
图 8 罕遇地震下结构的楼层加速度



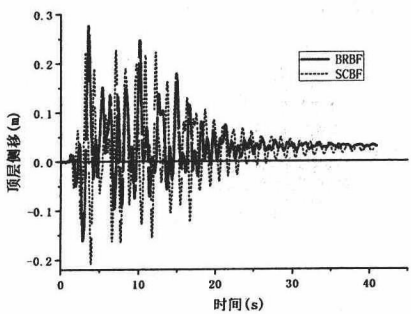
a) EI 波作用下



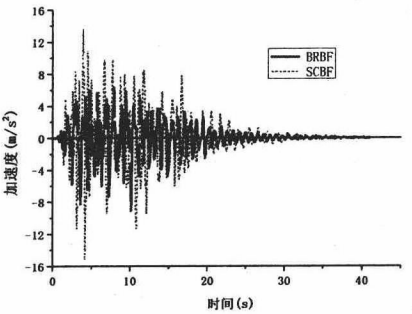
a) EI 波作用下



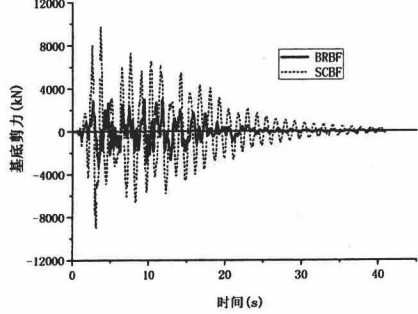
a) EI 波作用下



b) RG 波作用下



b) RG 波作用下



b) RG 波作用下

图 9 结构的顶层侧移时程曲线

图 10 结构的顶层加速度时程曲线

图 11 结构的基底剪力时程曲线

从图 11 所示的结构在罕遇地震作用下的基底总剪力的时程曲线看出,由于 SCBF 支撑截面较大,结构刚度较大,导致其基底剪力大大高于 BRBF 结构。由此看出,采用 BRB 的结构,在满足结构抗震要



求的同时,可节约支撑钢材用量,且降低了基础工程造价。

图 12 为 RG 波(罕遇地震)作用下汽机房内第一层、煤仓间第一层、煤仓间第六层右侧的两种支撑的轴向应力-应变关系曲线。可见,防屈曲支撑的耗能能力优于特殊中心支撑。BRB 的滞回环饱满稳定;SCB 在平面外受压失稳后,循环作用下受压承载力迅速退化,且滞回环面积较小,耗能性能较差。

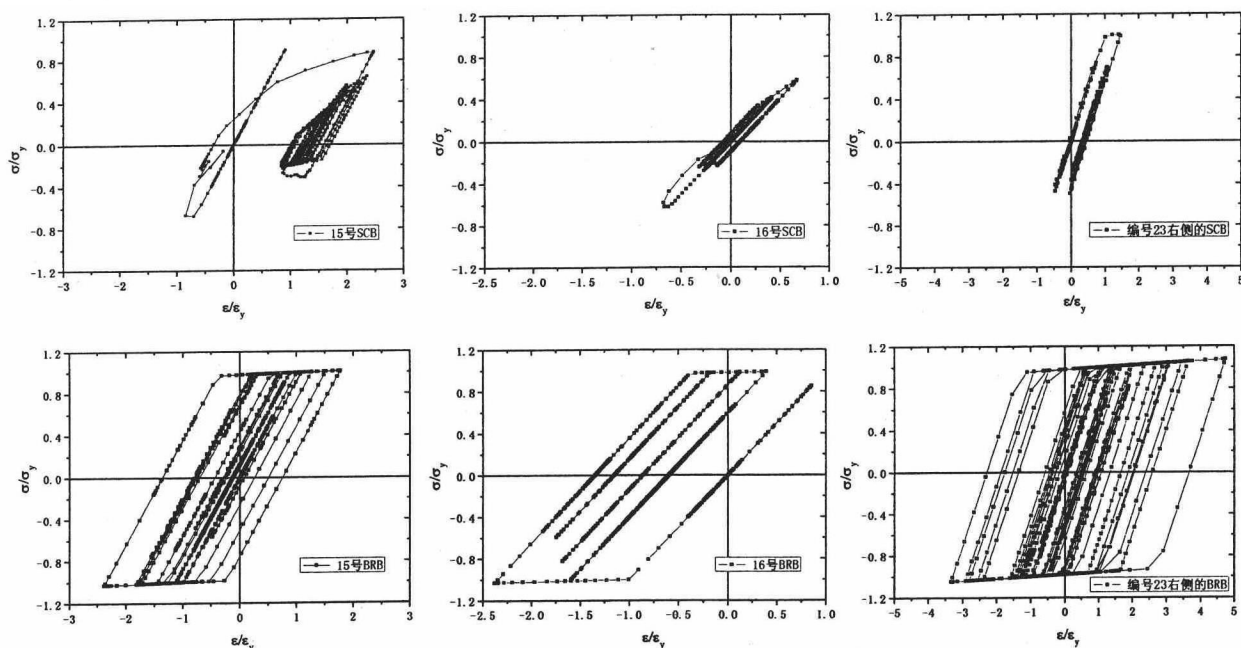


图 12 罕遇地震下支撑的应力-应变曲线

## 5 结论

对支撑分别采用特殊中心支撑和防屈曲支撑的两种结构的抗震性能进行了对比分析,所得结论如下:

1) 两种结构在多遇和罕遇地震下的最大层间侧移角均满足规范限值。应用防屈曲支撑后,结构的楼层侧移和层间侧移角并不一定总小于应用特殊中心支撑的结构,但前者的使用会显著降低结构的楼层加速度及基底剪力。

2) 罕遇地震作用下,结构中的柱子均保持弹性,仅极少数的钢梁发展了塑性,表明结构满足“强柱弱梁”的抗震要求。多数特殊中心支撑发生了平稳外弯曲失稳,并在强振下受压承载力退化严重,耗能能力较小,而防屈曲支撑能够在拉压作用下进入屈服耗能,滞回曲线饱满稳定。总体来讲,两种结构均能满足“大震不倒”的抗震设防目标。

3) 应用防屈曲支撑的结构,支撑的截面较小,相对于纯钢支撑可以节约钢材。同时,结构的刚度较小,承受的地震作用较小,可节约附属构件和基础工程的造价。但 BRB 的制作较复杂且成本甚高,远贵于同种钢材的价格。

## 参考文献

- [1] American Institute of Steel Construction (AISC), Seismic provisions of structural steel buildings[S]. Chicago: AISC, 2005.
- [2] 张耀春, 连尉安, 张文元. 焊接工字型截面钢支撑低周疲劳性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2005,26(6):114-121.
- [3] 丁玉坤, 张耀春. 不失稳支撑及不失稳支撑框架结构研究现状[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007,39(4):514-520.
- [4] DL5022-93 火力发电厂土建结构设计技术规定[S].
- [5] GB50011-2001 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
- [6] CECS 160:2004 建筑工程抗震性态设计通则(试用)[S]. 北京: 中国计划出版社, 2004.
- [7] JGJ99-98 高层民用建筑钢结构技术规程[S].