

第22届
全国结构工程学术会议
论文集

第Ⅲ册

PROCEEDINGS OF THE TWENTY-SECOND
NATIONAL CONFERENCE ON STRUCTURAL
ENGINEERING

No. III

主编：陆新征

《工程力学》杂志社
2013.8

CSTAM2013-P28

郑重声明

全国结构工程学术会议每年召开一届，并出版论文集属内部学术交流资料。为了扩大影响，确保作者论文能够得到广泛交流和宣传，便于同行学者及有关部门随时查阅、检索和引用，论文组织委员会每届均作如下的承诺和声明：

1. 会议论文集向全国 70 多个省市（包括港澳台地区）200 多所高等学校图书馆和情报部门免费赠送，总数有 300 多套
2. 为了扩大学术交流，会议论文集被中国有关信息部门及学术期刊光盘版收录。
3. 会议严格执行文责自负的原则。关于涉及保密问题及有关抄袭等学术不端行为，均由作者本人负责。

序

一年一度的全国结构工程学术会议去年在沈阳渡过了它 21 岁生日后，今年在新疆乌鲁木齐召开了第 22 届全国结构工程学术会议。

新疆地域广袤、物产丰富、风景壮丽，是我国面积最大、陆地边境线最长、毗邻国家最多的省区，是我国西部大开发的重要阵地。

乌鲁木齐是一个具有悠久历史的西域名城，远在新石器时代人类就在这里生息繁衍，唐代曾在乌鲁木齐周边设置轮台县，“轮台”也成为众多诗人吟咏广袤西域的代称。岑参、陆游等都曾留下过著名诗篇。清乾隆年代后，乌鲁木齐成为“繁华富庶，甲于关外”的城市。如今的乌鲁木齐，是全疆政治、经济、文化的中心，是中国西部对外开放的重要门户，新欧亚大陆桥中国西段的桥头堡，地处亚洲大陆地理中心，是欧亚大陆中部重要的都市。

今年会议的东道主新疆大学其前身是创办于 1924 年的新疆俄文法政专门学校。1935 年 1 月改建为新疆学院，1960 年 10 月 1 日，正式成立新疆大学，1978 年被国务院确定为新疆唯一的全国重点大学，1997 年被列入国家“211 工程”重点建设高校，2000 年被确定为国家西部大开发重点建设高校。2000 年 12 月 30 日，新疆大学与原新疆工学院合并组建新的新疆大学。2004 年，学校成为新疆维吾尔自治区人民政府、教育部“区部共建”高校。新疆大学学科门类齐全，校园环境优美，是我国西部及中亚地区的重要学术园地。

在中国力学学会结构工程专业委员会、新疆大学、《工程力学》编辑部等单位的共同努力下，本次会议得到了广大与会代表的大力支持。论文集共征集到论文 297 篇，涵盖了包括土木工程、水利工程、机械工程、航空航天工程等诸多领域。相信各位与会代表一定可以在本次会议上得到丰富的收获。

论文集主编 陆新征

陆新征

2013 年 8 月

第 22 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 297 篇，共计 1668 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 册、第 III 册只载本册目录。

第 I 册论文 89 篇（共 572 页），包括特邀报告和两个学科类别：特邀报告；1. 力学分析与计算；2. 公路、铁路、桥梁、水工与港工

第 II 册论文 96 篇（共 532 页），包括四个学科类别：3. 钢筋混凝土结构、材料与构件；4. 钢结构、材料与构件；5. 岩土、地基与基础、隧道及地下结构

第 III 册论文 112 篇（共 564 页），包括三个学科类别：6. 舰船、车辆、机械制造、航空航天结构；7. 抗震、爆炸、冲击、动力与稳定；8. 设计、施工、加固、优化、可靠度及事故分析；9. 新材料、新能源、交叉学科及其他

第 22 届

全国结构工程学术会议

中国 乌鲁木齐
URUMQI CHINA
8. 10 ~ 8. 12 , 2013

主办单位 中国力学学会结构工程专业委员会
新疆大学
中国力学学会《工程力学》编委会
水沙科学与水利水电工程国家重点实验室(清华大学)
土木工程安全与耐久教育部重点实验室(清华大学)
清华大学土木工程系
新疆大学建筑结构抗震与节能重点实验室

学术委员会

主 席 : 袁 驷
委 员 : (按姓氏拼音为序)

阿肯江·托呼提 陈建兵 陈以一 陈永灿 崔京浩 方 秦 龚耀清 桂国庆
海拉提·巴拉提 韩林海 金 峰 李宏男 李 慧 李爱群 李守恒 刘德富 刘宏民
楼梦麟 马伊磊 聂建国 努尔夏提·朱马西 茹继平 石永久 宋二祥 苏先榘 隋允康
孙建恒 王光谦 王怀忠 王进廷 王全凤 王晓纯 魏德敏 于 江 周新刚 张广泰

组织委员会

主 席 : 努尔夏提·朱马西
常务副主席: 韩林海
副 主 席 : 于 江 阿肯江·托呼提
委 员 : (按姓氏拼音为序)

陈建军 陈政清 范 峰 冯 鹏 高 波 郝际平 金学松 李建中 李英民 李正良
李忠献 刘 清 陆新征 罗尧治 秦拥军 沙吾列提·拜开依 孙柏涛 王 健 武 岳
武哲 徐礼华 杨亚政 杨年山 杨蔚彪 阎 石 叶康生 曾 攀 张 鑫 张正威
朱宏平 庄 茁

秘 书 处

秘书长 : 阿肯江·托呼提
副秘书长 : 沙吾列提·拜开依
学术秘书 : 黄丽艳(负责组织论文宣读、排序、分组、评定等学术工作)
秘书组 : (按姓氏拼音为序)

阿布都塞买提·卡力 胡什塔尔·尼亚孜 韩 霞 韩凤霞 何原野 罗光辉 刘 耘
李 玲 秦拥军 温 勇 王 强 王建虎 乌布力艾山 朱景伟 方熙元等教师,
研究生若干

第 22 届全国结构工程学术会议论文集目录

第III册目录

6. 舰船、车辆、机械制造、航空航天结构

典型对接结构疲劳分析研究	陈 莉 常文魁 (001)
精密离心机气浮轴承气膜刚度与承载能力分析	陈大林 吴连军 (005)
非线性颤振系统求解的变分迭代法	陈飞昕 陈衍茂 刘济科 (010)
2024-T351 铝合金搅拌摩擦焊工艺参数优化	陈先民 焦 婷 杨 俊 (014)
FPSO 舷侧结构抗撞性能的解析计算研究	高振国 胡志强 王 革 (021)
多楔带传动中张紧器参数优化算法研究	侯之超 劳耀新 王象武 (028)
基于非线性涡流检测的核电结构材料塑性变形损伤无损评价研究	李云飞 陈振茂 (032)
受损船底板极限强度研究	裴志勇 藤久保昌彦 矢尾哲也 (036)
深水海底管道 J 型铺设的动态分析	沙 勇 周巍伟 李丽玮 曹 静 (042)
汽车后扭力梁工作模态的试验分析	宋立新 侯之超 毛显红 (048)
混合动力客车传动系扭振响应及其影响因素分析	闫明刚 张 勇 侯之超 杨福源 余 平 (053)
铝锂合金与常规铝合金机身壁板静强度性能对比研究	闫文伟 张 侃 (058)
单双机身平流层太阳能无人机结构振动分析	杨 龙 高普云 王定文 (061)
新型材料下的机身壁板结构裂纹扩展特性研究	张 侃 廖江海 魏玉龙 (065)
新结构细节疲劳寿命威布尔分布特征参数估计方法研究	张 茂 薛景川 张 侃 (069)
舰船轴系纵向减振用共振转换器的滤波特性分析	张赣波 赵 耀 胡昌成 (073)
NX/Open 在 CAD/CAPP 集成系统的数据交换	张蔚萍 赵瑛峰 赵晓平 (077)
减振橡胶本构模型建立与参数识别方法	赵永玲 侯之超 (080)
风暴自存工况下自航自升式风电安装船直接强度计算	朱 翔 胡立鹤 唐永生 (084)

7. 抗震、爆炸、冲击、动力与稳定

高烈度区某超限高层建筑减震设计	蔡兹红 李亚明 刘宏欣 施从伟 马泽峰 (092)
聚合物混凝土修补板抗侵彻试验研究	曹 海 张新乐 郭晓辉 冯进技 李砚如 权 威 (097)
高阻尼隔震橡胶支座力学性能试验研究	陈 飞 郭凯敏 高占阳 李洪泉 (102)

SHPB 试验一次冲击中多次加载原因浅析 邓国强 王安宝 周布奎 张 磊 (108)

一种易于震后修复的分灾耗能组合剪力墙抗震性能试验研究.....
.....董宏英 于传鹏 曹万林 刘恒超 张 慧 (112)

落锤冲击作用下丙乳聚合物混凝土韧性试验研究..... 郭晓辉 张新乐 曹 海 冯进技 (119)

城市区域建筑物震害预测剪切层模型及其参数确定方法..... 韩 博 熊 琛 许 镇 陆新征 (123)

基于纤维截面单元评估大震下 RC 框架结构抗整体倒塌能力 韩建平 杨军平 (132)

结构楼面人行舒适度分析研究 胡 凯 瞿 革 倪建公 朱伟华 (139)

四分裂覆冰导线静态气动特性试验研究 黄汉杰 李新民 (147)

高聚物粘结炸药宽温宽应变率下率温等效原理讨论..... 黄西成 陈 刚 魏 强 莫 军 胡文军 (152)

确定基岩地震动包络曲线的设定地震法 黄永林 李金良 蒋 新 张金川 (159)

钢管混凝土拱面内非线性稳定的可靠度分析 蒋 伟 吕大刚 (164)

陶瓷/铝复合装甲抗穿燃弹试验与数值模拟分析 李金涛 何 煌 蔡鹏武 (168)

一种基于差分的子弹提取改进算法 李胜明 陈 斌 曾 勇 (172)

建筑玻璃在爆炸荷载作用下的破坏研究综述 李卫平 柳锦春 (176)

既有大型公共建筑钢筋混凝土框架结构增设粘滞阻尼器计算与试验研究..... 李忠煜 郑 云 惠云玲 (182)

带约束屈曲支撑单层网壳减振的参数影响分析 刘福佳 杨 颢 赵海燕 (186)

某涡轮冷却器压气机轮盘包容性研究 刘璐璐 宣海军 张 娜 洪伟荣 (190)

欧洲规范中列车脱轨撞击临近结构作用研究发展综述..... 刘艳辉 赵世春 叶列平 陆新征 (196)

基于概率密度演化的渡槽结构随机地震反应分析..... 刘章军 邢彦富 万 勇 (200)

地震动强度参数选择的统计方法 吕大刚 于晓辉 储雁涵 (206)

RC 框剪结构强震作用下的抗倒塌性能研究 缪志伟 宋前恩 裘赵云 (210)

基于随机能力谱法的 RC 框架结构抗震可靠度分析 宋鹏彦 吕大刚 (214)

混凝土和钢筋混凝土冲击试验的数值模拟 孙远翔 徐 琳 (218)

钢框架梁-柱子结构抗冲击性能试验研究 王 宁 霍静思 (226)

大跨度斜拉桥地震反应分析 王 奇 谢官模 (230)

地震灾评模拟实战演习效果评估方法 王东明 王明振 陈红富 王 旭 李永佳 (234)

某高层住宅楼结构超限分析 王小波 (242)

某核电站安全壳 1:15 模型振动台试验 王晓磊 侯钢领 吕大刚 (252)

竖向刚度突变结构层间隔震弹塑性动力分析
..... 吴 韬 汪 梅 潘福婷 谢汝强 沈 垚 郑俊勇 熊盼望 (257)

连接 Kelvin 模型的两相邻结构的地震动响应..... 吴巧云 朱宏平 (263)

钢筋混凝土框架结构抗倒塌性能分析 吴文灵 陈征锋 方圣恩 (269)

人行天桥的动力模型设计方法研究 邢英兴 汪大海 管永林 (273)

山区公路桥墩柱基于性能的箍筋优化设计 杨 畅 刘艳辉 余志祥 吴兴祥 (277)

滞回模型修正和地震动特征对 IDA 的影响分析杨 成 康军立 杜 乔 李英民 (282)
 任意超越概率的地震作用确定方法杨 春 (288)
 海峡两岸建筑抗震规范地震作用实例比较翟 栋 高建岭 白玉星 (292)
 白鹤滩水电站左岸边坡抗震分析张伯艳 李德玉 (296)
 内爆炸条件下爆炸波在建筑物内的传播规律研究.....张传爱 方 秦 龚自明 范俊余 (302)
 高轴压比高强混凝土足尺框架柱的应变变化规律.....张国军 刘建新 贾永彬 (308)
 聚合物混凝土梁抗爆性能试验研究张新乐 曹 海 郭晓辉 (312)
 室内燃气爆炸冲击波的特性及传播规律张秀华 王 钧 赵金友 吴燕燕 (317)
 一个用于约束混凝土侵彻问题的空腔膨胀模型甄 明 蒋志刚 (323)
 颗粒阻尼器对高层建筑减振的机理研究周天平 马崇武 慕青松 (328)
 新型压水堆核电厂核岛厂房结构地震反应分析周国良 唐 晖 魏 超 宋辰宁 张郁山 (332)
 考虑转换层位置的高层框架结构地震易损性分析.....周姗姗 张喜德 吕大刚 (338)
 颗粒阻尼器最优填充率的实验研究周天平 马崇武 慕青松 (343)

8. 设计、施工、加固、优化、可靠度及事故分析

基于精细随机有限元模型的隧道衬砌结构体系可靠度研究.....董志君 邢 锋 王卫仑 (347)
 某车间网架局部倒塌事故原因鉴定及修复处理杜延海 袁万胜 (353)
 基于贝叶斯动态模型和非均匀采样的桥梁结构可靠度预测.....樊学平 吕大刚 (357)
 混合增压排气机理研究及结构设计方子帆 肖华攀 吴德新 马振豪 周 刚 何孔德 (363)
 动载下人防地下室结构抗浮设计顾渭建 冯 丽 周淑玲 张 麐 (370)
 新型防撞护栏探索研究胡其高 王 帅 孙 烨 汪庆桃 (374)
 紫金国际商业广场抗震性能设计黄美平 吴敏捷 (379)
 福建省镇(乡)村既有建筑抗震性能缺陷鉴定及推荐加固图法.....江道镨 (385)
 碳纤维增强复合材料螺旋加固短圆木柱轴压性能.....李 浪 董江峰 王清远 侯 敏 (390)
 超高层建筑筒中筒结构体系之探讨李亚明 张 晖 郝安民 (394)
 圆中空夹层钢管自密实混凝土抗弯承载力试验研究.....刘 清 张 栋 陈 波 (399)
 基于混合 Copula 函数的二维串联系统可靠性分析刘月飞 吕大刚 (403)
 某聚合物仓库防火分区性能化设计研究鹿小燕 高建岭 何世钦 杨彦海 (409)
 老旧工业厂房混凝土檩条加固设计研究乔 巍 郭春红 (413)
 某工程地下室外墙加固方案比较分析沈黎元 (417)
 桥梁顶升施工风险评估分析苏俊杰 赵 阳 徐荣桥 (420)
 基于三元区间数的管道蠕变断裂的有限元法覃新川 刘长虹 范 坤 李 超 赖云霄 (425)
 结构劣化对在役桥梁承载力更新的影响王 草 李全旺 李连友 (428)

配筋砌块砌体剪力墙结构在超高层办公建筑中的应用.....王凤来 朱 飞 孙绪杰 (433)

某砖混结构房屋墙体开裂原因分析与处理卫常革 郑 云 李忠煜 陈 煊 (438)

北京四合院现状调查、维修与保护吴婧姝 王立忠 李晓渊 (442)

基于证据理论的施工中人为过失改错效果的评估方法.....谢 楠 李 靖 李建爽 黄绚烨 (447)

顶燃式热风炉炉壳结构优化设计徐善华 姜大龙 宋志顺 (451)

基于旧桥检测数据的桥梁退化模型研究张 龙 李全旺 杨晓刚 (455)

港珠澳工程氯离子侵蚀耐久性质量控制指标研究.....张秦铭 李全旺 李克非 范志宏 (460)

基于随机响应面模型的随机模型修正方法张秋虎 方圣恩 任伟新 (466)

某粮仓倒塌原因分析朱国良 (470)

9. 新材料、新能源、交叉学科及其他

地震灾害预测技术服务系统平台研究陈洪富 孙柏涛 董伟民 钟应子 陈相兆 (473)

高性能水泥基纳米胶凝材料渗透性能及孔径分布试验研究.....高 翔 李庆华 徐世焱 邵 康 安玉鹏 宋炳辰 (479)

基于激光三角变形测量无线传输系统研发与应用.....郭春红 弓俊青 (483)

硅橡胶/丁基橡胶复合泡沫材料的制备及其阻尼性能胡文军 黄西成 罗世凯 许 茂 杜 强 (487)

新型 Tensairity 结构研究进展分析江民书 袁端才 (492)

防水抗裂型隧道防火涂料耐火性能研究廖 聪 季 韬 庄一舟 左国庆 (497)

焊后表面处理对 7050 铝合金搅拌摩擦焊接头力学性能的影响规律研究.....廖江海 杨 俊 (501)

有限高狭长压电体中半无限运动裂纹问题解析解.....刘 萍 袁泽帅 卢子兴 (505)

铝合金薄板(1.8mm) K_R 曲线及 K_C 值测试研究刘秀丽 陈 莉 闫文伟 (509)

GFRP 管抗屈曲加固角钢的力学性能试验研究吕海波 沙吾列提·拜开依 冯 鹏 买尔旦·赛皮丁 张龔华 (514)

万家寨水库库区河道冰凌数学模型研究袁 婧 茅泽育 马 壮 鲍 军 樊 霖 (521)

钢管地聚物再生混凝土短柱轴压荷载作用下的实验研究.....石膏爽 龙 涛 李 浪 王清远 (525)

TLP 张力腿总体强度评估王世圣 谢 彬 谢文会 (534)

线性摩擦焊焊后热处理温度对接头显微组织和疲劳极限的影响规律.....杨 俊 许 飞 (539)

低周反复荷载下木结构梁柱植筋节点的结构性能试验研究.....杨会峰 刘伟庆 时境晶 凌志彬 (544)

松花江流域水生生态特征研究分析袁 婧 茅泽育 (551)

钢管高性能再生混凝土组合梁非线性分析张 旭 秦国鹏 (556)

竹/玻璃钢复合板材抗静荷载试验研究赵 健 周世峰 左社强 钟 兵 (561)

典型对接结构疲劳分析研究

*陈 莉, 常文魁

(中国飞机强度研究所, 陕西, 西安 710065)

摘 要: 本文采用 DFR 法对典型对接结构包括对接部位的 4 个孔边进行了疲劳分析, 给出了相应的 95%可靠度, 95%置信水平下的寿命, 结果表明典型结构中最危险的部位不一定是应力最大部位, 为后续结构危险部位的选取提供借鉴。

关键词: DFR 值; 对接结构; 疲劳分析; 寿命; 危险部位

STUDY ON FATIGUE ANALYSIS OF TYPICAL SPLICES STRUCTURE

*CHEN Li , CHANG Wen-kui

(Aircraft Strength Research Institute of China, Xi'an 710065, China)

Abstract: The four holes of typical splices structure is analyzed used DFR fatigue method in this paper. The four holes are all analyzed .The life under 95% credibility and 95% confidence level is .This showed that the most dangerous part is not always the stress largest part .this make suggestions for the latter research.

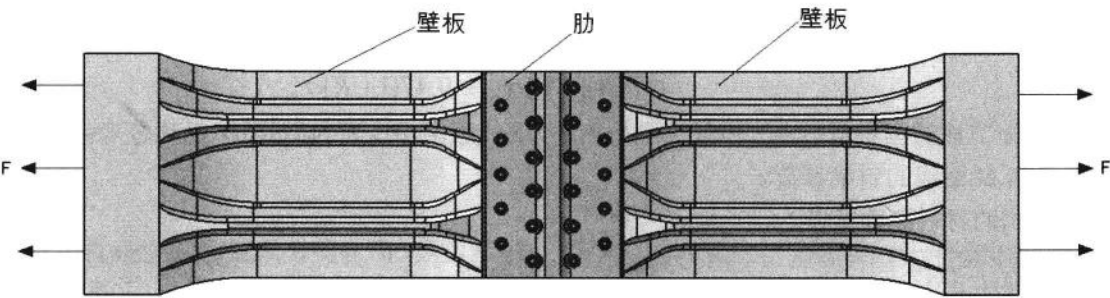
Key words: DFR value; splices structure; fatigue analysis; life; dangerous part

1 引言

在对飞机典型连接结构进行疲劳分析时, 首先要选择危险部位, 通常的做法是选取有限元分析中应力最大的部位, 作为危险部位。但是这样可能导致一些应力不大的部位由于疲劳性能不够好, 反而提前破坏。本文对飞机上的典型对接结构进行了疲劳分析, 分析了连接部位的所有孔边, 得到最危险的部位不是应力最大部位的结论, 为后续的结构分析提供参考。

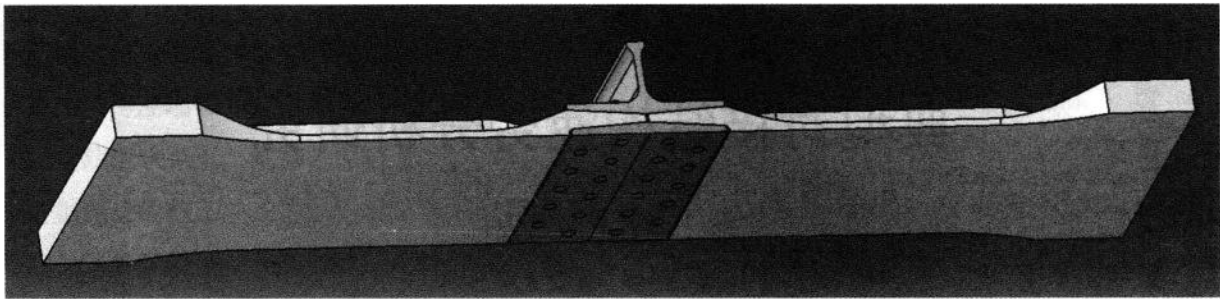
2 结构及分析要求

对接结构见图 1。壁板连接螺栓一边两排, 一排 5 个, 一排 6 个交错排列, 直径为 5/16 英寸。分析载荷谱为等幅谱, $R=0.06$, 最大载荷 $P_{max}=198000N$ 。结构两端夹持在试验机上, 两边对拉加载。



a) 正面

作者简介: *陈 莉(1971), 女, 陕西人, 高级工程师, 主要从事疲劳断裂研究(E-mail: chenli_103@126.com);
常文魁(1981), 男, 河南人, 工程师, 主要从事疲劳断裂研究;



b) 背面

图1 分析结构图

壁板的螺栓孔边为分析部位1和分析部位2，肋的螺栓孔边为分析部位3和分析部位4。对接板与翼肋的受力情况及细节尺寸都一致，因此不再赘述。具体分析部位及细节尺寸见图2。

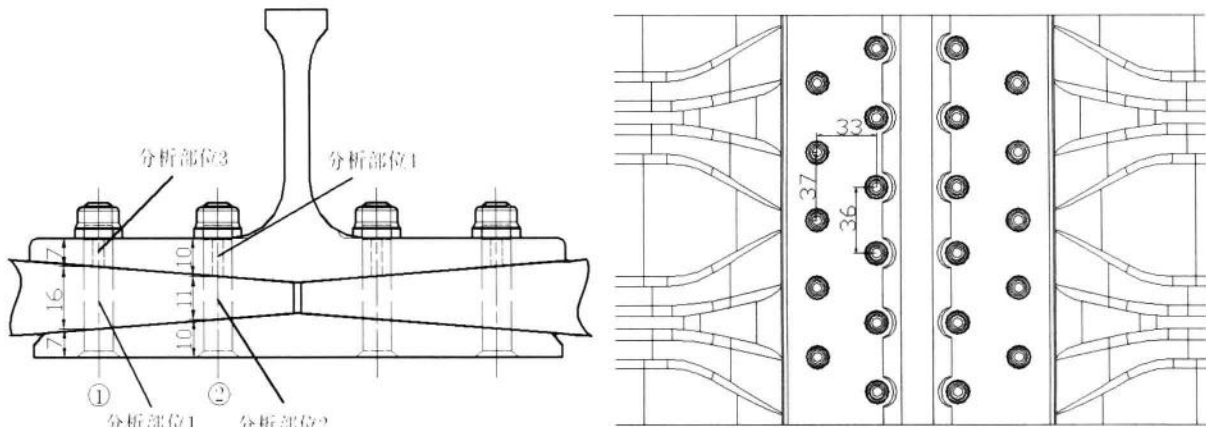


图2 分析部位及连接部位细节尺寸

3 疲劳分析方法简介

疲劳分析采用采用 DFR 方法。分析步骤：

a) 确定分析部位 DFR 值

根据试件结构及受力形式通过查手册及计算的方法获得细节疲劳额定值 DFR^[1]；

b) 确定分析部位应力谱

由于试验载荷为常幅谱，因此可计算出分析部位所在截面的最大名义应力；

c) 计算 95%可靠度 95%置信水平下的裂纹形成寿命 $N_{95/95}$ 。

可以用下面的公式计算 $N_{95/95}$ ^[2]：

$$N_{95/95} = 10^{(5 - \log Z / \log S_p)} \tag{1}$$

$$Z = \frac{(1 - R)[\sigma_{m0} - 0.53(DFR)]\sigma_{\max}}{(DFR)[0.94\sigma_{m0} - 0.47(1 + R)\sigma_{\max}]} \tag{2}$$

式中：DFR 为细节疲劳额定值； $\sigma_{\max}$ 为最大应力；R 为应力比； σ_{m0} 为 $N_{95/95}=10^5$ 循环等寿命线与 σ_m 轴的交点值； S_p 为 S-N 曲线的斜率参数。

分析中用到的材料参数见表 1。

表 1 材料参数

材料	E/MPa	μ	σ_{m0} /MPa	S_p	威布尔分布的形状参数 α
2024-T351	73776.5	0.33	310	2.0	4.0
7050-T7451	71018.5	0.33	310	2.0	4.0

4 分析部位的疲劳分析

4.1 壁板螺栓孔边疲劳分析

4.1.1 壁板螺栓孔边 DFR 分析模型的选取

针对结构及受载形式(见图 1), 壁板螺栓孔边的 DFR 可按双剪接头(插入件)来计算, 其计算公式如下:

$$DFR = DFR_{base} \cdot A \cdot B \cdot C \cdot D \cdot E \cdot U \cdot R_C \quad (3)$$

对铝合金(材料为: 2024-T351):

$$DFR_{base} = 121 \times 1.0 \times \psi \quad (4)$$

对于螺接结构载荷传递系数 ψ 可用下式计算:

$$\psi = 0.89 - 0.52 \lg \left(\frac{\sigma_{br}}{\sigma_g} \cdot \frac{t}{d} \right) = 0.89 - 0.52 \lg \left(\frac{R_1}{P} \cdot \frac{S}{d} \cdot \frac{t}{d} \right) (\psi > 1 \text{取} 1) \quad (5)$$

式中: σ_{br} 为钉孔挤压应力; σ_g 为参考应力; R_1 为端部一排危险紧固件载荷之和; S 为端部一排危险紧固件的间距; d 为端部一排危险紧固件的平均直径; t 为端部一排危险紧固件处的板厚度; P 为总载荷。

4.1.2 紧固件处载荷

根据参考文献[1]对本试件这样的准双面搭接连接件, 按图 3 的所示的双面搭接件计算其紧固件处载荷 R_1 和 R_2 (详见图 2)。

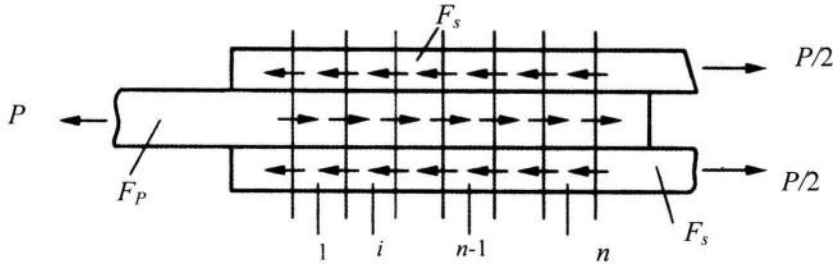


图 3 双面搭接件

本结构为双排钉, 因此有^[1]:

$$\begin{cases} R_1 = R_2 \left(1 + \frac{2F_p + F_s}{F_e} \right) - \frac{F_s}{F_e} P \\ R_2 = R_1 \left(1 + \frac{2F_p + F_s}{F_e} \right) - \frac{2F_p}{F_e} P \end{cases} \quad (6)$$

式中: F_s 为带板(上、下侧板)的柔度系数; F_p 为基板(中板)的柔度系数; F_e 为紧固件弹性柔度系数。

对于带板及基板的柔度系数可用公式(7)和公式(8)求得(对于斜削状或台阶状, 其厚度取最边两个紧固件间板的平均厚度):

$$F_s = \frac{S_1}{W_s t_s E_s} \quad (7)$$

$$F_p = \frac{S_1}{W_p t_p E_p} \quad (8)$$

式中: S_1 为紧固件的间距(载荷方向); W_s 为带板(上、下侧板)的宽度; t_s 为带板(上、下侧板)的厚度; E_s 为带板(上、下侧板)的弹性模量; W_p 为基板(中板)的宽度; t_p 为基板(中板)的厚度; E_p 为基板(中板)的弹性模量。

4.1.3 双面搭接件的紧固件柔度系数 F_e

对于双剪连接件, 其连接板均为铝合金材料时, 可按下式确定其紧固件的弹性柔度系数 F_e :

$$F_e = \frac{K_{dc}}{t_p E} \left(\frac{t_s}{t_p} \right)^{\lg \left(\frac{9.6-0.4d}{51-4.37d} \right)} \times (9.6-0.4d) \quad (9)$$

式中: E 为板弹性模量; K_{dc} 为紧固件材料修正系数。

4.1.4 构件疲劳额定值系数 R_C 的计算

一个构件包含相同危险细节的数目越多, 含有质量较差的危险细节的可能性就越大, 出现裂纹的概率越高, 疲劳寿命越短。用结构疲劳额定值系数(R_C)来反映这种影响结果。

构件疲劳额定值系数 R_C 的计算公式如下:

$$R_c = \left(\frac{250}{n} \right)^{\frac{\lg S_p}{\alpha}} \quad (10)$$

式中: α 为威布尔分布的形状参数; n 为相同危险细节数。

4.1.5 分析部位应力谱的确定

由于结构为受拉结构, 载荷谱为常幅谱, 应力比 $R=0.06$, 最大名义应力可按如下方法取值:

$$\sigma_{\max} = \frac{P}{A} \quad (11)$$

式中: A 为分析部位截面面积。

4.2 肋和对接板螺栓孔边疲劳分析

由于肋和对接板在分析部位细节尺寸基本一样(只差 0.1mm)。因此只对肋的螺栓孔边进行分析。

针对试件结构及受载形式(见图 1), 壁板螺栓孔边的 DFR 可按双剪接头(被插入件)来计算, 其计算公式与公式(3)和公式(4)相同。

对于螺接结构载荷传递系数 ψ 可用下式计算:

$$\psi = 0.735 - 0.515 \lg \left(\frac{\sigma_{br}}{\sigma_g} \cdot \frac{t}{d} \right) = 0.735 - 0.515 \lg \left(\frac{R_l}{P} \cdot \frac{S}{d} \cdot \frac{t}{d} \right) (\psi > 1 \text{ 取 } 1) \quad (12)$$

式中符号意义同前。端部危险紧固件载荷 R_l 和紧固件柔度系数 F_e 的计算方法同前。

4.3 本结构的实际分析

对壁板螺栓孔边和肋螺栓孔边分析的计算结果见表 2。

表 2 计算结果

变量	分析部位 1	分析部位 2	分析部位 3	分析部位 4
DFR/MPa	76.82	90.01	61.17	53.50
$\sigma_{\max}$ /MPa	55.25	40.02	31.7	44.20
$N_{95/95}$ /循环次数	281454	1659092	878315	165217

5 结论

通过上述分析可知, 虽然分析部位 1 的应力最大, 但其反而不是最危险的, 最危险的部位为分析部位 4(即肋或对接板的第二排 6 个钉的孔边)。

参考文献:

- [1] 《民机结构耐久性与损伤容限设计手册》编委会, 民机结构耐久性与损伤容限设计手册[M], 航空工业出版社, 2003。
- [2] 航空航天工业部科学技术研究院, 飞机结构耐久性及损伤容限设计手册[M], 西安: 西安飞机工业公司工程发展部, 1989。
- [3] 刘雪惠、汤龙华、肖寿庭编著, 工程实用飞机结构应力分析方法[M], 中国航空工业总公司《AFFD》系统工程, 1994.5。
- [4] 《军用飞机结构耐久性/损伤容限分析和设计指南》[M], 中国飞机强度研究所, 2005。
- [5] 螺栓和耳片强度分析手册[M], 航空航天部《AFFD》系统工程办公室, 1998。

精密离心机气浮轴承气膜刚度与承载能力分析

*陈大林, 吴连军

(中国工程物理研究院总体工程研究所, 四川, 绵阳, 621900)

摘 要: 采用解析方法推导了气浮轴承流场压力和气浮轴承承载能力表达式, 采用数值方法计算了气浮轴承承载能力、气膜刚度与轴承偏心率和气膜间隙之间的关系, 结果表明: 静压气浮轴承径向承载能力在没有偏心情况下, 不具备承载能力, 随偏心率的增大其承载能力呈线性增大; 径向气膜刚度随偏心率的增大略有减小, 在没有偏心情况时气膜刚度最大; 径向气膜刚度和承载能力随气膜间隙的减小而减小, 径向承载能力、气膜刚度都随气源压力的增大而增大。

关键词: 气膜刚度; 偏心率; 承载能力

1 引言

精密离心机是标定加速度计在各种载荷条件下输出性能的大型高精度测试设备, 它的研制成功将对我国惯性导航仪表的精度以及战略导弹命中精度的提高起到重要的作用^[1]。精密离心机静压气体轴承是保障其工作精度的关键部件, 旋转主轴轴线的平移会造成和旋转大臂伸长的同一误差效果; 轴线的倾斜则会完全反映在被测试的角位移中。刚度不高的气浮轴承在高速旋转时还会因离心力而造成运动速度的不平稳性, 转速的微小扰动可激发轴承自激振动, 从而影响测试精度。静压气浮轴承的计算是个十分复杂的问题, 目前, 气浮轴承的计算方法主要有有限元方法和解析方法两类^[2]。两种方法的共同点: 将工作气体均假设为层流状态的牛顿流体, 在气膜厚度方向, 压力梯度为零; 计算控制方程均为等温气体条件下的雷诺方程式, 忽略了气体的惯性力和体积力。两种方法的不同点是: 工程解析方法的做法是将轴承沿一条轴线剪开, 将轴承展开成一平面, 将该平面等分成 n 等分(n 等于节流孔数目), 假设任意两个节流孔之间无气体流动, 气体自小孔流出后, 立即充满该等分的全宽度, 使气体在每一等分内呈一维流动, 每等分内两节流孔间压力相等。气体无环向流动, 只沿平行于轴向方向流动, 其压力由节流孔后压力降至端面环境压力; 有限元方法则没有上面这些假设, 但如果考虑气膜厚度, 则因为气膜厚度为微米量级, 而结构几何尺寸为米量级, 将是一个跨尺度问题, 目前, 工程上尚没有太好的解决方法。综合上述两类方法的优缺点, 本文选择用工程解析方法对气浮轴承进行计算。

2 控制方程

考虑如图 1 所示气浮轴承, 气流由节流孔流入气膜间隙为 h_0 的气膜间隙中, 从轴承两端以环境压力 p_a 流出, 考虑到气膜厚度远小于轴承半径($h \ll R$), 因而可略去圆柱表面曲率的影响, 可沿任意轴线将其展开成平面。将展开的平面按节流孔数目在圆周方向分成 n 等分, 每等分宽度 $b = 2\pi R / n$ 。假设气膜厚度在每一等分中为常数, 大小等于节流孔处气膜厚度。假设轴套与轴承的偏心为 e , 定义 $\varepsilon = e / h_0$ 为偏心率, α_i 为每等分中心线与基准线(舵面轴线)的夹角, h_i 为第 i 等分的气膜厚度, 则有:

$$h_i = h_0(1 - \varepsilon \cos \alpha_i) \quad (1)$$

假设任意两节流孔之间无气体流动, 气体自小孔流出后, 立即充满该等分的全宽度; 每等分内两节流孔间压力相等, 其值为该等分节流孔后压力 p_{di} ; 气体无环向流动, 只沿轴向流动, 其压力由节流孔后压

作者简介: *陈大林(1975—), 男, 四川人, 副研究员, 博士, 主要从事流固耦合分析工作(Email: dalinchen2003@yahoo.com.cn);

吴连军(1965—), 男, 四川人, 工程师, 主要从事工程结构动力学分析与试验研究工作。

力降至排气处的环境压力 p_a 。按此假设，只需研究每个等分中从节流孔到排气处一段的压力分布，就能知道整个轴承的压力分布情况。第 i 等分从节流孔到排气处气体流向与压力分布如图 2 所示。

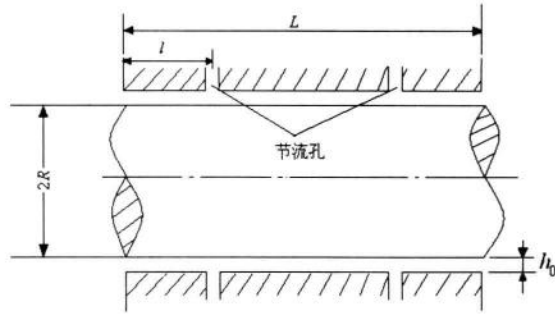


图1 气浮轴承结构简图

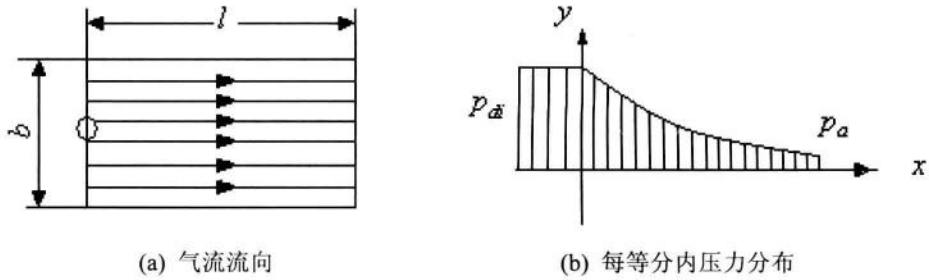


图2 第 i 等分内从节流孔到排气处气流流向和压力分布

假设气流流动为无惯性的稳态流动，粘性系数 η 为常值，气体流动运动方程可写为^[3]：

$$\begin{cases} \frac{\partial p}{\partial x} = \eta \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \\ \frac{\partial p}{\partial y} = 0 \\ \frac{\partial p}{\partial z} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

气体为等温层流流动的状态方程为：

$$\frac{p}{\rho} = \frac{p_a}{\rho_a} \quad (3)$$

质量连续性方程^[4]：

$$m_i = \frac{2\pi R}{n} \int_0^{h_i} \rho u dy \quad (4)$$

根据文献^[5]单个节流孔质量流量方程可写为：

$$m_i = \phi A p_0 \psi \sqrt{\frac{2\rho_a}{p_a}} \quad (5)$$

式(5)中 p_0 为气源压力， ψ 为流量函数，参见文献^[1]可写为：

$$\psi = \begin{cases} \left[\frac{k}{k-1} (\beta_i^{2/k} - \beta_i^{(k+1)/k}) \right]^{1/2} & \beta_i > \beta_k \\ \frac{k}{2} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{(k+1)/(k-1)} & \beta_i \leq \beta_k \end{cases}, \quad \beta_i = p_{di} / p_0, \quad \beta_k = 0.528$$

由方程(2)第一式两次对 y 积分，并利用边界条件 $y=0$ 及 $y=h_i$ 处， $u=0$ 可以求得：

$$u = -\frac{1}{2\eta} \frac{dp}{dx} y(h_i - y) \quad (6)$$

将(6)式代入方程(4)中，积分后得：

$$m_i = \frac{\pi R \rho h_i^3}{6n} \frac{dp}{dx} \quad (7)$$

将(7)式进行分离变量，对 x 从 0 到 x 积分，对 p 从 p_{di} 至 p 积分有：

$$p^2 - p_{di}^2 = -\frac{12n\eta m_i p_a}{\pi R h_i^3 \rho_a} x \quad (8)$$

当 $x = l$ 时， $p = p_a$ ，则(8)式成为：

$$p_{di}^2 - p_a^2 = \frac{12n\eta m_i p_a}{\pi R h_i^3 \rho_a} l \quad (9)$$

为求得气体压力的合力，考察如图 3 所示的第 i 等分弧长，其上作用的气体压力沿弧 ab 的法向方向，因此单位轴向长度的合力在该等分中点沿半径方向的投影为：

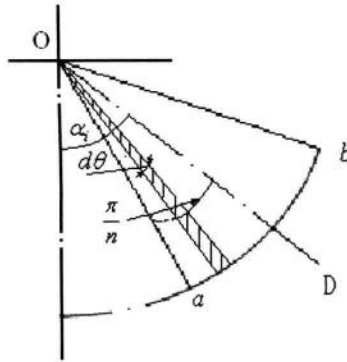


图 3 第 i 等分弧长

$$F_i = 2R \int_0^{\pi/n} p \cos \theta d\theta = 2Rp \sin(\pi/n) \quad (10)$$

结合图(3)的压力分布假设，第 i 等分弧长总合力在该等分中点沿半径方向的投影为：

$$F_{is} = 2p_{di}(L - 2l)R \sin(\pi/n) + 2 \int_0^l 2Rp \sin(\pi/n) dx \quad (11)$$

这个合力的方向与过该等分中点的半径重合，与基准线的夹角为 $\alpha_i (i=1, 2, \dots, L/n)$ ，若将每个等分上的力投影到基准线方向上，便得到气浮轴承的承载能力：

$$W = 2R \sin(\pi/n) \sum_{i=1}^n \left[p_{di}(L - 2l) + 2 \int_0^l p dx \right] \cos \alpha_i \quad (12)$$

为积分上式，必先求出压力 p 的表达式，图 2 中长为 l 段的压力表达式可用(9)式除以(8)式，经整理得到：

$$p = \left[p_{di}^2 - (p_{di}^2 - p_a^2) x / l \right]^{1/2} \quad (13)$$

将式(13)代入式(12)中，积分后得：

$$W = 2R \sin(\pi/n) \sum_{i=1}^n p_{di} \left[(L - 2l) + \frac{4l}{3} \frac{1 - \left(\frac{\sigma}{\beta_i} \right)^3}{1 - \left(\frac{\sigma}{\beta_i} \right)^2} \right] \cos \alpha_i \quad (14)$$

其中： $\sigma = p_a / p_0$ 。

式(14)中只需求出各等分中的 β_i 即可求出承载能力 W 及承载能力 W ，先以 p_0^2 除式(9)左右两端，再利用式(5)消去 m_i ，可得到 β_i 的表达式为：

$$\frac{\beta_i^2 - \sigma^2}{\sigma\psi} = \frac{12\eta\phi Anl_1}{\pi Rh_i^3} \sqrt{\frac{2}{p_a \rho_a}} \quad (15)$$

方程(15)是关于 β_i 的非线性关系式，可采用数值方法进行求解， β_i 求出后，即可求出 p_{di} ，然后通过式(14)即可求出气浮轴承的承载能力，气膜刚度采用差分方法求解，如对应于偏心 e 的刚度可写为：

$$K_w = \frac{W(e + \Delta e) - W(e)}{\Delta e} = \frac{\Delta W}{\Delta e} \quad (16)$$

3 算列分析

假设离心机工作在常温环境下，环境压力 $p_a = 101325$ 帕，气浮轴承结构参数 $L = 130\text{mm}$ ， $R = 150\text{mm}$ ， $l = 18\text{mm}$ ，节流孔直径 $d = 3\mu\text{m}$ ，气膜厚度 $h_0 = 10\mu\text{m}$ ， p_0 为气源供气压力。通过数值计算可绘出承载能力、刚度、偏心率、气源压力以及气膜厚度关系曲线。

图 4 为气膜厚度为 $10\mu\text{m}$ 情况下承载能力、气膜刚度与偏心率关系曲线，可知：气浮轴承在偏心率为零，即没有偏心情况下，气浮轴承径向是不具备承载能力的，气膜刚度此时最大；随偏心率的增大，承载能力基本上呈线性增大，气膜刚度略有降低，但降低幅度不大；三种不同气源压力下，气源压力越大，气浮轴承承载能力和气膜刚度越大。

图 5 为偏心率为零时气膜刚度与气膜间隙关系曲线，由图可知：气膜刚度随气膜间隙的增大而减小，间隙较小时减小速度越快，随间隙的增大气膜刚度减小越慢，最后趋于平缓；四种不同气源压力下，气源压力越大，气膜刚度也越大。

图 6 为偏心率 $\varepsilon = 0.3$ 时气浮轴承径向承载能力与气膜间隙关系曲线，由图可知：轴承径向承载能力随气膜间隙的增大而减小，随气源压力的增大而增大。

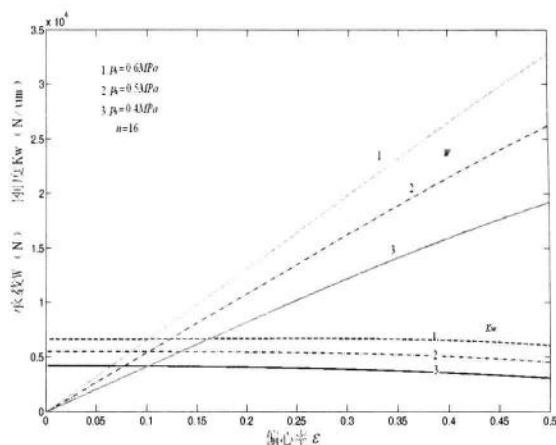


图 4 承载能力、刚度与偏心率关系曲线

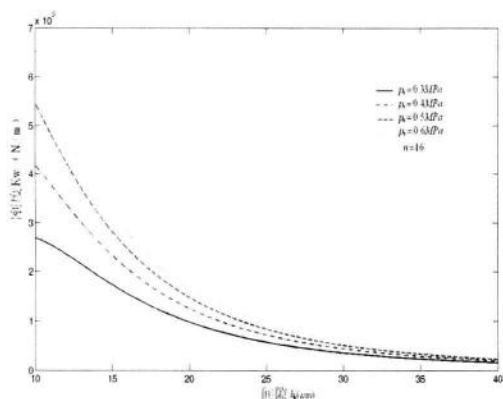


图 5 刚度与间隙关系曲线

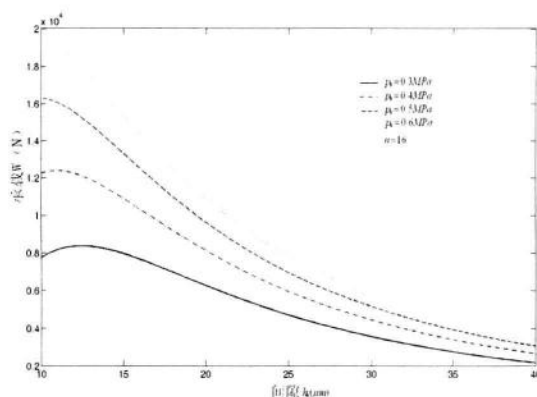


图 6 承载能力与间隙关系曲线