

曲轴再制造毛坯连杆轴颈表面损伤对 剩余疲劳寿命的影响 *

薛楠^{1,2}, 董丽虹², 徐滨士², 王慧鹏², 董世运²

(1. 北京理工大学 机械与车辆学院, 北京 100081; 2. 装甲兵工程学院 再制造技术重点实验室, 北京 100072)

摘 要: 为研究曲轴连杆轴颈表面损伤与曲轴再制造毛坯剩余疲劳寿命的相关性, 基于有限元仿真计算获得的曲轴过渡圆角应力分布结果, 选取含表面自然缺陷和人工预制缺陷的废旧曲轴, 在谐振式弯曲疲劳试验台上进行曲轴弯曲疲劳试验。采用金相显微镜和扫描电镜观察疲劳断口处的组织和形貌, 分析讨论表面缺陷对剩余疲劳寿命的影响。研究结果表明: 废旧曲轴剩余疲劳寿命对于缺陷位置的敏感程度高于缺陷尺寸, 连杆轴颈表面氮化层的剥落造成废旧曲轴剩余疲劳寿命显著降低。

关键词: 表面缺陷; 连杆轴颈; 曲轴再制造毛坯; 剩余疲劳寿命

中图分类号: TH17 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9289(2012)04-0021-06

Influence of Surface Defect of Crankpin for Crankshaft Remanufacturing Core on Remaining Fatigue Life

XUE Nan^{1,2}, DONG Li-hong², XU Bin-shi², WANG Hui-peng², DONG Shi-yun²

(1. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 10081; 2. Science and Technology on Remanufacturing Laboratory, Academy of Armored Forces Engineering, Beijing 10072)

Abstract: In order to investigate the correlation between surface damage of crankpin and remaining fatigue life of the crankshaft remanufacturing core, the result of stress distribution on crankpin fillets was obtained based on calculation of finite element method and wasted crankshafts with natural surface defect. Precut surface defects were selected to conduct bending fatigue test on the resonant fatigue test rig. Microstructure and morphology of fatigue fracture were observed by metallographic microscope and scanning electron microscope. The influence of surface defects for remaining fatigue life was analyzed. The results showed that defect position is more sensitive to remaining fatigue life than defect size of the wasted crankshaft and remaining fatigue life of the wasted crankshaft decrease significantly due to peeling of the surface nitrided layer.

Key words: surface defect; crankpin; crankshaft remanufacturing core; remaining fatigue life

0 引 言

再制造工程是废旧机电产品高技术维修的产业化, 其重要特征是再制造产品质量性能不低于新品。再制造是解决我国资源能源短缺的重

要途径, 能够为循环经济提供关键技术支撑, 是当今最具发展前景的技术领域之一^[1]。

汽车零部件再制造是我国最早开始探索再制造关键技术的试点行业之一。发动机是汽车的心脏, 曲轴是发动机的关键零件, 制造工艺复杂, 成本

收稿日期: 2012-07-05; **修回日期:** 2012-07-10; **基金项目:** * 国家自然科学基金面上项目(50975283); 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2011CB013401)

作者简介: 薛楠(1981-), 男(汉), 山西河津人, 博士生; **研究方向:** 无损检测技术

网络出版日期: 2012-07-10 14:55; **网络出版地址:** <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20120710.1455.002.html>

引文格式: 薛楠, 董丽虹, 徐滨士, 等. 曲轴再制造毛坯连杆轴颈表面损伤对剩余疲劳寿命的影响 [J]. 中国表面工程, 2012, 25(4): 21-26.

昂贵。开展发动机曲轴再制造技术研究,对推动再制造产业发展具有典型意义和示范价值^[2]。

废旧曲轴是再制造的生产对象,是经历长期服役而报废的成型零件。在使用过程中,曲轴可能产生多种形式的损伤,如磨损、变形、裂纹等。为保证再制造后曲轴的质量性能不低于新品,对再制造毛坯必须实施严格的质量控制。再制造前首先需要准确评估废旧曲轴的剩余寿命,剔除那些寿命储备短、不具备再制造价值的废旧曲轴,确保再制造曲轴能够承担下一轮服役要求。因此废旧曲轴的剩余寿命评估是曲轴能否再制造的前提^[3]。

由于废旧曲轴的服役历史的不确定性、损伤形式的复杂性、随机性和个体差异性,准确评估其剩余寿命非常困难。废旧曲轴最为常见的失效形式是连杆轴颈磨损超差,最为危险的失效形式是连杆轴颈表面产生疲劳裂纹^[4]。目前再制造企业仅采用磁粉探伤方法排查连杆轴颈表面有无疲劳裂纹,以此作为能否再制造的依据。有裂纹则报废,无裂纹则进行再制造。

虽未发现疲劳裂纹的废旧曲轴,连杆轴颈表面仍存在不同程度的损伤,尤其是轴颈表面强化层的破损对废旧曲轴剩余疲劳寿命的影响,目前尚无研究。这可能造成再制造曲轴的质量隐患。

文中基于有限元仿真计算曲轴工况下的应力分布,进行含不同表面损伤的曲拐的弯曲疲劳试验,研究连杆轴颈过渡圆角自然缺陷和预制缺陷对废旧曲轴剩余疲劳寿命的影响。

1 单曲拐模型静力分析

1.1 有限元模型的建立、简化及单元划分

曲轴有限元结构分析的第一步是建立几何模型。多缸曲轴结构复杂,单元数多,计算量大,选取曲轴单拐进行建模。由于主要分析连杆轴颈过渡圆角处的应力集中效应,建模时忽略油道孔。文中针对中国重汽生产的斯太尔 WD615.68 系列曲轴容易发生疲劳破坏的第四曲拐进行计算,曲轴材料特性如表 1 所示。

表 1 曲轴材料特性^[5]

Table 1 Crankshaft material mechanical properties ^[5]				
Material	Density/ (g · cm ⁻³)	Elasticity modulus/ GPa	Poisson's ratio	Yield strength/ MPa
42CrMo	7.8	220	0.3	680

在软件 SolidWorks 中对试验曲轴第四曲拐进行实体建模,并将模型导入有限元分析软件 ANSYS 中进行自由网格划分,试验曲轴第四曲拐三维网格模型如图 1。

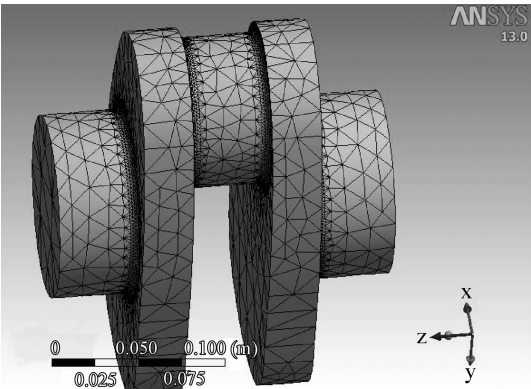


图 1 第四曲拐有限元模型

Fig. 1 Finite element model of fourth crankpin

1.2 曲轴单拐模型边界条件的施加

在曲轴的计算中,边界条件可分为两大类:载荷边界条件和约束边界条件。曲轴弯曲疲劳试验是考核曲轴单曲拐在承受汽缸最大爆发压力时的疲劳强度,即活塞运动到下止点位置,根据该时刻载荷和约束状态进行边界条件施加。

1.2.1 载荷边界条件

根据内燃机设计理论及有限宽度轴颈油膜应力分布规律并忽略油孔处压力峰值突变的影响^[6],曲轴所承受的气体压力作用于曲轴连杆轴颈时的面力分布规律为:汽缸爆发压力沿连杆轴颈按二次抛物线规律分布;沿连杆轴颈圆周方向 120°角范围内按余弦规律分布^[6](图 2)。

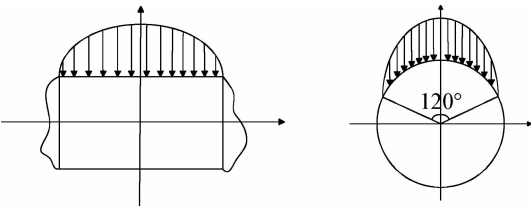


图 2 载荷边界条件

Fig. 2 Boundary conditions of load

1.2.2 约束边界条件

考虑到发动机机体对曲轴的约束情况较为复杂,文中采用在曲轴主轴颈上直接施加约束的简化边界处理方法:约束右端主轴颈 X、Y 和 Z 向位移,约束左端主轴颈 X 和 Y 向位移(图 3)。

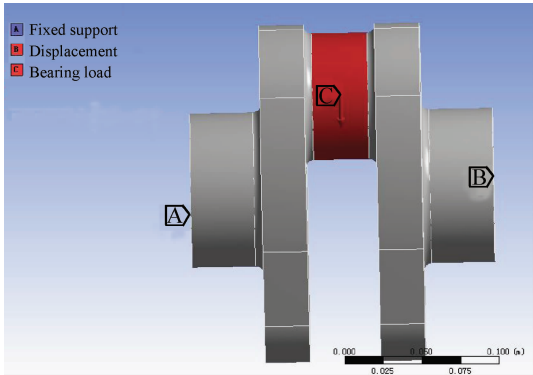


图 3 约束边界条件
Fig. 3 Boundary constraint condition

根据 AVL(李斯特内燃机测试)的设计实践,一般采用安全系数来评价曲轴的强度,即圆角疲劳强度与应力幅之比^[7]。文中采用新品斯太尔曲轴的安全系数 1.8(50%存活率)来评价试验曲轴的强度,图 4 给出了 1.8 倍爆发压力作用下,试验曲轴第四曲拐最大主应力分布云图。

从图 4 中可以看出,1.8 倍爆发压力作用下,试验曲轴第四曲拐过渡圆角下止点的应力集中程度最高,最大主应力幅值为 627 MPa,过渡圆角其余部位应力集中程度相对较低,发生疲劳破坏的概率较小。

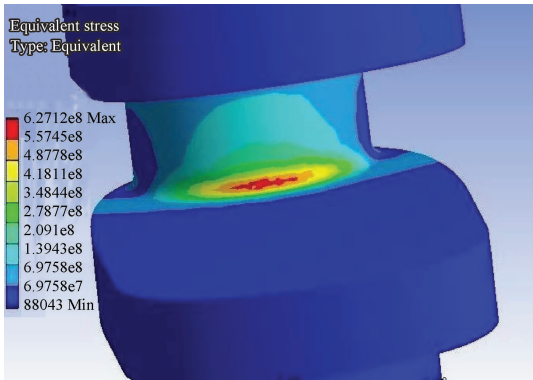


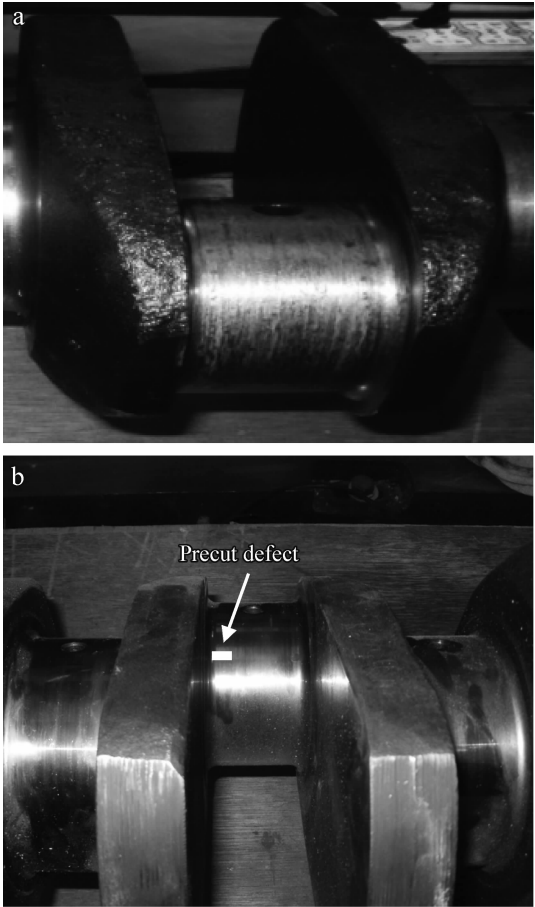
图 4 第四曲拐应力云图
Fig. 4 Stress distribution of the fourth crankpin

2 曲轴弯曲疲劳试验

2.1 试验曲轴信息

根据有限元计算结果,试验选用 WD615.68 系列曲轴 2 根,分别命名为 1 号曲轴和 2 号曲轴。其中,1 号曲轴第四曲拐连杆轴颈表面磨损严重(图 5(a)),有较多的划痕和烧伤痕迹,轴颈圆角

下止点部位有肉眼可见的自然缺陷,尺寸约为 1 mm×1 mm×0.5 mm;2 号曲轴第四曲拐连杆轴颈表面状态良好,无明显的划痕和缺陷。为加速 2 号曲轴的疲劳破坏,采用电火花加工技术在 2 号曲轴第四曲拐轴颈圆角下止点偏斜 30°处预制出人工缺陷(图 5(b)箭头所示位置),缺陷尺寸为 2 mm×5 mm×3 mm,预制缺陷处的最大主应力幅值约为 557 MPa。



(a) The fourth crankpin of crankshaft 1 (b) The fourth crankpin of crankshaft 2

图 5 试验曲轴曲拐
Fig. 5 Crankpin of experimental crankshaft

2.2 弯曲疲劳试验及分析

曲轴疲劳试验所采用的设备为浙江大学生产的 CBFT-II 型卧置谐振式曲轴弯曲疲劳试验机(图 6)。

标定试验载荷后,分别选取 1 号曲轴第四曲拐和 2 号曲轴第四曲拐进行疲劳试验,试验依据 AVL-R01N0010 标准“曲轴疲劳试验”进行,只施加弯曲载荷,在 1.8 倍爆压系数下检测两个样本,试验结果如表 2 所示。

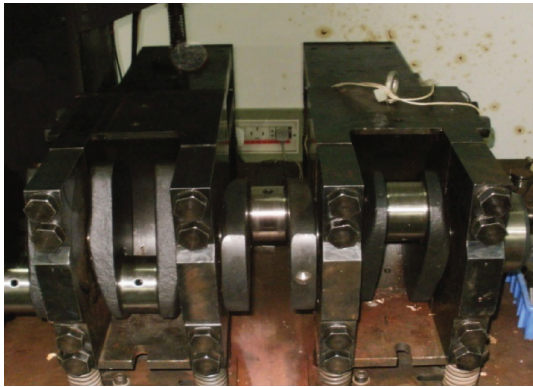


图 6 谐振式曲轴弯曲疲劳试验台

Fig. 6 Resonant fatigue test rig for crankshaft

表 2 曲轴疲劳试验数据

Table 2 Crankshaft bending fatigue test data

Number of crankshafts	Number of crankpins	Standard bending moment/Nm	Testing bending moment	Cycles
1	4	2805.52	5049.94	6.5×10^4
2	4	2805.52	5049.94	3.3×10^5

根据 AVL-R01N0010 设计标准,以 1×10^7 循环周次作为曲轴的安全寿命,可知在 1.8 倍载荷下,1 号曲轴和 2 号曲轴的两个试验曲拐均未通过,可见含缺陷的废旧曲轴的疲劳强度均低于新品曲轴的设计标准。其中 1 号曲轴裂纹萌生于试验曲拐连杆轴颈圆角下止点的缺陷部位;2 号曲轴裂纹萌生于试验曲拐连杆轴颈圆角部位,沿圆角进行扩展。根据有限元分析结果可知,试验曲拐的最大主应力均低于曲轴材料的屈服强度 680 MPa,试验疲劳寿命均大于 10^4 循环周次,故疲劳试验均为高周应力疲劳^[8]。由于 1 号曲轴的剩余疲劳寿命(6.5×10^4 循环周次)仅为 2 号曲轴的剩余疲劳寿命(3.3×10^5 循环周次)的 1/5,表明 1 号曲轴的剩余疲劳强度低于 2 号曲轴的剩余疲劳强度。

3 曲轴失效分析

3.1 显微形貌观察仪器

采用 NovaNanoSEM650 高分辨场发射扫描电子镜观察试件断口形貌;用 OLYMPUS-GX51 型光学显微镜观察试件的显微组织。

3.2 断口分析及微观组织检测

采用线切割技术在 1 号曲轴裂纹萌生部位

切下 $12\text{ mm} \times 16\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ 的试块,用有机溶剂丙酮对断口进行清洗并风干,保证试块断口形貌的清晰,对断口进行扫描电镜分析,图 7 给出了 1 号曲轴断口处的微观形貌。

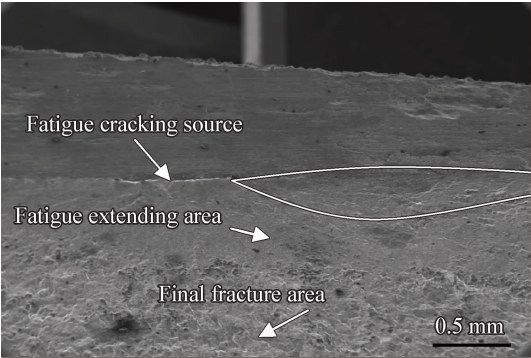


图 7 1 号曲轴断口形貌

Fig. 7 Morphology of fatigue fracture of crankshaft 1

从图 7 中可以看出,1 号曲轴断口为明显的疲劳断裂特征,由裂纹源、裂纹扩展区和瞬断区三部分组成。裂纹扩展区可见明显的疲劳弧线,疲劳弧线的汇聚处为轴颈圆角下止点的自然缺陷部位(图 7 曲线包围区域),表明圆角部位的自然缺陷是诱发裂纹形核的裂纹源。疲劳弧线以表面缺陷为中心向四周扩展,裂纹扩展至曲柄臂深处形成最终的瞬断区,瞬断区的断面较为粗糙。其中裂纹扩展区面积较小,瞬断区面积较大,表明 1 号曲轴裂纹源处的疲劳强度严重不足。

采用线切割方法在 1 号曲轴疲劳断口进行取样,垂直于疲劳断口处进刀,切割方向穿过自然缺陷并距裂纹源约为 0.5 mm。将切割下的试块制备成金相试样并抛光,采用 4%(体积分数)硝酸酒精进行腐蚀,腐蚀时间约为 10 s,对试样进行金相组织观察(图 8)。

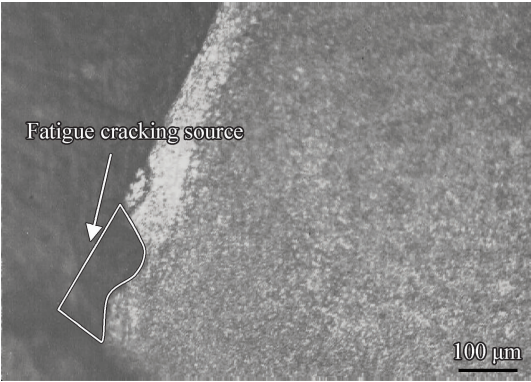


图 8 1 号曲轴断口显微组织形貌

Fig. 8 Microstructure of fatigue fracture of crankshaft 1

由图8可见,1号曲轴连杆轴颈圆角部位存在一层白亮层,是表面氮化层中的 ϵ 相,具有很高的硬度和抗疲劳强度^[9],心部组织为回火索氏体+铁素体。1号曲轴圆角部位白亮层分布不均匀,白亮层较深处厚度约为0.04 mm,有效氮化层深度约为0.28 mm,符合曲轴氮化层深度0.25~0.40 mm的技术要求。由于连杆轴颈磨损严重,轴颈圆角下止点部位的白亮层已经完全剥落形成自然缺陷(图8标出的区域),从而造成该部位的疲劳强度严重下降,由于轴颈圆角下止点同时是曲轴应力集中程度最严重的部位,因此疲劳裂纹很快萌生于该部位并迅速进行扩展,最终造成1号曲轴的剩余疲劳寿命非常短暂。

2号曲轴裂纹萌生于试验曲拐连杆轴颈圆角部位,如图9曲线所示位置,目测观察疲劳裂纹并未起源于表面预制缺陷处(图9中矩形位置)。

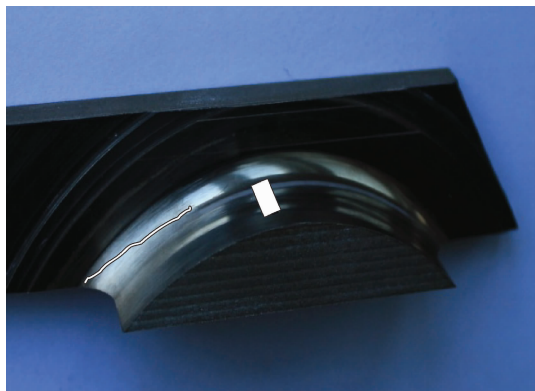


图9 2号曲轴裂纹宏观形貌

Fig. 9 Macro morphology of crack in crankshaft 2

由于2号曲轴裂纹扩展并未造成试验曲拐的断裂,无法通过断口分析来确定裂纹源位置,因此文中通过分析预制缺陷靠近裂纹一侧截面的显微组织形貌来判断裂纹的起源:采用线切割方法对2号曲轴进行取样,沿2号曲轴连杆轴颈轴向进刀并穿过预制缺陷,切割方向距靠近裂纹一侧截面约0.5 mm。将切割下的试块制备成金相试样并抛光,采用4%(体积分数)硝酸酒精进行腐蚀,腐蚀时间约为10 s,观察预制缺陷部位的显微组织形貌(图10)。

由图10可见,2号曲轴连杆轴颈圆角部位存在一层白亮层,是氮化层中的 ϵ 相,心部组织为回火索氏体+铁素体。2号曲轴圆角部位白亮层分布均匀无间断,与连杆轴颈良好的表面状态相对应,说明圆角部位的渗氮层保存完整。其中白亮

层的厚度约为0.02 mm,有效氮化层深度约为0.30 mm,符合曲轴氮化层深度0.25~0.40 mm的技术要求。试样表面未见裂纹痕迹,表明虽然2号曲轴圆角部位深度为3 mm的预制缺陷已将有效氮化层完全破坏,但是疲劳裂纹并不起源于预制缺陷部位。



图10 2号曲轴预制缺陷显微组织形貌

Fig. 10 Microstructure of precut defect of crankshaft 2

4 分析

通过选择包含自然缺陷和人工缺陷的废旧曲轴开展弯曲疲劳试验,结果表明含缺陷的废旧曲轴的疲劳强度均低于新品曲轴的设计标准;进一步对比1号曲轴和2号曲轴的试验结果可知:虽然1号曲轴自然缺陷的尺寸(1 mm×1 mm×0.5 mm)远小于2号曲轴预制缺陷的尺寸(2 mm×5 mm×3 mm),但是1号曲轴自然缺陷所处位置比2号曲轴预制缺陷所处位置具有更强烈的应力集中程度,造成1号曲轴的剩余疲劳强度低于2号曲轴的剩余疲劳强度,剩余疲劳寿命仅为2号曲轴的1/5。

断口分析显示,1号曲轴连杆轴颈过渡圆角下止点部位氮化层的剥落形成自然缺陷,造成该部位疲劳强度严重下降,疲劳裂纹起源于此并迅速扩展;2号曲轴连杆轴颈过渡圆角部位的预制缺陷虽然将轴颈表面氮化层完全破坏,但是预制缺陷并非是诱发裂纹形核的裂纹源。

5 结论

(1) 废旧曲轴的剩余疲劳强度对于缺陷位置的敏感程度高于缺陷尺寸,危险位置小尺寸缺陷对废旧曲轴剩余疲劳强度的影响程度大于非危险位置大尺寸缺陷。

(2) 废旧曲轴表面缺陷直接影响其剩余疲劳强度。表面氮化层保存越完整,废旧曲轴的剩余疲劳寿命越长。

参考文献

[1] 徐滨士,刘世参,史佩京.再制造工程和表面工程对循环经济贡献分析[J].中国表面工程,2006,19(1):1-6.

[2] 梁秀兵,陈永雄,白金元,等.自动化高速电弧喷涂技术再制造发动机曲轴[J].中国表面工程,2010,23(2):112-116.

[3] 董丽虹,徐滨士,董世运,王丹.金属磁记忆技术用于再制造毛坯寿命评估初探[J].中国表面工程,2010,23(2):106-111.

[4] 董世运,石常亮,徐滨士,等.重型汽车发动机曲轴断裂分析[J].失效分析与预防,2009,3(4):62-67.

[5] 刘鸣放,刘胜新.金属材料力学性能手册[M].北京:机械工业出版社,2011.

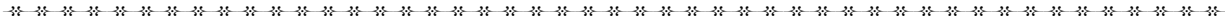
[6] 刘荣昌,马淑英,马国清.曲轴滚压关键参数设计理论与数值模拟[M].国防工业出版社,2010.

[7] 王致钊,程绍桐,程淑颖,等.柴油机曲轴可靠性辨析[J].柴油机,2008,30(5):32-47.

[8] 陈传尧.疲劳与断裂[M].武汉:华中科技大学出版社,2002:17-43.

[9] 王忠.机械工程材料[M].清华大学出版社,2009.

作者地址:北京市丰台区杜家坎21号 100072
装甲兵工程学院再制造技术重点实验室
Tel:(010) 6671 8540 (董丽虹)
E-mail:lihong.dong@126.com



• 学术动态 •

中国工程机械绿色维修与再制造论坛会议通知

为了推动我国工程机械绿色维修与再制造产业的发展,中国工程机械学会维修工程分会、中国设备管理协会工程机械维修委员会、中国机械工程学会再制造工程分会拟于2012年10月份在安徽合肥召开“中国工程机械绿色维修与再制造论坛”,交流近年来我国在工程机械维修和再制造方面的成果和经验。

会议将邀请国家机关的有关领导,国内工程机械维修与再制造领域的知名院士、教授、企业家参会,就工程机械维修与再制造相关领域的国家政策、发展规划及前沿技术做特邀报告。会议期间将组织企业家论坛和博士论坛进行专题高层交流。

会议交流内容包括:①绿色维修与再制造工程应用基础研究;②节能、节材、节资、环保的绿色维修与再制造新技术、新材料、新工艺、新设备研究;③大型企业开展工程机械再制造的优势、经验与策略;④工程机械零配件维修、再制造关键技术研究与应用;⑤工程机械健康管理及故障诊断、检测、监控技术;⑥工程机械全寿命周期与再制造多寿命周期费效研究;⑦维修技术与再制造技术在工程机械中的应用案例及效益分析;⑧工程机械维修与再制造人员的能力提升(技能发展、培训、知识管理、安全、健康等);⑨工程机械维修与再制造产品营销策略及产业市场化体系建设;⑩工程机械维修与再制造过程中的绿色节能减排技术;⑪其他有关绿色维修与再制造新理念、新技术等。

欢迎大专院校、科研机构、工程机械制造与使用单位等从事工程机械维修与再制造研究、管理和实践的同仁踊跃投稿并参加会议交流。会议将出版论文集,并评选出部分优秀论文。参会信息回复日期和论文全文截止日期为2012年8月30日。

参会及论文联系人:路凤芝 电话:010-66718873,13681518005 E-mail:lufz@sina.cn

会务联系人:洪建求 电话:0551-5840763,18626181677

E-mail:hong.jianqiu@ronganheavy.com