

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.03.003

座椅抬高器承载性及内部铁基粉末冶金件失效研究^{*}

李志鑫¹, 李 峰², 江伟光¹, 吕 迅¹, 任海波²

(1. 浙江工业大学 机械学院, 浙江 杭州 310014; 2. 宁波双林汽车部件股份有限公司, 浙江 宁波 315153)

摘要:针对汽车座椅抬高器承载性和安全性问题,采用显式计算方法和试验研究手段研究了抬高器的最大承载扭矩和失效行为。在有限元建模阶段,尤其是当材料应力超过其屈服极限,用真实应力-真实应变描述材料本构。发现了结构的位移、速度和加速度响应曲线随着载荷的增加,所呈现的锯齿效应逐步明显,据此得到了结构的相变转换过程及相变转换点。结合载荷时间历程,得到了座椅抬高器极限承载扭矩为 $96 \text{ N} \cdot \text{m}$ 与实际座椅抬高器的物理实验结果保持一致。通过拆解座椅抬高器实物,发现了抬高器实物和仿真模型的破坏失效位置非常接近。研究结果进一步验证了研究方法的正确性,为座椅抬高器的设计提供了有效指导,保证了座椅抬高器的安全可靠,验证了抬高器最大承载扭矩和关键零件的失效行为。

关键词:显式有限元分析;裂纹扩展;粉末冶金;破坏实验

中图分类号:U463;TH122

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2015)03-0312-05

Bearing capability of seat-elevation and failure mechanism of the internal Fe-based powder metallurgy

LI Zhi-xin¹, LI Feng², JIANG Wei-guang¹, LV Xun¹, REN Hai-bo²

(1. College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China;

2. Ningbo Shuanglin Auto Parts Co., Ltd., Ningbo 315153, China)

Abstract: In order to obtain the ultimate bearing characteristics, failure behavior and safety manners, the explicit finite element analysis calculation and the physical experiment were introduced to implement on the car seat elevation. On the finite element modeling, especially the material stress exceeding the yield limit, the real stress and real strain were used to describe the plasticity of material constitutive model. The structural displacement, velocity and acceleration response curves were obtained and the saw tooth effect was distinctive gradually with loading history. The phase transition was tracked through the response behavior and the phase point was extracted from the response curve. The ultimate torque of bearing seat elevation was about $96 \text{ N} \cdot \text{m}$ calculated through the phase point and loading history curve, which is in good agreement with the experiment. The seat elevation was lost failure and found that the structural damage location, accounting for the simulation and the physics experiment disassembled was very close. The results indicate that the method is validity to give an efficient guidance design and to assure the reliability of the seat elevation, which can give some evidence to estimate the maximum bearing moment and the failure behavior owing to the key components.

Key words: explicit finite element analysis; crack propagation; powder metallurgy; failure experiment

0 引 言

材料的宏观性能与细观性能相差甚远,计算宏观

理论在细观情况下通常不再适用,为更好地理解多晶体材料的力学特性,对哪个学科都是难题。国内外众多专家在这一领域开展了卓有成效的工作。如李俊琛

收稿日期:2014-09-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(71101129,51105338);浙江省自然科学基金资助项目(Y1110802);浙江省特种装备与制造重点实验室开放基金资助项目(20090305);浙江工业大学教改项目资助项目(JXY201403)

作者简介:李志鑫(1975-),男,宁夏银川人,工学博士,主要从事机械系统动力学方面的研究。E-mail:lizhixin@zjut.edu.cn

等^[1]设计了“宏观试验”与“细观微结构”相结合的研究方案,对三维多晶体材料微结构实现了从宏观力学状态到细观力学状态的跨尺度继承、多晶体材料微结构的有限元分析模拟。吴其俊等^[2]采用以能量为基准的刚度退化方法预测了钢-碳纤维/聚酰亚胺复合材料厚壁圆筒的渐进破坏行为。王新峰等^[3]采用细观单胞模型模拟三维机织圆管复合材料在轴向拉伸情况下的损伤起始、扩展、直至最终破坏的全过程。闫玉曦等^[4]通过拉伸试验和扫描电镜观察材料的损伤,采用GTN微观损伤模型完成对带有微小缺口的硅钢板冷轧过程中损伤分布以及裂纹萌生和扩展行为的研究。魏凌霄等^[5]采用红外热成像技术监测镁合金板材室温下疲劳裂纹扩展过程中试件温度的变化,研究疲劳裂纹尖端温升值与裂纹长度的对应关系。王志勇等^[6]采用线弹性材料模型,运用不含裂尖增强函数的扩展有限元法,研究静态和动态载荷作用下颗粒增强复合材料的断裂行为。潘应晖等^[7]对采用强脉冲激光表面处理过得镍铬合金,经X射线应力仪测试冲击区的残余应力场,对激光表面处理后材料本构关系的修正。针对具有拉伸和压缩不同模量的材料,张洪武等^[8]采用平面静力问题的参变量变分原理,将不同模量平面问题转化为互补问题进行求解,避免了应力状态假设和刚度矩阵的更新。熊纓^[9]在对结构钢SM400进行阶梯式变载条件下的疲劳试验,采用高精度局部柔度测量技术,考察疲劳裂纹扩展迟滞回线的形态变化与裂纹停留的关系,研究表明裂纹停留意味着循环加载过程中裂纹尖端既不形成拉伸塑性区,也不形成压缩塑性区,疲劳裂纹停留在最大载荷处,裂纹形态呈现“裂尖锐型”和“裂尖钝型”。张宏伟等^[10]应用断裂力学理论分析了起重臂疲劳裂纹萌生点及扩展行为。王亮等^[11]根据数字化(fix-ratio mix-mode, FRMM)断裂试验,得到压电复合材料试件的断裂韧性、位移及应变场。通过非线性有限元软件模拟分析了基于损伤力学的粘聚区特性,压电复合材料界面的起裂和脱胶扩展行为,研究界面粘结强度和界面刚度对计算结果的影响。

对连续介质材料开展失效性研究,主要采用的研究方法有数值仿真和物理试验,获得材料破坏断裂过程中裂纹的萌生特性和扩展行为。宏观上一般结构被看作是连续介质,但在微观上存在局部密度不均匀性。由于材料局部密度和晶粒不均匀性,对结构承载极限引起的裂纹成形进行模拟及试验验证等研究鲜有文献记载。

粉末冶金材料具有较高的材料屈服极限、抗疲劳

强度、较好的抗冲击韧性和抗大气腐蚀性等特点,已普遍被用于传动装置、发动机、通用机械和工具上。由于某些结构要求一次成型,而其内部又具有相对运动,造成维护极不方便,在设计阶段对结构的承载强度、可靠性和安全性要求较高。汽车座椅抬高器采用的半月形铁基粉末冶金件,处于封闭环境,具有相对运动、维护不便等特点。在设计阶段,对最大承载扭矩、安全性要求较高,计算机辅助强度分析和物理破坏试验研究成为其极限承载和安全性分析研究的主要手段。

基于汽车座椅抬高器最大承载扭矩,笔者对铁基粉末冶金件发生断裂破坏行为的相变特征,及最大承载扭矩试验造成的裂纹萌生扩展及失效行为进行研究。

1 粉末冶金材料失效机理

粉末冶金中添加不同的材料或者元素,其机械力学特性具有较大的差别。如Fe₃Al基合金具有良好的抗黏着磨损、磨粒磨损和高温下抗腐蚀磨损性能;氧化物弥散强化(ODS)铁基高温合金具有熔点高、耐高温腐蚀性好、传热性好、辐射肿胀小、高温强度高和抗蠕变性能优异等优点;而钛合金具有密度低、比强度高、屈强比高但韧性、耐腐蚀性好等优点。由于所加元素的活跃程度不同,制造工艺条件差异,造成粉末冶金的晶像差异很大,宏观上表现出不同的物理性质。

粉末冶金材料由于制造环境、元素的质量分布和所加合金元素种类不同,具有不同的晶像组织边界润湿特性等,形成晶像空间质量分数的差异。一般粉末冶金结构更易发生脆性断裂,但具有较高的屈服强度,相对杨氏模量较低,塑性变形时间及其短暂。

2 座椅抬高器的有限元数值建模及分析求解

座椅抬高器主要是通过手动驱动杆驱动轴自身旋转的同时,迫使粉末冶金档块产生较小的偏转。其通过形状耦合迫使粉末冶金件转动一定的角度,带动抬高器保持架壳体转动,驱使座椅骨架完成单次一定高度的调整;放松手柄,手动驱动杆在弹簧恢复力的作用下回复到起始位置,座椅抬高器完成一个周期一定高度的调整,汽车座椅抬高器的基本结构及有限元模型,座椅抬高器结构如图1所示。

座椅抬高器的结构相对比较复杂,采用经典的结构强度理论进行建模,最大承载扭矩的计算、校核比较困难。而采用有限元方法进行计算是一种比较经济可行的手段,尤其是建模的准确性起着至关重要的作用。

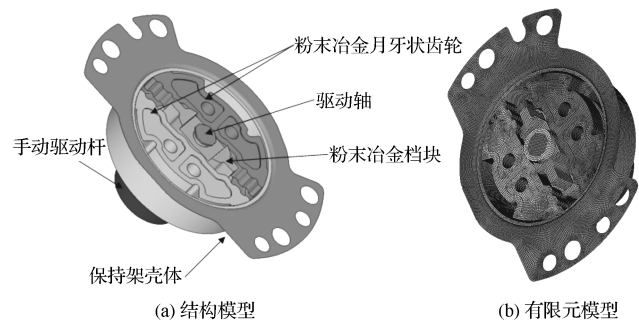


图 1 座椅抬高器结构

抬高器的组成零部件不存在较小的倒角、圆角以及极小的结构尺寸。在有限元建模过程中,为保证求解计算的准确性、精度,网格采用“正”字型网格,即立方六面体和正方四边形面网格等形式的网格,尽量保持网格的最小尺度与 3D 实物模型的最小尺寸相一致。本研究采用专业的网格划分工具 Hypermesh 对座椅抬高器进行网格剖分,得到网格的雅克比参数为 0.831 48;翘曲度大于 5% 的网格不存在,基本抬高器的有限元模型如图 1 所示。

材料参数的选取是决定有限元数值求解精度的重要一步,尤其是当材料的破坏应力超过其屈服极限后,材料参数在塑性非线性区对最大承载极限以及破坏安全性的计算尤其重要。座椅抬高器的手动驱动杆、抬高器保持架、驱动轴采用 40Cr 退火处理。在结构承载安全性研究过程中除了必须定义材料在线弹性变形阶段的基本参数外,需要定义材料超过屈服极限后的变形本构特征,其中 40Cr 超过屈服极限后,其真实应力-真实应变的本构如图 2 所示。笔者采用黏塑性材料模型对 40Cr 的本构特征进行描述,当 40Cr 受到的应力载荷小于屈服极限时,40Cr 的线弹性材料参数如表 1 所示。

表 1 40Cr 的线弹性材料参数

项目	数值
密度/($T \cdot mm^{-3}$)	7.850 0E-09.00
杨氏模量/MPa	206 000.00
泊松比	0.28
屈服强度/MPa	252.50

当 40Cr 受到的应力超过其屈服极限后,笔者采用坐标平移及分段线性化处理,获得 40Cr 的塑性真实应力-真实应变本构如图 2 所示。

铁基粉末冶金具有较小的密度、杨氏模量,但具有较大的屈服强度。一旦粉末冶金材料受到的应力超过其屈服极限后,立即发生脆性断裂。抬高器所使用的铁基粉末冶金材料基本的化学组成元素的质量百分比 C—0.3%~0.6%,Ni—3.60%~4.40%,Mo—0.4%~0.6%,Mn—0.05%~0.30%,Cu—1.3%~1.7%,其余

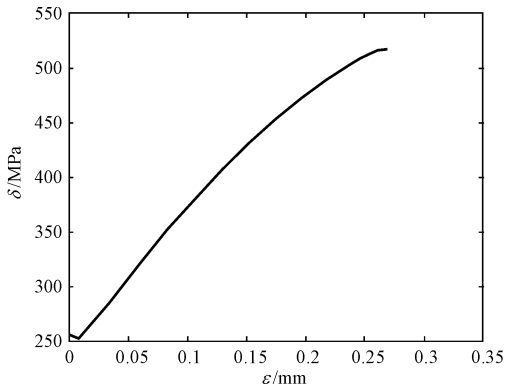


图 2 材料 40Cr 本构模型试验曲线

为 Fe。铁基粉末冶金材料的物理本构参数如表 2 所示。

表 2 铁基粉末冶金的材料参数表

项目	数值
密度/($T \cdot mm^{-3}$)	7.05E-09
杨氏模量/GPa	144.795
泊松比	0.27
屈服强度/MPa	965.30
横向断裂强度/MPa	1 030.00
拉伸极限强度/MPa	966.00

在座椅抬高器的动力学安全承载性研究阶段,采用显式计算方法,施加随时间变化的线性扭矩载荷: $M = 750\text{ t}$,其中时间 $t \in [0\ 0.2]\text{ s}$ 。

本研究根据上述基本的网格模型、材料模型以及显式有限元控制方法完成座椅抬高器模型的建立,输出计算文件,提交求解器 LS-Dyna 进行求解计算。得到任意时刻抬高器在外载作用下的响应行为。其中在 0.134 s 时,抬高器整体应力分布状况如图 3 所示。超过 0.134 s 后,抬高器瞬时响应急剧增加,内部结构件响应发生变化,部分部件发生断裂,铁基粉末冶金件的断裂失效状况如图 3 所示。

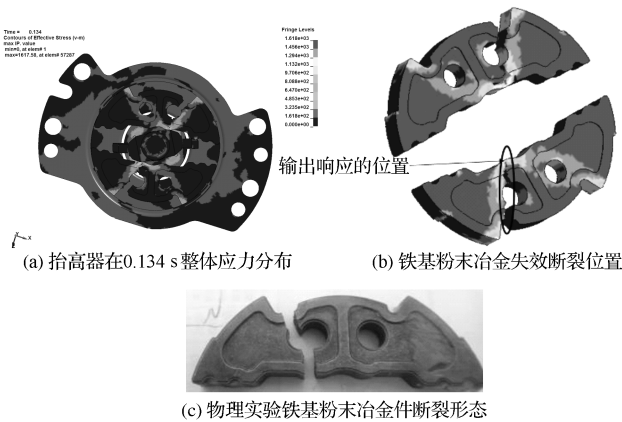


图 3 铁基粉末冶金件的断裂失效状况

从抬高器整体的变形应力云图来看,最先发生失效的零部件主要是铁基粉末冶金月牙状零件,当计算

求解时间在 0.134 s 时,月牙状零件开始发生断裂破坏(如图 3 所示)。输出粉末冶金件断裂裂纹附近节点的位移、速度和加速度响应曲线依次如图 4~6 所示。

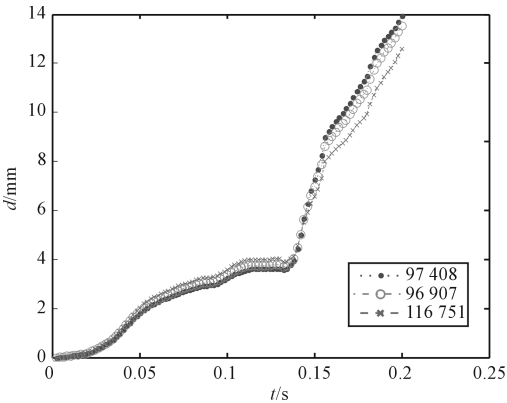


图4 粉末冶金件断裂裂纹附件节点的位移时程响应

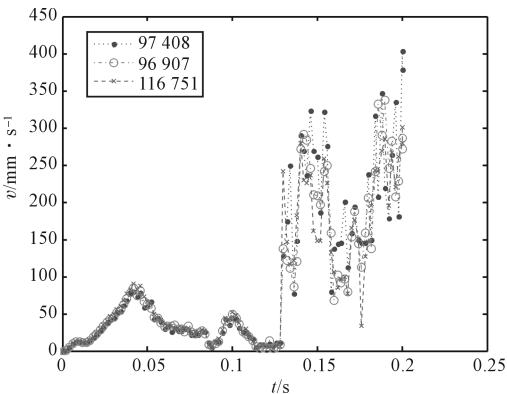


图5 粉末冶金件断裂裂纹附件节点的速度时程响应

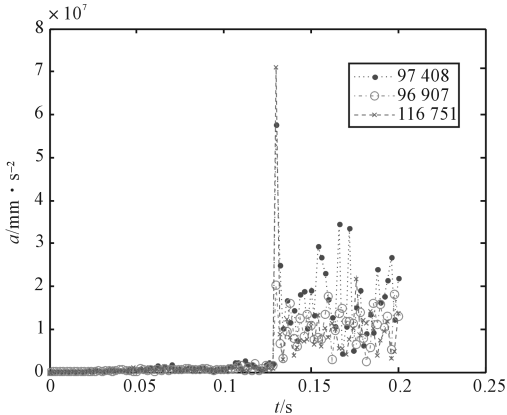


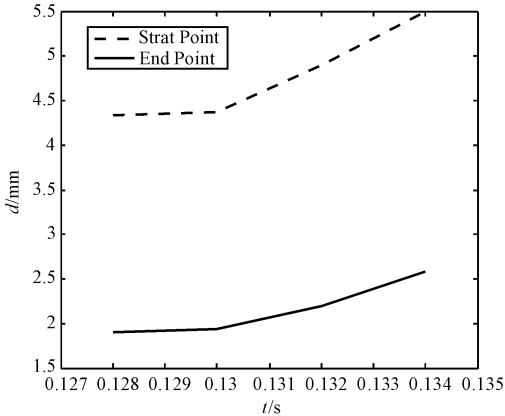
图6 粉末冶金件断裂裂纹附件节点的加速度时程响应

本研究通过比较粉末冶金件断裂裂纹附近节点的时间历程响应,发现位移、速度和加速度响应曲线虽然输出点的空间位置略有差异,但数据的一致重复性在失效前表现较好;当超过粉末冶金的屈服应力后,响应行为产生较大的波动,存在刚体自由态响应特征。从响应数据波动的起始位置分析,判断出座椅抬高器发生失效的时间点在 0.128 s 附近,响应输出数据波动明显,据此确定铁基粉末冶金件从弹性变形到塑性变形的

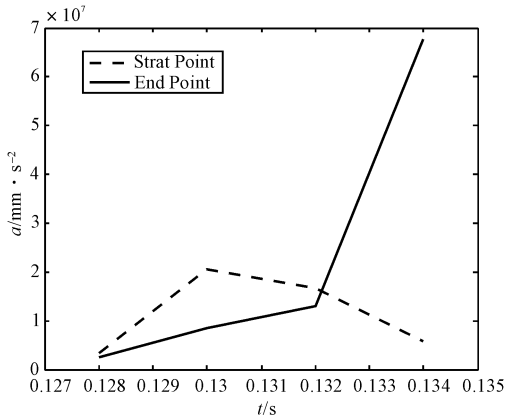
的相变时间点。
从断裂处节点的失效时间历程来看,时间在 0.128 s 达到粉末冶金材料屈服强度极限,即 965.30 MPa,此时铁基粉末冶金件发生断裂失效,依据加载时间历程(如图 3 所示),获得座椅抬高器的极限承载扭矩为 96 N·m。

3 裂纹扩展行为追踪及分析

本研究通过对铁基粉末冶金件的断裂时程响应行为分析,发现冶金件发生断裂的初始时刻为 0.128 s,此时铁基粉末冶金件受到的最大应力接近屈服极限,相应的应力分布如图 3 所示。瞬时应力超过铁基粉末冶金材料的极限承载,仿真过程中裂纹形成从 0.128 s~0.132 s 结束。相应地在抬高器物理承载特性试验研究阶段,所获得的月牙状粉末冶金件的裂纹如图 3 所示。提取铁基粉末冶金月牙状零件裂纹成形过程中裂纹位置附近对应节点的位移和加速度输出如图 7 所示。从裂纹输出位移和裂纹扩展的加速度曲线可以得出裂纹形成过程是在一个极短的时间内完成。铁基粉末冶金材料克服材料粘滞,发生脆性断裂,超过这个时刻,裂纹迅速增大。起始点裂纹位移响应随着裂纹的增大其响应位移大于终止时刻的响应位移;随着裂



(a) “时间-位移”曲线



(b) “时间-加速度”曲线

图7 铁基粉末冶金件裂纹扩展过程中“时间-位移”及“时间-加速度”曲线

纹的增大,在裂纹附近材料发生剥离,其加速度响应曲线产生紊乱。由于周边材料的约束作用,裂纹起始点材料之间的约束作用小于终止点材料的约束作用,因此终止时刻的加速度响应要大于起始位置的加速响应。相应节点的位移、速度和加速度响应的紊乱性依次增强,如图 4~7 所示。

4 试验验证

在完成汽车座椅抬高器承载特性有限元数值研究的基础上,笔者对座椅抬高器实物模型开展物理承载扭矩试验研究。整个实物模型及抬高器内部结构如图 8 所示。在试验研究阶段,笔者固定抬高器外壳上与座椅骨架连接的螺栓孔,驱动手柄上使用扭矩扳手施加线性扭矩载荷。



图 8 汽车座椅抬高器结构外形

当载荷达到 $97 \text{ N} \cdot \text{m}$ 时刻,扭矩阻力瞬间发生突变,数据记录仪停止工作。剖开抬高器外面的壳体,发现铁基粉末冶金件发生断裂,断裂位置如图 3 所示。

5 结束语

本研究通过对座椅抬高器承载特性的分析研究,验证了有限元数值计算模型的正确性。根据计算结果,得到座椅抬高器的承载极限为 $96 \text{ N} \cdot \text{m}$,而物理实验的破坏扭矩为 $97 \text{ N} \cdot \text{m}$,其中抬高器内部月牙状铁基粉末冶金件在外载扭矩的作用下发生断裂,造成抬高器失效。同时在研究中得出以下结论:

(1)材料模型不同,其失效形式也会发生变化。如抬高器的壳体定义为双线性塑性材料,材料应力超过屈服极限后,仍按照线性材料特征产生响应行为;对铁基粉末冶金类型的脆性材料,在材料应力超过屈服

极限后,在极短的时间内,发生断裂失效。在研究过程中,按照实际材料试验获得的材料参数进行材料模型和参数的添加,能够提高仿真求解计算的精度;

(2)相对物理实验,有限元数值计算能够精确地捕捉发生失效的瞬态相变时间点,对于物理试验,捕捉系统失效的时间点存在一定的困难;

(3)相对位移响应,计算获得的速度响应和加速度响应曲线更加跌宕起伏,锯齿效应更加明显。对难以从物理实验,位移响应曲线上捕捉材料特性发生突变的时空位置,而速度曲线和加速度曲线会愈加明显。

参考文献 (References):

- [1] 李俊琛,李旭东,盛捷,等.多晶体材料构件的跨尺度仿真计算[J].机械工程学报,2011,47(10):43-51.
- [2] 吴其俊,周克栋,赫雷,等.连续损伤力学在复合材料厚壁圆筒渐进破坏分析中的应用[J].南京理工大学学报,2011,35(4):479-483.
- [3] 王新峰,刘佳,周光明.三维机织圆管复合材料拉伸载荷下损伤过程的有限元模拟[J].南京理工大学学报(自然科学版),2011,35(1):113-117.
- [4] 闫玉曦,孙权,陈建钧,等.基于 GTN 模型的冷轧硅钢边部裂纹扩展研究[J].机械工程学报,2012,48(10):33-39.
- [5] 魏凌霄,闫志峰,王文先,等.基于红外热成像的镁合金疲劳裂纹扩展的研究[J].机械工程学报,2012,48(6):64-68.
- [6] 王志勇,马力,吴林志,等.基于扩展有限元法的颗粒增强复合材料静态及动态断裂行为研究[J].固体力学学报,2011,32(6):566-573.
- [7] 潘应晖,刘艳斌,戴峰泽,等.激光冲击 718 镍铬合金残余应力场试验及有限元分析[J].福州大学学报(自然科学版),2012,40(3):370-375.
- [8] 张洪武,张亮,高强.拉压不同模量材料的参变量变分原理和有限元方法[J].工程力学,2012,29(8):22-38.
- [9] 熊纓.疲劳裂纹扩展中停留机制的考察[J].机械工程学报,2010,46(16):119-124.
- [10] 张宏伟,贺利乐,陶炎文,等.塔式起重机起重臂疲劳裂纹扩展的机理分析[J].煤矿机械,2012,33(8):112-114.
- [11] 王亮,白瑞祥,雷振坤,等.压电复合材料粘接界面断裂有限元模拟[J].计算力学学报,2012,29(4):517-521.

[编辑:李辉]

本文引用格式:

李志鑫,李峰,江伟光,等.座椅抬高器承载性及内部铁基粉末冶金件失效研究[J].机电工程,2015,32(3):312-316.

LI Zhi-xin, LI Feng, JIANG Wei-guang, et al. Bearing capability of seat-elevation and failure mechanism of the internal Fe-based powder metallurgy[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2015,32(3):312-316.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>