

И. В. 库德里亚弗采夫

〔苏〕 И. Е. 纳乌姆钦科夫 著

И. М. 萨文娜

УСТАЛОСТЬ КРУПНЫХ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

大型机器零件 的疲劳

机械工业出版社

大型机器零件的疲劳

И.В.库德里亚弗采夫
〔苏〕 Н.Е.纳乌姆钦科夫 著
Н.М.萨文娜

赵少汴 译



机械工业出版社

本书系统介绍了苏联中央机器制造与工艺科学研究所(ЦНИИТМАШ)长期以来在大型零件疲劳强度试验研究方面取得的成果与经验,并提供了很多有价值的数据资料。全书共分十一章。第一章简单介绍他们所用的试验设备。第二、三、四章系统介绍大型零件的弯曲、扭转与接触疲劳强度。第五章详细介绍大型零件的冷作强化。第六、七、八章分别介绍组合转子、焊接转子和大型焊接结构的疲劳强度。第九、十、十一章介绍其他常用结构材料(钛合金、铸铁与铸钢)的疲劳知识。本书对重型机械、电站设备和动力机械部门的设计人员、工艺人员和试验研究人员有很大参考价值,也可供其他机械制造部门的广大技术人员和大专院校机械系的师生参考。

УСТАЛОСТЬ КРУПНЫХ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

И. В. КУДРЯВЦЕВ
Н. Е. НАУМЧЕНКОВ
Н. М. САВВИНА

大型机器零件的疲劳

И. В. 库德里亚弗采夫
〔苏〕 Н. Е. 纳乌姆钦科夫 著
Н. М. 萨文娜
赵少汴 译
责任编辑 张诚文
封面设计 刘代

机械工业出版社出版(北京印成门外百万庄南里一号)

(北京市书刊出版业营业登记证出字第117号)

金堂县印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 787×1092 1/32·印张 8 1/4·字数 180 千字

1986年6月北京第一版·1986年6月成都第一次印刷

印数 0,001—4,070·定价: 2.00 元

科技新书目: 120—119

统一书号: 15033·6193

8603911

译者序

机器零件的破坏多数为疲劳破坏，因此，疲劳强度问题是影响机器使用可靠性与使用寿命的一个关键问题。由于疲劳破坏的机制非常复杂，影响因素过多，因此，时至今日，许多问题仍没有能从理论上得到完善解决。在解决实际机器零件的疲劳强度问题时，仍然不得不依靠全尺寸零件疲劳试验的方法。由于进行疲劳试验——特别是大型零件的疲劳试验，需要化费大量的费用与时间，因此，目前世界上这方面的数据发表得很少。苏联中央机器制造与工艺科学研究院长期以来在大型零件的疲劳试验方面进行了大量工作，不但积累了很多试验数据，而且在如何提高大型零件的疲劳强度方面摸索出了一些经验与规律，不少成果已在生产中卓见成效。这些数据是通过几十年的试验积累的，来之不易，值得我们参考。书中介绍的一些冷作强化方法，工艺上并不复杂，却能成倍提高大型零件的疲劳强度，值得我们借鉴。他们使用自己研制的结构简单、造价低廉的惯性式疲劳试验机进行大型零件疲劳强度研究的方法，也对我们不无启发。因此，译者本着“洋为中用”的精神，将本书译成中文，介绍给重型机械、电站设备、动力机械和其他机械制造部门的广大设计人员、工艺人员与试验研究人员；希望能对我国大型机器零件的疲劳设计与疲劳强度试验研究工作有所裨益。

原 序

本书对大型全尺寸机器零件和大型试样与模型的弯曲疲劳强度与扭转疲劳强度的试验数据进行了综合。苏联中央机器制造与工艺科学研究院(ЦНИИТМАШ)由于建造了专门的疲劳试验机,因此能对这些试样广泛进行疲劳试验。这些设备由С.И.亚茨克维奇(С.И.Яцкевич)和В.М.安德连科(В.М.Андренко)研制出来,它们可以对许多个试样同时进行疲劳试验,试样截面可以在很大的范围(直径或厚度由20到400mm)内变化。本书除了简要地介绍了中央机器制造与工艺科学研究院设计的试验机以外,还讨论了我们在试验研究中使用的苏联和其他国家的疲劳试验机。

试验的基本任务是确定大型研究对象的疲劳特性。以及研究各种工艺因素和结构因素对其疲劳强度的影响。由于大型模型或全尺寸零件疲劳试验的工作量很大,试验也过于复杂,因此,无论是苏联还是其他国家,这方面的数据都积累得不够。但是,对大型零件进行试验来确定其疲劳强度,恰恰是合理选择许用应力、零件形状和材料成分与合理确定工艺处理规范的可靠方法。

本书研究了常用机械制造材料——锻钢、铸钢、铸铁和钛合金的数据。除了中央机器制造与工艺科学研究院的数据以外,还简要说明了其他研究单位和工厂(巴顿电焊研究所、全苏柴油机车科学研究所、交通部中央科学研究所、МИИТ、ЦНИИСК、苏联科学院物理-力学研究所、乌拉尔奥尔忠尼启则重型机器制造厂和新克拉马托尔斯克列宁机器

制造厂等)的工作结果。也援引了其他国家(美国、日本和西德)的某些特别有价值的结果。

由于重型机械制造和动力机械制造部门制造特大型零件的需要,产生了对组合零件(转子、轧辊等)在交变载荷下的强度进行译定的必要。组合零件的疲劳试验,肯定了在重大产品中使用大型组合零件的可能性。

书中引用了表面塑性变形(ППД)在工业中合理使用的实践知识,表面塑性变形是提高交变载荷下零件强度的有效方法。

结合着提高各种大型零件疲劳强度的具体任务,介绍了相应的表面冷作方法。这些大型零件包括:大型汽轮机和发电机转子,大功率柴油机曲轴和焊接结构等。作者在这方面的开发性研究,已经在工业中开花结果,广泛应用。这些工作在降低应力集中对零件疲劳强度的不利影响方面,具有特别重要的意义。

Л.М.什科利尼克(Л.М.Школьник)的著作^[42],已对试验方法问题进行了论述,因此,这里只涉及在大型研究对象试验中专门使用的万能试验设备(多数为苏联的)及其试验特点。

某些专著已对低周疲劳的试验特点做过详细讲述,这里仅研究高周加载。

本书不拟重复某些新近出版的有关交变载荷下强度计算方法的专门手册[10.21.34]中的内容。在机器零件的表面塑性变形强化方法方面,本书仅列出少量的书刊目录。苏联和其他国家的更详细的著作目录(超过300个标题)可以在Е.Г.科诺瓦罗夫(Е.Г.Коновалов)和В.А.西多连科(В.А.Сидоренко)的书中找到。

作者希望，本书能有助于各种机械制造部门的广大设计人员和工艺人员。

作者热烈欢迎对本书内容提出批评和建议。来函请寄：109088，莫斯科，Ж-88，中央机器制造与工艺科学研究所材料与结构强度处。

目 录

译者序

原序

第一章 大型机器零件的疲劳试验设备	1
一、苏联的疲劳试验机	2
二、其他国家的疲劳试验机	16
第二章 大型机器零件的弯曲疲劳	18
一、疲劳试验方法	18
二、直径至280mm的钢制光滑轴和阶梯轴的弯曲疲劳	23
三、环形切口轴的疲劳尺寸效应	29
四、电渣铸件和锻钢的疲劳	32
五、大功率船用柴油机曲轴的疲劳	36
六、大型零件在非对称循环下的疲劳	40
七、校直对板形零件疲劳的影响	47
第三章 大型机器零件的扭转疲劳	51
一、钢弯曲与扭转疲劳极限的比例	51
二、光滑轴和阶梯轴的扭转疲劳	53
三、曲轴的扭转疲劳	65
第四章 大型机器零件接触区的疲劳	67
一、带静座配合的大轴的疲劳	67
二、垫片材料和厚度对钢板接触区疲劳的影响	72
三、加载频率对轴的静座配合区疲劳强度的影响	75
四、夹持区表面冷作提高钢疲劳强度的原理	75
五、轧制氧化皮对热轧钢疲劳强度的影响	78
六、绝对尺寸和表面淬火对压配合轴疲劳强度的影响	80
七、提高板形零件疲劳强度和剪切强度的接触面处理方法	83
八、300×400mm平试样的疲劳	90

九、带压配合大轴的疲劳与热处理方法的关系	91
十、美国进行的带压配合大轴的疲劳试验	97
第五章 大型机器零件的表面冷作强化	101
一、残余应力及其对机器零件疲劳强度的作用	101
二、机器零件的表面塑性变形 (ППД) 强化	103
三、曲柄压力机的钢轴和铸铁轴的疲劳强度	110
四、大功率压力机机架横梁的疲劳强度	113
五、阶梯轴的变形强化参数选择	122
六、阶梯轴强化的变形力计算	127
七、疲劳裂纹扩展的中止	131
八、用塑性变形法挤出条沟时曲轴的疲劳与下挖深度的 关系	132
九、用热法 (自临界温度以下冷却) 在轴上建立有利的 残余应力	139
十、大型铸造曲轴的冷作强化	142
第六章 大型组合式机器零件的疲劳	144
一、燃气轮机的组合式复合转子	144
二、汽轮发电机的组合转子	147
第七章 汽轮机与发电机焊接转子的疲劳	162
一、燃气轮机的焊接复合转子	162
二、汽轮机和发电机的焊接转子	165
第八章 大型焊接结构元件的疲劳	177
一、大截面对接焊接连接的疲劳	177
二、T型焊接连接的疲劳	182
三、大型焊接管接头连接元件的疲劳	187
四、带有焊接件的元件的疲劳	193
五、缺陷对焊接连接疲劳强度的影响	195
六、大型结构元件焊补后的疲劳	204
第九章 钛合金的疲劳	208

一、钛合金的疲劳及其尺寸效应	208
二、钛合金的腐蚀疲劳	212
三、钛合金轴滚压强化后的残余应力	213
四、钛合金焊接连接的疲劳	217
五、钛合金的扭转疲劳	222
第十章 铸铁的疲劳	227
一、高强球墨铸铁的疲劳及其尺寸效应	227
二、滚压、喷丸冷作和高频电流 (TBC) 淬火对高强铸 铁疲劳的影响	229
三、缺陷对高强铸铁疲劳的影响	237
四、高强铸铁的疲劳与热处理的关系	239
五、高强铸铁焊接连接的疲劳	240
第十一章 铸钢的疲劳	245
一、铸造钢结构和焊-铸钢结构的疲劳	245
二、铸钢件的疲劳	249
参考文献	254

第一章 大型机器零件 的疲劳试验设备

在评定形状复杂的大型零件的疲劳强度时，只是使用近似的计算方法，利用现有的关系式来考虑尺寸因素的影响，将小型标准试样的数据转换到实际的零件和结构，往往不一定能得到理想的结果。

造船、重型、动力和化工等机械制造部门，在对承受交变载荷的大型机器零件和结构元件的实际强度进行评定中出现了严重问题。因此，苏联和其他国家，都对大型机器零件和结构模型的疲劳试验发生了很大兴趣。

现在，苏联、美国、日本、联邦德国、英国和捷克等国，都还只有有限数量的试验机能够进行大型试样的疲劳试验，和进行轴、铁路车辆轴、柴油机曲轴、汽轮机和发电机转子及其它机器零件和结构元件的模型或实物疲劳试验。

在这些试验机上试验试样和零件时，用杠杆、弹簧或液压装置、以及电磁或惯性力加载。用杠杆或弹簧加载的试验机，笨重而且效率低。在试验大型试样时，也使用液压疲劳试验机。但是，这种试验机频率很低，试验基数大时不能使用。用惯性力加载的试验机最先进，它不需消耗很大动力就可使试样得到颇大变形。

苏联的某些试验室里，备有可以对大型试样、全尺寸零件和结构模型进行弯曲疲劳试验和扭转疲劳试验的试验机。中央机器制造与工艺科学研究院、巴顿电焊研究所、全苏柴油机车科学研究所和科学院物理-力学研究所都研制出了这

些试验机。

一、苏联的疲劳试验机

1. 惯性试验机

中央机器制造与工艺科学研究院设计出了许多种惯性疲劳试验机。这些试验机利用惯性振动头加载块振动的动力放大效应工作。按加载方式可分为对称弯曲疲劳试验机和对称扭转疲劳试验机。С.И.亚茨克维奇设计的V-200疲劳试验机可以对固定的圆柱形试样、轴和 $\phi 200 \sim 250\text{mm}$ 的转子模型进行圆弯曲疲劳试验。在试验过程中试样按对称循环做圆弯曲振动，试样本身不旋转，而是载荷向量围绕着试样的轴心旋转。试验机的主要部件为：振动系统（振荡器），带有拖动装置的惯性振动头，机架，起重装置和控制台。

振动系统由试样2（图1）和两个质量相等或接近相等的加载块1和3组成，加载块为盘形，直径1.1m，厚度400mm，试样两端分别固定在两个加载块中。每个圆盘中装有一套碟形弹簧6，每套碟形弹簧由一组直径800/530mm的外弹簧和一组直径530/260mm的内弹簧组成。将碟形弹簧压平后，其外圆支撑在圆盘的凹孔内，内孔压紧试样端部。这样，可以多次装卸试样而不损坏接触面。这样的试样装夹方法和许多试验机上所用的大型试样装夹方法根本不同，现行的装夹方法都是使用各种类型的压合连接，它们使试验成本大为提高。

振动头7是偏心布置在销轴端部的质量，销轴插在下加载块1中。振动头由两个偏心距相同的偏心块组成。偏心距可以在零到最大值 $\rho = 40\text{mm}$ 之间调节。

扭矩由直流电动机9通过万向接头8传递到振动头。试验

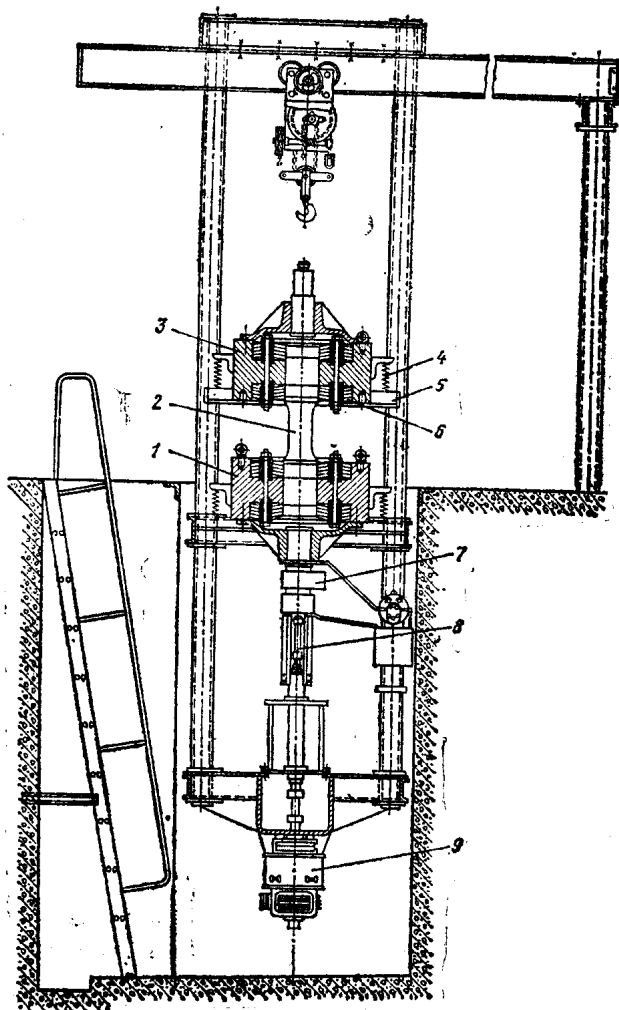


图 1 试样直径200~250mm的Y-200弯曲疲劳试验机

机的振动系统用 8 个软圆柱弹簧 4 安装在机架 5 上, 这些软圆柱弹簧保证上、下加载块能自由振动, 同时也能避免将机架结构的振动传递到基础上。

试样和带有振动头的电动机垂直排列。振动头的旋转中心和试样及电动机轴同心。在试样轴心、加载块和振动头不平衡质量的旋转中心这样配置的情况下, 系统的振形是上、下加载块沿其初始位置向相反方向作周期转动, 转角分别为 φ_1 和 φ_2 。

振动头旋转产生的激振力和不平衡质量旋转角速度的平方成正比, 它使系统强迫谐振。激振力振幅为

$$Q = m\rho\omega^2$$

式中 ω ——振动头质量 m 的角速度;

ρ ——质量 m 的重心和旋转中心的距离。

在试验机最常使用的工作制度——偏心距 $\rho = 30\text{mm}$ 和振动头的旋转频率 $n = 2500 \text{ r/min}$ (41.7Hz) 的情况下

$$Q = m\rho\left(\frac{\pi n}{30}\right)^2 = 12.2 \times 0.03 \times \left(\frac{3.14 \times 2500}{30}\right)^2 \\ \approx 250\text{kN}$$

试验机工作时作用在试样上的弯矩值, 可以用改变偏心块角速度的方法和移动偏心块质量 (相对于旋转中心) 的方法进行调节。

在增大振动头的旋转频率时, 试样上的载荷也增大。用这样的方法来达到试验所需的试样变形值, 并在整个试验期间保持变形值不变。

固有频率和振动头激振频率的比值不应高于一定数值, 以保证试验机稳定工作。当振动头的激振频率小于固有频率的 80% 时, 试验机的工作很稳定。

Y-200疲劳试验机的技术性能为：固有频率58Hz、或3500r/min；振动头频率由12.5到50Hz，或750~3000r/min；每个加载盘的质量约3000kg；试验机平面尺寸 $1.5 \times 4.5\text{m}$ ；电动机功率16kW。

Y-200疲劳试验机用于对 $\phi 200 \sim 250\text{mm}$ 的实心 and 空心轴类试样进行对称循环的弯曲疲劳试验。这些试验可以研究各种因素对金属强度的影响。这些因素包括：各种应力集中（切口、条沟、键槽、孔），表面强化（喷丸处理、滚压、机械冲击等），热处理和化学热处理，钢、铸铁和钛合金的成分与组织等。

除了使用普通试样以外，还可使用各种压合结构、组合结构和焊接连接的接头等特殊试样进行试验。

C.И.亚茨克维奇和B.M.安德连科设计的YII-20、YII-30、YII-50、YII-200、YII-300疲劳试验机可以对截面尺寸为 20×30 、 30×40 、 50×75 、 200×300 和 $300 \times 400\text{mm}$ 的矩形截面试样进行对称循环的平面弯曲试验。这样，就可以在非常宽广的范围内研究试样的绝对尺寸对疲劳强度的影响——从 $20 \times 30\text{mm}$ 截面的小试样到 $300 \times 400\text{mm}$ 截面的大试样。

由于这些试验机上利用了振动的动力放大效应，因此，只需消耗很小的功率就可以在试样上得到相当大的载荷。

YII-300疲劳试验机（图2）和其它试验大型试样的疲劳试验机相比，具有尺寸小、机构简单、工作时无噪声、使用可靠和能够保持载荷恒定等优点。

YII-300疲劳机设有以下部件：振动系统，带有拖动装置的惯性振动头，机架，操纵台，带有夹紧试样的液压夹具的移动式泵站。并备有标定装置。

试样8与固定试样端部的两个加载横梁9一起组成振动

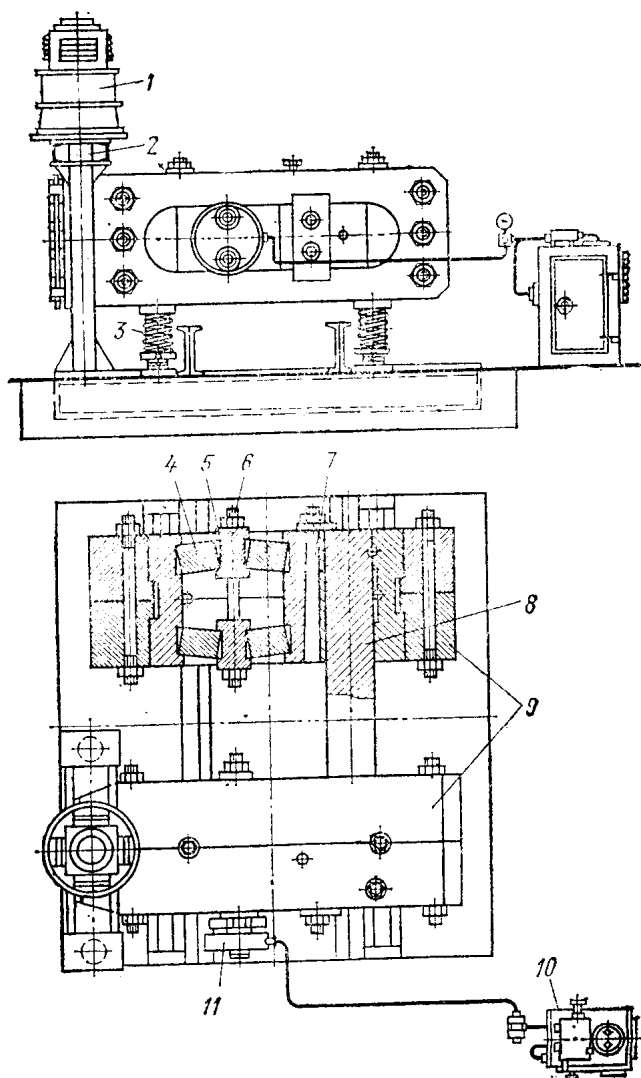


图 2 进行大尺寸元件和零件弯曲疲劳
试验的YΠ-300疲劳试验机的结构图

系统，加载横梁的形状为长方体。振动系统安装在 8 个小刚度的圆柱螺旋弹簧 3 上，以便使横梁可以在水平面内相对于试样纵轴自由振动。这样的振动系统安装方法，排除了将振动传递到试验机周围和建筑物上的可能性，从而不必制造大型基础。用安装在加载梁内的杠杆夹头将试样固定。这些夹头由楔 7、杠杆 4 和滑块 5 组成。在固定试样时用拉杆 6 将滑块拉近，并将杠杆弄平。楔块的拉紧和滑块的靠近，都是利用高压泵装置 10 操纵的专门液压夹具 11 进行。

系统的强迫振动，由安装在试验机一个加载横梁上的惯性振动头进行激振。振动头由壳体、通过滚动轴承安装在壳体内的轴及固定在轴上的偏心块构成。偏心块的总偏心量可以由零调节到给定的数值。振动头备有润滑轴承的流动式润滑系统。

振动头的转子由直流电动机 1 拖动，因而振动头的旋转频率可以在很大的范围内调整。电动机直接安装在振动头上方的支座 2 上，支座固定在试验机的机架上。

为了保证振动系统能自由移动，振动头通过万向接头和拖动电动机相连。

试样中的应力幅值取决于转速和振动头不平衡质量的偏心量。调节它们，可以在试验机加载横梁最有利的振动动载放大系数下得到所需的激振力，从而得到所需的应力值。

设计 VII-300 疲劳试验机的主要目的，是进行带有不同应力集中的特大板试样的对称弯曲疲劳试验，试样的截面尺寸为 $300 \times 400 \text{ mm}$ ，长 2.3 m （质量 2150 kg ）。

由于需要对重型机械和动力机械制造中的许多大型零件（大功率柴油机曲轴，汽轮机与发电机的焊接转子、组合转子和焊接-组合转子，大型轧钢机的轧辊等）的承载能力进