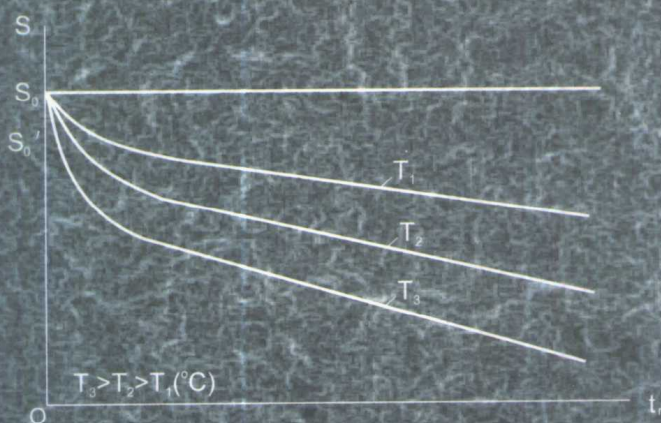


弹簧（材料）应力松弛及预防

Stress Relaxation and Prevention
of Springs(Materials)

苏德达 著



天津大学出版社
TIANJIN UNIVERSITY PRESS

弹簧(材料)应力松弛及预防

苏德达 著

天津大学出版社

内容简介

本书内容共 10 部分:1、2 部分介绍了应力松弛现象的普遍性、松弛失效的危害性、主要特性指标、与其他力学性能之间的关系和测试方法;3~9 部分为本书主要内容,以不同状态的常用弹簧材料及特殊弹性合金为主线条,结合典型弹簧实例,论述了材料成分、热处理及表面强化处理后组织及性能的特点,说明了应力松弛性能的变化规律和预防技术;第 10 部分为全书的理论分析,提出了应力松弛动力学新方程以及松弛变形时位错亚结构变化特征和变形机制与组织结构的关系。

本书可供从事弹簧、弹性元件及金属制品新品种的开发研究、设计与制造、产品检验与管理等人员学习和借鉴;对于从事材料科学与工程、各类机械工程及宇航业等方面的师生及有关科研人员也是一本有益的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

弹簧(材料)应力松弛及预防/苏德达著. —天津:天津大学出版社, 2002.8

ISBN 7-5618-1648-0

I. 弹… II. 苏… III. 弹簧—金属材料—应力松弛—研究 IV. TH135

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 061125 号

出版发行 天津大学出版社

出版人 杨风和

地址 天津市卫津路 92 号天津大学内(邮编:300072)

网址 www.tdcbbs.com

电话 营销部:022-27403647 邮购部:022-27402742

印刷 河北省昌黎县第一印刷厂

经销 全国各地新华书店

开本 148mm×210mm

印张 13.75

字数 410 千

版次 2002 年 9 月第 1 版

印次 2002 年 9 月第 1 次

印数 1—3 000

定价 40.00 元

代 序

弹簧是机械装置不可缺少的重要零件,在绝大多数情况下起着控制零部件运动的作用。弹簧的破坏或任何形式的失效将使机组出现不同程度的故障,甚至诱发机毁人亡的恶性事故,造成重大损失。弹簧品种、材料及结构形式各式各样,加工方法也十分繁多,然而,“应力松弛”却是影响弹簧或弹性元件质量、寿命诸多因素中的核心问题。

本书以“弹簧(材料)应力松弛及预防”为命题,论述了如下 10 部分内容。第 1 部分为概论,阐明了应力松弛现象及其主要特性指标以及与其他力学性能指标间的关系;第 2 部分为测试方法;第 3~9 部分论述了冷拔碳素弹簧钢丝、油淬火回火弹簧钢丝、形变热处理弹簧钢丝、退火态或热轧态钢材、不锈钢弹簧材料、耐热弹性合金及铜合金高导电高弹性材料等制成的各种典型弹簧(如纺织机摇架弹簧、压缩机气阀弹簧、内燃机气门弹簧、汽车和火车上的悬架弹簧及缓冲簧、液压元件或喷油器用调压弹簧、石油牙轮钻头用卡簧等)或弹性元件(如安全阀弹簧、子母弹中的锥簧及尾翼片簧、地震仪用异形弹簧片等)的应力松弛变化规律、处理技术及组织结构变化特点;最后第 10 部分探讨了应力松弛的普遍规律、松弛动力学方程的表达式及其实际应用,对应力松弛机理进行了扼要总结。该书的重点是对各种材料制成的典型弹簧的应力松弛特性与预防技术(如热处理及各种强压处理技术等)进行了较为系统、深入的论述,迄今国内外还极缺少类似的专著。

本书作者长期从事金属材料及热处理专业方面的教学研究工作,他及他所领导的科研组在弹簧材料的强韧化热处理技术、弹簧的失效分析、弹簧应力松弛变化规律及预防技术等方面均有较深的造诣。1992 年作者曾获先进失效分析专家称号,其领导研究的项目于 1981 年获市优秀科技成果二等奖,1982 年获国家发明三等奖,1992 年获发明专利(压缩螺旋弹簧电脉冲强压松弛处理新技术),1992 年获 22 个一级学会颁发的项目成果一等奖(项目名称:弹簧(材料)应力松弛性

能的变化规律及其预防技术的开发研究)。作者编写了《弹性合金》一书的第二篇“通用弹簧钢(1986年)”,主编了《弹簧的失效分析》(1988年)、《热处理手册》Ⅱ卷中的“弹簧的热处理”(1991年二版、2001年三版),在各种杂志上发表论文50篇以上,其中《弹簧的疲劳强度、寿命预测与损伤容限》获中国机械工程学会授予的1991~1996年度优秀论文奖。可以毫不夸大地说,本书作者是我国在弹簧材料热处理、失效分析与预防对策方面有突出贡献的著名专家。

本书内容反映了作者及其科研组在20世纪80~90年代积累的大量实验数据、应力松弛动力学曲线与回归方程以及电镜照片等,也包含了他们结合生产实际问题提出的许多改进弹簧产品质量和提高其使用寿命的技术思路及方法,这些可直接用来为生产服务。特别应指出的是,作者在科研中取得了一些具有国际水平的关于应力松弛的理论成果和技术专利,首次提出了材料在松弛过程中可动位错密度(ρ_m)随时间延续而呈双曲线规律衰减的假设,在著名的Li方程基础上导出了新的应力松弛动力学方程,该方程经过验证,更具普遍性,更符合实际。通过大量电镜照片分析,作者等观察到松弛过程中材料内部发生了位错亚结构的变化特征,首次提出了体心立方材料与面心立方材料在应力松弛时的变形机制。新方程可用来预测弹簧(材料)的松弛失效寿命,为正确理解普通碳素钢丝、低合金钢丝(均属于体心立方结构材料)、奥氏体不锈钢及镍基高温合金(均属于面心立方结构材料)等在应力松弛过程的差异,给出了本质的解释。

本书的出版对从事弹簧(材料)设计、制造及使用者和新品种金属制品开发者以及材料科学基础理论研究的科教人员都有参考价值,必将为我国机械工业基础零部件质量与寿命的提高起到重要的推动作用。同时,这本书也是具有自主知识产权的一部杰出的著作。

中国工程院院士



2001年1月

序 言

苏德达教授的新著《弹簧(材料)应力松弛及预防》一书出版,是弹簧工业和金属材料工业跨入新世纪时值得庆贺的一件事情。

“司空见惯”的弹簧是重要的机械基础件,具有以下功能:①缓冲或减振(如车辆的悬挂弹簧);②机械储能(如仪表和自动控制机构上的原动弹簧、车辆翻转机构的扭杆弹簧);③控制运动(如各种调节器上的弹簧);④测力(如动力计上的弹簧);⑤定位(如卡环);⑥防松(如防松弹簧垫圈)等。因此它被广泛应用于机械、仪表、电器、交通运输及家用电器等行业。随着工业的发展,弹簧的用量愈来愈大,就世界范围来说,已形成北美、西欧和东亚三大弹簧产区。我国(特别是长江三角洲、珠江三角洲地区)的弹簧工业发展迅猛,有的单位年销售额可达4亿元。弹簧材料以金属材料为主,但近年来,非金属材料(如橡胶、塑料、陶瓷等)、气体(如空气、氮气等)用量也日益增加。弹簧的失效与设计、材料、加工工艺和使用均有关系,但导致大量弹簧失效的原因主要来自材料质量和制造工艺质量的低劣。此外,弹簧材料的应力失效(主要表现为弹簧的承载能力随时间而逐渐下降),是常见的也是弹簧工业及相关配套工业十分重视的问题。

本书是目前在国内见到的弹簧松弛失效方面的第一部专著,具有下列特点。

1. 广泛性。全书共分10部分,重点介绍了作者本人十余年来的研究成果,并适当介绍了国内外的最新研究动态,它不仅涉及弹簧材料,还涉及各种金属制品、混凝土构件、橡胶及塑料工业等。

2. 实用性。按照材料类型(如按冷拔钢丝、油淬火回火钢丝、退火状态及热轧态钢材、不锈钢、耐热弹性合金、铜合金高弹性材料等)编排章节,便于读者参阅,同时结合实例介绍了用量大、失效问题多的产品(如内燃机气门簧、纺织摇架弹簧、模具工业的扁钢丝簧等)。

3. 独创性。作者介绍了他的研究成果,即关于应力松弛中材料内

部所发生的组织及亚组织(位错亚结构)的变化过程,并首次提出了体心立方与面心立方材料在应力松弛中位错结构发生的不同类型的变化,对普通碳钢及低合金钢(体心立方结构)与奥氏体钢、镍基高温合金、铜合金(面心立方结构)应力松弛过程的差异,给出了合理的解释。

我于20世纪80年代中期结识苏教授,在十几年的接触中多次听过他的学术报告。他长期就职于天津大学金属材料及热处理专业,从事弹簧材料及弹簧失效分析研究45年,先后承接国家部委等研究课题十余项,多次获国家及省部级的奖励,发表论文五十余篇,申请专利多项,是我国弹簧材料及热处理与失效分析和预防的著名专家,弹簧失效委员会的顾问。他已有77岁的高龄,还能将自己多年来的研究成果整理成书,奉献给读者,对他这种“老骥伏枥,志在弹簧失效分析及预防”的精神深感敬佩。

目前出书难,出技术书更难。为了本书得以出版,两位中国工程院院士雷建权教授和崔崑教授写了建议出版的信,弹簧失效委员会秘书处于2000年12月在京专门向中国机械工程学会失效分析分会及设计分会的领导就失效委员会顾问苏教授的著作出版作了汇报,得到了与会的张英会教授、王仁智研究员、陈玉民及孙微高级工程师的赞同和支持。解放军1001强力弹簧研究所也给予必要的支持,才使本书能与读者见面。受弹簧失效委员会的委托,同时作为参与本书出版的支持者对本书的出版也甚感欣慰。

弹簧失效分析及预防

专业委员会秘书长 刘辉航

2001年2月7日于西安

前 言

应力松弛或弹性衰退是各种材料,特别是金属材料在服役时出现的一种物理现象,是各种机械弹簧(如阀门弹簧及缓冲弹簧等)、螺栓等基础件、精密仪器及仪表中弹性元件的主要失效模式。建筑工程混凝土构件中使用的钢筋、钢棒、钢绞线、钢丝及钢丝绳等均把低松弛作为一项重要的性能指标,在日用品(如各种家具及家用电器)中大量使用的弹簧床垫及弹簧也同样存在着弹性衰退现象。由于弹簧材料及弹性元件应用的广泛性和重要性,深入研究其应力松弛性能的变化规律,寻求有效的预防技术,不仅对提高基础件的质量、增加金属制品新品种、延长它们的使用寿命、节约特殊钢及合金的消耗,甚至能使整套设备运行时安全可靠、充分发挥其生产效率等,都有巨大的技术经济意义,而且,“应力松弛及弹性衰退”也是材料科学与工程中基础理论研究的一个课题。

目前,上述方面的实用与理论研究均在进行中,国内外发表的科学论文也较多,一些发达国家已制定“金属及构件应力松弛测定法”和相应的技术标准,但发表的专著较少。我领导的科研组在 20 世纪 70 ~ 80 年代承接了一些重要弹簧(如阀门弹簧、摇架弹簧、牙轮钻头卡簧等)应力松弛及预防技术的研究课题,并取得一些成果,也发表了近三十篇论文。这也就是编写此书的原因、目的和资料来源。

本书以“应力松弛及预防”为中心内容,以“常用弹簧材料”为书目轴线,以生产中常用而又重要的“典型弹簧”为案例进行编写。在弹簧应力松弛及松弛失效的诸因素中,除了它的结构形状设计及工况条件(如应力水平、工作时间和环境温度等)外,最重要的原因是材质问题。弹簧的失效归根到底是材料失效。

本书内容共 10 部分。在 1、2 部分扼要介绍了应力松弛的概念、特性指标以及应力松弛与其他力学性能之间的关系和它的测试方法。其余 8 部分为本书的主要内容,较详细地论述了弹簧材料,如冷拔碳素弹

簧钢丝、油淬火回火弹簧钢丝、退火态与热轧态弹簧钢材、不锈钢蚀及耐热弹簧钢材与弹性合金和高导电高弹性铜合金等的化学成分、合金化与强韧化原理、供应状态下的组织结构及性能特点,介绍了典型弹簧的设计图纸和技术要求,弹簧的工况条件及制造工艺流程等,重点论述了由上述材料制造的弹簧(冷成形或热成形)经过不同热处理(HTHT及LTHT)、表面强化处理(喷丸或化学热处理等)、预应力处理(prestressing)和稳定化处理(stabilizing)对应力松弛动力学及特性指标的影响,观察了处理前后弹簧材料的组织及位错亚结构的变化,从而优选了一些有效的预防应力松弛的技术措施,使这些弹性元件获得优异的抗应力松弛性能。最后,从材料热力学和位错理论出发,对应力松弛曲线进行了回归分析,导出了更具普遍性和实用性的应力松弛动力学新方程,对松弛变形的微观机制与金属结构类型的关系等进行了总结。

众所周知,应力松弛和断裂是弹簧及弹性元件失效的两种主要模式。断裂,特别是疲劳断裂失效具有突发性,其危害性非常明显,而应力松弛或弹性衰减失效具有渐进性和隐蔽性,往往被人们忽视。实际上,弹簧及弹性元件的功能逐步丧失甚至比完全丧失所带来的损失更为惊人。作者等编著的《弹簧的失效分析》一书主要论述了断裂失效发生的原因及预防技术,本书是它的重要补充。

应当说明,本书的素材除了收集国内外有关的文献外,主要来自本科研组长期从事的教学科研工作所取得的大量实验数据、曲线、图表、照片及撰写的论文。所以,本书应是科研与生产密切结合的产物,也是天津大学师生、实验员与企业科技员工们共同劳动的结晶。在此,作者对原机械工业部重型通用总局所属压缩机行业各厂(所)不仅委托科研任务,还从财力、物力及人员等方面给以很大的支持表示由衷的感谢;也对铁道部、原石油工业部、经纺工业部门和原八机部等有关的许多工厂的合作和具体支持表示诚挚的谢意。还应指出,李忆莲教授以及多届硕士研究生:张捷平、武凤、朱知寿、肖林、吴秉民、谷家越和更多的历届本科毕业生在本科研组的工作中付出了辛勤与创造性的劳动,在此作者一并致谢。

为了本书的出版,哈尔滨工业大学教授雷建权院士和华中科技大

学教授崔崑院士写了推荐信,雷院士还为本书写了“代序”。在此,作者对他们的热情支持表示敬意和感谢。中国机械工程学会失效分会秘书长陈玉民教授级工程师,设计分会副秘书长孙微高级工程师,弹簧失效及预防专业委员会主委王仁智研究员,副主委兼弹簧技术学组组长北京科技大学张英会教授,中国人民解放军 1001 强力弹簧研究所所长、弹簧技术学组和失效委秘书长刘辉航高级工程师,还有副秘书长舒荣福高级工程师为本书的出版进行过专门研究和具体支持。刘辉航秘书长为本书写了序言。在此,作者表示由衷的感谢。

由于作者水平有限,书中一定存在不少缺点和错误,敬希读者批评指正。

作 者

2001 年 3 月

责任编辑： 郭建国
封面设计： 谷英卉
技术设计： 赵淑芬



作者简介

苏德达，教授，1925年生，江西萍乡市人。1951年北洋大学机械系本科毕业，1955年从哈尔滨工业大学金属热处理专业研究生毕业后在天津大学任教40年。中国机械工程学会高级会员，中国弹簧失效委第一届主委、第二届副主委，现任顾问；《机械工程材料》杂志编委；天津市热处理组组长，学会理事；天津市理化检验学会理事；天津市金属学会金属制品学组副主任及中国发明协会会员。

科研成果：“提高压缩机气阀弹簧使用寿命的研究”1981年获天津市科技进步二等奖；“压缩机气阀弹簧丝强韧化热处理新技术”1982年获国家发明三等奖；“弹簧（材料）应力松弛及预防技术的开发研究”1992年在全国22个一级学会联合召开的学术研讨会上获项目成果一等奖，并获“全国先进失效分析专家”称号；“螺旋压缩弹簧电脉冲强压松弛处理新技术”1986~1992年获全国发明专利。在各种期刊发表论文60余篇，其中参加国际学术会议论文6篇，国家一级学会（或杂志）论文10篇，《弹簧疲劳强度、寿命预测和损伤容限》获1991~1996年度机械工程学会优秀论文奖。

目 录

1 概论	(1)
1.1 应力松弛现象及其主要特性指标	(1)
1.2 应力松弛与瞬时拉伸试验的抗力指标	(2)
1.3 应力松弛与弹性减(衰)退	(11)
1.4 应力松弛和蠕变	(14)
1.5 应力松弛研究的重要意义和内容	(17)
参考文献	(20)
2 应力松弛测试方法	(21)
2.1 拉伸与压缩应力松弛试验法	(22)
2.1.1 拉伸应力松弛试验法	(22)
2.1.2 压缩应力松弛试验法	(25)
2.2 弯曲及扭转应力松弛试验法	(27)
2.2.1 弯曲应力松弛试验法	(27)
2.2.2 扭转应力松弛试验法	(38)
2.3 螺旋弹簧(实物)应力松弛试验法	(42)
参考文献	(49)
3 冷拔碳素钢丝弹簧的应力松弛及预防	(50)
3.1 冷拔碳素弹簧钢丝的种类、组织和性能	(50)
3.1.1 冷拔弹簧钢丝的金相组织及亚结构	(51)
3.1.2 冷拔弹簧钢丝的力学性能	(58)
3.1.3 冷拔弹簧钢丝的强韧化原理	(60)
3.2 摇架弹簧的应力松弛及预防	(68)
3.2.1 摇架弹簧的结构、主要参数、工况及技术要求	(68)
3.2.2 去应力退火对摇架弹簧应力松弛性能的影响	(70)
3.2.3 强压处理对摇架弹簧应力松弛性能的影响	(74)
3.2.4 65 钢丝及 65Mn 钢丝制摇架簧的应力松弛及预防	

.....	(94)
3.3 液压元件调压弹簧的应力松弛及预防	(97)
3.3.1 液压弹簧的技术要求及材料分析	(97)
3.3.2 去应力退火对 T9A 钢丝力学性能的影响	(98)
3.3.3 热强压处理对 T9A 弹簧松弛性能的影响	(102)
3.3.4 T9A 弹簧钢丝在应力松弛过程中的组织变化	(106)
3.4 电冰箱压缩机支承弹簧的应力松弛及预防	(108)
3.5 金属制品的应力松弛及预防	(111)
3.5.1 预应力混凝土(PC)钢材(钢丝或钢棒)	(112)
3.5.2 胎圈钢丝及钢帘线的应力松弛及预防	(118)
3.5.3 其他金属制品的应力松弛及预防	(121)
参考文献	(124)
4 油淬火回火钢丝弹簧的应力松弛及预防	(125)
4.1 油淬火回火弹簧钢丝的种类、组织和性能	(125)
4.1.1 油淬火钢丝的生产原理、特点及种类	(125)
4.1.2 油淬火回火钢丝的金相组织和力学性能	(129)
4.1.3 油淬火回火钢丝的发展趋势	(137)
4.2 去应力退火对油淬火钢丝性能的影响	(141)
4.3 油淬火回火碳素钢丝弹簧的应力松弛及预防	(142)
4.4 油淬火回火铬钒钢丝弹簧的应力松弛及预防	(147)
4.4.1 油淬火回火 50CrVA 钢丝制摇架弹簧的应力松弛	(147)
4.4.2 油淬火回火 50CrVA 钢丝制气阀弹簧的应力松弛	(150)
4.5 其他油淬火回火低合金钢丝的应力松弛	(157)
4.5.1 汽车阀门弹簧的应力松弛	(157)
4.5.2 油淬火回火硅铬钢丝制锥簧的应力松弛	(160)
4.5.3 油淬火回火硅锰(60Si2MnA)钢丝的应力松弛	(165)
4.6 淬火钢丝弹簧在应力松弛过程中的组织及亚结构变化	(168)

参考文献	(171)
5 退火态及热轧态钢材制弹簧的应力松弛及预防	(172)
5.1 退火态弹簧钢制簧的应力松弛	(172)
5.1.1 牙轮钻头卡簧的应力松弛及预防	(172)
5.1.2 喷油器调压弹簧的应力松弛及预防	(177)
5.1.3 电站锅炉安全阀弹簧的应力松弛及预防	(180)
5.1.4 碟簧及膜片弹簧的应力松弛及预防	(183)
5.2 热轧弹簧钢的应力松弛	(189)
5.2.1 汽车悬架压缩螺旋弹簧的应力松弛	(190)
5.2.2 扭杆弹簧的应力松弛	(200)
5.2.3 车用缓冲弹簧(圆簧和板簧)的应力松弛	(202)
5.3 扁钢带制簧的应力松弛	(211)
5.3.1 蜗卷弹簧的应力松弛	(211)
5.3.2 模具弹簧的应力松弛	(216)
参考文献	(219)
6 热处理及表面强化对弹簧应力松弛性能的影响	(221)
6.1 整体热处理对弹簧应力松弛性能的影响	(221)
6.1.1 对弹簧应力松弛性能的影响	(221)
6.1.2 恒温热处理对弹簧应力松弛性能的影响	(222)
6.1.3 低碳马氏体在弹簧生产中的应用	(227)
6.2 形变热处理对弹簧应力松弛性能的影响	(230)
6.2.1 LTMT 弹簧钢丝的应力松弛	(230)
6.2.2 HTMT 弹簧的应力松弛	(234)
6.3 感应加热淬火对弹簧(钢)应力松弛性能的影响	(241)
6.3.1 用感应快速加热制造超细晶粒钢棒	(241)
6.3.2 扭杆弹簧经高频加热淬火后的力学性能	(242)
6.4 表面强化处理对应力松弛性能的影响	(245)
6.4.1 弹簧的低温化学热处理及其性能特点	(246)
6.4.2 弹簧表面喷丸强化及其特性	(252)
6.4.3 弹簧残留应力的松弛	(257)

参考文献	(259)
7 不锈钢弹性元件的应力松弛及预防	(261)
7.1 奥氏体不锈钢(弹簧)的应力松弛及预防	(261)
7.1.1 去应力退火对 1Cr18Ni9 摇架弹簧应力松弛性能 的影响	(262)
7.1.2 强压处理对 1Cr18Ni9 弹簧应力松弛的影响	(266)
7.1.3 应力松弛动力学及组织结构变化	(271)
7.2 马氏体不锈钢弹簧的应力松弛	(278)
7.3 沉淀硬化型不锈钢的应力松弛	(281)
7.4 马氏体时效不锈钢制弹性元件的应力松弛	(285)
7.4.1 00Cr12 原材料分析及尾翼片簧的加工和试验方法	(285)
7.4.2 尾翼片簧的时效处理	(288)
7.4.3 尾翼片簧的强弯处理	(290)
7.4.4 尾翼片簧的应力松弛曲线及松弛失效寿命预测	(292)
7.5 奥氏体沉淀强化的高弹性合金的应力松弛	(294)
7.5.1 合金的成分、组织、性能特点及强化原理	(294)
7.5.2 3J-1 合金的应力松弛	(296)
7.5.3 3J-2 及 3J-3 合金的应力松弛	(299)
参考文献	(303)
8 耐热弹性合金弹簧的应力松弛	(304)
8.1 耐热弹性合金的性能特点	(304)
8.2 铁基耐热钢和合金的应力松弛或蠕变	(307)
8.3 镍基高温高弹合金的应力松弛	(314)
8.3.1 耐热弹簧(刮片簧)的松弛变形失效与选材	(314)
8.3.2 高温合金 GH4169(Inconel 718 合金)的应力松弛	(317)
8.3.3 NiCr15Fe7NbTi2Al(Inconel X-750)合金的应力松弛	(323)

8.3.4	Ni - Cr - Co 系镍基高温合金的应力松弛	(325)
8.3.5	Ni - Cr - Nb 系高温高弹性合金的应力松弛	(330)
8.4	以其他元素为基的高温高弹性合金的应力松弛	(332)
8.4.1	钴基高温高弹性合金的应力松弛	(332)
8.4.2	钛(Ti)基弹性合金的应力松弛	(335)
	参考文献	(342)
9	铜合金高弹性材料的应力松弛	(343)
9.1	形变强化型铜基弹性合金的应力松弛	(343)
9.1.1	H68(H70)黄铜片材的应力松弛	(345)
9.1.2	青铜的应力松弛	(356)
9.1.3	形变强化铜合金松弛稳定性的改进措施	(372)
9.2	沉淀硬化型铜合金的应力松弛	(376)
9.2.1	铍青铜的应力松弛	(376)
9.2.2	不含铍的青铜的应力松弛	(390)
	参考文献	(394)
10	弹簧(材料)应力松弛机理及其应用	(394)
10.1	应力松弛的热力学分析	(395)
10.2	应力松弛动力学及其影响因素	(395)
10.2.1	松弛动力学方程及其应用	(397)
10.2.2	影响松弛动力学的因素	(397)
10.3	在应力松弛过程中的组织及位错亚结构变化	(413)
10.3.1	体心立方结构材料在应力松弛过程中的组织 及亚结构变化	(414)
10.3.2	面心立方结构材料在应力松弛过程中的组织 及亚结构变化	(416)
	参考文献	(421)