

机械热变形 理论及应用

Theory and Application of Mechanical
Thermal Deformation

费业泰 等著



國防工業出版社
National Defense Industry Press

机械热变形理论及应用

Theory and Application of Mechanical Thermal Deformation

费业泰 李桂华 卢荣胜 黄强先 著
胡鹏浩 罗 哉 苗恩铭 李光珂

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

机械热变形理论及应用/费业泰等著. —北京:国防工业出版社, 2009. 6

ISBN 978-7-118-06222-9

I. 机... II. 费... III. 机械制造-热变形 IV. TH161

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 024679 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

天利华印刷装订有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 850 × 1168 1/32 印张 7 $\frac{1}{4}$ 字数 198 千字

2009 年 6 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 36.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革

开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

**国防科技图书出版基金
评审委员会**

国防科技图书出版基金 第五届评审委员会组成人员

主任委员 刘成海

副主任委员 王 峰 张涵信 程洪彬

秘 书 长 程洪彬

副 秘 书 长 彭华良 蔡 镭

委 员 于景元 王小谟 甘茂治 刘世参
(按姓氏笔画排序)

李德毅 杨星豪 吴有生 何新贵

佟玉民 宋家树 张立同 张鸿元

陈冀胜 周一宇 赵凤起 侯正明

常显奇 崔尔杰 韩祖南 傅惠民

舒长胜

本书主审委员 刘世参

前 言

任何物体均是存在于一定的温度环境之中的,构成物体的材料物理性能或形体在不同温度环境下将受到一定的影响,人们常言的材料热胀冷缩现象也已成为人皆知晓的自然现象,因此人类的生活、生产和科技活动在不同程度上受到温度影响是不可避免的客观规律。现代科学知识告诉我们,人们可以发现自然规律并利用它来为人类服务。

在工程技术与科技活动中,温度的影响尤为显著,特别是高性能高精度机械工程与仪器科技中,温度已成为影响机械与仪器性能及精度的重要或关键的因素,因此人们多年来一直重视对温度的影响进行研究,并取得了一定成果。由费业泰主持的学科组,在国家自然科学基金、原机械工业部技术发展基金和教育部博士学科点专项基金等大力支持下,近 30 年来连续获得 8 个高水平资助项目和 3 项合作研究课题,其中国家自然基金资助项目 6 个。我们先后共有 20 余位师生(其中包括博士和硕士研究生 18 人)投入研究工作,对机械热变形理论及应用技术进行了较为系统深入的研究,取得了具有一定新颖性和实用性的创新成果。

机械热变形理论及应用研究,涉及多学科领域,在理论与实践上均具有相当难度,本学科组坚持不懈,克服多重困难,使研究工作不断深入,取得了新进展和创新成果,其主要表现在三方面:一是研究了传统机械热变形理论存在的不足,给予补充完善及新解释;二是对传统理论中没有研究而又具有重要性的问题进行了深入研究,提出了新的理论与认识;三是对传统理论研究过的但又有不妥之处的问题提出了更为科学的理论。这三方面的理论与实践成果在本书各章相关内容中均有详细的论述。例如,热胀冷缩是

物体材料属性的一种普遍现象,但对物体形体尺寸热胀冷缩则不具有普遍性,即由于形体相关尺寸制约,热变形后形体尺寸可能增大,也可能缩小,还可能不受温度影响而保持不变。即物体材料具有热胀冷缩特性,而物体形体尺寸则不完全具有这种属性。由此提出了新概念与新思想,显然与传统的概念截然不同,它揭示了传统的热变形计算公式存在的弊端。根据上述各项研究成果,共发表了 120 余篇学术论文。同时,为了验证理论成果的正确性,还研制了四台热变形试验装置,以适用于均匀温度场和非均匀温度场状态下,对简单形体和复杂形体进行二维和三维的热变形试验测试。各项研究成果不仅促进了热变形理论研究的发展,也为实际工程提供了解决热变形问题的理论与实际依据,而且已为国内有关高等学校、科研院所和大型企业解决了迫切的实际热变形应用问题。

本学科组的机械热变形理论及研究取得的多项研究成果已在国内外学术界产生重要影响,并得到国家有关部门的重视,共有 40 余位省部级领导、国家自然科学基金委领导和院士来本学科组研究实验室参观指导,其中包括原机械部包叙定部长,教育部周济部长,雷天觉院士、金国藩院士、刘先林院士、李同保院士等 20 余位院士,他们对本学科组的研究成果均给予充分肯定与高度评价,同时给予大力支持,这对我们研究工作的持久深入是巨大鼓舞。

为了对我们的研究工作与成果进行全面系统的总结,并发挥广泛的社会效应,在国防科技图书出版基金的支持下,我们撰写了这本机械热变形理论及应用专著。根据多年来的研究成果,我们拟定了本书体系、纲目与各章内容,并由参加实际研究工作的几位教师和研究生分别撰写有关章节。全书由费业泰主持撰写及修改定稿,并撰写第 1 章,李桂华博士、副教授撰写第 2 章,卢荣胜博士、教授撰写第 3 章,黄强先博士、教授撰写第 4 章,胡鹏浩博士、教授撰写第 5 章,罗哉博士、副教授撰写第 6 章,苗恩铭博士、副教授和李光珂硕士共同撰写第 7 章。此外,李光珂硕士还参加全书各章统稿等工作。

由于机械热变形理论与应用是涉及传热学、热弹性理论、机械学和计量学等多学科的复杂研究领域,在理论和实践上也存在较大的研究难度,需要长期不断地进行研究,我们所进行的研究工作,虽然取得了一些成果,但对于复杂的机械热变形理论与应用研究领域,也仅仅是其中一部分。而且已取得的研究成果,其中有的建立了理论并被试验所证明;有的虽然建立了理论,由于受条件限制未能进行试验验证;有的则是给出了试验结果,尚未给出严格的理论表述。因此出版本书也仅是抛砖引玉之举,并期望有关学者能够对机械热变形理论共同进行研讨,以推动热变形理论研究进一步发展。同时由于本书撰写时间仓促和作者水平所限,不足之处在所难免,希望读者提出宝贵意见,谨表衷心感谢!

目 录

第 1 章	绪论	1
1.1	热变形误差研究的重要意义	1
1.2	热变形误差研究进展及主要问题	4
1.3	热变形误差的影响因素分析	7
1.4	精确材料热膨胀系数研究	8
1.5	热变形理论研究	9
1.6	热变形理论应用技术研究	12
1.7	环境温度控制技术	13
第 2 章	机械热变形的基础理论	17
2.1	热传导理论基础及分析	17
2.1.1	热传导的概念	18
2.1.2	温度场的边值条件	22
2.1.3	温度场的求解	24
2.2	热弹性理论及其解法	35
2.2.1	各向同性体热弹性问题的基本方程	36
2.2.2	热应力问题解法	41
第 3 章	材料热膨胀系数	54
3.1	概述	54
3.2	材料热膨胀系数的定义	56

3.3	材料热膨胀机理与理论计算	59
3.3.1	弗兰克尔双原子模型	59
3.3.2	准谐振近似理论	61
3.3.3	热膨胀现象的定性说明	64
3.3.4	热膨胀现象的定量描述	65
3.4	材料热膨胀系数的影响因素分析	70
3.4.1	温度的影响	70
3.4.2	材料成分变化的影响	71
3.4.3	材料金相组织的影响	71
3.4.4	试样加工方法不同造成的材料热膨胀 系数值的差别	72
3.4.5	测量方法所带来的误差分析	73
3.4.6	试样形状尺寸的影响	74
3.4.7	材料热膨胀系数定义的标准造成的误差	75
3.4.8	其他因素对测量值的影响	76
3.5	材料热膨胀系数定义不同引起的误差分析计算	76
3.5.1	平均热膨胀系数产生的误差	77
3.5.2	微分热膨胀系数产生的误差	77
3.5.3	现行两种定义的材料微分热膨胀系数 定义不同产生的误差	81
3.6	材料热膨胀系数对热变形计算精度的影响分析	83
3.6.1	线膨胀系数的近似性	84
3.6.2	热变形误差模型的非线性	85
3.6.3	物体形状的复杂性	86
3.6.4	物体温度的不均匀性	87
3.6.5	热变形误差公式的可靠性	88
3.7	形体热变形系数的概念	89

3.7.1	热变形系数的定义	89
3.7.2	热变形系数与热膨胀系数的关系	90
3.7.3	热变形系数与边界条件的关系	91
3.8	材料精确热膨胀系数	92
3.8.1	传统定义的热膨胀系数的局限性	92
3.8.2	材料精确热膨胀系数	94
第4章	零件形体热变形机理	96
4.1	残余应力对零件热变形影响分析	96
4.1.1	概述	96
4.1.2	热处理对残余应力形成及分布的影响	98
4.1.3	切削加工对表层残余内应力形成及 分布的影响	105
4.1.4	残余应力影响金属零件热变形机理	108
4.2	零件形体热变形分析计算	112
4.2.1	概述	112
4.2.2	回转体零件径向尺寸热变形的影响计算	113
4.2.3	残余应力对现行热膨胀系数测量的影响 计算	124
4.2.4	残余应力对热配合的影响计算 ^[43,48]	127
第5章	常见机械零件形体热变形计算	130
5.1	典型形体温度场的理论分析	131
5.1.1	实心主轴一维温度场计算 ^[10]	131
5.1.2	圆盘一维温度场计算 ^[10]	132
5.1.3	球体的温度场计算 ^[3]	133
5.2	主轴三维热传导问题的级数解	138
5.2.1	Bessel 方程	138

5.2.2	主轴的热传导特点和数学描述 ^[49]	140
5.3	圆盘类零件热变形计算	148
5.4	圆环直径热变形分析 ^[50]	150
5.4.1	圆环内径尺寸对内径热变形影响	150
5.4.2	圆环外径对内径热变形影响	151
5.4.3	试验结果分析	152
5.5	方体类零件热变形计算	153
5.6	渐开线圆柱齿轮的热变形计算 ^[51]	157
5.6.1	渐开线齿轮的变形分析	157
5.6.2	齿轮轮齿的几何热变形计算	158
5.6.3	渐开线齿轮非渐开线误差测量结果	170
第6章	最佳热配合理论及应用研究	172
6.1	最佳热配合研究	172
6.1.1	热变形对间隙配合影响的理论分析与计算	173
6.1.2	热变形对过盈配合影响的理论分析与计算	183
6.2	最佳热配合原理及应用研究	186
6.2.1	最佳热配合基本原理	187
6.2.2	最佳热配合补偿值计算	192
6.3	应用举例	204
第7章	多维高精度热变形试验装置	206
7.1	概述	206
7.2	多维高精度热变形试验装置原理及组成系统 ^[57,58]	207
7.2.1	试验装置功能原理	207

7.2.2	试验装置组成	208
7.2.3	专用夹具的研制	213
7.2.4	热变形测量的精度分析	215
7.3	典型形体热变形测量方法	218
7.3.1	长度的测量	218
7.3.2	圆环直径的测量	219
参考文献		221

Contents

Chapter 1	Introduction	1
1.1	Great Significance of Thermal Deformation Research	1
1.2	Progress and Main Problems in Thermal Deformation Error Research	4
1.3	Analysis of Factors Affecting on Thermal Deformation Error	7
1.4	Research on Accurate Thermal Expansion Coefficients of Materials	8
1.5	Theoretical Research on Thermal Deformation	9
1.6	Thermal Deformation Theory and Its Application Technologies	12
1.7	Environmental Temperature Control Technology	13
Chapter 2	Basic Theory of Mechanical Thermal Deformation	17
2.1	Basic Theory and Analysis of Thermal Conductivity	17
2.1.1	Concept of Thermal Conductivity	18
2.1.2	Boundary Conditions of Temperature Field	22

2. 1. 3	Solution of Temperature Field	24
2. 2	Thermal Elasticity Theory and Solutions	35
2. 2. 1	Basic Thermal Elastic Equations of Isotropic Body	36
2. 2. 2	Solutions to Thermal Stress	41
Chapter 3	Thermal Expansion Coefficients of Materials	54
3. 1	Summary	54
3. 2	Definition of Thermal Expansion Coefficients of Materials	56
3. 3	Mechanism and Theoretical Calculation of Material Thermal Expansion	59
3. 3. 1	Frankel Diatomic Model	59
3. 3. 2	Quasi – Resonant Approximation Theory ...	61
3. 3. 3	Qualitative Explanation of Thermal Expansion Phenomenon	64
3. 3. 4	Quantitative Description of Thermal Expansion Phenomenon	65
3. 4	Affecting Factor Analysis of Thermal Expansion Coefficient of Material	70
3. 4. 1	Effect of Temperature	70
3. 4. 2	Effect of Material Composition	71
3. 4. 3	Effect of Material Microstructure	71
3. 4. 4	Difference of Thermal Expansion Coefficients Caused by Different Preparation Methods of Specimen	72
3. 4. 5	Analysis of Error Caused by Measurement	

Methods	73
3. 4. 6 Effect of Specimen Size	74
3. 4. 7 Error Caused by Definition Standard of Material Thermal Expansion Coefficient ...	75
3. 4. 8 Other Factors Affecting on Measured Value	76
3. 5 Error Analysis and Calculation Caused by Different Definitions of Thermal Expansion Coefficient of Material	76
3. 5. 1 Errors Caused by Average Thermal Expansion Coefficient	77
3. 5. 2 Errors Caused by Differential Thermal Expansion Coefficient	77
3. 5. 3 Errors Caused by Difference between Two Present Definitions of Thermal Expansion Coefficient of Material	81
3. 6 Analysis of Effect of Thermal Expansion Coefficient on Calculation Accuracy of Thermal Deformation	83
3. 6. 1 Approximation of Thermal Expansion Coefficient	84
3. 6. 2 Nonlinearity of Thermal Deformation Error Model	85
3. 6. 3 Complexity of Object Shape	86
3. 6. 4 Thermal Inhomogeneity of Object	87
3. 6. 5 Reliability of Calculation Formula of Thermal Deformation Error	88