

# 热 应 力

B. E. 盖脱伍德

科学出版社

52.526  
526

# 热 · 应 · 力

B. E. 盖脱伍德 著

魏信方 邵成助 张承煦 译

王德荣 校

16/15

科 学 出 版 社

1964

B. E. GATEWOOD  
THERMAL STRESSES  
With Applications to Airplanes, Missiles,  
Turbines, and Nuclear Reactors  
McGraw-Hill Book Co. Inc. 1957

### 內 容 簡 介

本书主要讲述飞行器结构在气动加热后结构内的温度分布和热应力的计算方法，亦涉及结构的热刚度、热疲劳、热冲击、热屈曲、高温蠕变以及热载荷对颤振的影响诸方面的问题。

中译本中已按俄译本 (Температурные Напряжения) 将原书中的英制单位改为公制单位，以便于查用。俄译本末所附的俄文参考文献亦已录于中译本末。

本书可供研究高温强度的设计工程师、研究人员、高等学校教师、研究生、大学生等参考。

### 热 应 力

B. E. 盖脱伍德 著

魏信方 邵成勋 张承煦 译

王德荣 校

\*

科学出版社出版

北京朝阳门大街 117 号

北京市书刊出版业营业许可证出字第 061 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经销

\*

1964 年 7 月 第 一 版 开本：850×1168 1/32

1964 年 7 月 第一次印刷 印张：8 12/16

印数：0001—5,000 字数：219,000

统一书号：13031·1936

本社书号：2988·13—1

定价：[科七] 1.50 元

## 俄譯本編者序

推荐給讀者的这本书論述了一个重要問題——热应力,这个問題的現實性,最近几年随着現代技术中热过程的溫度及速度的增大而急驟增长。热应力問題发生在机器制造、航空、冶金、建筑业和其他部門,也就是与溫度作用有关的強度問題可能有很大意义的部門。进行強度計算时,在确定热应力的同时,发生由溫度变化引起的位移問題,它們决定着机件各个部分在工作时的相对位置。

本书所研究的是:当某一零件或其相应于溫度变化的某些部分很难自由变形时,在零件中产生的热应力問題。最常見的热应力系当零件体内各点具有不同溫度时发生,其时零件的各个部分力图按不同数量增大或减小尺寸以致引起压应力和拉应力。当各元件体内有常溫而各元件之間有联系,以及如果零件是由几种綫热膨胀系数不同的材料制成时,也会产生热应力。

在估計強度时,必須根据零件的材料,溫度作用的大小、持續時間和重复性,来确定弹性极限內的应力或考虑到材料屈伏时的变形。

計算弹性极限內的热应力(热弹性应力)是比較簡單的問題。在弹性理論方面的著作中,对于給定的、通常不随時間变化的溫度場,這一問題已經解决。本书中引述了解这些問題的基本关系式和某些例題。这个問題的系統闡述和一系列热弹性应力的解,讀者可在下列书籍中找到: Н. Н. Лебедев, “Температурные напряжения в теории упругости” (ОНТИ, 1937) 和譯自德文的\* Е. Мелан, Г. Паркус “Температурные напряжения, вызываемые

---

\* 有中譯本,“由于定常溫度場而产生的热应力”,何善培譯,科学出版社,1955——譯者注。

стационарными температурными полями” (ГИФМЛ, 1958). 列在书末的俄文文献多半是在該方面的工作。

对于解决工程問題，确定在随時間变化的温度場下弹性极限內的热应力問題，是极为重要的問題。在实际計算热应力时，通常有必要估算在机件启动和停車时产生的、非定常热状态下的热应力。这是由于，为了更好地利用机件而加速启动和停車会增大温度分布的不均匀性，而这就导致热应力的增长，这对強度来讲可能是危险的。計算时需要求解非定常热传导問題，并且要确定当时最大可能的热应力。对求解热传递問題的理論和方法，苏联作者們探討得較为全面。在列举的俄文文献中，引述了这方面的一系列理論及实验工作，它們对讀者計算热应力看来是有用的。

本书中不太多的关于非定常状态下热应力的材料是很有价值的，因为在苏联及国外的現有文献中，对这个問題都闡述得很不够。

本书中有許多章节，参考了美国工业的經驗，叙述主要用于飞机制造业的在温度作用下的強度及稳定性問題。虽然引述的实际材料有限，但是，这里已能很好地說明所产生問題的复杂性和在解决实际問題时考虑其各个方面的必要性。

与热应力有关的一系列問題，本书中尚未触及，沒有研究确定由温度改变引起的塑性变形下的应力問題；各种实验研究方法在确定热应力和热状态时具有很大意义，这在本书中並沒有反映。

顾及所产生的工程問題，論述了确定热应力及估計它們強度的影响的各种处理方法，这是本书的优点。因此，尽管在不少問題上的研究很簡略，本书对于在設計及計算受温度作用的零件及結構部門工作的苏联讀者是有价值的。

Н. И. 普利哥罗夫斯基(Пригоровский)

## 序

自二次大战以来,为了飞机与导弹的需要而有超声速出现,这就使得飞机结构设计师面临着包括温度、热应力和材料性质等在内的一些新问题。发动机设计师在这些问题上已经做了很多工作,但是对于航空结构设计师来说,试图解决金属薄壁结构上这些问题的的工作还刚刚开始。同样,由于原子能为人们所掌握,在核反应堆的设计上也引进了复杂的热传递与热应力问题。本书试图给出着手研究这类问题的基础知识,并提出解决飞机与导弹结构、喷气发动机以及核反应堆等方面与高温有关的各种问题的可能步骤。

本书并不限于讨论在给定温度分布下,并且没有屈曲时,求解结构内的弹性热应力的古典热应力问题,而是接触到结构设计问题的各个方面:温度分布、各种结构中的弹性与非弹性热应力、弹性与非弹性的外载应力\*和热应力的组合、各种材料及各种载荷条件下的许用应力、高温对屈曲、挠曲、刚度、疲劳、冲击与颤振的效应。

着手研究这类问题的方法是先建立完整的问题,然后根据物理状况或实验资料作出一些假定,使问题简化。对这样取近似后的问题作出分析解,它示出了问题中的基本参数,并允许我们作出应力随这些参数变化的图表。然后再研究各个简化假设,求出修正系数,以改善解的精确度。在大多数情况下,从这样的解算步骤所得的结果,对结构设计已足够准确。实际上,热应力计算只是结构设计所必需的一完整系列的近似计算程序之一。在这里所提出的热应力计算步骤,可认为与设计程序中某些其他步骤同样准确,

---

\* 原文为 applied stress, 即由外载荷所引起的应力,译为外载应力——译者注。

而較之根据运流热传递計算所得的温度以及在蠕变状况下得出的許用压应力更为准确。不仅如此，采用包括模拟机或计算机等在內的最为細致的計算方法，其所得結果的精確程度也不会超过原始数据。因为用来求解温度分布及所引起的热应力的原始数据，包含着材料与大气的物理性質与机械性質等，它們是相当散布的測定值，因此由任何計算步驟所得的結果，至少亦有同等的散布。

本书第一章給出了热应力方程，从簡單情况开始，而直到建立一般形式的三維方程。本书其余各章将引証第一章所列的热应力公式。第二章給出热传导、热輻射、热运流与气动加热等的温度方程，并且应用这些方程得出典型飞机或导弹結構的理想結構元件的热平衡方程。在后面若干章內将引証第二章的那些温度方程。

第三章內計算了一个理想化的結構元件的温度分布和热应力，此結構元件是由一块温度均匀的蒙皮和一根有另一均匀温度的桁条連接而成。在此情形下，对这理想化的元件來說，時間是唯一的独立变量。在对于蒙皮元件的气动加热、蒙皮对桁条的热輻射以及蒙皮与桁条間接合处的热阻作了某些假設以后，得出了温度与热应力的分析解。确定了与几何形状、材料性質及時間等有关的一些重要参数，并且画出了最大应力随这些参数变化的曲綫。

在第四章中，将第三章中的解算步驟推广到了一維温度与热应力变化的情形。将時間和厚度作为独立变量，求得了飞机結構中的厚板、梁或多腹板盒型梁的分析解。第五章給出了某些特別重要的較簡單的二維热应力問題，而一般的二維問題則在第九章中討論。

第六章用以討論高温下材料的性質、在各种載荷条件下的許用应力与材料的效率。对材料的热疲劳与热冲击亦作了一定的討論。在第七章中，研究了兼有外載应力、热应力和許用应力的应力分析問題，特別着重在非弹性热应力、外載应力与热应力的非弹性組合、以及外載应力与热应力組合的時間。在第八章中，研究了在高温与热应力作用下結構的位移与刚度。給出了簡單的解算步驟，以確定結構的位移与刚度的近似值，及它們对热应力与顫振的

合效应。

第九章中研究了一般二維热应力問題的一些情形，特别是能量法和复变函数法，并用以解了几个問題。

由以上概述可見，本书主要是为从事飞机結構分析的航空工程师与航空工程学院的学生而准备的。但是，因为有相当部分的材料是初次发表，所以任何一个研究热应力的人，或对其有兴趣者，都可从本书获得有用的知識。有关渦輪机叶片，渦輪轉盘及核反应堆等热应力問題的几节也已包括在本书中，旨在給出噴气发动机設計与核反应堆設計中所遇到的問題的概念。而对于沒考虑飞机結構的、古典热应力理論的課程，可以用第一、五、九章为基础。

本书是以作者在空軍工程学院对航空工程研究生所开热应力課程为基础的。除掉第二章和第五章中部分材料外，前八章适用于一个学期每周为三小时的課程（或一季度每周为四小时的課程）。在前八章中所用到的数学运算不超出初等偏微分方程的范围，而第九章則需要一些复变函数理論和結構分析中所用的能量法的知識。

B. E. 蓋脫伍德



## 符 号

由于热传递理論中某一特性的标准符号可能与結構分析中不同特性的标准符号相同,因此,每当在同一式子中出现从不同領域引来的相同符号之时,就必须改变标准的記法。除此种情况外,仍采用标准符号;因为符号应有的含义通常由其內容即可明了。下列符号表系按照全书的一般記号、材料性質、几何性質、載荷、参数以及下标而分組排列。只在某一节中定义和使用的符号未予列入。

一般記号	$\nabla^2$	拉普拉斯算子 $\left[ \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right]$
	$e$	正应变
	$f$	正应力,公斤/厘米 <sup>2</sup> 或公斤/毫米 <sup>2</sup>
	$F$	許用应力,公斤/厘米 <sup>2</sup> 或公斤/毫米 <sup>2</sup> (关于各种許用应力見表 6.3); 函数
	$g$	重力加速度, 9.81 米/秒 <sup>2</sup>
	$\gamma$	剪应变
	$i$	$(-1)^{1/2}$
	$\phi$	应力函数; 解析函数
	$\psi$	解析函数
	$q$	热传递, $\frac{\text{千卡}^*}{\text{小时}}$
	$r, \theta$	极坐标
	$r, \theta, z$	柱坐标
	$s$	弧长; 单位圓內的复变量
	$t$	時間, 小时, 分, 秒; 单位圓边界上的复变量

\* 俄譯作: 表面間的热流——譯者注。

	$T$	温度, $^{\circ}\text{C}$ , $^{\circ}\text{K}$ ; 自基准温度 $T_0$ 算起的温度改变
	$\tau$	剪应力, 公斤/厘米 <sup>2</sup> 或公斤/毫米 <sup>2</sup>
	$u, v, w$	$x, y, z$ 方向或 $r, \theta, z$ 方向的位移
	$U$	双调和函数
	$v$	速度, 厘米/秒或米/秒
	$V$	温度函数
	$w(s)$	映射函数*
	$x, y, z$	直角坐标
	$z$	复变量
材料性质	$\alpha$	线热膨胀系数, $1/^{\circ}\text{C}$
	$c_p$	比热, $\frac{\text{千卡}}{\text{公斤} \cdot ^{\circ}\text{C}}$
	$\delta$	伸长百分率
	$E$	弹性模量, 公斤/厘米 <sup>2</sup>
	$e$	发射系数
	$F$	许用应力, 公斤/厘米 <sup>2</sup> (各种许用应力见表6.3)
	$G$	剪切弹性模量, 公斤/厘米 <sup>2</sup>
	$h$	运流热传递系数, $\frac{\text{千卡}}{\text{小时} \cdot \text{米}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}}$
	$k$	热传导率, 卡/小时·厘米· $^{\circ}\text{C}$ ; $E \alpha$ ; $E\alpha/(1-\nu)$
	$m$	泊松比的倒数
	$\mu$	粘性系数(公斤·秒/米 <sup>2</sup> )
	$\nu$	泊松比
	$\rho$	密度, 克/厘米 <sup>3</sup> , 公斤·秒 <sup>2</sup> /米 <sup>4</sup>
	$\sigma$	辐射常数, $4.96 \times 10^{-8}$ 千卡/米 <sup>2</sup> ·小时· $^{\circ}\text{K}^4$
几何性质 $A, S$		面积, 厘米 <sup>2</sup> 或米 <sup>2</sup>
	$a, b, c, d, L$	长度或高度、或宽度、或厚度, 米, 厘米或毫米
	$c$	中性轴至最外层纤维的距离, 米, 厘米或毫米;

\* 俄译作: 几何参数函数——译者注。

		柱端固定系数	
	$e$	間隙;偏心率,毫米	
	$e_c$	許用鉚釘撓度	
	$h, s, t$	蒙皮或板的厚度,米,厘米或毫米	
	$h_w$	腹板厚度	
	$I$	慣性矩,厘米 <sup>4</sup>	
	$J$	极慣性矩,厘米 <sup>4</sup>	
	$K$	屈曲系数,式(6.2)	
	$L'$	$L/c^{1/2}$ ,有效柱长	
	$\rho$	迴轉半径,厘米或毫米	
	$s$	鉚釘間距,厘米或毫米	
	$W$	板的撓度,厘米或毫米	
載荷	$M$	弯矩,公斤·厘米	
	$N$	扭矩,公斤·厘米	
	$P$	压力,力,公斤/厘米 <sup>2</sup>	
	$P$	热載荷,公斤	
	$P_c$	許用鉚釘載荷,公斤	
	$P, Q$	外載荷,公斤	
	$q$	剪流,公斤/厘米	
	$X, Y, Z$	$x, y, z$ 方向的分力	
	参数	$B$	热应力参数,式(3.5);許用应力参数,式(6.1), (6.2), (6.4);最佳应力参数,式(6.24), (6.27), (6.29)
		$D$	輻射参数,式(3.11), (3.15);撓度参数,式(8.11), (8.12), (8.14), (8.16), (8.18), (8.19), (8.41), (8.44), (8.45), (8.55), (9.26);刚度参数,式(9.21)
$\eta$		屈曲应力参数,式(6.3)	
$H$		式(3.1), (3.56), (7.11)	
$H_b, H_c$		式(4.2), (4.3)	

- $h_i$  接合热传导, 式(3.24)  
 $K$  約束系数, 式(1.4), (1.6); 屈曲系数, 式(6.2)  
 $LM$  拉生-米勒 (Larson-Miller) 参数, 式(6.17)  
 $M$  最大或压損应力参数, 式(6.9)  
 $Ma$  馬赫 (Mach) 数, 式(2.27)  
 $N$  式(4.21)  
 $Nu$  紐塞尔脫 (Nusselt) 数, 式(2.24), (2.31)  
 $p$  式(4.35)  
 $Pr$  普朗特 (Prandtl) 数, 式(2.26)  
 $q$  式(4.27)  
 $r$  恢复系数, 式(2.29)  
 $R_1, R_2$  式(3.28), (3.32)  
 $R_j$  接合热阻系数, 式(3.25)  
 $R_T$  温度参数, 式 (8.11), (8.41), (8.46), (9.26)  
 $Re$  雷諾 (Reynolds) 数, 式(2.25)  
 $t_1$  达到最大速度、或最高温度或最大热应力的時間  
 $W$  式(4.7)  
 下标  $1, 2, \dots, n, \dots, N$  代表不同元件的数  
 $aw, as$  絕热壁, 絕热面  
 $A, B$  点  
 $ap$  外載的  
 $b$  桁条, 弯曲  
 $cr$  临界屈曲  
 $E$  平衡  
 $f$  流体  
 $i$  求和下标; 初始  
 $m$  平均; 中間; 最大

$m_i$	初始最大
0	基准;初始;中面
$R$	参考
$RT$	室温
$r, \theta$	$r$ 方向, $\theta$ 方向
$s$	表面;蒙皮;板;正割模量
$t$	拉力;正切模量
$w$	壁;腹板
$x, y, z$	$x$ 方向, $y$ 方向, $z$ 方向

# 目 录

序 .....	viii
符号 .....	xi
第一章 热应力方程 .....	1
§ 1.1 热应力的定义 .....	1
§ 1.2 均匀温度时的热应力 .....	3
§ 1.3 接合处的热载荷 .....	6
§ 1.4 一维温度分布时的热应力 .....	10
§ 1.5 一般的热应力-应变方程 .....	14
§ 1.6 二维热应力的应力函数 .....	20
第二章 温度方程 .....	24
§ 2.1 引言 .....	24
§ 2.2 热传导 .....	25
§ 2.3 热辐射 .....	27
§ 2.4 热运流 .....	30
§ 2.5 气动加热 .....	34
§ 2.6 理想结构的热平衡方程 .....	40
§ 2.7 瞬时温度的数值积分法 .....	42
第三章 理想结构中的瞬时温度和应力 .....	49
§ 3.1 引言 .....	49
§ 3.2 在所设蒙皮温度下桁条温度的计算 .....	49
§ 3.3 蒙皮对桁条的辐射 .....	54
§ 3.4 桁条对蒙皮温度的影响 .....	56
§ 3.5 接合处的热阻对桁条温度的影响 .....	58
§ 3.6 计算温度与实验温度的比较 .....	60
§ 3.7 常热源时桁条与蒙皮的温度 .....	61
§ 3.8 导弹结构的蒙皮与桁条温度 .....	67
§ 3.9 无约束理想结构的热应力公式 .....	72

第四章 一維溫度分布时的热应力	75
§ 4.1 引言	75
§ 4.2 在一个表面或边缘上具有綫性瞬时温度的板或梁	76
§ 4.3 在一个表面上有常热源的板	84
§ 4.4 在一个表面上有可变热源的板	89
§ 4.5 在蒙皮上有常热源的梁	91
§ 4.6 梁中的剪滞	98
§ 4.7 涡轮叶片中的热应力	101
第五章 二維热应力問題	108
§ 5.1 引言	108
§ 5.2 具有二維溫度分布的梁	108
§ 5.3 菱形机翼中的热应力	111
§ 5.4 溫度为半径的函数的圓板	115
§ 5.5 解涡轮圓盘中热应力的有限差分法	117
§ 5.6 核反应堆部件中的热应力	121
第六章 高温时的許用应力	127
§ 6.1 引言	127
§ 6.2 高温时的材料性質	127
§ 6.3 短时許用压应力(均匀溫度)	132
§ 6.4 短时許用应力(非均匀溫度)	144
§ 6.5 高温蠕变	148
§ 6.6 柱与板的蠕变屈曲	152
§ 6.7 热疲劳	155
§ 6.8 热冲击	157
§ 6.9 高温下飞行器材料的效率	159
第七章 高温下的应力分析	173
§ 7.1 引言	173
§ 7.2 均匀溫度下的非弹性热应力	174
§ 7.3 非均匀溫度下的非弹性热应力	179
§ 7.4 外載应力和瞬时热应力的組合应力	183
§ 7.5 有热应力时的有效面积	187
§ 7.6 外載应力和定常热应力的組合应力	188

§ 7.7 高温下的设计步骤 .....	190
第八章 热对位移和刚度的影响 .....	193
§ 8.1 引言 .....	193
§ 8.2 板和梁的弯曲 .....	195
§ 8.3 屈曲柱的挠度 .....	197
§ 8.4 屈曲板的挠度 .....	201
§ 8.5 法向载荷下板的挠度 .....	202
§ 8.6 由于截面的翘曲和转动而产生的位移 .....	206
§ 8.7 剪切位移 .....	211
§ 8.8 热载荷对颤振的影响 .....	212
第九章 二维热应力方程的一般解法 .....	219
§ 9.1 引言 .....	219
§ 9.2 变分法 .....	220
§ 9.3 矩形板中的热应力 .....	222
§ 9.4 矩形板的屈曲 .....	224
§ 9.5 复变函数法 .....	226
§ 9.6 空心圆筒 .....	231
§ 9.7 长筒形组合体 .....	234
§ 9.8 截面为两偏心圆的组合体 .....	238
附录 A, B, C .....	243
俄文参考文献 .....	253



## 第一章 热应力方程

§ 1.1 热应力的定义 众所周知,温度的改变会引起物体膨胀或收缩. 一杆长度的改变量  $\Delta L$  可写成

$$\Delta L = \alpha L(T - T_0), \quad (1.1)$$

式中,  $L =$  杆长;

$T - T_0 =$  温度改变量;

$\alpha =$  线热膨胀系数;

$T_0 =$  初始温度;

$T =$  最后温度.

系数  $\alpha$  是温度变化  $1^\circ$  时,每单位杆长的长度改变量.  $\alpha$  的单位通常是厘米/厘米  $\cdot$   $^\circ\text{C}$ .

若物体的所有纤维皆能自由膨胀或收缩,则温度变化不产生任何应力. 然而,在一连续体内,这样的膨胀或收缩通常不能自由地进行,因而在物体内部产生了应力. 加在物体上的、阻止膨胀或收缩的外加约束,也使物体内部产生应力. 这些应力都称之为**热应力**.

一长度为  $L$  的杆,由于均布应力  $f$  所引起的伸长为

$$\Delta L = \frac{fL}{E}, \quad (1.2)$$

式中  $E$  是弹性模量. 若杆被完全约束住,以致其长度不变,且又不弯曲或屈曲,则由式(1.2)得出的伸长应抵消由式(1.1)得出的伸长. 因此,当完全约束住时,热应力为

$$f = -\alpha E(T - T_0), \quad (1.3)$$

式中负号表明有一压应力抵制杆膨胀.

若一杆的膨胀或收缩只是部分地被约束,则式(1.3)可写成

$$f = -K\alpha E(T - T_0), \quad (1.4)$$