固体火箭发动机粘接结构热波成像检测与定量识别

Thermography Testing and Quantitative Identification for Adhesive Structure of Solid Rocket Motor

杨正伟 张 炜 著

国防工业出版社
National Defense Industry Press

固体火箭发动机粘接结构热波成像检测和定量识别

Thermography Testing and Quantitative Identification for Adhesive Structure of Solid Rocket Motor

杨正伟　张　炜　著

中国科学技术大学
图书馆藏

国防工业出版社
·北京·

内 容 简 介

本书针对固体火箭发动机壳体粘接结构界面的典型缺陷，从红外热波成像检测的基本原理出发，分析了各种复杂结构的热波传导过程，针对热激励源加载及优化、图像序列处理和分析、缺陷参数定量识别等关键技术进行了深入研究，在此基础上针对粘接结构缺陷开展了大量的检测实验研究，进一步应用和验证了相应的研究成果。最后，对脉冲激励红外热波成像检测系统的集成等问题进行了探讨，为该技术的推广、应用提供了相应的技术支持。

本书既可作为高等院校相关专业的博士研究生、硕士研究生和高年级本科生的教材，也可供从事无损检测、装备管理与维护工作等相关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

固体火箭发动机粘接结构热波成像检测和定量识别/杨正伟，张炜著. —北京：国防工业出版社，2015.3

ISBN 978-7-118-10042-6

Ⅰ. ①固… Ⅱ. ①杨… ②张… Ⅲ. ①固体推进剂火箭发动机—红外线无损检验—研究 Ⅳ. ①V435

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 054106 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)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 **印张** 11¾ **字数** 205 千字

2015 年 3 月第 1 版第 1 次印刷 **印数** 1—2000 册 **定价** 48.00 元

(本书如有印装错误，我社负责调换)

国防书店：(010)88540777 发行邮购：(010)88540776

发行传真：(010)88540755 发行业务：(010)88540717

前　言

固体火箭发动机(SRM)由于结构简单、机动性能好、可靠性高及易于维护等优点,在武器系统中的应用越来越广泛。SRM 壳体为多层粘接结构,各粘接界面易出现夹杂、孔隙、脱粘、强度弱化等缺陷,因此开展对 SRM 壳体粘接结构的无损检测理论与技术研究一直是国内外关注的热点问题。红外热波成像作为一种新兴的无损检测技术,具有适用面广、检测速度快、检测面积大、非接触等优点,可以在某种程度上弥补传统检测技术的不足,已引起了国内外的广泛关注。

本书应用红外热波成像技术对 SRM 壳体粘接结构进行了检测理论和方法的研究,综合运用传热学、红外图像序列处理、有限元等领域的先进技术对红外热波成像的基础理论和关键技术进行了研究,验证了红外热波成像技术用于 SRM 壳体结构缺陷检测的可行性和优越性。本书的研究成果为 SRM 壳体的安全可靠提供了一种新型的无损检测手段,为推动红外热波成像技术在我国航空航天、交通运输、石油化工等领域的工程应用奠定了相应的理论基础和技术支持。

本书得到了国家自然科学基金(51075390、51305447、51275518)、陕西省自然基础研究计划项目(2013JM7021)以及军队预研等多个项目的支持,是作者多年来在红外热波成像检测技术研究和工程应用的总结。本书是作者在博士生导师张炜教授的悉心指导下完成的,同时也得到了课题组张金玉教授、田干教员、朱杰堂教员,以及宋远佳、金国锋、王冬冬、陶胜杰、明安波、宋鸿杰、罗文源等博士和硕士的帮助,在此对他们表示衷心的感谢!

由于作者水平有限,书中错误与不当之处在所难免,诚恳地欢迎广大读者批评指正。

作　者

2014 年 12 月

目　录

第 1 章　绪论 …… 3

1.1　粘接结构主要特点及缺陷 …… 5

1.1.1　粘接结构的主要特点及缺陷 …… 5

1.1.2　粘接结构无损检测方法综述 …… 6

1.2　红外热波成像检测技术的国内外研究与应用现状 …… 7

1.2.1　热波理论国内外研究现状 …… 7

1.2.2　热激励源问题的研究现状 …… 9

1.2.3　陷定量识别方法研究 …… 10

1.2.4　存在的主要问题 …… 12

1.3　本书的主要工作 …… 13

第 2 章　基于热波理论的热传导特性分析 …… 17

2.1　红外热波成像检测的基本原理 …… 17

2.2　瞬态导热微分方程及其定解条件 …… 18

2.2.1　导热微分方程 …… 18

2.2.2　瞬态导热微分方程的定解条件 …… 21

2.3　不同热激励条件下的瞬态热传导分析 …… 22

2.3.1　脉冲热激励热传导分析(PT) …… 23

2.3.2　持续加热热传导分析(ST) …… 24

2.3.3　锁相热激励热传导分析(LT) …… 25

2.3.4　功率超声激励产生内热源热传导模型(UT) …… 26

2.4　含缺陷半无限大平板结构脉冲热激励条件下的表面温度场分析 …… 27

2.5　含缺陷圆柱结构脉冲热激励热传导特性分析 …… 29

此为试读,需要完整PDF请访问: www.ertongbook.com

2.6 实际脉冲热激励条件下表面的温度场分布 …… 31
2.7 本章小结 …… 34
第3章 热波传导数值分析及脉冲热激励源的参数优化 …… 37
3.1 基于有限元理论的热传导分析 …… 37
3.2 正交各向异性复合材料脉冲红外热波成像检测数值分析 …… 38
3.2.1 建模与划分网格 …… 39
3.2.2 初始条件及边界条件 …… 39
3.2.3 计算结果与分析 …… 40
3.3 固体火箭发动机多层粘接结构脉冲红外热波成像检测数值分析 …… 42
3.3.1 建模、划分网格及定解条件 …… 43
3.3.2 计算结果与分析 …… 44
3.4 脉冲热激励源的参数优化研究 …… 46
3.4.1 几种典型的检测参数 …… 46
3.4.2 脉冲热流密度与检测参数关系分析 …… 48
3.4.3 脉冲宽度与检测参数关系分析 …… 49
3.4.4 脉冲能量对检测能力的影响分析 …… 49
3.5 基于多脉冲热激励的复合材料结构热传导特性分析 …… 51
3.5.1 多脉冲(Multi – pulse)概念的提出 …… 51
3.5.2 多脉冲对缺陷检测能力的影响分析及间隔时间优化 …… 51
3.5.3 多脉冲热激励的实验验证 …… 54
3.6 本章小结 …… 56
第4章 缺陷定量识别与重建方法研究 …… 61
4.1 红外图像序列数据处理及分析方法 …… 61
4.1.1 常规红外图像处理方法 …… 61
4.1.2 动态热层析技术 …… 66
4.1.3 脉冲相位法 …… 67
4.1.4 红外图像序列分段拟合重建 …… 68
4.1.5 基于图像序列微分和差分相结合的缺陷对比度增强方法 …… 71

4.2 脱粘缺陷大小的定量识别 …… 74
4.2.1 最大对比度阈值分割的缺陷大小识别 …… 74
4.2.2 基于数学形态学分水岭方法的缺陷分割 …… 76
4.3 脱粘缺陷深度定量识别 …… 77
4.3.1 采用最佳检测时间计算缺陷深度 …… 77
4.3.2 基于 BP 神经网络的缺陷深度和大小计算 …… 78
4.4 基于实验数据与有限元分析相结合的缺陷重建算法 …… 80
4.4.1 缺陷模型修正单元 …… 80
4.4.2 FEM 仿真单元 …… 84
4.4.3 缺陷重建过程 …… 84
4.4.4 实验验证 …… 84
4.5 本章小结 …… 86
第 5 章 固体火箭发动机壳体粘接结构红外热波成像检测实验 …… 91
5.1 实验概述 …… 91
5.1.1 实验目的 …… 91
5.1.2 实验设备 …… 91
5.1.3 固体火箭发动机壳体试件描述 …… 92
5.1.4 实验准备及实验参数选择 …… 92
5.2 含分层缺陷的层状玻璃纤维复合材料试件检测及分析 …… 93
5.2.1 含分层复合材料试件 …… 93
5.2.2 实验结果及分析 …… 94
5.2.3 缺陷大小、深度的定量识别 …… 95
5.3 含脱粘缺陷的钢壳体/橡胶绝热层试件检测及分析 …… 96
5.3.1 平底洞模拟的钢壳体/绝热层脱粘缺陷检测 …… 97
5.3.2 聚四氟乙烯夹层模拟的脱粘缺陷检测 …… 100
5.3.3 结论 …… 102
5.4 含脱粘缺陷玻璃纤维/橡胶绝热层试件检测及分析 …… 102
5.4.1 平底洞模拟的圆形脱粘缺陷红外热波成像检测 …… 103
5.4.2 聚四氟乙烯模拟的正方形脱粘缺陷检测 …… 105
5.4.3 大面积空气脱粘缺陷的红外热波成像检测 …… 108

5.4.4 紧贴性脱粘缺陷的红外热波成像检测 …… 108
5.4.5 结论 …… 110
5.5 含脱粘缺陷的壳状钢壳体/橡胶绝热层试件检测及分析 …… 110
5.5.1 圆柱形小曲率钢壳体/绝热层平底洞试件热波检测 …… 110
5.5.2 球形小曲率钢壳体/绝热层平底洞试件的热波检测 …… 114
5.5.3 结论 …… 119
5.6 某型复合材料 SRM 红外热波成像检测及分析 …… 119
5.7 本章小结 …… 121
第 6 章 粘接结构红外热波成像检测能力评估 …… 125
6.1 检测参数影响因素分析 …… 125
6.1.1 热波检测的适用性分析 …… 125
6.1.2 材料参数对检测参数影响分析 …… 126
6.1.3 缺陷参数对检测参数影响分析 …… 130
6.1.4 环境因素对检测参数影响分析 …… 135
6.1.5 热激励源参数对检测参数影响分析 …… 136
6.1.6 参数处理 …… 137
6.2 固体火箭发动机壳体脱粘缺陷红外热波成像检测能力评估 …… 138
6.2.1 玻璃纤维复合材料检测分辨率分析 …… 138
6.2.2 钢壳体/绝热层缺陷检测分辨率分析 …… 140
6.2.3 玻璃纤维壳体/绝热层缺陷检测能力分析 …… 142
6.3 固体火箭发动机壳体粘接结构的检测策略 …… 144
6.4 本章小结 …… 145
第 7 章 固体火箭发动机壳体粘接结构红外热波成像检测系统设计 …… 149
7.1 脉冲闪光灯热激励红外热波成像检测系统整体功能设计 …… 149
7.1.1 硬件系统功能设计 …… 149
7.1.2 软件系统功能设计 …… 150
7.2 硬件系统的详细设计方案 …… 151
7.2.1 红外热像仪的选择 …… 151
7.2.2 脉冲热激励的研制 …… 154
7.2.3 反光板和遮罩的设计 …… 156

7.3 红外图像处理和缺陷识别软件系统开发 …… 157
7.3.1 系统开发环境 …… 157
7.3.2 系统的主要功能和总体框架 …… 157
7.3.3 热波图像序列处理技术运行界面 …… 158
7.4 系统实验和验证 …… 163
7.5 本章小结 …… 166
参考文献 …… 167

第1章
绪　论

此为试读,需要完整PDF请访问: www.ertongbook.com

第1章 绪 论

固体火箭发动机(Solid Rocket Motor,SRM)是一种采用固体推进剂的化学火箭动力装置,由于其具有结构简单、机动性能好、可靠性高及易于维护等优点,在航空航天领域发挥着举足轻重的作用,特别是在火箭武器系统中的应用越来越广泛,并有逐步取代液体火箭发动机的趋势[1]。SRM 是由壳体/绝热层/包覆层/装药组成,为多层粘接结构,由于在生产过程中容易受到各种制造工艺因素、人为因素及环境因素的干扰,各粘接界面易出现夹杂、孔隙、脱粘、强度弱化等缺陷,而在制造、运输、贮存及使用过程中的各种动静载荷、机械损伤、高温、高压、蠕变等因素也会引起各种损伤的产生、缺陷的扩展及材料的老化(特别是粘接剂层),可能造成发动机壳体结构刚度和强度等性能的急剧下降,将影响发动机的使用性能和寿命,如果不能及时发现这些缺陷或损伤,将可能酿成灾难性的后果[2]。据资料统计,国内外火箭发射失败的案例中,有 1/3 是由于火箭发动机的故障引起的,而火箭发动机的故障又有 1/3 是由于壳体粘接结构缺陷或损伤引起的[3]。因此,SRM 壳体结构的可靠性将直接影响整个火箭武器系统的安全可靠。如果能够采用可靠的无损检测手段及时检测 SRM 壳体层状粘接结构的缺陷和损伤,并对缺陷的状态和扩展情况进行监测和评估,将大大提高整个飞行器系统的使用安全性和可靠性。因此,开展对 SRM 的无损检测理论与技术研究是国内外研究的热点,快速、高效的无损检测手段也成为一个迫切需要解决的问题。

对 SRM 壳体粘接结构的无损检测,目前主要是采用射线、超声波等常规技术进行检测和评估的。射线检测特别适用于复杂结构或复合材料中的孔隙和夹杂等体积型缺陷,对垂直于材料表面的裂纹也有较高的检测灵敏度和可靠性[4-7]。美国从 1959 年就开始采用射线方法检测 SRM 壳体的粘接质量,目前该方法成为检测 SRM 的一种最有效的手段[8,9]。国内也将 X 射线照相法和工业 CT 应用于检测 SRM,取得了重要的进展[10-13]。但由于射线检测方法对于粘

接结构及复合材料中常见的分层缺陷和平行裂纹检测比较困难，并且由于检测周期长、设备庞大、不便于在线检测等缺点，在 SRM 壳体结构应用中受到了一定的限制。

超声波技术是目前粘接结构无损检测方法中最有效和最方便的技术，能够对粘接界面的分层、脱粘、孔隙、裂纹和夹杂进行准确的检测，并且还能够判断材料的疏密、密度、纤维取向、屈曲、弹性模量等特性。国外对粘接结构超声波检测技术研究相对比较深入[14,15]，而国内的北京航空航天大学、北京航空制造工程研究所、南京航空航天大学、哈尔滨工业大学、北京航空材料研究所等单位也积极开展研究，并取得了很多的成果。如北京航空航天大学的周正干等人[16,17]设计了一套铝蒙皮蜂窝粘接质量超声导波检测系统，检测效率比常规超声检测提高了 30 倍，为实现蜂窝结构的复合材料快速无损检测奠定了基础；同时他们还研究出了一种复合构件的非接触超声成像技术，解决了传统超声波检测中需要耦合剂的问题，大大提高了我国超声无损检测水平和快速制造能力。北京航空制造工程研究所和中北大学的刘松平、郭洁等人[18-20]在激光超声检测技术、超声自动扫描成像检测技术等方面做了大量的工作，取得了较好的研究进展和研究成果。但超声波技术对 SRM 壳体这类大型结构检测效率比较低，对不同缺陷需要不同的探头，还需要使用耦合剂，对于复杂结构检测难度较大。因此，SRM 复合材料壳体目前一直处于不检测状态，存在严重的安全隐患。

由于 SRM 壳体的面积比较大，结构也比较复杂，在实际应用中又要求必须能在最短的时间内完成检测任务。因此，上述两种检测方法均难以满足 SRM 的快速、高效、便携、大面积实时检测的需要。红外热波成像（Infrared Thermal Wave）无损检测技术（简称热波技术）是近年来美国航空航天和国防领域兴起的一种新的无损检测技术，由于其检测速度快、效率高、观测面积大、便于在线在役检测等优点引起了国内外广泛的关注[21-23]。1990 年以来，国内外积极开展热波技术的研究和应用，随着计算机水平和红外热像仪精度的不断提高，目前这项技术在航空航天、汽车、化工、石油、建筑、电力、电子、医学等领域有了很多成功的应用[24-35]。

因此，本书将利用这种新兴的红外热波成像检测技术，解决 SRM 壳体粘接结构的质量检测难题，通过研究热波在粘接结构中的传导规律，对热波检测的热激励源及其加载方式进行分析及优化；在此基础上，对红外热图处理和缺陷

定量识别方法进行深入研究,达到对缺陷准确检测的目的。本书研究具有以下意义和应用价值:

(1) 理论研究意义。本书针对固体火箭发动机壳体的结构特点,研究热波和与其相匹配的理论,建立起热波和缺陷相互作用的理论模型,优化热激励方式并建立优化准则,通过深入研究红外图像序列处理和缺陷定量判别方法,为制定相应的红外热波成像方法的检测规范提供理论依据。通过上述研究不仅可以丰富复合材料结构的热波理论,而且建立的热波理论和方法可以对热波技术在其他领域的应用提供理论根据。

(2) 国防和军事价值。粘接结构或材料在航空航天飞行器如载人航天飞船、卫星、火箭武器系统中应用非常广泛,并且应用范围会越来越大。一旦由于材料结构失效导致遂行任务失败,不仅会造成严重的财力和人力损失,更可能给整个国家带来不良的影响。例如,在战时,火箭等大型战略武器装备如果由于发动机结构缺陷造成遂行任务失败,将可能直接影响战争的成败。因此,开展快速高效的粘接结构的热波无损检测技术研究显得尤为重要。

(3) 应用前景。红外热波成像技术不仅可以检测发动机壳体粘接结构的缺陷和损伤,而且可以检测几乎所有的复合材料或结构,还可以对航空航天各类飞行器的关键部位如火箭发动机喷口涂层、壳体绝热层界面脱粘、火箭发射筒内壁损伤,以及电气系统、推进剂储罐、特装机械设备等进行检测。同时,该技术还可以应用于各种胶接、焊接质量控制和检测、涂层附着情况检测以及产品的质量监测,应用领域非常广泛。

1.1 粘接结构主要特点及缺陷

1.1.1 粘接结构的主要特点及缺陷

粘接结构是现代工业尤其是国防工业应用越来越广泛的一种制造工艺,包括金属—金属、金属—非金属、非金属—非金属,以及目前发展迅速的复合材料粘接结构,如飞机蒙皮/衬层/蜂窝各个界面、SRM 的壳体/绝热层/包覆层/推进剂、喷管喉衬等关键部位均采用了粘接结构[36,37]。粘接结构具有重量轻、外形光滑、结构整体应力分布均匀等优点,并且比刚度、比强度较大。但其缺点也是

比较明显的，主要表现在工作寿命低、粘接接头耐温性不高、粘接件剥离强度很低、粘接质量检测困难等。通常层状粘接结构中主要存在三种基本缺陷：①粘附强度低，即胶粘剂与被粘接件结合不好；②内聚强度低，即胶层强度低；③孔洞、脱粘、微孔隙等。

SRM 壳体的缺陷主要有以下 5 种类型[8]。

（1）壳体内部的缺陷。壳体主要有复合材料壳体和金属壳体，复合材料的缺陷主要包括内部分层、夹杂、孔隙、纤维与基体开裂或纤维断裂等，主要原因是制作过程中的工艺控制参数难以精确控制或环境因素的干扰，以及使用、贮存过程中的外力破坏造成的损伤等；而金属壳体的缺陷主要有裂纹、腐蚀等。

（2）第一界面的脱粘，即壳体与绝热层之间的脱粘。其形成的主要原因是由于粘贴绝热层过程中壳体清理不干净造成的，另外固化过程中温度、压力控制不好、粘接剂质量较差或贮存老化等因素也会导致此界面的缺陷。

（3）第二界面脱粘，即绝热层与包覆层之间的脱粘。包覆层喷涂前绝热层的表面清理不彻底、衬层与绝热层材料的相容性不好或者贮存老化过程中都容易形成第二界面脱粘。

（4）第三界面脱粘，即包覆层与推进剂药柱之间的脱粘。贮存或使用过程中的过度应力都容易形成第三界面缺陷。

（5）绝热层间脱粘。由于绝热层往往是多层结构，绝热材料各层粘接不牢就会产生脱粘或层间粘接界面疏松，形成分层和微孔缺陷。

1.1.2 粘接结构无损检测方法综述

20 世纪 70 年代以来，如何有效地对粘接结构的质量进行检测和评估，一直是国内外研究的热点。早期的粘接结构检测方法主要是针对粘接界面有空隙的脱粘缺陷的，如对金属粘接结构的敲击法检测、阻抗法检测、声振法检测、超声波检测以及激光全息干涉无损检测方法等。现有的大多数无损检测方法是针对孔洞、裂纹、微孔隙以及脱粘等缺陷的，一般有射线法[10-13]、超声法[36-40]、声发射[41,42]、声超声法[43-46]及激光全息[47-48]等。上述方法各有所长，在粘接结构的质量检测中发挥着重要作用。然而，对于 SRM 壳体多层粘接结构，目前主要还是借助于常规的超声检测方法，但检测效率不高，效果也不是很理想，特别是对于粘接界面的贴合型脱粘缺陷的检测难题，目前还没有得到有效解决；

而对于应用越来越广泛的复合材料壳体粘接结构，由于缺少有效的检测方法，目前一直处于不检测状态，存在严重的安全隐患。

1.2 红外热波成像检测技术的国内外研究与应用现状

热波的概念可以追朔到1863年，由Angstrom提出利用热波来测量材料的热扩散系数。直到1978年，热波理论才开始真正用于无损检测，Wong等人利用激光加载和光声效应检测到陶瓷材料的裂纹缺陷，早期的应用采用的是单点激光和单点探测器，因此检测速度非常慢。20世纪80年代后期，随着具有高速、高像元、高灵敏度红外热像仪的出现以及计算机数字信号处理技术的发展，使得各种红外无损检测与评价的新技术相继涌现，各国红外无损检测专家为提高红外检测精度，做了不懈的努力，使红外热成像技术在无损检测领域中越来越受到重视。

目前，这种方法已开始被广泛应用于检测各种材料的缺陷，如金属、合金、塑料、陶瓷及各种复合材料或结构[49-53]，美国多家大公司（如GE、GM、波音、福特、洛克希德、西屋等）及政府机构（如NASA、FAA、空军、海军）等已经在广泛应用和推广该项技术[54]。该技术最大的一个优势就是检测速度快，非常适合现场、外场、在线在役检测。如美国国家航空航天局应用该技术检测航天飞机的蒙皮缺陷[55]，波音公司应用红外热波成像技术检测蒙皮内部的加强筋开裂和锈蚀[56]，还可用该方法检测各种飞行器的液体燃料发动机和固体燃料火箭发动机的喷口绝热层附着问题、各种镀膜、涂层的探伤问题、粘接质量问题等[57-59]。近年来，作者所在课题组致力于红外热波成像技术在火箭发动机壳体中的研究和应用，取得了一系列的成果[60-66]。

红外热波成像方法涉及传热学、热波理论、红外图像处理等一系列学科，该方法的研究和应用离不开对其关键技术的研究。因此，下面将分别对热波理论、热激励源、红外图像处理及缺陷定量识别方法等关键技术的国内外研究现状进行分析，并针对目前存在的主要问题进行深入分析，为开展本书的工作提供依据。

1.2.1 热波理论国内外研究现状

热波理论描述的是变化的温度场与材料之间相互作用的机理，是热波检测

的理论基础。目前，主要通过理论分析和数值模拟的手段研究热波与材料之间的相互作用。奥齐西克[67]假定材料传热性能上为近似的各向同性，并忽略了表面的辐射和对流换热，认为热流在半无限大材料（厚度尺寸相对较小）中的三维（3D）传热微分方程可以简化为一维状态，然后利用镜像原理，推导出了脉冲加热后表面温度场的一维理论计算公式，该公式考虑了缺陷深度对温度场的影响，因此能够定性研究缺陷的深度。而事实上影响热波与材料相互作用的因素有很多，其中缺陷大小也是一个重要因素，因此 S. K. Lau、D. P. Almond 等人[68]把缺陷尺寸（直径）考虑进去，根据一维理论模型，假定缺陷被均匀加热并且能完全反射热能，只考虑热波在缺陷表面的一次反射，得到了表面温差（缺陷对应区域与正常区域的温差）与缺陷大小和深度随时间变化的公式，该公式是迄今为止描述缺陷存在对表面温度场影响最全面的公式。上述两种公式均是在一维状态下假定材料各向同性的基础上推导出来的，对于各向异性的层状材料和结构来说，是不太适合的。由于层状结构三维传热问题的复杂性，无法通过数学推导求得其精确的解析公式。因此，目前主要借助于数值分析的手段研究热波在复杂材料和结构内部的传导规律[69]。

数值分析方法能够对热波在材料内部的传导进行分析，并且可以深入地研究各种因素对检测参数的影响[70]。对于单向复合材料的导热分析，国外研究较早并取得了一系列的成果。针对大厚度层合结构，Padvoan、Tamma、Turko 等人[71,72]采用不同特点的三维单元进行了初步分析，但受计算手段限制，模型较为粗糙，建模时间很长。Savoia 等人[73]利用解析法对复合材料层合板进行三维热分析，其过程十分复杂且受边界条件限制，难以应用到工程实践。Rolfes 等人[74-76]针对复合结构提出了线性热层合理论模型，利用二维（2D）单元描述三维（3D）结构得到热问题，假定沿层合板厚度方向温度满足线性分布，同时考虑了铺层顺序对结果的影响，并在此基础上和其他学者发展了二阶以及高阶热层合理论。E. Uhlman[77]建立了基于移动点源的各向同性材料的三维热传导模型，用于预测各向异性材料的热损伤区域，实验与模拟结果基本相符。国内，2003 年闫相桥[78]采用有限元法对正交各向异性材料三维热传导问题进行了分析，从热流密度表示的热传导微分方程入手，利用 Galerkin 方法建立了正交各向异性材料三维热传导问题的有限元模型。崔俊芝、李友爱[79]针对具有周期性构造复合材料结构的瞬态热传导问题，采用有限元—精细积分法给出了具体

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com