

教育部包装教学分指导委员会/中国包装联合会包装教育委员会推荐教材
普通高等教育包装工程本科专业规划教材

包装应用力学

Packaging Applied Mechanics

		高 德	主 编
王 军	计宏伟	周建伟	副主编
	王振林	卢立新	主 审

 中国轻工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

包装应用力学/高德主编. —北京:中国轻工业出版社, 2015.7

普通高等教育包装工程本科专业规划教材

ISBN 978-7-5019-9223-2

I. ①包… II. ①高… III. ①包装-应用力学-高等学校-教材 IV. ①TB48

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第084070号

内 容 简 介

本书作为包装工程本科专业的《包装应用力学》核心课程教材,包含了两部分的内容:第一部分为包装动力学基础理论(第一章绪论、第二章包装固体力学基础、第三章包装产品的振动、第四章包装件的冲击);第二部分为包装力学的应用(第五章包装件的损伤失效、第六章包装材料的力学模型基础、第七章包装工程中流体力学基础)。通过本课程的学习,将为包装工程专业后续的包装结构设计、运输包装、包装测试等专业课程奠定力学基础。

本书可作为高等院校包装工程专业教材,也能用于该学科方向的研究生教学,并可供从事包装结构设计和科研人员参考。

责任编辑:杜宇芳

策划编辑:林 媛 杜宇芳 责任终审:滕炎福 封面设计:锋尚设计

版式设计:宋振全 责任校对:燕 杰 责任监印:张 可

出版发行:中国轻工业出版社(北京东长安街6号,邮编:100740)

印 刷: 印刷厂

经 销:各地新华书店

版 次:2015年7月第1版第2次印刷

开 本:787×1092 1/16 印张:13.25

字 数:303千字

书 号:ISBN 978-7-5019-9223-2 定价:30.00元

邮购电话:010-65241695 传真:65128352

发行电话:010-85119835 85119793 传真:85113293

网 址: <http://www.chlip.com.cn>

Email: club@chlip.com.cn

如发现图书残缺请直接与我社邮购联系调换

150798J1C102ZBW

普通高等教育包装工程本科专业规划教材（第四套） 编审委员会成员名单

顾 问：奚德昌 潘松年 王振林 宋宝丰 戴宏民 金国斌

主 任：张昌凡 王志伟 许文才

副主任：马 力 殷涌光 黎厚斌 王建清 卢立新 孙智慧

高 德 陈 彦 林 媛

委 员：（按姓氏笔画）

丁 毅 王家民 王双飞 计宏伟 邓开发 向 红

刘跃军 刘宝顺 刘晋浩 杨福馨 张国强 张耀权

林 江 陈 洪 陈卫成 陈金周 陈璧辉 陈满儒

周云杰 姚齐水 钱成锡 徐伟民 唐全波 黄俊彦

龚发云 郭彦峰 曾克俭 霍李江

秘书处：曾克俭 罗亚明 张宇华 杜宇芳

“林中有路。这些路多半突然断绝在杳无人迹处。这些路叫做林中路。每条路各自延展，但却在同一林中……林业工和护林人识得这些路。他们懂得什么叫做在林中路上。”

教育是个行动链条，这个链条上的每一个环节都必须和谐地相互连接起来，如果零星地进行一些教育改革，而没有一个关于教育的目标与方式的整体观念，这个链条恐怕难以正常运转。但这并不是说，我们不能尝试一些新的变革。相反，我们必须清晰地思考如何为学习者的未来探索新的道路，一些传授知识、技能和思想的路径。当我们重组知识体系和改革教育方法时，我们没有忽视之前已有的各种经验，因为这些经验不仅使我们能够改进现有的方式和体系，而且还可以使我们能够在这些方面之外发现其他新的可供选择的路径。这种把寻求实际可供选择的新路径作为推进教育改革的做法，在我们看来，具有现实的价值与意义。

这次推出的普通高等教育包装工程本科专业统编教材就是一种为学习者的未来探索新路径的尝试，是对之前已有教材体系的续接与拓展，也是重组知识体系的新探究。

按照包装工程本科专业自身发展的流变脉络和理论类型，我们将此次的教材分为两个方面：规划教材和特色教材。各成系列，相得益彰。规划教材覆盖了《包装工程本科专业规范》涉及的知识领域中的全部核心知识单元及部分选修知识单元，包括《包装材料学》《包装工艺学》《包装印刷技术》《包装机械》等11本教材。特色教材反映的是各校特色，今后会随着社会需求的变动而适时推出。用“规划教材+特色教材”这样的方式推出统编教材，其目的是完整地呈现包装工程专业的知识体系，同时也是尽可能地体现高校的学术特色，尊重学习者的知识选择。

我们希望通过这次统编教材的出版，为广大读者增加一扇了解中国及世界包装教育改革的窗口，并通过教材这些林中路的探索，加速我国包装教育事业走向世界的步伐。

最后需要说明的是，由于编者自身的知识理解的局限，编著过程中难免存在不妥之处，诚盼学术界同仁及使用者不吝指教。

教育部包装教学分指导委员会

2010 年 12 月

包装工程是一门多学科交叉的工程技术学科，具有以自然科学为基础，工程科学为主干，与社会科学相关联的特征。在这个伴随着现代包装产业发展形成的新学科中，数学、力学、材料科学及机械工程是其主要基础支撑学科。根据现代高等教育规律与国内外的实施经验，“厚基础”是实现包装工程“应用型、复合型、创新型”人才培养的必要条件。在与防护包装设计、包装材料研发、包装性能测试与质量控制相对应的一系列包装工程专业课程中，力学原理与分析方法是贯穿其中的最重要知识。

众所周知，力学是涵盖了自然界中从微观、细观到宏观乃至天体的一个经典大学科。包装工程范畴中的力学问题，有其应用性和针对性的特点。包装力学探索包装材料、包装产品与商品包装在静动态荷载激励下的响应规律，为寻求科学的包装保护原理，研究适用的防护材料、结构和包装设计技术，为保护商品、人与环境和谐，促进包装工程可持续发展提供理论基础。

基于我国包装工程本科专业基础教学和包装产业界广大科技工作者提升理论水平的需求，笔者在长期从事包装力学方向的教学与科研基础上编写了这本“包装应用力学”新教材。全书分七章阐述：在第一、二章介绍了包装应用力学的主要研究问题，并引述了固体力学在包装工程中典型运用的一些概念；第三、四章重点剖析了包装结构设计与应用中最重要的振动与冲击理论；第五章运用了力学中的损伤失效概念，有助于对包装破损现象进行规律分析；在第六章中，依托笔者团队及国内外相关学者的研究成果，专门介绍了包装材料的力学建模方法；最后基于包装保护因素的拓展需要，在第七章中首次引入包装流体力学基础理论，力求为食品、农产品、医药品等包装材料与产品的设计、开发提供帮助。

本书由高德任主编，王军、计宏伟、周建伟任副主编。其中第一、三、七章由高德编写，第二章由计宏伟编写，第四章

由周建伟编写，第五章由王军编写，第六章由王军与计宏伟协同编写。

中国振动工程学会包装动力学专业委员会理事长王振林教授、江南大学卢立新教授出任本教材的主审。两位教授在教材体系和特色凝炼中提供了有益的指导。本书编写中还得到了浙江大学力学系卢富德博士的帮助。

本教材参考借鉴了同方向的一些专著、教材和论文，特别是奚德昌、彭国勋、汤伯森、宋宝丰等知名专家的研究，给编者以可贵的启迪。中国轻工业出版社的鼎力支持，是本书能顺利与读者见面的重要因素，在此一并致以诚挚的感谢！

笔者在编写中力求在基础课程中引入一些当代研究的新成果。为了结构、内容的完整性、系统性，并在适应不同层面受体中找到“平衡点”，某些章节用“*”标示，可供不同学时课程教学取舍，也为研究生教学及相关科技人员参阅预留了空间。

学科理论向教材转化是现代高等教学的需要，然而有着诸多难点。限于编著者水平，本书第一版必定在内容编选及论述方式上存在疏漏与偏颇，切盼广大师生、读者与专家斧正。

作者

2013年1月

目 录

CONTENTS

第一章 绪论 1

第一节 包装应用力学的任务	1
第二节 包装应用力学的研究内容	1
一、包装件	2
二、物流过程	3
三、振动与冲击	4
四、包装件的损伤失效	5
五、包装材料的力学模型	5
六、流体力学在包装中应用	5
第三节 包装应用力学的发展	5
一、包装应用力学的发展历史	5
二、包装应用力学的发展趋势	7
练习思考题	7

第二章 包装固体力学基础 8

第一节 固体力学中的若干定义和概念	8
一、质量与惯性	8
二、弹簧与弹性	10
三、阻尼与黏性	14
四、力、力偶与力矩	16
五、应力、应变、应变率与应变能	17
六、蠕变与松弛	20
第二节 材料与结构力学基础	21
一、强度与刚度	21
二、稳定性	23
三、构件的基本变形	24
四、断裂、冲击与疲劳	28
练习思考题	33

第三章 包装产品的振动 34

第一节 概述	34
一、基本概念	34
二、振动系统及形式分类	35
三、振动问题的研究方法	36
四、包装件振动模型与运动方程	36
第二节 单自由度线性系统振动	37
一、单自由度线性系统无阻尼自由振动	37
二、单自由度线性系统有阻尼自由振动	39
三、单自由度线性系统强迫振动	43
第三节 两自由度线性系统振动	48
一、两自由度线性系统振动的模型及动力学方程	48
二、两自由度线性系统的自由振动	49
三、两自由度系统的强迫振动	52
第四节 多自由度线性系统振动	56
一、多自由度系统振动的模型及动力学方程	57
* 二、弹性体产品包装的振动分析	58
* 三、刚体产品包装的振动分析	65
练习思考题	72

第四章 包装件的冲击 74

第一节 概述	74
第二节 单自由度包装件跌落冲击	75
一、无阻尼包装件的跌落冲击	75
二、有阻尼包装件的跌落冲击	77
三、非线性特性包装件的跌落冲击	81
四、冲击回弹特性	85
第三节 考虑易损零部件时产品包装跌落冲击	87
一、考虑易损零部件时产品包装跌落冲击的动力学模型	87
二、运动方程及求解	88
三、作用力与加速度	89
* 第四节 多自由度包装件跌落冲击	90
一、刚体产品包装的冲击	90
二、刚体-弹性体产品包装的冲击	92
练习思考题	94

第五章 包装件的损伤失效 95

第一节 包装件损伤失效形式	95
---------------------	----

一、弹性失效和弹性失稳	95
二、脆性失效和脆性断裂	96
三、疲劳失效	96
四、过度变形	96
第二节 易损度	97
一、易损度的概念	97
二、易损度的理论描述	98
三、易损度的确定	99
第三节 冲击谱理论	104
一、冲击脉冲激励	104
二、冲击谱	106
第四节 典型包装致损的力学分析	116
一、包装箱、盒类的破损	116
二、包装袋类的破损	119
三、包装瓶罐类的破损	121
四、包装桶类的破损	122
练习思考题	125
第六章 包装材料的力学模型基础	127
第一节 包装材料的力学模型基础	127
一、线性应力应变关系及本构模型的概念	127
二、弹塑性本构模型	129
三、黏弹性本构模型	131
第二节 常用缓冲包装材料的力学模型	134
一、发泡聚苯乙烯的力学模型	134
二、发泡聚乙烯的力学模型	135
三、瓦楞纸板的力学模型	136
四、蜂窝纸板的力学模型	137
五、缓冲气垫的力学模型	139
六、纸浆模塑的力学模型	139
第三节 模型参数的识别方法	139
一、最小二乘法及其原理	139
二、线性包装模型参数识别的最小二乘法	141
三、三次非线性包装材料模型参数识别的最小二乘法	143
第四节 力学模型的应用	144
练习思考题	146
第七章 包装工程中流体力学基础	147
第一节 包装工程中的流体力学问题	147

第二节 液体包装力学	149
一、流体力学基础	150
二、流体传递现象基础	160
第三节 气体包装力学	165
一、气体热力学基础	165
二、真空包装技术	168
第四节 迁移与扩散的力学问题	183
一、气体的迁移现象	183
二、气体的扩散现象	184
三、低压下气体的迁移	186
练习思考题	192
主要参考文献	195

第一章 绪 论

内容提要

包装应用力学作为教育部印刷与包装工程教学指导委员会确定的包装工程本科专业 8 门专业核心课程之一,在培养包装工程学生的包装应用力学知识和提高工程设计能力的同时,为后续各类专业课程的学习奠定了必须的力学基础。本章主要包括包装应用力学的任务、包装应用力学研究的主要内容以及包装应用力学的发展历史和发展趋势三节内容。主要讲授:包装应用力学的任务、包装件、物流过程、振动与冲击、包装件的损伤失效、缓冲防护包装中的力学问题、流体力学在包装中应用、包装应用力学的发展历史、包装应用力学的发展趋势。

基本要求、重点和难点

基本要求:掌握包装件的组成、各组成的基本要求,流通过程,熟悉包装件、内装物、缓冲衬垫、外包装、物流过程等一些基本概念,掌握包装应用力学在包装工程教育中的作用,强度与刚度、稳定性的知识,了解包装力学的现状及发展趋势。

重点和难点:重点掌握包装件、物流过程。

第一节 包装应用力学的任务

包装应用力学是包装工程专业的 8 门核心课程之一,同时又是一门重要的专业基础课程。包装应用力学的主要任务有以下几个方面:

① 随着现代科学技术的发展,力学的研究内容已渗入到包装工程学科涉及的知识领域,主要有包装结构设计、运输包装、包装机械、包装技术与方法等许多专业课程,都要以振动、冲击、破损机理、传递原理等力学知识为基础,而这些力学基础问题在大学物理和工程力学等基础课程中无法解决,而导致包装工程专业工程设计能力明显不足,为此,包装应用力学是学习一系列后续课程的理论基础。

② 包装件在物流过程中要经历搬运装卸、贮藏和运输等多个环节,有些工程问题可以直接采用包装力学的基本理论去解决,有些比较复杂的问题,需要综合运用包装力学和其他专门知识共同解决,才能建立科学合理的包装防护理论。所以学习包装应用力学,是为解决工程问题奠定一定的基础。

③ 包装应用力学的研究方法,是数学与力学知识在包装工程知识领域的直接应用,因此充分理解包装应用力学的研究方法,不仅可以深入地掌握这门知识,而且有助于学习其他科学技术理论,有助于培养正确的分析问题和解决问题的能力与素质,为今后解决包装工程的生产实际问题,从事科学研究工作打下基础。

第二节 包装应用力学的研究内容

包装应用力学主要研究内容是以包装件的物流过程为背景,在宏观上应用力学的基本

原理,探求包装件在物流过程中承受振动与冲击的内在规律,阐释缓冲防护包装中的缓冲材料承受的刚度、强度及稳定性的力学问题,对常用包装件进行力学分析,研究包装工程中流体的流动和输送问题;在微观上应用流体力学原理,简述液体、气体等在包装材料及物品中的渗透、泄漏,包装中化学物迁移问题,包装物品的防潮问题。

本教材主要讲授固体力学基础知识、包装件振动和冲击理论、流体力学在包装中的应用、缓冲防护中的力学问题、常用包装件破损的力学分析、缓冲包装材料的力学模型及包装力学实验等内容。

一、包 装 件

包装是人们为了在物流中保护产品、方便储运、促进销售、易于使用,按一定技术方法而采用的容器、材料及辅助物等的总称。产品经过包装形成包装件,包装件通常由内装物、缓冲衬垫和外包装三部分组成。

1. 内装物

(1) 物态

物态即产品存在的状态,它主要影响包装容器的选择,如液态产品就不能同固态产品那样直接用木箱或纸箱包装,需采用桶、罐、瓶等容器进行包装。

(2) 外形、尺寸、重量和结构

产品的外形主要影响外包装容器的结构、固定形式以及单元包装的数量。产品的尺寸和重量主要影响包装容器的种类、形式和级别以及储运时的堆码高度。了解产品的结构有助于选择内装物在容器中的固定方式。

(3) 化学腐蚀性

由于空气中的水分、氧气、氮气、碳、尘埃及其他化学成分的存在,暴露在大气环境中的机电类产品,会产生不同程度的腐蚀,如黑色金属(钢或铁)制品要比合金金属容易锈蚀。产品的这种特性主要影响产品在运输储存过程中要求的防护方法,如防潮、防锈、防水、防酸碱等。

(4) 物理损坏性

包装件物流过程中的机械类外载主要是冲击和振动,用以表征包装件对其耐受程度,是产品固有的一种属性,根据物品耐受程度,采用相应的缓冲包装以及防护等级。物流过程的其他外场力主要是指静电、电磁场和放射性作用,需要采用防静电、防电磁和防辐射包装等。

(5) 危害性

产品的危害性主要有易燃易爆性、毒性、放射性等方面,包装不善将导致对人与环境的危害。产品的危害性决定了其防护方法、防护等级、包装标志以及储运中的一些特殊规定。

(6) 载荷类型

按内装物施加给包装容器的结构强度大小,可将载荷类型分为3种:轻载荷、中等载荷和重载荷。根据载荷类型及产品在包装容器中的固定方式采取相应防护等级。

(7) 分解与组合性

了解产品是否具有可分解组合的特性,对减小包装尺寸、简化包装结构及方便储运有

重要意义。

(8) 材料相容性

材料的相容性体现在衬垫材料、内裹包材料、捆扎材料及产品表面之间应彼此相容，不能出现由于包装材料与产品表面发生物理化学反应而影响产品品质的问题。

2. 缓冲衬垫

缓冲衬垫是根据商品不同形状及薄弱部位，用于固定商品，确保商品在运输过程中不致移动，主要具有缓冲作用的包装构件。衬垫作为具有缓冲作用的包装构件，其主要作用是减少或降低外界冲击对内包装物品的破坏。常用的缓冲衬垫材料有发泡聚苯乙烯 (EPS)、发泡聚乙烯 (EPE)、聚乙烯 (PE)、聚丙烯 (PP)、纸浆模塑、瓦楞纸板、现场发泡等。

了解包装缓冲衬垫的力学特性，对揭示包装件在动态激励下响应规律、合理设计包装缓冲衬垫具有重要意义。包装缓冲衬垫材料绝大部分是黏弹性材料，除具有一般材料的弹性和塑性外，蠕变和应力松弛现象也是其典型力学特性。

3. 外包装

产品的外部包装，在流通过程中主要起保护产品、方便运输的作用。外包装是运输包装件的重要组成部分，除了通常对外包装有结构、形状、材质等方面的要求外，还应具有一定的机械强度，以保护产品在装卸运输和仓储条件下完好无损。

最常用的外包装容器是瓦楞纸箱，部分重型产品也采用蜂窝纸板包装箱，一些较轻或本身抗压强度较高的产品如玻璃空罐等，在使用托盘运输时，可用缠绕薄膜包装代替瓦楞纸箱。

二、物流过程

一般来说，包装件的物流过程主要包括：装卸、搬运、运输、贮藏等环节。

1. 装卸、搬运环节

所谓装卸是指随物品运输和保管而附带发生的作业，是物流作业中的一个环节。具体来说，它是指在物流过程中对物品进行装卸货、搬运移送、堆垛拆垛、放置取出、分拣配货等作业。装卸活动的基本动作包括装车（船）、卸车（船）、堆垛、入库、出库以及连接上述各项动作的短程输送，是随运输和保管等产生的必要活动。在物流过程中，装卸活动是不断出现和反复进行的，它出现的频率高于其他各项物流活动，每次装卸活动都要花费很长时间，所以往往成为决定物流速度的关键。装卸活动所消耗的人力也很多。此外，进行装卸操作时往往需要接触货物，因此，这是在物流过程中造成货物破损、散失、损耗、混合等损失的主要环节。例如袋装水泥纸袋破损和水泥散失主要发生在装卸过程中，玻璃、机械、器皿、煤炭等产品在装卸时最容易造成损失。

物流过程中的装卸作业包括卸货和搬运分拣堆垛中以及拆垛配货活动中的装卸作业，发货活动中的搬运、装货等装卸作业。具体来说装卸作业按作业内容分有以下 4 种类型：装货卸货作业、搬运移动作业、堆垛拆垛作业、分拣配货作业。

装卸作业按装卸场所分类：车站装卸、机场装卸、仓库装卸、港湾装卸、码头装卸。

装卸作业按物品形态分类：单个物品装卸（一般指大物件装卸）、集装货物装卸（如

托盘、集装箱等装卸)、散装货物装卸(如粉粒状物体的装卸)。

装卸作业按机械来分类:传送带装卸、吊车装卸、叉车装卸、托盘以及各种其他装卸机械的装卸。

包装件在物流过程中,要经过多次装卸和短距离搬运等作业。包装件的体积和重量影响着装卸搬运的方式。现今,装卸搬运方式主要有机械和人工两种。其中机械方式大多采用叉车、吊车等设备,用以装卸笨重的包装件,要求外包装设计要适应机械装卸的要求。人工装卸一般适用于40kg以下的包装件,过重难以做到轻拿轻放,过轻则显得零乱、分散。在人工装卸时,由于工况和操作者习惯不同,包装件受跌落、碰撞、抛掷的机会较多,在包装设计时,要合理配置提手或手孔,以利于文明装卸和搬运。

2. 运输环节

运输是用设备和工具,将物品从一地点向另一地点运送的物流活动,其中包括集货、分配、搬运、中转、装入、卸下、分散等一系列操作。

由生产厂到消费地,包装件要历经漫长的旅程。在汽车、火车、轮船以及飞机等运输过程中,包装件所受到的冲击力一般小于装卸作业,所以受冲击损坏的几率降低,而受振动损坏的几率则较大。特别是汽车运输,受公路路面颠簸激励、车辆减振性能和轮胎充气程度的制约,均可能导致包装件的振动破损。

包装件在物流过程中,还要经受气象环境条件的考验,不同的温度和湿度对包装件也有影响,如纸包装易受潮变形,内装食品、药品霉变,金属制品锈蚀,电子类产品受潮等从而导致变质或性能降低等。货物运输就是防止上述现象的发生,保证产品从生产者到消费者移动过程中的质量和数量,起到产品的保值作用,即保护产品的存在价值,使该产品在到达消费者时使用价值不变。

3. 贮藏环节

包装件在物流过程中还需要作长期或短期的贮藏存放。贮藏周期越短,越利于产品保护。贮藏中要求尽可能占用较小的场地,以提高贮藏率,所以堆码是常用的方式。堆码会使下层包装件受到因上层包装件重力而引起的静压力,导致外包装发生变形,危及内装物,因此堆码的高度应根据包装件的强度进行计算,避免下层包装件压损。

对于长期储存的包装件,还要考虑环境条件的影响,特别是露天存放时,尽管会采取某些遮蔽措施,但是环境仍是很恶劣的,阳光、风雨、腐蚀气体、微生物等危害不容忽视。

综上所述,包装件在装卸、搬运、运输、贮藏环节中,会受到许多外部因素的危害。因此,必须对包装件的物流过程有全面的了解,并模拟环境条件对包装件进行相关测试,以了解所设计包装的防护性能,从而优化包装设计。

三、振动与冲击

包装件在物流过程中,受到的破损大多是由振动与冲击导致的。为了更好掌握包装件的力学防护原理,主要介绍包装件在单自由度线性系统、两自由度和多自由度情况下的振动与冲击基本原理,了解包装件在振动和冲击情况下的运动规律,为缓冲包装设计奠定理论基础。

四、包装件的损伤失效

介绍包装件在物流过程的损伤失效形式, 主要包括弹性失效和弹性失稳、脆性失效和脆性断裂、疲劳失效、过度变形, 对振动和冲击过程中的易损度及冲击谱理论进行了描述, 介绍包装箱盒类、包装袋类、包装瓶罐类、包装桶类等典型包装件致损原因, 并进行力学分析。

五、包装材料的力学模型

从线性应力应变关系及本构模型的概念、弹塑性本构模型、黏弹性的本构模型等力学模型基础入手, 讲解发泡聚苯乙烯、发泡聚乙烯、瓦楞纸板等几种常用缓冲包装材料的力学模型, 进而介绍利用最小二乘法原理进行模型识别的方法, 了解如何采用本构模型进行缓冲包装设计。

六、流体力学在包装中应用

在物流过程中, 包装对物品的保护是其最根本的功能, 不同的物品有不同的防护要求, 例如防潮、保鲜、防霉、防锈、无菌、防虫害、防静电、防震缓冲等。这些保护要求包装物品在流通过程中起到一定的阻隔作用, 将物品和环境中的热量、水分、气体、力、光、电、虫、菌、尘等传递量减少到最低、最合理的程度。包装工程中的流体力学问题主要涉及以下几个方面: 流体的流动和输送、包装的渗透和泄漏、包装中化学物迁移。

第三节 包装应用力学的发展

一、包装应用力学的发展历史

包装应用力学的经典理论分析, 最早由美国明德林 (R. D. Mindlin) 于 1945 年在论文《缓冲包装动力学》中提出。明德林指出, 造成包装件在物流过程中产生机械损伤, 原因不外是产品本身太脆弱、保护性缓冲不当、包装容器不够坚固等。1952 年简森 (R. R. Janssen) 提出缓冲系数-最大应力曲线, 1961 年富兰克林 (P. E. Franklin) 和海旦 (M. T. Hatae) 提出最大加速度-静应力曲线, 根据这些经验曲线, 可以设计计算单自由度线性或非线性系统的跌落缓冲包装。缓冲系数-最大应力曲线是包装材料的静态压缩特性曲线, 由于实验简便, 现尚有应用。最大加速度-静应力曲线是包装材料的动态压缩特性曲线, 更接近于实际情况, 目前应用较广泛。1961 年缓冲包装设计被作为一个独立的章节, 列入了美国的权威工具书《Shock and Vibration Handbook》。在 1964 年美国国防部制定的《Military Standardization Handbook》中, 介绍了缓冲包装设计的内容。1968 年马斯登 (G. S. Mustin) 在《Theory and Practice for Cushion Design》一书中, 首次较系统地总结和归纳了已有的成果。1969 年星野茂雄和丰田实比较全面地总结了缓冲包装设计理论。1976 年麦旦其 (D. McDaniel) 和威斯基德 (R. M. Wyskida) 提出包装材料动态压缩曲线除了与包装材料尺寸和跌落高度有关外, 还与时间和环境温度有关。1982 年马斯登也提出了同样的观点, 为了减少试验工作量, 科斯特 (T. L. Cost)、麦旦其和威斯基

德分别建立了使用某些包装材料包装产品最大加速度的数学表达式,根据不同静应力、厚度、跌落高度和环境温度,可由此数学表达式直接计算最大加速度值。

由于包装件结构较复杂,缓冲材料的非线性特性十分突出,在明德林(R. D. Mindlin)建立的双自由度简化的动力学模型中,只能得到近似的计算结果。历来采用的跌落试验机,在对包装后的产品进行跌落试验时,很难保证冲击时的姿态和防止反弹,不易得到准确的冲击加速度-时间曲线,影响分析精度。因此,无论是理论还是试验方法及设备,都有很大的改进空间。

1954年高霍索(M. Komhauser)和1965年彭特莱(J. W. Pendered)提出了损坏灵敏度概念。1968年牛顿(R. E. Newton)提出了破损边界概念。

围绕易损度的评价及损伤边界曲线的理论和试验研究,国内外许多学者做了不少工作。目前世界上常用的缓冲包装设计方法为“五步法”,由MTS系统公司和密歇根州立大学包装学院在20世纪70年代末期共同研制成功。缓冲设计的五个步骤包括:确定环境、确定产品的易损度、选用适当的缓冲衬垫、设计与制造原型包装、试验校核原型包装的性能。

“五步法”在美国和世界各地获得应用,经过近10年的发展,终于被美国国家标准学会(American National Standards Institute, ANSI)列入美国试验材料学会(American Society for Testing and Materials, ASTM)标准。之后又出现了缓冲包装设计的“六步法”,并给出了与每一个步骤相关联的ASTM标准。该理论与方法已列入美国《包装工程设计手册》,编入包装动力学教材。一些国家按各自的实际情况,修订了相应的包装标准。如日本从1987年3月起实施了新的标准——包装物实验方法通则JIS Z 0202、JIS Z 0232等。

我国很早就有了包装应用力学的实践,如公元7世纪唐代将陶瓷制品完整无损地运往日本、印度及马来西亚等国,表明当时我国已具备了较高的防震缓冲技术。但包装应用力学理论研究相对较晚。1978年,湖南大学朱光汉教授向国内介绍关于包装应用力学情况;同年,由国家标准局发布了包装材料静、动态压缩试验、振动传递率和缓冲包装设计等4项国家标准。

20世纪80年代起,我国开始进行包装应用力学的系统研究。1987年1月,浙江大学奚德昌教授发起召开了全国首届包装动力学学术讨论会,后经中国科协和中国振动工程学会批准,于1989年6月在嘉兴成立了中国振动工程学会包装动力学专业委员会。通过该学会历届理事会与广大会员的努力,至今其工作已辐射全国二十多个省市,理事单位涵盖了全国几十所高校和一批包装主干研究机构、大中型包装企事业单位;国际上和美国、新加坡、加拿大、德国、日本等国的相关学术、教育组织建立起交流合作关系。先后在杭州、北京、温州、重庆、无锡、广州、哈尔滨、西安、郑州、珠海、武汉、宁波等地召开了14届全国性学术交流大会,交流发表论文2000余篇,为推动我国包装应用力学和缓冲包装结构设计的发展,做出了重要的贡献。

1985年起,浙江大学奚德昌、童忠钊、王振林等开始培养包装应用力学方向的硕士研究生,1987年开始招收博士研究生;陕西科技大学彭国勋、北京工商大学郑百哲、北京印刷学院许文才、江南大学王志伟、哈尔滨商业大学高德等也相继培养了一批包装力学方面的硕士研究生;2003年江南大学王志伟开始招收培养包装力学方向的博士生。这