

材料与结构的能量吸收

耐撞性 · 包装 · 安全防护

余同希 [澳] 卢国兴 著
华云龙 译



化学工业出版社
材料科学与工程出版中心

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

材料与结构的能量吸收: 耐撞性·包装·安全防护/余同希, [澳] 卢国兴著; 华云龙译. —北京: 化学工业出版社, 2005. 11
书名原文: Energy Absorption of Structures and Materials
ISBN 7-5025-7946-X

I. 材… II. ①余…②卢…③华… III. 工程材料 IV. TB30

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 140958 号

Energy Absorption of Structures and Materials/by Guoxing Lu and Tongxi Yu

ISBN 1 85573 6888

Copyright © 2003 by Woodhead Publishing Limited. All rights reserved.

Authorized translation from the English language edition published by Woodhead Publishing Ltd.

本书中文简体字版由 Woodhead 出版公司授权化学工业出版社独家出版发行。

未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

北京市版权局著作权合同登记号: 01-2004-6555

材料与结构的能量吸收

耐撞性·包装·安全防护

余同希 [澳] 卢国兴 著

华云龙 译

责任编辑: 宋向雁

文字编辑: 宋 薇

责任校对: 蒋 宇

封面设计: 潘 峰

*

化学工业出版社 出版发行

材料科学与工程出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

购书咨询: (010)64982530

(010)64918013

购书传真: (010)64982630

[http:// www. cip. com. cn](http://www.cip.com.cn)

*

新华书店北京发行所经销

北京永鑫印刷有限责任公司印刷

三河市东柳装订厂装订

开本 720mm×1000mm 1/16 印张 20 字数 410 千字

2006 年 2 月第 1 版 2006 年 2 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-7946-X

定 价: 49.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

中文版序

材料和结构的能量吸收行为对结构受撞击后的安全性起着关键的作用。在航空航天、汽车、轨道车辆、海洋平台、高速公路护栏、核电站等实际工程中，由于安全防护的需要，设计师对结构的能量吸收性能必须有严格的要求。在设计电子产品或贵重物品的包装时，应考虑在撞击或跌落的情况下，其包装材料能够吸收足够的能量以减小被包装物件的损伤。此外，在人体防护和运动安全等领域，也都有类似的问题。

自 20 世纪 70 年代以来，人们逐渐认识到结构与材料能量吸收的重要性，并进行了大量的研究。目前，这一研究领域的参与者越来越多，研究范围日益广泛，大量研究成果已在实际中采用。2003 年英国 Woodhead 出版社出版了我们二人合著的“Energy Absorption of Structures and Materials”一书。作为世界上此领域的首部专著，该书综合了国际上（包括作者本人）的系统研究成果，详细介绍了能量吸收性能的基本概念、工程背景、研究方法以及其所涉及的动载效应，总结了基本构件在不同加载条件下的变形机理和吸收能力，并介绍了复合材料与多孔材料的吸能机理与行为。

我们力求深入浅出，在实验观测的基础上突出问题的物理本质，强调力学模型分析以及结果的工程意义。本书英文版受到国际学术刊物和研究者的好评。现在，我们很欣慰能将它的中文版介绍给国内读者，希望有助于促进这一重要领域的研究和发展。本书适合于从事相关研究和设计的科技工作者、工程师、研究生及本科高年级的学生使用。

我们谨借此机会，衷心感谢华云龙教授一丝不苟地翻译全书。在出版过程中，化学工业出版社给予了许多帮助，Woodhead 出版社准许发行本书的中文版，在此一并致谢。

余同希 卢国兴

2005 年 7 月 8 日

前 言

本书论述结构和材料在静载荷和冲击载荷作用下的能量吸收。对于能量吸收装置的设计和材料的选择,结构受到意外撞击时的耐撞性和损伤的评估以及减轻冲击的包装设计,都需要能量吸收性能方面的知识。对能量吸收性能的研究要求有材料工程、结构力学、塑性理论和冲击动力学等方面的知识。在过去的几十年里,人们对这个课题的研究表现了极大的兴趣。尽管如此,在这一领域的文献是相当分散的,对于某些读者,特别是初学者,要想顺利地掌握基本概念,并将有关原理应用于其他问题,是比较困难的。在本书中,我们试图将这个领域目前的知识汇集在一起。

因为实际应用中的结构和材料门类繁多,本书主要关注基本概念、研究方法以及简单的结构元件和材料。在介绍这些内容时,重点放在阐述物理行为和简单的分析方法上。对更为实际的复杂结构的全面综合分析,例如汽车车身和飞机机身的分析,则超出本书的范围。本书没有将商业有限元软件的使用包括在内,只对一些问题给出了应用有关软件的计算结果。

本书的结构如下。第1章对本书主题作了扼要的介绍,描述了能量吸收材料和结构的工程背景,阐明了碰撞能量吸收装置的一般要求。基于塑性力学和冲击动力学的有关知识,第2章介绍了理论分析的基本原理和方法。第3章在能量吸收的论题范围内,讨论了量纲分析和小尺度模型试验的相关概念,同时介绍了常规实验方法。

第4章~第6章,应用第2章和第3章中介绍的原理,考察了某些简单构件在不同加载条件下的能量吸收。这些结构包括圆环、圆环系统和薄壁管件,所有这些结构都可能经历塑性大变形。加载条件包括拉伸、压缩(轴向或横向)以及压入。第7章着重于碰撞条件下局部变形的模拟,以及惯性敏感结构的分析。

第8章研究伴有撕裂的塑性变形问题。这类问题是十分复杂的。撕裂能量的量值很难确定,它随不同问题而变化。此外,在较远区域,撕裂和弯曲/拉伸之间可能有交互作用。

第9章介绍四个问题的塑性分析:管件翻转、管件的鼻状成型、球壳的翻转以及深海管道屈曲的传播。这些例子说明了塑性变形传播的若干特点。

与前面第4章~第9章所讨论的金属结构不同,第10章研究了四类多胞材料的能量吸收性能:蜂窝材料、泡沫材料(包括金属泡沫)、木材和多胞纺织复合材料。这里的分析一般要利用到第2章介绍的方法,在微结构层次对典型胞元进行研究,然后将胞元的力学行为转换成多胞材料的整体响应。

第 11 章对有关复合材料及其结构的研究作了概括, 讨论了复合材料管件和复合材料夹层板。详细描述了能量吸收机理, 并与相应的金属结构进行了比较。对解析方法得到的结果亦有介绍。

最后, 第 12 章包含四个工程实例研究: 岩石滚落防护网, 利用泡沫材料的包装设计, 车辆内部装修的设计以及公路护栏梁的设计。通过这些实际例子说明了前面各章介绍的知识的应用。

本书对于工程 and 材料科学的高年级本科生和研究生、机械和结构工程师以及对结构和材料防撞设计和能量吸收计算有兴趣的研究工作者来说都是很有用的。

在我们对这个课题的研究和理解的过程中, 得到了许多朋友和同事的帮助。特别是, 我们要对 C. R. Calladine 教授和 W. Johnson 教授, 我们各自的研究生导师, 表示感激之情, 他们一直是激励我们研究的源泉。我们要感谢我们的同事和朋友 Steve Reid, Norman Jones, Bill Stronge, Yella Reddy, Jason Brown, Majid Sadeghi, Bin Wang (王彬), Qing Zhou (周青), Dongwei Shu (舒东伟), Raphael Grzebieta, Xiaoming Tao (陶肖明), Pu Xue (薛璞) 和 Xi Wang (王熙), 还有我们的学生 Dong Ruan (阮冬), Ziyang Gao (高子阳), Jacquelin Hui (许庭茵) 和 Haihui Ruan (阮海辉) 在本书的准备过程中所提供的图片和曲线。本书部分内容是在 Guoxing Lu (卢国兴) 的研究休假和 Tongxi Yu (余同希) 的休假年里完成的, 因此对斯文本科技大学 (SUT) 工程与科学学院和香港科技大学 (HKUST) 机械工程系表示感谢。我们感谢 Stephen Guillow 仔细地阅读了本书的手稿, 并提出了许多宝贵的意见, Xiaodong Huang (黄晓东) 绘制了全部高质量的插图。Woodhead 出版社委派的编辑 Mrs. Gwen Jones 提出了许多非常有价值的建议。许多出版社惠允复制有关的图表, 我们在文中表示了感谢。最后, 我们感谢我们各自的妻子, Jue (王珏) 和 Shiyang (李世莺), 感谢她们这些年来的理解和耐心。

G. Lu (卢国兴) T. X. Yu (余同希)

墨尔本

香港

2003 年 3 月

符 号 表

A	面积	P_S	极限载荷
a	加速度; 接触圆半径	p	冲量
B	(2, 73) 式中的材料常数; 宽度	p_o	过载冲量
b	宽度	p^*	孔隙度
c	距离; 正方形管的边长	Q	广义力
c_L	纵向弹性应力波波速	q	指数; 分布载荷
c_p	纵向塑性应力波波速	R	半径
d	直径	R_{er}	能量比, $E_{in}/E_{\max}^e$
D	能量耗散; 圆管/圆环的直径; 塑性能	R_M	质量比
E	杨氏模量; 能量	R_p	塑性耗散能量与输入能量之比, D/E_{in}
E_m	输入能量	r	径向坐标; 应变率指数; 半径
E_p	强化模量	S	比例因子
e	恢复系数	S_l	线性尺度的比例因子
F	力	S_m	材料的比例因子
f	无量纲力	T	脉冲持续时间; 系统的总动能; 总厚度; 总时间
G	(集中) 质量	t	时间
H	高度; 一个皱褶的半长; 水平力分量	u	位移
h	厚度	V	弹体的速度; 竖直力分量
I	截面的二次矩	v	速度
J	惯性矩	v_y	屈服速度
K	动能	W	功
k	弹簧常数	w	翼缘长度; 比功
L	长度	x, y	坐标
l	胞元的尺度; 卷曲长度	Y	屈服应力
M	弯矩	α	角加速度
M_e	最大弹性弯矩	Δ	(特征) 位移
M_o	板壳单位长度的塑性极限弯矩	δ	(局部) 位移; 增量
M_p	梁的塑性极限弯矩	δ_e	等效长度
m	质量; 无量纲弯矩, M/M_e	ε	应变
m_e	结构的等效质量	ε_D	压实应变
N	轴力	ε_f	断裂应变
N_p	梁的塑性极限轴力	ε_I	入射应变
N_o	板壳单位长度的塑性极限轴力 (膜力)	ε_R	反射应变
n	裂纹数	ε_T	透射应变
P	载荷	ε_y	屈服应变
P_o	初始极限载荷		

η 结构有效率；动力增强因子
 θ 转角
 κ 曲率
 κ_e 最大弹性曲率
 λ 塑性铰的等效长度
 μ 摩擦系数
 ν 泊松比
 $\pi_1, \pi_2 \cdots$ 无量纲组
 ρ 密度；塑性铰处转动的半角
 ρ^* 多胞材料密度
 ρ_s 胞壁固体材料的密度
 σ 应力
 τ 剪切强度
 ϕ 密实度；无量纲直径
 φ 无量纲曲率, κ/κ_e
 ω 角速度

上标

d 动态
 e 弹性
 ep 弹塑性
 o 静力许可
 p 塑性
 rp 刚塑性
 $+$ 上界
 $-$ 下界
 $*$ 运动许可

下标

b 弯曲
 c 压缩；复合材料；特征值；中部
 cr 临界
 d 压实
 e 有效，等效
 f 最终；翼缘
 fri 摩擦
 $frac$ 断裂
 g 整体
 in 输入
 L 纵向
 l 局部；锁定
 m 膜；模型；金属
 max 最大
 min 最小
 o 初始
 p 原型；峰值
 r 恢复；径向；反弹
 s 延展的；静态的；固体的
 t 管件的；切线的；撕裂的
 tl 总的
 u 终极的
 w 腹板
 y 屈服

目 录

1 绪论	1
1.1 车辆事故及其后果	1
1.2 能量吸收结构/材料的应用	8
1.3 设计能量吸收结构和选择能量吸收材料	14
2 能量吸收能力的分析方法	19
2.1 材料行为的理想化	19
2.2 极限分析和界限定理	26
2.3 大变形效应	32
2.4 动载荷效应	35
2.5 能量法	44
3 量纲分析和实验技术	50
3.1 量纲分析	50
3.2 小尺度结构模型	54
3.3 实验技术	58
4 圆环和圆环系统	65
4.1 一对集中力作用下的受压圆环	65
4.2 一对集中力作用下的受拉圆环	66
4.3 集中力作用下的固支半圆拱	70
4.4 两平板对压下的圆环	73
4.5 横向受约束的圆管	76
4.6 端部受撞击的一维圆环系统	80
4.7 圆管阵列的横向压溃	83
4.8 其他圆环/圆管系统	84
4.9 小结	85
5 横向载荷作用下的薄壁构件	86
5.1 集中力作用下的圆管	86
5.2 钝楔对圆管的压入	89
5.3 薄壁构件的弯曲破坏	93

5.4	其他加载系统与评论	107
6	轴向压溃的薄壁构件	109
6.1	圆管	109
6.2	方管	116
6.3	帽形和双帽形截面	125
6.4	泡沫充填效应	127
6.5	进一步评论	131
7	结构碰撞与惯性敏感性	132
7.1	碰撞引起的结构局部变形	132
7.2	惯性敏感能量吸收结构	149
8	伴随有韧性撕裂的塑性变形	161
8.1	撕裂能量的测量	161
8.2	金属圆管的轴向劈裂	166
8.3	正方形金属管的轴向劈裂	171
8.4	金属管的刺穿	175
8.5	尖楔切割金属板	179
8.6	小结	183
9	圆柱壳和球壳	184
9.1	管子翻转	184
9.2	管件向内的鼻状成型	188
9.3	球壳的翻转	189
9.4	海底管道塌陷的传播	192
9.5	小结	196
10	多胞材料	198
10.1	蜂窝材料	198
10.2	泡沫材料	206
10.3	木材	212
10.4	多胞材料对碰撞的响应	214
10.5	多胞纺织复合材料	226
11	复合材料和复合材料结构	235
11.1	影响能量吸收特性的因素	235
11.2	圆管的轴向压溃	235

11.3	其他几何形状管件的轴向压溃	246
11.4	管件弯曲	248
11.5	关于复合材料管件压溃的评论	250
11.6	复合材料包裹的金属管件的轴向压溃	250
11.7	复合材料夹层板	253
12	工程实例研究.....	262
12.1	岩石滚落防护网	262
12.2	利用塑料泡沫材料进行包装	267
12.3	车辆内部装修的设计	273
12.4	波纹梁护栏系统	278
	参考文献	286
	名词术语	304

1 绪 论

本章从车辆耐撞性到人体防护，回顾了对能量吸收结构和材料研究的工程背景，也讨论了以能量吸收为目的的设计结构和选择材料的一般原理。

1.1 车辆事故及其后果

1.1.1 车辆事故统计

现代世界极大地依赖各种交通工具，20 世纪以来，车辆的数目一直持续增长。仅在美国，根据 NCSA (National Centre for Statistics & Analysis, 全国统计与分析中心) 的数据，在 2000 年登记在册的车辆达 217930000 辆 (比 1990 年的数字增加了 18%)，而 VMT (Vehicle Miles Traveled, 车辆行驶英里数) 估计为 2688312 百万英里 (比 1990 年增加了 25%)。美国 2000 年的人口为 275129687 人，与其人口数相比，上述数字表明平均每 5 个人有 4 辆车，每辆车每年平均行驶 20000km。

技术进步不仅使得车辆的数目和行驶里程不断增加，而且也向更高的速度和更大规模的运载器 (例如大型卡车和飞机) 方向发展。因为运载器本身就是昂贵的结构，如果发生交通事故，对人和环境的破坏将更为严重。

机动车交通事故是一个世界性的主要问题，严重威胁人的生命和健康，并且对社会造成严重的经济损失。例如，车辆碰撞所引起的 1~34 岁美国人的死亡数，比任何类型疾病和伤亡原因都要多。在美国，在与交通运输有关的各种死亡中，与公路交通有关的占 95% 以上，而火车和飞机只各占 2%。

根据 NCSA 发表的交通安全情况表 (Traffic Safety Fact Sheets)，1999 年美国估计有 6279000 起警察报告的交通碰撞事故，其中有 41611 人死亡，3236000 人受伤。在这些事故中，有 37943 起是致命的，另外有 4188000 起仅引起财产损失。在 1999 年车祸死亡的 41611 人中，有 25210 人是驾驶人员，10596 人是乘员，5805 人非乘员 (行人和骑自行车者)。图 1.1 为 2000 年不同类型车祸的死亡人数百分比。

在图 1.2(a) 和 (b) 中，分别按年给出了车祸死亡率和每 100 百万英里车祸死亡率的变化趋势。从图 1.1(b) 中可以看到，每 100 百万英里 VMT 的车祸死亡率，由 1988 年的 2.25 逐渐减少至 2000 年的 1.6。

虽然道路安全问题在世界各地都有，但是只有 OECD (Organization for Economic Cooperation and Development, 经济合作与发展组织) 的成员国家可以得到较完整的统计数据。OECD 有超过 20 个成员国，每个 OECD 成员国向设在德国的国际交通与事故数据库 (International Traffic and Accident Database, IRTAD) 定

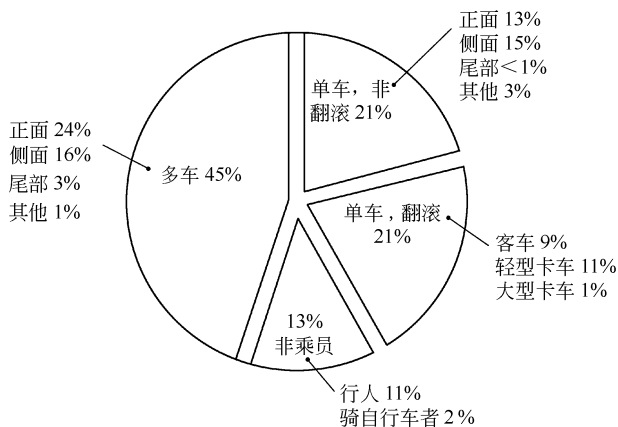
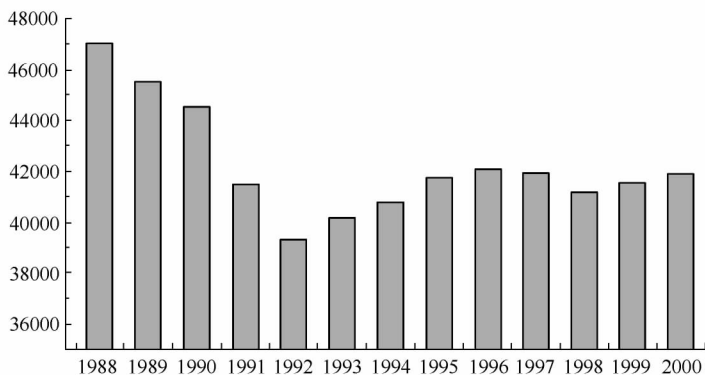
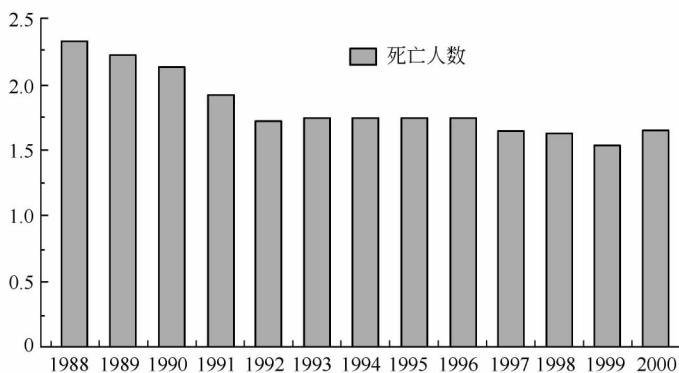


图 1.1 美国 2000 年按车祸类型统计的死亡人数百分比



(a) 每年总的死亡数



(b) 每年每 100 百万英里行车里程的死亡率

图 1.2 美国车祸死亡人数 (NCSA 的数据)

期提供道路安全统计数据。

每 10000 辆登记在册车辆引起的年死亡人数，是一种考虑了摩托化水平的用以比较道路死亡人数的数据。对于 OECD 国家，这个数字的平均数由 1975 年的 6.7 降至 1997 年的 2.0。在 OECD 国家中，1997 年这个数字的变化范围为 0.7（冰岛）~11.1（韩国）。图 1.3 为一些 OECD 国家的每 10000 辆登记在册车辆引起的年死亡人数以及 OECD 的平均数。

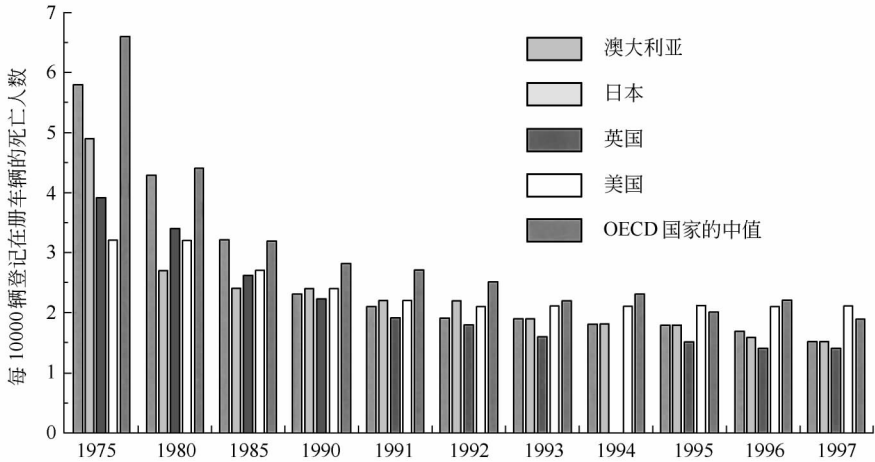


图 1.3 一些 OECD 国家每 10000 辆登记在册车辆的死亡数和 OECD 平均数的变化趋势

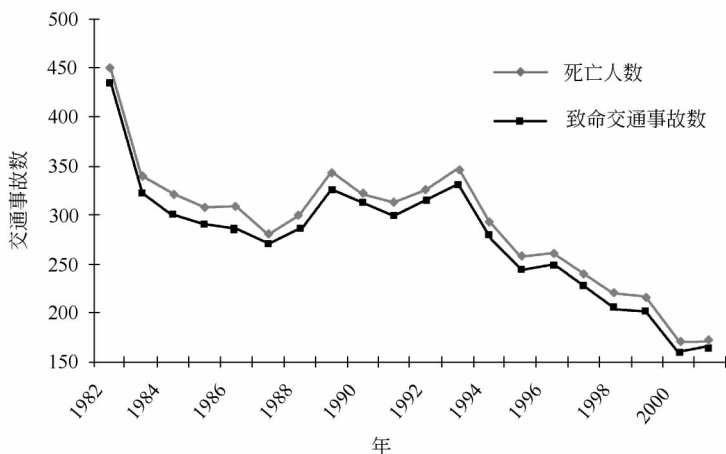
另一个有意义的数字是每十万人口的死亡数，这是一种与道路使用有关的公众安全危险的量度。这个数字的平均数在 1975 年是 18.8，到 1997 年降至 11.7。在 OECD 国家中，这个数字 1997 年的变化范围是 5.5（冰岛）~29.3（韩国）。

对于其他国家和地区，有不完整的统计数据。例如，中国报告，在 2000 年大约有 84000 人死于道路交通事故。如果和登记在册车辆数相比，这个数字是比较高的；但是如果同中国的 13 亿人口相比，就不太高了。作为中国的一个特别行政区（SAR），香港在 2000 年大约有 50 万辆登记的车辆，而每年大约有 200 人死于道路交通事故。香港的某些统计数据见图 1.4。

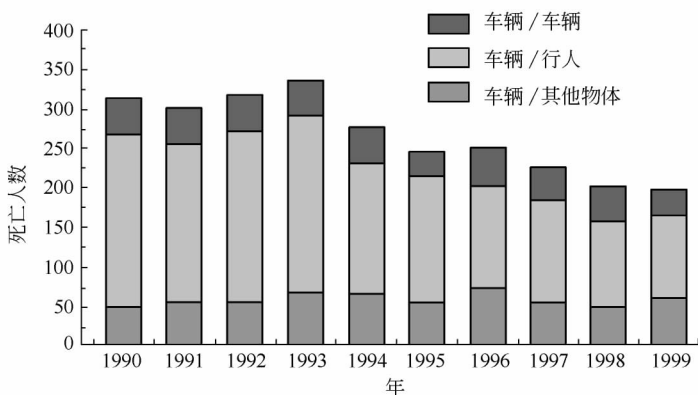
道路车祸所造成的经济损失对每个国家都是惊人的。例如，根据澳大利亚运输安全局提供的数据可知（2000 年度回顾），1996 年澳大利亚道路车祸造成的损失为（单位：澳大利亚元）：造成重伤的为 71.5 亿；造成死亡的为 29.2 亿；只有财产损失的为 24.4 亿；造成轻伤的为 24.7 亿。澳大利亚道路车祸造成的总的年度损失大约为 150 亿澳大利亚元。

1.1.2 车辆事故的后果

众所周知，就像其他碰撞事件，快速运动车辆的碰撞是在非常短的时间间隔



(a) 按年变化的致命交通事故数



(b) 死亡类型

图 1.4 香港的车祸死亡数

内发生的。首先，由于改变动量 mv 的需要，在碰撞面上出现在时间 t 内一个平均值为 F 的力。 F 与 t 成反比，即 $F = mv/t$ 。于是，时间 t 越短，力 F 就越大（碰撞过程的详细分析将在本书的第 7 章给出）。这个很大的碰撞力会引起车辆乘员巨大的加速度（实际上是减速度），特别是在他们没有被安全带约束住的头部。图 1.5 为一个典型碰撞中头部的加速度脉冲，它显示了一个高速度和短持续时间（通常是 $3 \sim 25\text{ms}$ ）的碰撞，包括快速加载和卸载的过程。

这个很大的碰撞力或者加速度对人和结构会造成严重的伤害和破坏。一般地说，车辆碰撞的后果可以概括如下（参见 Johnson, 1990）：

- 对人（或者偶然对其他活的生物体，如动物）的损伤或伤害，这是对车辆乘员和/或车辆外部的人造成的身体和/或心理的伤害和外伤；
- 结构损坏，大多数是属于车辆结构发生的未料及的塑性变形和断裂，也包

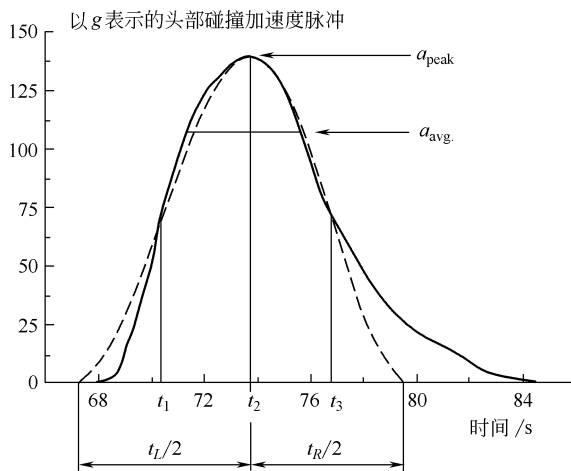


图 1.5 小汽车碰撞实验中典型的加速度脉冲
(World Scientific Publishing 惠允复制)

括由于碰撞引起火灾造成的破坏；

- 货物损坏，诸如因为货物移动引起的损坏，油箱触地导致油的溢出和泄漏；
- 对环境的破坏，如对路边物体（树、柱子、护栏等）的损坏。

关于对车辆乘员的损伤和伤害，值得注意的是，由于车辆碰撞事故中快速减速，乘员头部可能同车辆内部部件如支柱、边梁、顶棚或者风挡发生碰撞，这称为二次碰撞，也可能是非常危险的。

1.1.3 人体对碰撞的忍受度

发生下列四种情况中的一种或者多种，都可能会引起车辆乘员在车祸中受伤（参见 Carney III，1993）：

- 不可接受的强减速度；
- 乘员室被压溃；
- 同车辆内部部件发生碰撞；
- 被抛出车外。

为了评定撞车事件的严重程度，有关方面已经进行了很多损伤生物力学以及乘员危险判据的研究。在这个综合领域里，汽车制造业的研究实验室和政府交通部门资助的研究机构已经取得了许多进展。

头部/脑部损伤判据

多年以来，头部损伤都被认为是交通事故中对人体伤害最为严重的外伤类型。严重头部损伤的年度估计数字指出，在美国发生的接近 5800 起涉及轿车、小货车和小型卡车的事故中，有 67% 是严重损伤。头部和脑部受到的损伤很难医治，而

且经常导致长期身体机能障碍。由于早期死亡，或者是由于长期治疗和丧失劳动能力所带来的费用，对社会经常是巨大的损失。在美国，由于机动车事故每年大约有 135000 人因为脑部受伤而住院治疗。这些受伤住院的费用约为 3.7 亿美元（参见 Carney III，1993）。

生物力学研究揭示了人类头部（颅骨和脑）系统忍受度可以用一条曲线来评估，这条曲线最初是 Lissner 等人提出的，Patrick 等人作了修正（参见 Johnson 和 Mamalis，1978）。这条曲线被称为韦恩州立大学忍受度曲线（Wayne State Tolerance Curve，见图 1.6），广泛用于汽车安全研究。它显示引起脑震荡和颅骨破碎的头部加速度或者减速度（retardation）的水平。它是以前额与一个平整的不可压曲面碰撞时枕骨受到的平均加速度为依据的。

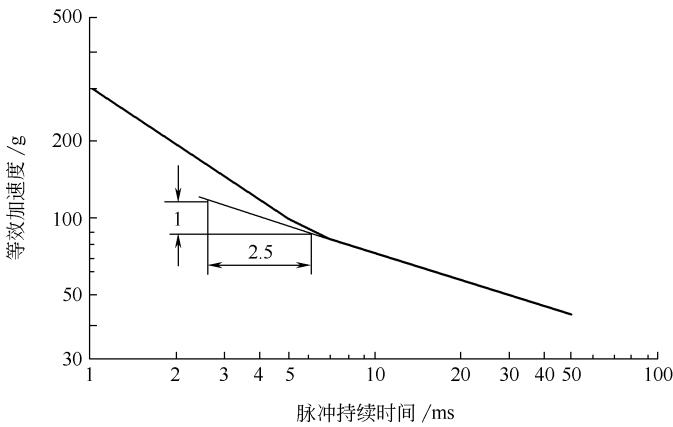


图 1.6 Wayne State（韦恩州立大学）忍受度曲线

Wayne State 忍受度曲线是损伤严重性多种指数的基础。最通用的指数是 Gadd 提出的，人体不同部位的忍受度用一个数字指标来表示。对于头部，Gadd 严重性指数（Gadd Severity Index, GSI）定义为（Perrone，1972；Johnson 等，1982）

$$GSI \equiv \int_0^T a^{2.5} dt < 1000 \tag{1.1}$$

其中， a 是加速度（或者减速度），以 g （重力加速度）为单位， t 是以毫秒为单位的时间， T 是加速度（或者减速度）脉冲的总作用时间，以毫秒为单位。正面碰撞引起颅脑严重内部损伤的阈值取为 1000。这显示正常健康的成年人可以忍受而不导致永久脑部损伤或者颅骨破碎的加速度水平。

脉冲持续时间应当取在 $0.25\text{ms} < T < 50\text{ms}$ 范围内，因为对于这个时间 T 范围内，方程（1.1）中的指数 2.5 表示了 Wayne State 忍受度曲线一个直线近似。1972 年 Gadd 提出，对于分布式的碰撞，阈值可以取在 1500 的水平上。

后来，GSI 被头部损伤判据（Head Injury Criterion, HIC）所替代，目前它被认为是最好的头部损伤指标（见 Chou 等，1988 和 Zhou 等，1998）

$$HIC \equiv \max(t_2 - t_1) \left(\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt \right)^{2.5} < 1000 \quad (1.2)$$

其中, t_1 和 t_2 分别是使得 HIC 达到最大值的脉冲初始和终止时刻, $a(t)$ 是合成加速度。现行的对 HIC 的要求是要低于 1000。如果高于这个数值, 人的头或者脑就极有可能受到不可恢复的损伤。

对于头部碰撞, 目前仍然使用 HIC 判据, 但是寻求其极大值的范围已经从整个范围变为 36ms。关于 HIC 有效性的辩论还在持续进行。有些人争辩道, HIC 并不反映被认为会引起脑损伤的转动加速度。 HIC 与颅骨破碎的关联性比较好, 而与脑损伤的关联就不那么好了。但是在车辆检验标准中仍然采用 HIC , 因为还没有其他判据能够像这样被广为接受。

至于车辆乘员与车辆内部部件的“二次碰撞”, 美国机动车安全标准强制要求车辆内部所有位置较高的部件需要作碰撞试验。这种试验中有一个 4.5kg 的混 III 假人头部模型 (Hybrid III Headform), 它处于速度为 6.7m/s 的自由飞行状态运动, 这相应于产生严重损伤的平均速度。自由飞行的假人头部 (headform) 是从第 50 个百分位的混 III 系列男性假人上取出的头部模型。这个假人及其有限元模型 (Zhou, 2001) 如图 1.7 所示。主要关心的是假想乘员与车辆内部碰撞速度的数值, 以及碰撞后乘员在 10ms 内的最大平均减速度。对于乘员碰撞速度和随后减速度, 推荐的阈值分别为 12m/s 和 20g (Carney III, 1993)。

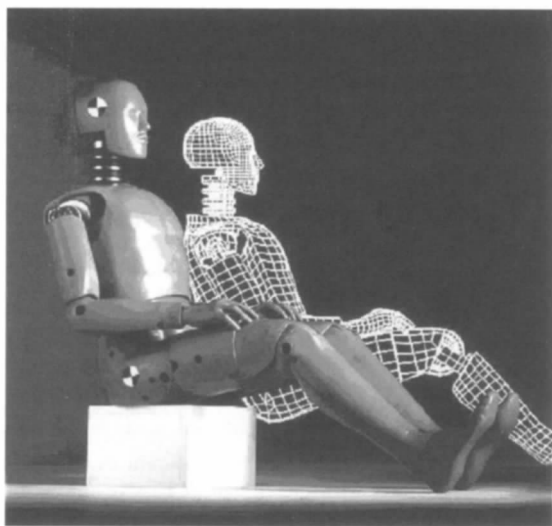


图 1.7 假人及其有限元模型 (World Scientific Publishing 惠允复制)

胸部损伤判据

对于胸部损伤, 早期忍受度的量度是根据加速度或者力, 它们仍然是有效的。