



能量吸收： 结构与材料的 力学行为和塑性分析

余同希 卢国兴 张 雄 著



科学出版社

国家科学技术著作出版基金资助出版

能量吸收：结构与材料的力学行为和塑性分析

余同希 卢国兴 张 雄 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

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。本书试图将这个领域最基本和最新的知识汇集在一起以便读者顺利地掌握基本概念,并将有关原理应用于其他工程问题。由于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、基本模型、研究方法及简单的结构元件和材料。在介绍这些内容时,重点放在阐述力学和物理行为及最常用的基本建模和分析方法上。对更为复杂的实际结构在撞击下的全面综合分析,如汽车车身和飞机机身的耐撞性分析,则超出本书的范围。

本书适合从事力学、材料、机械、土木工程、航空航天、车辆、包装等相关学科研究和设计的科技工作者、工程师、研究生及高年级本科生使用。

图书在版编目(CIP)数据

能量吸收:结构与材料的力学行为和塑性分析/余同希,卢国兴,张雄著. —北京:科学出版社,2019.10

ISBN 978-7-03-062360-7

I. ①能… II. ①余… ②卢… ③张… III. ①结构力学—塑性分析 IV. ①O342

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 207212 号

责任编辑:孙寓明 李建峰/责任校对:高 嵘 刘 畅

责任印制:彭 超/封面设计:苏 波

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

武汉中远印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

开本:787×1092 1/16

2019 年 10 月第 一 版 印张:23 1/4

2019 年 10 月第一次印刷 字数:599 000

定价:218.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

经典的固体力学主要研究材料和结构在各种载荷条件下的应力、应变、变形、刚度、强度、韧性、稳定性和耐久性等；随着各类运载工具（如汽车、高速列车、舰船、飞行器、航天器等）的迅速发展，以及在特殊条件下工作的材料与结构（如核电站和海洋结构）的安全需求，科学家和工程师必须考虑结构与材料在静载荷及冲击载荷作用下的能量吸收行为。例如，对能量吸收装置的设计和材料的选择，对结构受到意外撞击时的损伤和耐撞性的评估，以及减轻冲击损坏的包装设计，都需要懂得能量吸收性能的知识和分析方法。对能量吸收性能的研究，要求具有材料工程、结构力学、塑性理论和冲击动力学等诸多领域的知识。在过去的几十年里，人们对这一领域的兴趣急剧增强，发表了大量研究结果；但有关文献相当分散，这对希望将相关原理和分析方法应用于实际问题的工程师，以及初次接触相关概念的研究者，都造成了很大的困难。本书旨在将这个领域的知识汇集在一起系统地整理和阐述。

本书作者着力整理了近年来世界各国学者在这一领域内的丰硕研究成果，并增加了在汽车设计、飞机机身设计和桥梁防护等方面的几个工程应用实例。本书定位于应用科学基础研究，同时，本书所传播的知识同高性能新材料的开发（如用于飞行器、航天器和着陆装置的高比吸能材料）及节能环保（支撑汽车轻量化及减轻环境灾害）有着密切的联系，并有直接的应用。

鉴于实际应用中的结构和材料门类繁多，难以囊括铺陈，本书将着眼于基本概念、基本原理和塑性力学分析方法，并以常用的工程材料和简单的结构元件为例来阐述能量吸收行为的特征。本书将重点放在力学行为和分析方法上，而更为实际的、复杂系统的全面综合分析，如汽车和飞机的耐撞性分析、人体在冲击载荷下的损伤等，则超出了本书的范围。本书虽然对一些问题给出了应用有关软件的计算结果，但没有将有限元商用软件的使用包括在内。

本书第 1 章扼要地介绍研究结构和材料能量吸收行为的工程背景，阐明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 章介绍力学建模和理论分析的基本原理与方法。围绕能量吸收行为，第 3 章讨论量纲分析和小尺度模型试验的相关概念，同时介绍常规试验方法。

第 4~6 章应用第 2~3 章中介绍的基本原理，考察某些简单构件在不同加载条件下的能量吸收性能。这些结构包括圆环、圆环系统、薄壁管件和夹层结构，所有这些结构都容许经历塑性大变形，从而在变形过程中耗散掉外载做功所输入的能量。加载条件包括拉伸、压缩（轴向或横向）及压入等。这些简单构件也是工程中应用最广泛的能量吸收元件。

与第 4~6 章中研究的准静态加载下的简单构件不同，承受撞击的结构会呈现更为多样化的行为。第 7 章阐述碰撞条件下局部变形的特征和建模，惯性敏感结构的分析，以及运动的结构物对固壁的撞击。第 8 章研究伴有撕裂的塑性变形问题。这类问题也十分复杂，因为撕裂能量的量值很难确定，它随不同情况而变化，在较远区域，撕裂和弯曲/拉伸之间可能有交互作

用。此外，金属结构和材料在能量吸收过程中容易发生韧性断裂，第 8 章也将对这一问题进行相关介绍。

第 9 章介绍五个特殊问题的塑性大变形分析，包括管件翻转、管件的鼻状成型、圆管的胀管、球壳的翻转及深海管道屈曲的传播。这些例子展现出稳态塑性变形模式和塑性变形传播的若干特点。

第 4~9 章讨论的都是金属结构，而第 10 章研究三类多孔材料的能量吸收性能，它们是蜂窝材料、泡沫材料（包括金属泡沫）、木材，相关的分析会运用第 2 章介绍的方法，在微结构层面对典型胞元进行塑性分析，然后将胞元的力学行为集结成多孔材料的整体响应。第 11 章对复合材料及其结构的能量吸收行为作概括，讨论复合材料管件、复合材料夹层板，以及纤维金属层合板和多孔纺织复合材料，详细描述它们的能量吸收机理，并与相应的金属结构进行比较，同时也会对解析方法得到的结果作介绍。

第 12 章包含五个工程实例研究：岩石滚落防护网，利用泡沫材料的包装设计，吸收行人头部撞击能量的汽车发动机罩盖设计，保护桥墩的柔性防撞装置，以及飞机结构适坠性分析和改进飞机底舱的能量吸收能力。通过这些代表性实例来说明前面各章阐述的原理和方法的工程应用。

由于作者水平有限，书中疏漏之处在所难免，敬请各位读者指正！

余同希 (T.X.Yu)、卢国兴 (G.Lu)、张雄 (X.Zhang)

中国香港

澳大利亚墨尔本

中国武汉

2019 年 6 月

目 录

1 绪论	1
1.1 车辆事故及其后果	2
1.1.1 车辆事故统计	2
1.1.2 车辆事故的后果	5
1.1.3 人体对碰撞的忍受度	6
1.2 能量吸收结构(材料)的应用	9
1.2.1 能量吸收结构用于改进车辆的耐撞性	9
1.2.2 能量吸收结构用于高速公路的安全防护	10
1.2.3 能量吸收结构用于工业事故的防护	11
1.2.4 能量吸收结构用于个人安全防护	12
1.2.5 能量吸收结构/材料用于包装	13
1.3 设计能量吸收结构和选择能量吸收材料	13
1.3.1 能量吸收结构的一般特点	13
1.3.2 一般原理	14
2 能量吸收能力的分析方法	19
2.1 材料行为的理想化	20
2.1.1 材料拉伸的力学性质	20
2.1.2 理想化的材料模型	20
2.1.3 塑性梁的弯矩-曲率关系	22
2.1.4 塑性铰和铰线	23
2.1.5 材料理想化的力学模型	24
2.1.6 刚塑性理想化的适用性	25
2.2 极限分析和界限定理	26
2.2.1 理想塑性结构的极限状态	26
2.2.2 弯曲和拉伸作用下的梁	27
2.2.3 静力许可应力场和下界定理	29
2.2.4 运动许可速度/位移场和上界定理	30
2.3 大变形效应	32
2.3.1 背景	32
2.3.2 实例分析	32
2.3.3 大变形的各种效应	34
2.4 动载荷效应	35
2.4.1 应力波的传播及其对能量吸收的影响	35

2.4.2	惯性及其对能量吸收的影响	38
2.4.3	应变率及其对能量吸收的影响	41
2.5	能量法	43
2.5.1	能量法用于确定初始坍塌载荷和坍塌机构	43
2.5.2	能量法用于大变形	45
2.5.3	能量法用于动态变形情况	47
3	量纲分析和试验技术	49
3.1	量纲分析	50
3.1.1	物理变量、基本变量和量纲齐次性	50
3.1.2	量纲分析法	50
3.2	小尺度结构模型	54
3.2.1	相似性要求	54
3.2.2	精确转换数量上的困难	56
3.3	试验技术	57
3.3.1	万能试验机	57
3.3.2	落锤、滑轨和摆锤	58
3.3.3	分离式霍普金森压杆	60
3.3.4	气炮和其他技术	62
4	圆环和圆环系统	63
4.1	一对集中力作用下的受压圆环	64
4.2	一对集中力作用下的受拉圆环	65
4.3	集中力作用下的固支半圆拱	68
4.3.1	受向外载荷作用的半圆拱	68
4.3.2	受向内载荷作用的半圆拱	70
4.4	两平板对压下的圆环	71
4.5	横向受约束的圆管	73
4.6	端部受撞击的一维圆环系统	77
4.7	圆管阵列的横向压溃	80
4.8	其他圆环/圆管系统	82
4.9	进一步讨论	82
5	横向载荷作用下的薄壁构件和夹层梁	85
5.1	集中力作用下的圆管	86
5.2	钝楔对圆管的压入	88
5.3	薄壁构件的弯曲破坏	91
5.3.1	正方形和矩形截面	91
5.3.2	圆管截面	96
5.3.3	槽形截面的弯曲坍塌	97
5.3.4	角形截面梁的弯曲	102

5.4	泡沫充填管的弯曲	104
5.5	夹层梁和夹层板的弯曲吸能	107
5.5.1	传统蜂窝和泡沫铝芯层夹层板的能量吸收	108
5.5.2	折纸结构作为芯层的夹层板	111
5.6	其他加载系统与评论	113
6	轴向压溃的薄壁构件	115
6.1	圆管	116
6.1.1	轴向压溃模式和典型的力-位移曲线	116
6.1.2	理论模型	117
6.2	方管	122
6.2.1	轴向压溃模式和典型的力-位移曲线	122
6.2.2	压溃机构的理想化	124
6.2.3	塑性区的详细分析	124
6.2.4	与试验比较	129
6.2.5	动态效应	130
6.3	帽形和双帽形截面	130
6.4	多胞薄壁构件	132
6.4.1	角形单元	135
6.4.2	三板角单元	136
6.4.3	其他单元与讨论	139
6.5	泡沫充填效应	140
6.6	内压效应	143
6.7	管件在轴向压缩下的能量吸收评价指标体系	147
6.7.1	评价指标体系的建立	147
6.7.2	应用这一指标体系评价管件的能量吸收性能	149
6.8	进一步讨论	152
7	结构碰撞与惯性敏感性	155
7.1	碰撞引起的动量交换和局部变形	156
7.1.1	两个物体正碰撞的动力学	156
7.1.2	接触力引起的压陷	160
7.1.3	结构在碰撞下的动态局部变形	168
7.2	惯性敏感能量吸收结构	171
7.2.1	两类能量吸收结构	171
7.2.2	折板的静力行为	173
7.2.3	折板的动力行为	174
7.2.4	进一步讨论	179
7.3	运动的结构物对固壁的撞击	180
7.3.1	研究背景	180

7.3.2	圆环对固壁的撞击和反弹—数值模拟	180
7.3.3	圆环对固壁的撞击和反弹—试验验证	184
7.3.4	薄壁球对固壁的撞击和反弹	186
7.3.5	双质量弹性系统对固壁的撞击和回弹	190
8	伴随有韧性撕裂的塑性变形	193
8.1	撕裂能量的测量	194
8.1.1	面内撕裂	194
8.1.2	面外撕裂	195
8.1.3	正方形金属管开裂时的撕裂能量	196
8.1.4	关于撕裂能量数值的评论	197
8.2	金属圆管的轴向劈裂	198
8.2.1	Huang 等的理论分析	200
8.2.2	利用圆锥形模具使圆管劈裂	202
8.3	正方形金属管的轴向劈裂	203
8.4	金属管的刺穿	206
8.4.1	试验	206
8.4.2	理论分析	208
8.5	尖楔切割金属板	209
8.6	金属的韧性断裂	212
8.6.1	等效断裂应变的影响因素	213
8.6.2	几个重要的断裂模型	214
8.6.3	加载历史的影响	216
8.7	进一步讨论	217
9	圆柱壳和球壳	219
9.1	圆管翻转	220
9.2	管件向内的鼻状成型	225
9.3	圆管的胀管	227
9.4	球壳的翻转	231
9.5	海底管道塌陷的传播	233
9.5.1	圆环模型	234
9.5.2	塑性地基上的塑性梁模型	235
9.6	进一步讨论	237
10	多胞材料	239
10.1	蜂窝材料	240
10.1.1	胞元结构、相对密度、应力—应变曲线和压实应变	240
10.1.2	面内加载下的平台应力	243
10.1.3	面外加载	246
10.2	泡沫材料	246

10.2.1	胞元结构、相对密度、应力-应变曲线和压实应变	246
10.2.2	金属泡沫材料的平台应力	248
10.2.3	金属泡沫材料的能量吸收性能	250
10.2.4	金属泡沫材料的本构关系	251
10.3	木材	254
10.4	多胞材料对撞击的响应	256
10.4.1	理想刚塑性冲击波理论	256
10.4.2	一维质量-弹簧模型	258
10.4.3	蜂窝材料的动力压溃—有限元模拟	261
10.4.4	蜂窝材料的动力压溃—基于代表性单元变形历史的理论模型	265
10.4.5	应变率效应	269
10.4.6	进一步讨论	269
11	复合材料和复合材料结构	271
11.1	影响能量吸收特性的因素	272
11.2	圆管的轴向压溃	272
11.2.1	能量耗散机理和特性	272
11.2.2	纤维层方位的影响	279
11.2.3	直径与壁厚比 (D/h) 的影响	280
11.3	其他几何形状管件的轴向压溃	280
11.4	管件弯曲	282
11.5	关于复合材料管件压溃的评论	283
11.6	复合材料包裹的金属管件的轴向压溃	284
11.7	复合材料夹层板	286
11.7.1	复合材料表层的贯入能量	286
11.7.2	复合材料夹层板	289
11.8	纤维金属层合板	292
11.8.1	低速冲击响应	294
11.8.2	高速冲击响应	297
11.9	多胞纺织复合材料	298
11.9.1	背景	298
11.9.2	穹顶阵列纺织复合材料的两种构形研究	298
11.9.3	胞元几何形状和胞元分布对能量吸收能力的影响	300
11.9.4	轴向压缩下平顶圆锥壳的理论模型	300
11.9.5	细观失效机理	302
11.9.6	进一步讨论	303
12	工程实例	305
12.1	岩石滚落防护网	306
12.1.1	岩石滚落及其防护	306

12.1.2	防护网的能量吸收能力	306
12.1.3	拉伸变形	308
12.1.4	作用力的数值	309
12.1.5	数值实例	309
12.1.6	与圆环沿直径方向拉伸的比较	310
12.2	利用塑料泡沫材料进行包装	310
12.2.1	脆性物品运输过程中的防护	310
12.2.2	基于缓冲曲线的包装设计	311
12.2.3	如何由泡沫材料的应力-应变曲线构造缓冲曲线	313
12.2.4	讨论	314
12.2.5	数值实例	314
12.3	吸收行人头部撞击能量的汽车发动机罩盖设计	315
12.3.1	人车碰撞事故与行人头部伤害	315
12.3.2	汽车发动机罩盖与行人头部碰撞保护	316
12.3.3	头部冲击器撞击发动机罩盖的多峰波形特征	317
12.3.4	基于 HIC 的最优碰撞波形	319
12.3.5	工程实例: 具有夹层板结构的发动机罩盖设计	320
12.4	保护桥墩的柔性防撞装置	321
12.4.1	柔性防撞装置的设计理念和典型结构	321
12.4.2	柔性防撞装置的工作原理	322
12.4.3	柔性抗船撞装置设计和研究中的主要科学技术问题	322
12.4.4	简化理论模型及其分析	323
12.4.5	设计和试验	324
12.5	飞机结构适坠性及能量吸收分析实例	325
12.5.1	机身框段坠撞分析	325
12.5.2	不同撞击速度下机身框段的响应分析	328
参考文献		331
符号表		355
名词术语表		358
后记		362

1 绪 论

本章从车辆耐撞性到人体防护，回顾对能量吸收结构和材料研究的工程背景，讨论以能量吸收为目的的结构设计和材料选择的一般原理。

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,根据国家统计局与分析中心(National Center for Statistics and Analysis, NCSA)的数据,2015 年登记在册的车辆达 281 312 446 辆(较 2000 年增加 30%),而车辆行驶英里数(vehicle miles traveled, VMT)约为 $3\,095\,373 \times 10^6 \text{ mi}^{①}$ (较 2000 年增加 13%),美国 2015 年的人口约为 321 418 820,上述数字表明平均每 8 个人拥有 7 辆车,每辆车每年平均行驶约 11 000 mi。

技术进步不仅使运载器的数目和行驶里程不断增加,而且使其向更高速度和更大规模的方向(如大型卡车和飞机)发展。运载器本身就是昂贵的结构,一旦发生交通事故,不仅损坏运载器本身,对人体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引起的死亡人数都要多。在美国,与交通运输有关的各种死亡中,公路交通相关的占 95%以上,而火车和飞机各只占约 2%。

根据 NCSA 发表的交通安全情况表(traffic safety fact sheets),2015 年美国约有 6 296 000 起警察报告的交通碰撞事故,其中 35 092 人死亡,约 2 443 000 人受伤。在这些事故中,有 32 166 起是致命的,另外有 4 548 000 起仅引起财产损失。在 2015 年车祸死亡的 35 092 人中,有 22 442 人是机动车驾驶人员,6 229 人是乘员,6 421 人是非乘员(行人或骑自行车者)。图 1.1 为美国 2015 年不同类型车祸的死亡人数百分比。

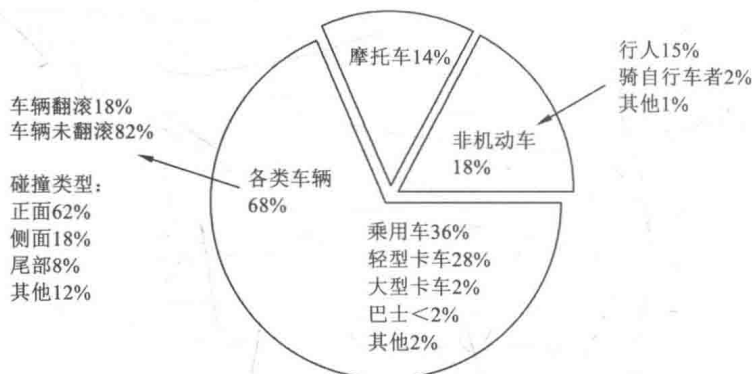


图 1.1 美国 2015 年不同类型车祸死亡人数百分比

图 1.2 (a) 和 (b) 为 2000~2015 年美国总的车祸死亡人数和每 1 亿 mi 行车的里程的车祸死亡率的变化趋势。从图 1.2 (b) 中可以看出,每 1 亿 mi VMT 的车祸死亡率,由 2000 年的 1.53 逐渐减少至 2015 年的 1.13。

① 1 mi=1 英里=1.609 344 km

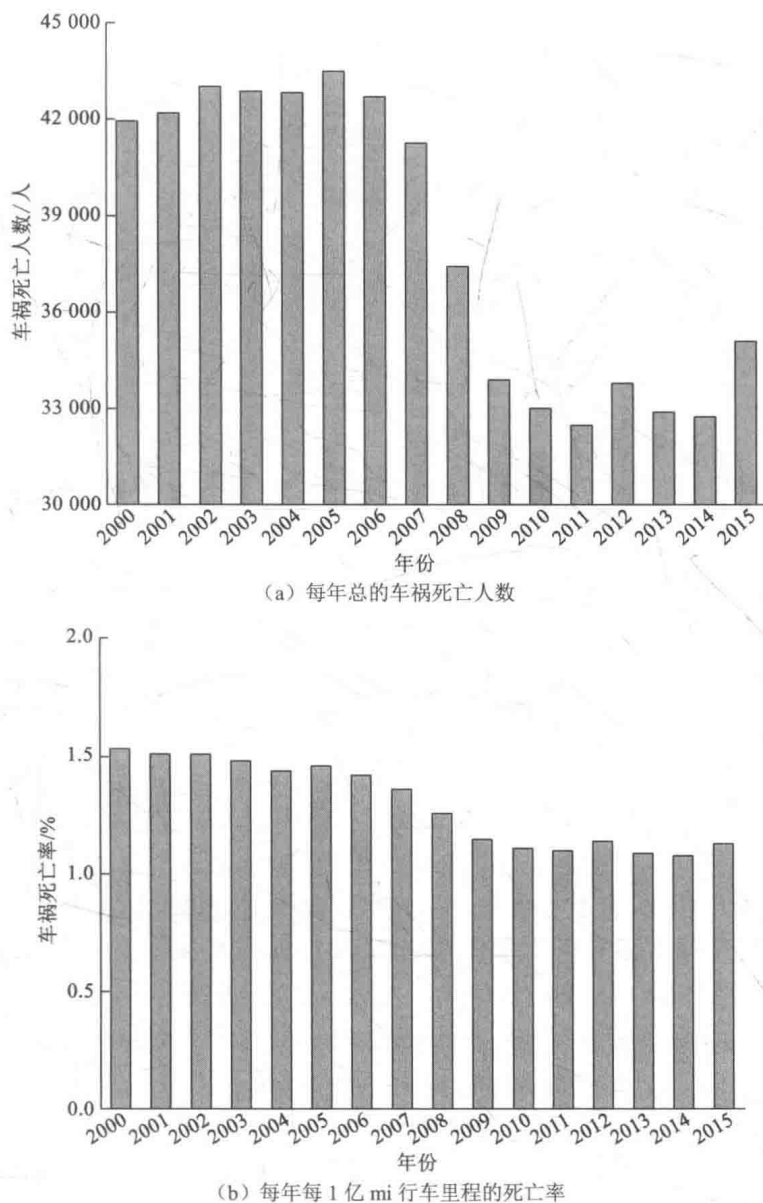


图 1.2 2000~2015 年美国车祸死亡人数及车祸死亡率 (NCSA 的数据)

虽然道路安全问题在世界各地都有,但是只有经济合作与发展组织 (Organization for Economic Cooperation and Development, OECD) 的成员国家可以得到较完整的统计数据。OECD 有超过 30 个成员国,每个成员国向设在德国的国际道路交通与事故数据库 (International Road Traffic and Accident Database, IRTAD) 定期提供道路安全统计数据。

每 10 000 辆登记在册车辆引起的年死亡人数 (万车死亡率),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 1990 年的 6.1 降至 2000 年的 2.9,而 2015 年降至 1.1。在 OECD 国家中,2015 年这个数字的变化范围为 0.3 (挪威)~4.6 (智利)。图 1.3 为一些 OECD 国家的每 10 000 辆登记在册车辆引起的年死亡人数及 OECD 国家的中值。

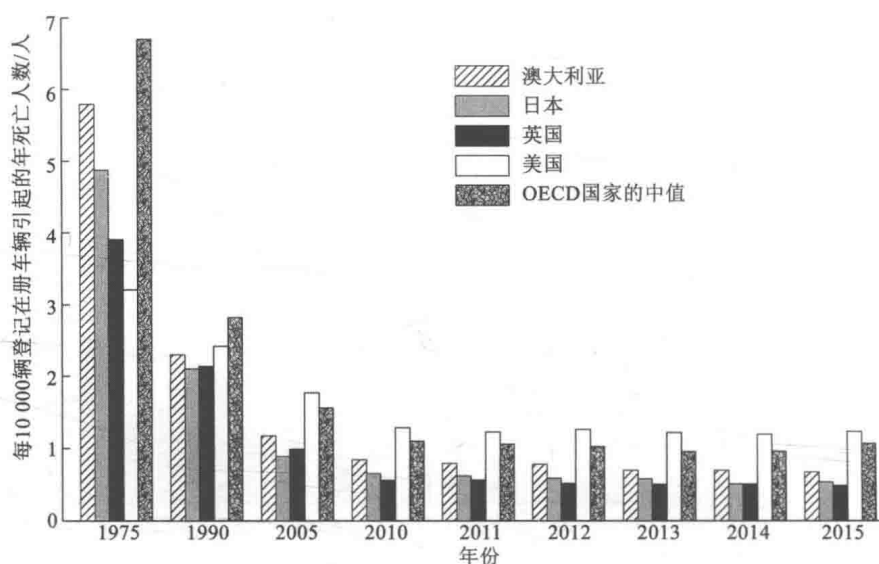
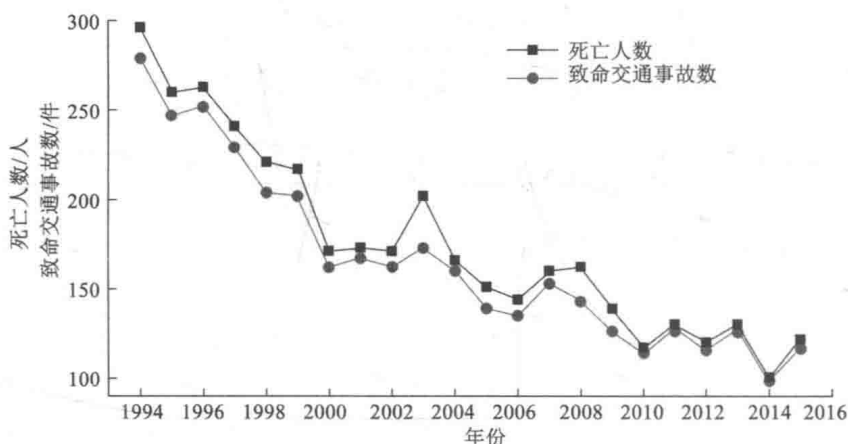


图 1.3 一些 OECD 国家每 10 000 辆登记在册车辆引起的年死亡数和 OECD 国家中值的变化趋势

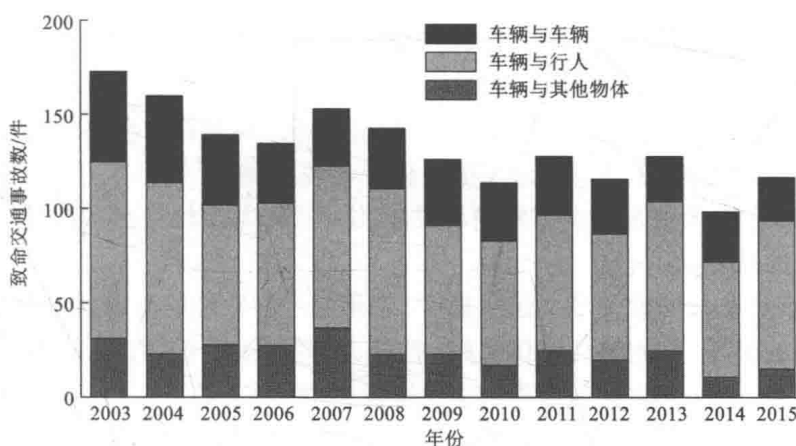
另一个有意义的数字是每 10 万人口的死亡数，这是一种与道路使用者有关的公众安全危险的量度。这个数字的平均数在 1990 年为 17.1，2000 年降至 12.4，到 2015 年降至 5.8。在 OECD 国家中，这个数字 2015 年的变化范围是 2.3（挪威）~13.3（墨西哥）。

对于其他国家和地区，有不完整的统计数据。按照中国国家统计局公布的数据，在 2015 年有 58 022 人死于道路交通事故。和登记在册的车辆数相比，这个数字看起来比较高；但是如果同中国的 13 亿人口相比，就不太高了。另外，根据世界卫生组织（World Health Organization, WHO）2015 年的“全球道路安全状况报告”（*Global Status Report on Road Safety*），中国每 10 万人口的道路事故死亡率约为 18.8，仍远高于发达国家，如美国（10.6）、日本（4.7）、德国（4.3）和英国（2.9）。作为我国的特别行政区（special administrative region, SAR），在 2015 年 730 万人口的香港大约有 71 万辆登记的车辆，而当年有 117 人死于道路交通事故，每 10 万人口的道路事故死亡率仅为 1.6，香港的部分统计数据见图 1.4。



(a) 1994~2016 年的死亡人数和致命交通事故数

图 1.4 香港的车祸死亡数及造成死亡的车祸类型



(b) 造成死亡的车祸类型

图 1.4 香港的车祸死亡数及造成死亡的车祸类型 (续)

道路车祸所造成的经济损失对每个国家来说都是惊人的。例如，根据澳大利亚道路运输和交通部门的数据，2016 年澳大利亚道路车祸造成的经济损失（单位为澳元）：造成重伤的约为 127.1 亿，造成死亡的约为 102 亿，造成轻伤的约为 8.7 亿，财产及其他损失约为 93.8 亿。加在一起，澳大利亚道路车祸造成总的年度损失大约为 331.6 亿澳元。

1.1.2 车辆事故的后果

众所周知，与其他碰撞事件一样，快速运动的车辆和运载器的碰撞是在非常短的时间间隔内发生的。首先，由于改变动量 mv 的需要，在碰撞面上出现一个在时间 t 内平均值为 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见第 7 章）。这个很大的碰撞力会引起车辆及乘员的巨大加速度（实际上是减速度），特别是乘员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（又称加速度波形或碰撞波形），它显示了一个高速度和短持续时间（通常为 3~25 ms）的碰撞，以及快速加载和卸载的过程。

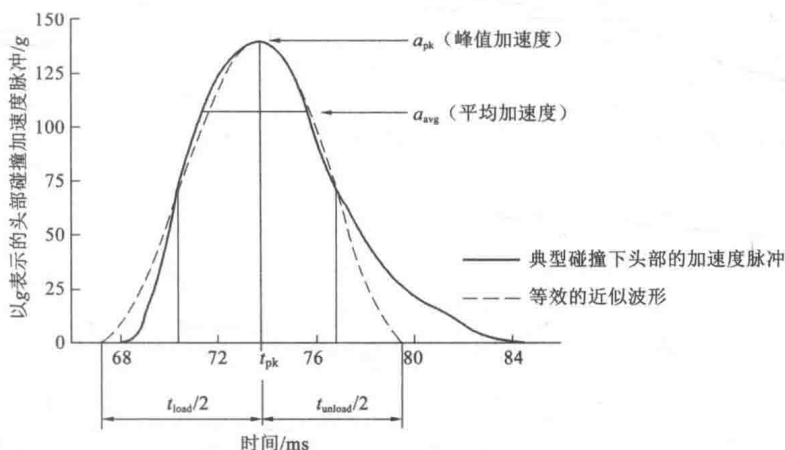


图 1.5 小汽车碰撞试验中典型的加速度脉冲 (Zhou, 2001)

图中 t_{load} 、 t_{unload} 分别为峰值左边的加载时间和右边的卸载时间； t_{pk} 为峰值时间

这个很大的碰撞力或者加速度会对人体和结构造成严重的伤害和破坏。一般来说, 车辆碰撞的后果可以概括如下 (Johnson, 1990):

(1) 对人 (或者偶然对其他生物体, 如动物) 的损伤, 这是指对车辆乘员和 (或) 车辆外部的人 (如行人、骑自行车的人等) 造成的身体或心理的伤害;

(2) 结构损坏, 大多数是属于车辆结构发生的未预料的塑性变形和断裂, 也包括由碰撞引起火灾而造成的破坏;

(3) 货物损坏, 如由货物移动引起的损坏, 油箱触地导致油的溢出和泄漏;

(4) 对环境的破坏, 如对路边物体 (树、柱子、护栏等) 的损坏。

值得注意的是, 由于车辆在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, 称为二次碰撞, 也是非常危险的。

1.1.3 人体对碰撞的忍受度

以车辆乘员为例, 发生下列四种情况中的一种或多种, 都可能会使人体在车祸中受伤 (Carney III, 1993):

(1) 不可接受的强减速度;

(2) 乘员室被压溃;

(3) 同车辆内部部件发生碰撞;

(4) 被抛出车外。

为了评定车辆事故中人体损伤的严重程度, 汽车制造业的研究实验室和一些国家政府交通部门资助的研究机构等进行了很多损伤生物力学研究, 并在这个综合领域里取得了许多进展, 为乘员及行人的危险程度提供了损伤判据 (injury indicator)。损伤判据主要根据人体各部位的结构特点和加速度、力等指标计算得出, 从而度量人体对碰撞载荷的承受情况和损伤风险 (Gurdjian et al., 1953)。随着试验测量水平和数值模型等分析工具的不断完善, 相关研究也提出了基于应力、应变分布的损伤判据, 考察人体组织在局部的受力和变形情况, 从而判断损伤水平 (Yang et al, 2006; Löwenhielm, 1974)。下面将分别以颅脑及胸部为例进行说明。

1.1.3.1 颅脑损伤判据

颅脑损伤是交通事故中直接导致人员死亡的最主要的外伤类型, 通常发生在车辆事故中乘员头部与内饰碰撞, 或者在车辆与行人碰撞事故中行人头部与车辆前部碰撞。对严重头部损伤的年度估计数字分析指出, 在美国发生的约 5 800 起涉及轿车、小货车和小型卡车的事 故中, 有 67% 是严重损伤。颅脑损伤的治疗较为复杂和耗时, 甚至会导致长期身体机能障碍和劳动能力丧失, 造成巨大的社会和经济损失。在美国, 由于机动车事故, 每年约有 135 000 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 (Carney III, 1993)。

颅骨骨折是交通事故中最常见的颅脑损伤类型之一。以颅骨骨折为例, 生物力学研究揭示人类颅骨对加速度脉冲的忍受度可以用一条曲线来表示, 这条曲线最初是由 Lissner 等提出的, Patrick 等做了修正 (Johnson et al., 1978)。这条曲线被称为韦恩州立大学忍受度曲线 (Wayne State University tolerance curve, 图 1.6), 广泛用于汽车安全研究。它以前额与一个平整的不可