



汽车碰撞的 安全与吸能

The Safety and Energy Absorption of Vehicle Collision

雷正保 王素娟 付爱军 林骥/ 著



国防科技大学出版社

**The Safety and Energy
Absorption of Vehicle Collision**

内 容 简 介

围绕汽车碰撞的安全性设计,从工程应用的角度出发,针对汽车正面碰撞、侧面碰撞、后部碰撞、油箱碰撞安全性及汽车翻滚碰撞安全性各自的特点与要求,结合在汽车制造企业的实际应用例子,系统论述了国家 863 计划项目“汽车碰撞吸能系统智能化概念技术”(课题编号:2006AA11Z224)等 6 项课题的相关研究成果,以作者发明的螺旋剪切式汽车碰撞吸能机理为核心,以汽车碰撞吸能能力的智能化研究为主题,以汽车碰撞安全性设计方法为重点,以客车翻滚安全性研究为特色,以汽车碰撞的 CAE 技术为手段,形成了一套汽车碰撞的安全与吸能新技术,共包括七个方面的内容:汽车碰撞研究的历史进程;汽车碰撞分析的 CAE 方法;汽车碰撞的结构设计方法;汽车碰撞的安全性分析;汽车的翻滚安全性分析;螺旋剪切式汽车碰撞吸能原理;螺旋剪切吸能系统的自适应控制技术。

本书适合高校车辆工程及载运工具运用工程专业师生、汽车碰撞安全技术专家与发明爱好者、汽车制造企业、LS-DYNA、etc/VFC 软件用户与爱好者等科技和工程技术人员、教师参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

汽车碰撞的安全与吸能/雷正保,王素娟,付爱军,林骥著. —长沙:国防科技大学出版社,2008.9

ISBN 978-7-81099-549-8

I. 汽… II. ①雷…②王…③付…④林… III. 汽车实验:碰撞试验 IV. U467.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 108874 号

国防科技大学出版社出版发行

电话:(0731)4572640 邮政编码:410073

<http://www.gfkdcbs.com>

责任编辑:文 慧 责任校对:唐卫藏

新华书店总店北京发行所经销

国防科技大学印刷厂印装

开本:787×1092 1/16 印张:14.5 字数:344 千

2008 年 9 月第 1 版第 1 次印刷 印数:1-1000 册

ISBN 978-7-81099-549-8

定价:28.00 元

前 言

汽车的安全性、乘坐舒适性及百公里油耗(以下简称三大指标)是世界汽车市场竞争的焦点。如何在法规限定的长、宽、高尺寸范围内,设计出结构强度高、碰撞安全性能好、乘坐空间大、质量轻的汽车,一直是全球各大汽车公司竞相投入开发并力求获得优势的焦点。目前,计算机辅助设计(CAD)和数值仿真(CAE)技术已被广泛运用到汽车设计中,设计师可根据经验首先确定汽车的总体结构,明确碰撞吸能结构,估算所需的吸能区长度,并对乘坐区域进行初步布置;由此创建 CAD 模型并生成有限元网格,计算出静、动态响应及碰撞安全性等;然后根据仿真结果修改设计;最后用实车进行必要的试验验证。目前几乎所有大中型汽车制造公司均不同程度地采用了这种设计方法。显然,这种方法设计的成败在很大程度上取决于设计师的经验。

事实上,汽车的三大指标是相互矛盾的。在相同的设计理念下,提高汽车的碰撞安全性,就意味着需要增加吸能区长度,此时,若要保持汽车整车长度不变,就必然要减少乘坐空间,降低乘坐舒适性(这些汽车上,乘客腿部的伸展空间会很小);若要保持乘坐空间不变,就需要增加整车长度,一方面,整车长度受法规限制,另一方面,整车长度的增加,就意味着汽车质量的增加,直接导致百公里油耗增加。

可见,现有设计方法,不能从根本上解决三大指标之间的矛盾,只能在三大指标之间寻找某种折中。

国家 863 计划项目“汽车碰撞吸能系统智能化概念技术”,应用螺纹剪切破坏机理来吸能,应用螺旋传动的运动特性来借用车外空间并根据车速自动调整吸能能力,为彻底解决三大指标之间的矛盾奠定了新的技术基础。

事实上,自 1886 年汽车诞生以来,汽车的安全技术已经经历了两次大的飞跃并正在酝酿第三次飞跃:

汽车安全技术的第一次飞跃大约发生在 1924 至 1975 年间,从汽车翻滚和固定壁碰撞试验,到驾驶员室安全气囊大批投入市场的整个期间,其特点是试验,并根据试验结果开发安全带、安全气囊及缓冲吸能结构等安全设施。

汽车安全技术的第二次飞跃大约发生在 1976 至 2005 年间,从动态显式有限元程序 DYNA3D 正式发布,到 NCAP 得到广泛推广的整个期间,其特点是借助数值分析方法,可以在样车生产之前就能对其安全性能进行评估与优化,同时,对汽车的安全性能采用了星级评估方法,实际上是提高了汽车安全水平的认证门槛值。

前两次飞跃,不能彻底解决三大指标间的矛盾。能够彻底解决三大指标之间矛盾的新技术将引领汽车安全技术的第三次飞跃。

正是在这种历史背景下,螺纹剪切式汽车碰撞吸能技术应运而生,它利用螺纹的剪切破坏力基本为常数的特征,在冲击载荷下,确保了系统具有稳定的破坏模式、均匀的压缩

载荷、能够可控制地吸收撞击能量。在非碰撞时,利用螺旋传动的运动特性,可实现吸能力随车速的自动调整,且通过借用车外空间,保证了汽车的轻量化。

可以预见,随着人们对车—车碰撞相容性、汽车—护栏碰撞相容性等汽车碰撞安全性要求的提高,螺纹剪切式汽车碰撞吸能技术的市场应用前景将更加广阔。

为此,本书在对汽车碰撞的结构设计方法与 CAE 分析技术进行系统论述的基础上,将重点阐述螺纹剪切式汽车碰撞吸能系统的结构特点、工作原理及自适应控制。

本书包括了国家 863 计划项目“汽车碰撞吸能系统智能化概念技术”(编号:2006AA11Z224)、教育部重点项目(编号:205108)及湖南省教育厅重点项目(编号:04A001)“新型汽车碰撞能量吸收装置研究”、湖南省科技计划项目“碰撞的三维再现分析系统”(编号:06CK3036)、长沙市科技局项目“道路交通事故快速三维再现系统”(编号:KO69030-12)、柳州五菱汽车工业有限公司委托项目“V2 车身上部结构强度 CAE 分析”的相关研究成果。本书是作者们长期合作开展汽车安全技术研究的产物,长沙理工大学“道路灾变防治与交通安全教育部工程研究中心”的雷正保教授是这些项目的主要负责人与主持人,长沙理工大学汽车与机械工程学院的王素娟、柳州五菱汽车工业有限公司的付爱军、上汽通用五菱汽车股份有限公司的林骥是这些项目最重要的研究者,除本书作者外,参加这些项目研究的还有:长沙理工大学科技处的熊建军副处长以及罗义、龙建强、唐波、杨兆、颜海棋、刘兰、彭威、李扬、朱海文、彭作、唐宁、李素霞、李静、杜青云、李自菊、鄢一夫、赵建等长沙理工大学汽车与机械工程学院的研究生。

本书的 CAE 分析主要由 LS-DYNA 与 eta/VPG 完成。本书的撰写得到了柳州五菱汽车工业有限公司的张正湘总工程师、湖南长丰汽车研发股份有限公司贺四清副总经理、北汽福田汽车股份有限公司长沙汽车厂的廖洪波副总工程师、陈志部长等许多朋友的大力支持与帮助,在此,作者对曾经支持、帮助和关心过本书出版的各位同行、LS-DYNA 和 eta/VPG 供应商、参考文献作者、审稿者和出版者致以诚挚的谢意。

限于作者水平,书中错误难免,敬请指正。

著者

2008 年 6 月 5 日

目 录

前 言

第 1 章 汽车碰撞研究概况	(1)
1.1 汽车碰撞研究的核心	(1)
1.1.1 吸能机理是核心	(1)
1.1.2 吸能机理研究现状	(4)
1.2 汽车碰撞研究的方法	(9)
1.2.1 经验法	(10)
1.2.2 试验法	(11)
1.2.3 数值分析法	(12)
1.3 汽车碰撞研究的历史进程	(14)
1.4 本章小结	(21)
第 2 章 汽车碰撞分析的 CAE 方法	(22)
2.1 真实应力—应变曲线	(22)
2.1.1 对数应变	(22)
2.1.2 材料的真实应力—应变曲线	(24)
2.1.3 真实应力—应变曲线的近似数学表达式	(26)
2.2 动态显式有限元方程	(27)
2.2.1 虚功原理与有限元方程	(27)
2.2.2 显式时间积分及时间步长	(30)
2.2.3 本构关系	(31)
2.2.4 应力更新方法	(32)
2.3 材料模型	(33)
2.3.1 材料的硬化模型	(34)
2.3.2 刚体材料模型	(35)
2.3.3 幂指数塑性材料模型	(36)
2.3.4 分段线性材料模型	(37)
2.4 接触处理方法	(39)
2.4.1 接触搜寻方法	(39)
2.4.2 桶式分类搜寻方法的典型应用	(46)
2.4.3 接触力的计算方法	(48)

2.5	壳单元公式	(51)
2.5.1	单元理论	(51)
2.5.2	BELYTSCHKO—LIN—TSAY 壳单元	(52)
2.5.3	改进的 Belytschko—Wong—Chiang 单元	(55)
2.5.4	三角形壳单元	(57)
2.6	砂漏及控制途径	(61)
2.7	本章小结	(62)
第3章	汽车碰撞的结构设计方法	(63)
3.1	汽车正面碰撞法规	(64)
3.1.1	美国的正面碰撞法规	(65)
3.1.2	日本的正面碰撞法规	(65)
3.1.3	欧洲的正面碰撞法规	(66)
3.1.4	中国的正面碰撞标准	(66)
3.1.5	新车评估程序	(66)
3.2	其它碰撞法规	(67)
3.2.1	侧面碰撞法规	(67)
3.2.2	追尾碰撞法规	(68)
3.2.3	动态翻滚试验法规	(68)
3.2.4	气囊试验法规	(68)
3.2.5	汽车碰撞相容性和行人保护法规	(69)
3.3	现行碰撞法规评价指标	(70)
3.3.1	GB11551—2003《乘用车正面碰撞的乘员保护》	(70)
3.3.2	美国 FMVSS 208	(70)
3.3.3	欧洲 ECE R94	(71)
3.3.4	欧洲 Euro NCAP	(71)
3.4	车体结构耐撞性评价标准	(72)
3.5	汽车主吸能件和车体设计要求	(75)
3.5.1	汽车主吸能件及其在碰撞中的作用	(75)
3.5.2	汽车车体设计要求	(77)
3.5.3	汽车车身的特征尺寸	(78)
3.6	汽车碰撞的结构设计	(83)
3.6.1	汽车碰撞中的能量分布	(83)
3.6.2	汽车碰撞的结构设计	(87)
3.7	本章小节	(88)
第4章	汽车碰撞的安全性分析	(89)
4.1	油箱的碰撞安全性	(89)

4.1.1	油箱的布置方式	(89)
4.1.2	后撞法规的比较	(90)
4.2	油箱的碰撞安全性设计	(91)
4.2.1	MPV 乘用车的油箱碰撞安全性设计	(91)
4.2.2	Mini MPV 的油箱碰撞安全性设计	(93)
4.3	油箱泄漏的判据	(97)
4.4	MPV 的碰撞安全性分析	(97)
4.4.1	碰撞分析流程和有限元模型	(97)
4.4.2	正面碰撞分析结果	(99)
4.4.3	侧面碰撞分析结果	(102)
4.4.4	后部碰撞分析结果	(105)
4.5	欧洲某 Mini MPV 的偏置碰撞分析	(106)
4.6	本章小节	(108)
第 5 章	汽车的翻滚安全性分析	(109)
5.1	客车安全法规	(110)
5.2	客车翻滚试验法规介绍	(111)
5.2.1	FMVSS208 翻滚试验	(111)
5.2.2	FMVSS216 车顶抗压试验	(112)
5.2.3	ECE66 车身上部强度试验	(113)
5.3	客车立柱及车身段耐撞性研究	(115)
5.3.1	立柱耐撞性分析	(116)
5.3.2	车身段耐撞性分析	(120)
5.4	GL6460L 轻型客车翻滚模型	(123)
5.4.1	翻滚模型预处理	(125)
5.4.2	网格划分及检查	(126)
5.4.3	单元公式及材料特性	(127)
5.4.4	边界条件及接触处理	(128)
5.4.5	计算控制参数	(130)
5.5	GL6460L 轻型客车翻滚仿真及结果分析	(131)
5.5.1	客车骨架变形分析	(131)
5.5.2	能量变化分析	(133)
5.5.3	加速度及接触力分析	(134)
5.6	本章小结	(136)
第 6 章	螺紋剪切式汽车碰撞吸能原理	(137)
6.1	螺紋剪切式汽车碰撞吸能原理的技术特征	(137)
6.1.1	总体技术特征	(137)

6.1.2	细节特征	(137)
6.2	螺纹剪切吸能机理	(138)
6.3	基于螺纹剪切吸能机理的典型吸能系统	(138)
6.3.1	典型吸能系统的结构	(138)
6.3.2	典型吸能系统的工作过程	(141)
6.3.3	典型吸能系统与车身的连接方法	(141)
6.3.4	三点支撑技术	(141)
6.3.5	吸能能力的自适应控制	(142)
6.4	螺纹剪切过程的力学分析	(142)
6.5	典型结构吸能特性的有限元分析	(145)
6.5.1	CAD 模型	(145)
6.5.2	有限元模型	(147)
6.5.3	有限元结果分析	(148)
6.6	典型吸能结构螺纹参数的确定	(149)
6.6.1	单线螺纹参数确定的仿真试验	(149)
6.6.2	单线螺纹参数的选择举例	(154)
6.6.3	多线螺纹仿真试验	(155)
6.7	在汽车正面碰撞中的应用	(157)
6.7.1	碰撞速度为 50km/h 时的应用	(157)
6.7.2	碰撞速度为 56km/h 的应用	(159)
6.7.3	在微型车改进中的应用	(160)
6.8	在碰撞相容性研究中的应用	(162)
6.8.1	车—车碰撞相容性	(162)
6.8.2	汽车—护栏碰撞相容性	(163)
6.9	本章小结	(164)
第 7 章	螺纹剪切吸能系统的自适应控制技术	(166)
7.1	自适应控制系统设计基础	(166)
7.1.1	电子控制系统的研发与螺纹剪切吸能系统	(166)
7.1.2	汽车电子控制系统及相关理论	(168)
7.1.3	电子控制芯片的发展及主要结构形式	(169)
7.1.4	相关电子产品的介绍	(171)
7.2	总体方案设计及论证	(172)
7.2.1	拟采取的设计方案及论证与对比	(172)
7.2.2	最终确定的方案	(182)
7.3	选定方案的理论分析及各元件参数的确定	(183)
7.3.1	系统控制原理及设计思路	(183)
7.3.2	与控制系统设计有关的相关计算	(184)

7.3.3 系统硬件设计	(185)
7.3.4 系统软件设计	(187)
7.4 系统的调试仿真	(195)
7.4.1 相关软件介绍	(195)
7.4.2 系统电路电气连接软件检测(Protel)	(196)
7.4.3 系统程序编译与调试(Keil)	(197)
7.4.4 系统电路与程序联调仿真(Proteus 和 Keil)	(200)
7.4.5 控制装置的硬件模拟	(202)
7.5 本章小结	(204)
附录 A AT89S51 结构引脚介绍	(205)
附录 B 智能吸能装置控制系统程序	(209)
参考文献	(215)

第 1 章 汽车碰撞研究概况

1.1 汽车碰撞研究的核心

1.1.1 吸能机理是核心

汽车的高速碰撞安全性（含汽车正面碰撞安全性、偏置碰撞安全性、侧面碰撞安全性、后碰撞安全性、翻滚碰撞安全性、汽车撞柱安全性等）、乘坐舒适性、自重轻量化、碰撞相容性（含车—车碰撞的相容性及汽车—护栏碰撞相容性）是当今汽车安全技术发展的四大主旋律^[1-6]。

汽车安全是一个永恒的话题。据测算，自 1886 年汽车问世以来的 120 年内，全球已有 3300 多万人死于车祸，有 1 亿多人因车辆而伤残。目前，在每年的车祸中有 120 多万人死亡，1200 多万人伤残，全球 50% 的交通事故受害者年龄在 15~24 岁，每年交通事故造成的经济损失达 5180 亿多美元，相当于每年发生两次日本广岛核爆炸^[5,6]。

为了提高汽车的碰撞安全水平，美国高速公路交通安全局（NHTSA）每年将对 100 辆以上的汽车实施破坏性试验。此外，由美国保险企业创立的民间团体“美国道路安全保险协会”（IIHS），也对 35~40 辆汽车进行碰撞试验。所有结果将反映在各自发布的“碰撞安全性评价”中。新车碰撞试验在所有的商业宣传项目中是成本最高的一项，但却不可缺少——在美国，每年有 350 万人遭遇重大交通事故，安全性评价显示了当某人不幸成为其中一员时生还的概率。

我国自 1901 年有人将两辆美国产汽车运抵上海后，汽车给国人带来方便的同时也带来了车祸。目前，每年因车祸死亡 10 万人左右，以汽车保有量计算，我国只占全球的 1.9%，但全球 15% 的交通事故发生在我国，交通事故已连续 10 余年居世界第一，单车事故率相当于美国的 13 倍，日本的 40 倍。

随着道路运行条件的改善及汽车制造水平的提高，小型车、大型车（含大客车、重型货车）的最高设计车速分别在 160km/h、100km/h 以上，在高速公路上通常的行车速度分别为 100km/h、80km/h 左右^[1]。

实践表明，汽车的碰撞速度按行车速度的 80% 或最高设计车速的 60% 来确定，就能覆盖 80% 的碰撞事故^[1]，即碰撞速度为：小型车 80~100km/h，重型车 60km/h。可见，即使是 NCAP 的测试标准速度 64km/h 也仍然偏低。

事实上，由于越来越多的汽车在美国碰撞试验中获得最高评价，美国交通安全署 NHTSA 已经修改了汽车碰撞试验标准，使其变得更为严格。目前，乘用车乘员保护装

置最高评价为五星级，如果按照以往的汽车碰撞试验标准，汽车以 56 km/h 的速度正面碰撞障碍物，则被测试汽车中的 88% 以上能够获得四星级或五星级评价，说明以往的汽车碰撞试验标准要求太低了。

为此，美国最近出台了一项新的法规，全面提升了汽车行驶安全标准，新法规将侧撞速度从目前的 32km/h 提高到 54km/h，后撞速度从目前的 48km/h 提高到 80km/h。这个新规定将在 2005 年起步，2009 年全面实施。为了达到新标准，汽车厂商每年大概要花费 4100 万美元，或者说每辆车要花费 5.14 美元。但是实施这个新规定预计每年将可以减少 8~23 条生命死于车祸。

这个新规定要求汽车厂商采用更结实的油箱，这样可以防止汽车在高速下撞车时更好地避免油料渗漏，避免起火爆炸。美国国家高速公路安全管理局的一个专家表示，虽然汽车被撞起火的现象很少见，但是一旦发生，后果就非常严重。这个新规定出台后可以挽救一些人的性命。

由于老标准的安全测试规定是，后面碰撞的速度为 48km/h，侧面碰撞的速度为 32km/h，然后检查油箱是否漏油。在碰撞过程中漏油超过 1 盎司，在随后的 5 分钟内漏油超过 5 盎司，或者随后的 25 分钟之内在 1 分钟里漏油超过 1 盎司，就会被视为不合格。显然，老标准的这个要求远低于新标准要求，美国国家高速公路安全管理局估计目前在路上行驶的 46% 的车辆将不能通过新标准的测试要求。

美国车辆安全测试新标准包括如下主要内容：

- ① 新车必须通过 66km/h 的前撞；
- ② 从 2005 年款车开始，车辆必须能够通过 54km/h 的侧撞；
- ③ 从 2007 年款车开始，每个汽车厂家必须有 40% 的车辆通过 80km/h 的后撞；
- ④ 从 2008 年款车开始，每个汽车厂家必须有 70% 的车辆通过 80km/h 的后撞；
- ⑤ 从 2009 年款车开始，所有的车辆都必须通过 80km/h 后撞测试。

通用汽车公司发言人称，“通用”很欢迎这项新规定，并且早已开始重新设计车辆以通过新的安全测试。但一些汽车安全活动团体认为新规定还做得不够，有人提出即使油箱设计很差的车辆也能达到这个新标准，例如通用公司在 20 世纪 80 年代出售的 C/K 皮卡，油箱是位于车架外面的，很容易被撞后发生起火。

可以肯定，今后的碰撞标准速度将进一步提高，安全标准将越来越严格。

而能源专家认为，传统汽车的汽油只有 1% 是用来载人的，其余的全部用于带动汽车自身的行驶，所以，要进一步减少汽车能源的消耗量，关键就是要想方设法减轻车子自身的重量。因此，在安全标准日益严格的同时，汽车的轻量化也迫在眉睫^[1,2,4]。

由于汽车的冲击动能与车速平方成正比，碰撞车速有少量提高，汽车要吸收的碰撞能量就会提高很多。因此，时至今日，仍然不能将汽车碰撞速度标准提升到 80~100 km/h 或更高，根本原因就在于汽车上已没有多余的空间去增加吸能区长度了（那种简单增加汽车长度的做法，因会明显增加汽车自重而不被业界接受。相应地，那种通过压缩乘坐空间来提供吸能区长度的做法，因将明显影响乘坐舒适性，同样不被业界接受）。因为高速碰撞的汽车，需要很长的碰撞吸能区才能使汽车的动能随吸能结构的渐进压溃而被均匀地耗散，并使瞬时冲击载荷强度降低到确保乘员安全的水平——这就是说，我

们不能以提高“吸能密度”（即吸能元件单位长度的能量吸收）的方式来增加汽车的吸能能力了，受汽车自重的制约，吸能元件的吸能密度往往已用到了最佳状态，我们只能通过提高吸能元件的比吸能（即吸能元件单位重量的能量吸收）来降低吸能元件的自重^[1,6]。

可见，在汽车上已没有多余的空间去增加吸能区长度的情况下，适时从车身外部获取“多余空间”而又不明显增加汽车自重的方法就成为唯一的选择。车身内部的空间很无奈，车身外部的世界真精彩！

一般来说，在交通事故中，因正面撞击引发的事故比例居于第一位，其次就是侧撞，其比例大约占到总量的30%左右，再次才是追尾。由于采取的保护措施比较少，侧撞是比较危险的。侧撞安全的问题主要是车身的吸能问题，也涉及油箱的泄漏问题，而追尾碰撞的安全问题，则主要是油箱的泄漏问题，本质上还是油箱周边车身结构的吸能问题。

值得注意的是，我国公安部对2005年全国道路交通安全情况进行统计后分析指出：在47起特大交通事故中，共发生单方事故28起，占总数的59.6%。其中，有21起为坠车事故，多发生在西部多山地区，占总数的44.6%。非单方事故中，发生正面碰撞事故8起，追尾碰撞事故7起，两者合计占事故总数的32.6%。

汽车交通事故给人们的生命、财产带来了巨大的损失，尤其是客车引发的特大事故，对社会产生的影响巨大。特大单方面事故以坠车事故居多，研究客车的安全，特别是客车翻滚时的结构安全具有重大意义，同样地，客车的翻滚安全性问题，也是一个车身的吸能问题。

此外，车—车之间的碰撞相容性问题日益突出，碰撞相容性一般包括三个方面的内容：质量相容性；结构刚度相容性；车身几何外形相容性^[3,10-15]。

对车身几何外形相容性的问题，美国高速公路安全保险协会IIHS发表了一个新的研究报告，报告阐述了新设计的SUV和卡车缓冲装置可以与轿车吸能装置相配合，达到车身几何外形相容的目的。这种SUV和卡车缓冲装置解决了车—车碰撞时，两车的撞击位置刚好是正常的保险杠高度的问题，即如果将轿车调整到NHTSA制定的标准高度，万一发生车—车碰撞，撞击的就是轿车的保险杠。这种装置已在Volvo车上得到应用^[16]。

可见，质量相容性与结构刚度相容性已成为目前汽车碰撞相容性研究的核心，也就是说，除了要进一步加强汽车自身乘员保护系统外，更要在降低大质量车的前端刚度上下工夫^[3,17]。

而在现行的正面碰撞评价体系指导下，其结果正好与碰撞相容性要求相反，即厂家的设计思想是：

① 对于小质量车辆，受汽车自重的制约，小质量车的前端吸能区的吸能密度往往已用到了最佳状态，即小质量车的前端刚度往往已到了难以继续提高的地步，尽管如此，由于小质量车的冲击动能相对较小，故小质量车的前端刚度也相对较小；

② 对于大质量车辆，由于大型车辆对墙碰撞中需要吸收的能量较大，为了不过多地增加车辆前端的长度，厂家往往采用增加前端刚度的办法来提高碰撞安全性（国际上

尚未制定大型车辆的碰撞安全标准,故对大型车的前端刚度无任何技术限制),这样造成大质量车的前端刚度往往远高于小质量车乘员舱被压溃的抵抗能力,所以必须在不明显增加大质量车自重的前提下大幅度降低大质量车的前端刚度,才能确保在车—车碰撞中,使大质量车不至于压溃小质量车的乘员舱而对乘员造成严重伤害。

据统计,在我国的道路交通事故中,发生在普通干线公路上的事故约有 45%,发生在高速公路上的事故约有 30% 是车辆越出路外造成的,且由此造成的特、重大恶性交通事故占该类事故总数的比例达 62% 以上。

而我国目前仍然约有 30 万公里公路属于山岭重丘区二级以下技术等级公路,仅湖南省就有二、三、四级公路 37 009km,等外级公路 42 415km,其中相当比例的公路属于山岭重丘区二级以下技术等级公路和等外级公路,且不乏坡陡弯急、依山靠水、傍沟临涧的地段,更重要的是,这些公路中的有些路段还缺乏必要的优良的耐撞性安全防护设施,给安全行车带来了一定的隐患。随着西部大开发进程的不断推进,交通安全状况将更为严峻。

受地理条件的制约,在西部地区,位于陡崖峭壁上的公路将占更高的比例(包括旅游区内的专用旅游公路及通往旅游区的普通运输公路),有相当多的公路具有很高的纵向坡度(也许其路侧还同时位于陡崖峭壁上),这样的路况将包藏着极大的安全隐患,虽然目前的路侧护栏在防护车辆从路侧掉下陡崖峭壁方面发挥过且正在发挥着巨大的作用;虽然事故多发地段的警示标识璀璨夺目;虽然安全教育早已深入人心,但车辆从陡崖峭壁翻滚坠落的惨剧仍然时有发生!无疑,汽车及公路安全设施,如路侧护栏等的碰撞相容性不足是造成这些惨剧发生的重要原因之一。

汽车的高速碰撞安全性、翻滚安全性、乘坐的舒适性、自重的轻量化、车—车碰撞的相容性、汽车—护栏碰撞相容性均呼唤新的碰撞吸能机理。

本书在对汽车正面碰撞安全性、偏置碰撞安全性、侧面碰撞安全性、后碰撞安全性、翻滚碰撞安全性等进行系统深入研究的基础上,旨在重点论述作者提出的适于汽车碰撞的创新吸能机理。主要针对以下问题:

- ① 汽车自重轻量化;
- ② 汽车高速碰撞时需要很大的吸能区长度,以使汽车的动能随吸能结构的渐进压溃而被均匀地耗散,并使瞬时冲击载荷强度降低到最低水平;
- ③ 车—车碰撞需要解决质量相容性与结构刚度相容性的三大要求;
- ④ 汽车—护栏碰撞相容性研究也需要新的思路等实际,探索应用螺纹剪切破坏机理来吸能、应用螺旋传动的伸缩特性,借用汽车外部空间来提供足够吸能区长度,而又不明显增加汽车自重的可行性。虽然螺旋传动已广泛用于起重器、压力机、进给机构、调整机构等中,但把螺纹剪切破坏机理用于吸能原理的思想,在国内外文献中尚未见报道。

1.1.2 吸能机理研究现状

就汽车碰撞吸能系统的研究而言,在研究方法上,主要有试验法、CAE 法、半经验

公式法、优化设计法四种。

1. 试验法

试验法是指通过反复试验(试验寻优)确定合适的结构形式与尺寸,这是最基本、最直接的方法,目前主要用于复合材料结构的吸能特性研究^[2]。

2. CAE 法^[18-20]

CAE 法是指根据以往的经验进行设计,然后创建 CAD 模型并生成有限元网格,计算出静、动态响应及耐撞性等,再根据计算结果修改设计(即人工寻优),最后用实车试验验证。由于汽车碰撞涉及大变形、接触、弹塑性等计算力学中极具挑战性的问题,国际上直到 20 世纪 80 年代末,才逐渐形成一个基于显式有限元的碰撞仿真研究分支^[19,21,22],并在汽车碰撞分析中取得极大成功^[18-20],且越来越为人们重视,目前几乎所有的汽车制造公司均采用此法^[17-20]。国内在这方面虽起步晚,但进展快,效果较好^[1,5-7,23,69-71],图 1-1 为上汽通用五菱汽车股份有限公司自主开发的新产品 N1 的碰撞仿真,结果与实验十分吻合^[7]。

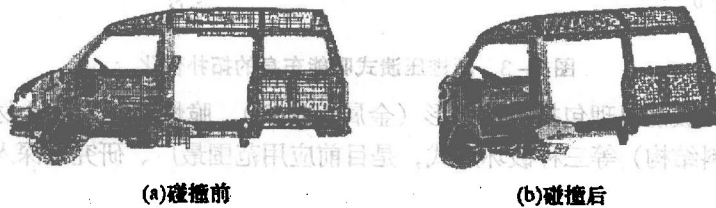


图 1-1 汽车碰撞仿真结果(分析软件为 LS-DYNA)

3. 半经验公式法

半经验公式法是指从细观力学的角度,结合实验,给出结构吸能特性的半经验公式(解析法寻优),该法仅在个别简单吸能元件的分析中得到应用^[2]。

4. 优化设计法

优化设计法包括各种形式的结构拓扑、形状及尺寸优化设计技术^[24-30]。对于一个特定的碰撞问题,只要指定一种吸能模式,就可在优化算法驱动下自动生成最优设计(计算机寻优)。在形状拓扑优化方面,最典型的思路是“基于有限元形状灵敏度的数学规划优化”。近 10 年来,国际上对此进行了深入研究^[28-31]。图 1-2 及图 1-3 为优化设计在汽车碰撞研究中能解决的问题。

上述方法,通常只能解决吸能机理相同时的寻优问题,寻优的结果一般只是尺寸或形状的改变,不是吸能机理的变化。为了提高汽车的碰撞吸能水平,人们开展了大量研究,并发展了渐进压溃式、液压阻尼式、摩擦式、气囊式等多种吸能机理。

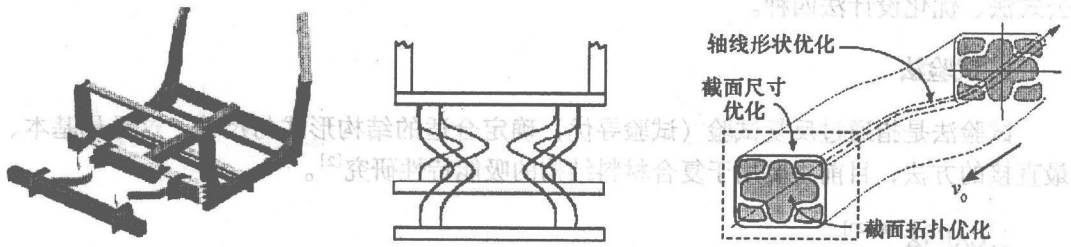


图 1-2 渐进压溃式吸能结构的优化设计

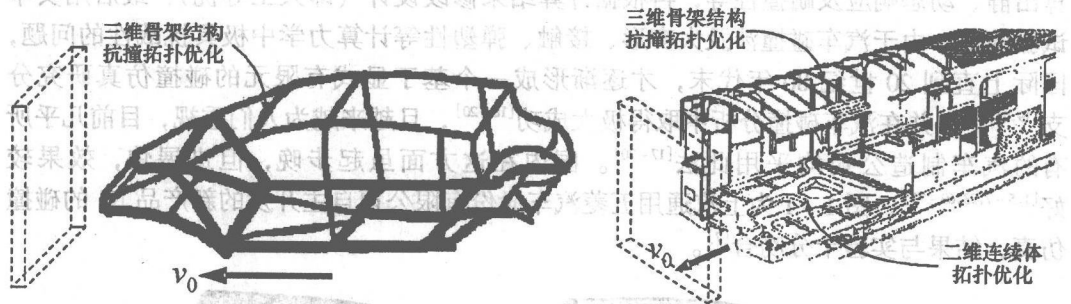


图 1-3 渐进压溃式吸能车身的拓扑优化

渐进压溃式吸能机理包括塑性变形（金属等材料）、脆性断裂（复合材料）及二者的组合（混合材料结构）等三种破坏形式，是目前应用范围最广、研究最深入的一种吸能机理（图 1-4）。与之密切相关的原创性研究可追溯到 1960 年，当时 Alexander^[32] 率先研究了金属圆柱管轴向压缩能量吸收分析模型；从 1973 年起，以 NASA 的 Langley 研究中心、Ford 汽车公司、英国 University of Liverpool、美国 University of Michigan、日本 Kyoto Institute of Technology、法国 French National Institute for Transportation and Safety Research 等为代表的研究机构对复合材料圆柱壳（管）的能量吸收性能进行了深入研究^[33-37]。

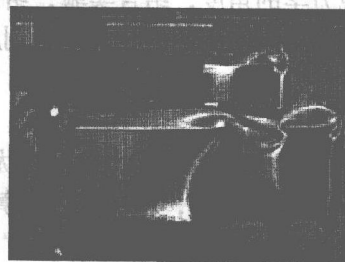


图 1-4 渐进压溃式吸能梁

1977 年，Ford 汽车公司的 Thornton 博士^[33] 率先报道了在轴向撞击载荷下，复合材料薄壁圆柱壳具有优异的能量吸收性能。从 1986 年起，Reid 等人开展了多种材料组合体系的缓冲吸能结构研究，例如内部填充轻质泡沫的薄壁管吸能体系^[38-39]；1991 年，Cambridge 大学的 Hull 教授^[37] 等发表在 *Composite Science and Technology* 上的经典文献 A

unified approach to progressive crushing of fiber-reinforced composite tubes, 引发了人们对复合材料吸能结构更广泛的研究。同年, Wang^[40]首先进行了复合圆柱管 (compound tube) 结构压缩性能的研究; Kitagawa 等人^[41]利用波纹来控制边梁的变形模式, 设计了三种波纹形式, 优化设计出能量吸收最优的排布方式; Haug 等人^[42]进行了 Carbon - Kevlar - Aramid 混杂复合材料薄壁梁的碰撞仿真研究。1993 年, Albertini 等人^[43]利用改进了的 Hopkinson 杆试验装置模拟真实的汽车碰撞, 研究了短结构薄壁吸能结构的冲击特性。

从 1995 年起, Wei 等人^[44]研究了两层同心金属圆柱中间夹杂高分子材料的夹层结构的吸能特性。1998 年, Otubushin^[45]等利用非线性有限元研究了金属薄壁方管的碰撞性能。2002 年, 刘瑞同^[46]研究了复合材料板、肋、筋典型组合的截面为“+”、“T”、“L”等构型的结构及碳纤维波纹板的轴向吸能性能; 2005 年, 为了增加吸能区长度, “POLO”和“途安”使用了铝合金发动机支架, 在发生强烈撞击时这个支架会折断, 迫使整个发动机结构下落, 从而腾出大量缓冲空间, 并减少对发动机系统的直接机械冲击力。近期, 中国科学院力学所宋宏伟、清华大学范子杰等与波兰 Wrocław 大学 Tobota 等人开展合作^[47-52], 在多孔材料填充薄壁结构吸能性能研究等多个方面取得了新的进展, 提出了能量吸收解耦方法、以定量表征相互作用效应等一系列新方法。

限于篇幅, 国内外学者取得的大量成果无法一一例举, 参考文献中也只罗列了部分成果^[1-70], 但正是广大学者的研究成果, 在不断促进全球汽车碰撞安全水平的稳步提高, 也为本项目的提出与开展研究奠定了坚实的基础。

可见, 基于渐进压溃式机理的吸能结构, 从几何形式来看, 包括圆柱管、方形管、帽形结构、圆锥管、方锥管、波纹板、I 型梁、夹层结构等; 从材料及成型工艺来看, 包括金属材料、层合复合材料、挤出复合材料、编织复合材料、泡沫材料、蜂窝材料等。人们还研究了纺织复合材料结构的吸能特性^[53-56]。

基于渐进压溃式吸能机理的吸能结构, 其力—变形特性存在很大波动 (图 1-5), 导致碰撞中汽车的减速度波动很大, 不利于乘员安全^[57-61]。为此, 人们尝试了多种改良方法, 如引发削弱处理方法, 图 1-6 就是采用引发削弱处理方法的典型例子, 即通过削弱吸能构件横截面来消除压溃过程力的峰值^[1, 62, 63]。

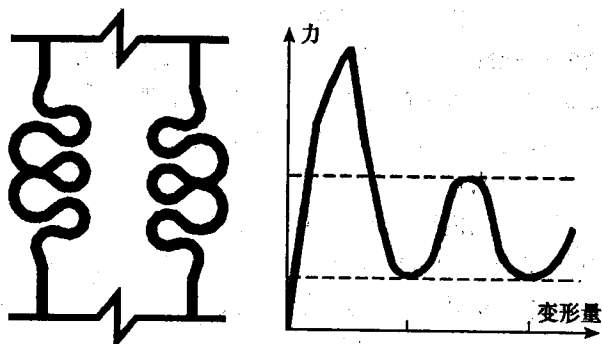


图 1-5 压溃式吸能构件的变形特征

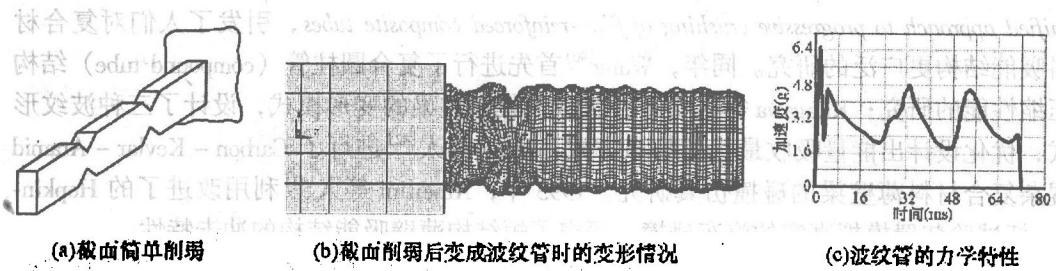


图 1-6 压溃式吸能构件的改良

液压阻尼式吸能机理在碰撞速度较低的汽车减振器及汽车模拟碰撞试验中有应用^[64]。在飞行器的回收上也曾有应用^[2]（飞行器的回收一般要经过降落伞减速和反推火箭制动两级作用，实际着陆速度一般低于 5m/s，而汽车碰撞速度均在 13m/s 以上），如美国 Apollo 指挥舱的着陆缓冲系统由 6 根垂直方向布置的液压活塞机构和 8 根水平双向铝蜂窝杆组成。液压活塞机构通过粘性液体的阻尼吸收冲击能量。铝蜂窝则通过拉伸或压缩下的结构失稳、塑性变形与破坏吸收能量。

摩擦吸能机理仅在只需吸收少量动能的吸能转向柱中有应用^[5]（见图 1-7）。

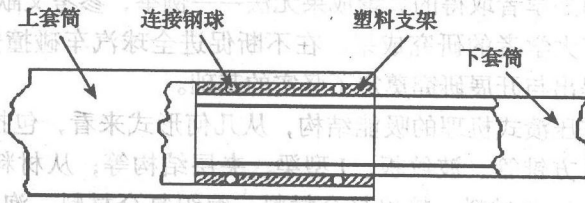


图 1-7 采用摩擦阻尼耗能的转向柱套管

气囊式吸能机理则主要用作车内乘员及车外行人的安全防护^[65-67]。

正如文献 [2] 所指出的那样，对于以上这些在汽车行驶中吸能能力不可调的吸能结构，本质上都可用轻质复合材料吸能结构代替。这也就是为什么目前汽车上使用的碰撞吸能机理基本都是渐进压溃式吸能机理的原因。

上述吸能机理对确保汽车碰撞安全性满足现行法规要求曾发挥并将继续发挥巨大作用。但面对汽车碰撞安全标准的不断提高，汽车上已没有多余空间去增加吸能区长度、若增加整车长度又面临汽车自重大幅上升，以及车—车碰撞质量相容性与刚度相容性等一系列的新问题，上述吸能机理就表现出较大的局限性。

此外，不应忽视汽车具有的动能与车速平方成正比，实际行驶中，车速在不断变化，汽车的动能将在很大范围内变化这个事实。因此，理想的吸能系统应该能够根据车速的变化自动调整吸能能力，即吸能能力也应与车速平方成正比。同时，不论车速如何，只要发生碰撞，吸能系统就应有稳定的破坏模式、均匀的压缩载荷，能够可控制地吸收撞击能量，才能给乘员提供最优的安全保护^[1,2,4]。

本书提出的新型吸能原理，利用螺纹的剪切破坏力基本为常数的特征，在冲击载荷下，确保了系统具有稳定的破坏模式、均匀的压缩载荷，能够可控制地吸收撞击能量。在非碰撞时，利用螺旋传动的运动特性，可实现吸能能力随车速的自动调整，并通过借