

装备防护

缓冲包装信息融合设计方法及应用

滑广军^{1*}, 金澳威¹, 刘奇龙¹, 唐丛¹, 周紫², 周懿欣¹

(1. 湖南工业大学, 湖南 株洲 412007; 2. 株洲市红三角包装印刷有限责任公司, 湖南 株洲 412007)

摘要: **目的** 探究基于最大加速度-静应力曲线的缓冲包装信息融合设计方法, 以优化缓冲包装设计的过程和效果。**方法** 将最大加速度-静应力曲线以通用函数形式表征, 引入最优设计准则, 构建缓冲设计基本方程组, 阐述该方程组的数学和物理含义, 将基于最大加速度-静应力曲线的缓冲包装设计归结为利用 2 个约束条件确定 3 个设计参数的问题。利用缓冲包装设计的稳定性约束条件和基本方程组, 推导出缓冲失稳临界方程。**结果** 将缓冲材料的最大加速度-静应力曲线作为基础信息层, 将表征缓冲设计目标的产品易损性参数 $[G]$ 、表征约束条件的产品底面积参数 A 以及缓冲失稳临界方程等约束条件投影到基础信息层, 通过多层信息的融合得到缓冲包装信息融合设计边界图, 能够进行快速、准确的缓冲衬垫设计。

关键词: 信息融合; 缓冲设计; 最大加速度-静应力曲线; 失稳临界方程; 边界图

中图分类号: TB48

文献标志码: A

文章编号: 1001-3563(2025)05-0216-05

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2025.05.027

Design Method and Application of Cushioning Packaging Based on Information Fusion

HUA Guangjun^{1*}, JIN Aowei¹, LIU Qilong¹, TANG Cong¹, ZHOU Qing², ZHOU Yixin¹

(1. Hunan University of Technology, Hunan Zhuzhou 412007, China;

2. Zhuzhou Red Triangle Packaging Printing Co., Ltd., Hunan Zhuzhou 412007, China)

ABSTRACT: The work aims to explore the design method of cushioning packaging information fusion based on the maximum acceleration-static stress curve to optimize the process and effect of cushioning packaging design. The maximum acceleration-static stress curve was characterized in the form of a universal function. By introducing optimal design criteria, a basic equation system for cushioning design was constructed. The mathematical and physical meanings of this equation system were explained. The cushioning packaging design based on the maximum acceleration-static stress curve was attributed to a problem of determining three design parameters with two constraint conditions. The stability constraints and basic equation system were utilized to derive the critical equation for cushioning instability. The maximum acceleration-static stress curve of the cushioning material was used as the basic information layer, and the fragility parameter $[G]$ representing the cushioning design objective, the product bottom area parameter A representing the constraint conditions, and the cushioning instability critical equation were projected onto the basic information layer. By fusing multiple layers of information, the boundary diagram of buffer packaging information fusion design could be obtained, which enabled fast and accurate cushioning packaging design.

KEY WORDS: information fusion; cushioning packaging design; maximum acceleration-static stress curve; instability critical equation; boundary diagram

收稿日期: 2024-11-09

基金项目: 湖南省自然科学基金联合基金项目 (2022JJ30223); 国家重点研发计划 (2023YFC3904603); 湖南省高等学校教学改革研究 (HNJG-2021-0123); 大学生创新创业训练计划项目 (S202311535012)

*通信作者

缓冲包装的目的是在流通过程中吸收冲击能量,避免内装物由于冲击振动发生损坏。缓冲包装设计方法由美国密歇根州立大学包装学院与MTS公司共同提出,我国的缓冲包装设计标准也是基于该方法^[1-2]。传统的最大加速度-静应力曲线的缓冲包装设计方法综合产品参数信息(如产品易损性参数 $[G]$ 、产品底面积参数 A 等)、流通环境特征信息(如流通过程中的跌落高度 H)、缓冲材料性能参数信息(最大加速度-静应力曲线),构建了基于最大加速度-静应力曲线的缓冲包装设计体系,并提供了实施步骤^[3-7]。基于最大加速度-静应力曲线的缓冲包装设计方法中,最大加速度-静应力曲线一般采用图形化的形式表征,主要是因为最大加速度-静应力曲线由一组不规则的曲线组成。这种缓冲曲线族难以用具体函数的形式表达,缓冲包装设计的思路不够清晰,为此一些研究人员探究该设计方法的数学内涵并进行创新性的应用^[8-9]。

信息融合是指将来自不同信息源或多个数据源的信息进行整合、分析和综合,以生成更全面、准确和有用的信息^[10]。在信息融合过程中,多个信息源可以是来自不同传感器、不同领域的数据、各种文本和图像信息等^[11]。信息融合的目标是整合多样化的信息,以获取更全面、一致和准确的决策^[12]。通过信息融合层次的建立,能够将相关信息整合为一个可视化的框架,为设计过程提供清晰的指导和决策依据。按照融合对象的层次不同,信息融合划分为底层(数据级)、中层(特征级)和高层(决策级)^[13-17]。

缓冲包装设计是一个系统性、多目标、多约束的设计问题,基于信息融合的方法对缓冲包装设计方法进行诠释具有重要的工程意义^[18-19]。在本研究中,以缓冲材料的最大加速度-静应力曲线作为基础信息层,将表征缓冲设计目标的产品易损性参数 $[G]$ 、表征约束条件的产品底面积参数 A 以及缓冲失稳临界方程等约束条件投影到基础信息层,通过多层信息的融合得到缓冲包装信息融合设计边界图。

1 缓冲设计基本方程组的建立

缓冲包装设计要综合考虑产品特性、缓冲材料特性、环境特性,同时考虑经济性及可靠性等因素。缓冲包装设计最基本的准则是跌落冲击时的最大加速度不能超过产品脆值即产品易损性参数 $[G]$,因此需要建立基于该准则的基本方程组。

1.1 最大加速度-静应力曲线的抽象函数化

当质量为 m 的产品使用缓冲面积为 A 的衬垫进行缓冲保护时,缓冲面积与产品质量的关系为

$$\sigma_{st} = \frac{mg}{A} = \frac{W}{A} \quad (1)$$

式中: σ_{st} 为衬垫承受的静应力,kPa; g 为重力

加速度,9.8 m/s²; W 为产品重力,N。

某缓冲材料在跌落高度为60 cm时的最大加速度-静应力曲线如图1所示,该曲线本质上表征了以静应力为自变量、以最大加速度为因变量、以衬垫厚度和跌落高度为参变量的材料缓冲性能规律。相对于缓冲系数-最大应力曲线,最大加速度-静应力曲线包含更丰富的设计信息,利用最大加速度-静应力曲线所包含的信息能够进行更高效的设计。

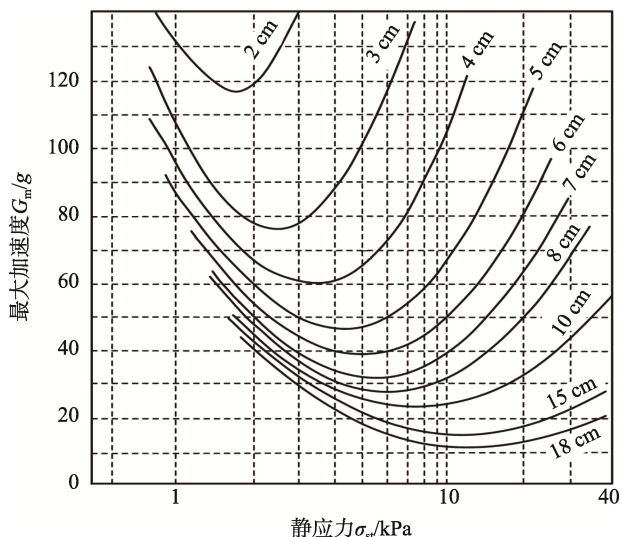


图1 最大加速度-静应力曲线

Fig.1 Maximum acceleration-static stress curve

根据图1所示的曲线族,以抽象函数的形式表达缓冲材料受冲击时的静应力、最大冲击加速度、衬垫厚度及跌落高度等参数的关系,见式(2)。

$$G_m = f(\sigma_{st}, T, H) \quad (2)$$

式中: T 为缓冲衬垫厚度; H 为包装件跌落高度; G_m 为产品衬垫系统跌落冲击时产品承受的最大加速度,应满足 $G_m \leq [G]$ 。

引入最优设计理念,令 $G_m = [G]$,则式(2)变为

$$[G] = f(\sigma_{st}, T, H) \quad (3)$$

1.2 缓冲设计基本方程组

利用式(1)与式(3)构建缓冲设计基本方程组,见式(4)。

$$\begin{cases} A = \frac{W}{\sigma_{st}} \\ [G] = f(\sigma_{st}, T, H) \end{cases} \quad (4)$$

式中:产品重力 W 、产品脆值 $[G]$ 、跌落高度 H 由产品特性和环境特性决定,对于缓冲包装设计,这3个因素属于客观因素,可以通过测试或经验获取;衬垫面积 A 、衬垫厚度 T 需要通过设计确定,静应力 σ_{st} 需要通过最大加速度-静应力曲线选择确定。

式(4)中,要通过2个约束条件确定3个未知参数,约束条件不够,满足条件的解不唯一,使得缓冲包装设计有多种方案选择。因此,缓冲包装设计时,施加不同的约束条件可以获得不同的缓冲包装设计结果。

2 缓冲包装信息融合设计边界图

缓冲包装设计的最基本要求是在产品最大加速度 G_m 不超过产品脆值 $[G]$ 的前提下,衬垫能够吸收包装件在跌落高度 H 所具有的势能。另外,要遵循包装材料与包装体积的减量化设计准则,基于信息融合的思想对缓冲包装设计的各要素及约束条件进行可视化处理。

2.1 动态破损临界线

将图1中的最大加速度-静应力曲线作为基础信息层,将缓冲包装的设计目标 $G_m \leq [G]$ 作为特征信息向最大加速度-静应力曲线进行投影,可获得缓冲包装动态破损临界线,如图2所示,该临界线上方区域为动态破坏区。

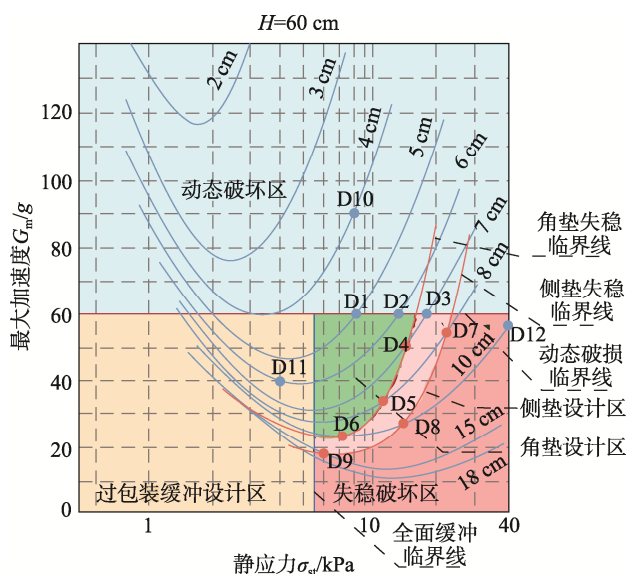


图2 基于最大加速度-静应力曲线的缓冲包装信息融合设计边界

Fig.2 Boundary diagram of cushioning packaging information fusion design based on the maximum acceleration-static stress curve

2.2 全面缓冲临界线

全面缓冲包装面积 A_{all} 与内装产品的底面积相等,将 A_{all} 代入式(1)可求出全面缓冲包装设计时的最大应力 σ_{all} ,将该特征信息向最大加速度-静应力曲线进行投影。具体方法如下:在图1中以静应力 σ_{all} 为横坐标作垂线,可得到全面缓冲临界线。图2中,

各曲线与该临界线的交点就是各自对应的全面缓冲设计点。全面缓冲临界线左边区域的应力小于 σ_{all} ,该区域对应的缓冲衬垫面积大于内装产品的底面积,属于过包装缓冲设计区,不仅使用的缓冲材料用量会增加,缓冲包装件的体积也较大,运输、仓储等费用增加,不属于优化设计区域。

2.3 失稳临界线

缓冲包装材料一般比较软,若缓冲衬垫过厚、面积过小则容易发生失稳现象,失稳的判据见式(5)。

$$A_{min} \geq (1.33T)^2 \quad (5)$$

式中: A_{min} 为最小缓冲衬垫的面积。

若局部缓冲衬垫选用2个侧衬垫,则 A_{min} 为 $A/2$,根据式(5)可得侧垫失稳的临界值为

$$A_{min} = \frac{A}{2} = (1.33T)^2 \quad (6)$$

由(6)求得 $A=3.54T^2$ 。

将式(6)与式(1)联立,消去 A 可得:

$$\sigma_{st} = K_d \cdot T^{-2} \quad (7)$$

式中: $K_d = \frac{W}{3.54}$ 。若已知材料的最大加速度-静

应力曲线,则可将式(7)表征的失稳特征信息向最大加速度-静应力曲线进行投影,式(7)对应的曲线为侧垫失稳临界曲线。

若衬垫选用4个角衬垫,同理可得角垫失稳临界曲线,其对应的函数关系见式(7),其中 $K_d = \frac{W}{7.08}$ 。

角垫失稳临界曲线在侧垫失稳临界曲线左侧,其物理含义为角垫满足稳定性要求时,需要更大的缓冲面积,缓冲材料承受的静应力较小,材料用量要多于侧垫。

2.4 局部缓冲设计区

全面缓冲方案消耗材料多,包装件占用运输及仓储空间大,目前常用局部缓冲包装。局部缓冲设计区位于全面缓冲临界线右侧,局部缓冲包装的缓冲面积 $A_{par} < A_{all}$,但局部缓冲包装仍要满足式(4)。考虑到缓冲衬垫在包装箱内固定的可靠性,局部缓冲衬垫一般设计为成对的侧垫或4个角衬垫的形式。

局部缓冲设计区包括角垫设计区和侧垫设计区2部分。在全面缓冲临界线右侧、动态破坏临界线下方及侧垫失稳临界曲线中间的区域为侧垫设计区,在全面缓冲临界线右侧、动态破坏临界线下方及角垫失稳临界线中间的区域为角垫设计区,侧垫设计区覆盖角垫设计区。角垫设计区既能设计成角垫,也可以设计成侧垫,而在角垫失稳临界线与侧垫失稳临界线之间的区域只能进行侧垫设计,否则会发生失稳。

2.5 失稳破坏区

在失稳临界曲线下方的区域, 缓冲衬垫厚度较大, 容易发生失稳。该区域属于失稳破坏区, 若在此区域选择曲线上的数据进行缓冲包装设计, 缓冲衬垫会发生失稳失效行为。

3 应用案例: 利用信息融合设计边界图的缓冲包装设计

若某产品重力为 500 N,底面尺寸为 30 cm×30 cm, 产品许用脆值为 60, 等效跌落高度为 60 cm。利用图 1 所示缓冲材料的最大加速度-静应力曲线, 按照第 2 节所述方法进行处理, 可得到图 2 所示的缓冲包装信息融合设计边界图, 在图 2 中选择 D1~D12 共 12 个设计点。通过 12 个设计点所在设计区域可直接判断

D10 处于动态破坏区, 基于 D10 设计的衬垫最大加速度为 90g, 超过产品的许用脆值[G]。D11 处于过包装缓冲设计区, 基于该点设计的衬垫面积为 1 250 cm², 超过产品底面积, 使用该方案一般要在产品和衬垫之间加设硬质纤维板或木板, 导致包装件体积过大, 综合成本增加, 一般不选用。D12 处于欠包装缓冲区, 基于该点设计的衬垫面积为 125 cm², 侧垫设计方案与角垫设计方案均不满足稳定性要求。D9 左边接近全面缓冲临界线, 因此利用该设计点设计的衬垫面积和厚度大、缓冲材料消耗多, 虽然安全, 但不是优选方案。从节省材料的角度出发, 如果设计成角垫, 优选 D2 或 D4; 如果设计成侧垫, 优选 D3 或 D7。利用图 2 可直接确定缓冲包装设计方案, 表 1 为不同包装缓冲区的设计点对应的衬垫参数, 分析表 1 可得到与利用信息融合设计边界图直接判断相同的结论。

表 1 不同包装缓冲区设计点衬垫参数
Tab.1 Pad parameters for design point in different packaging cushioning zones

编号	包装缓冲区	静应力/kPa	最大加速度/g	衬垫厚度/cm	缓冲面积/cm ²	设计方案
D1	角垫设计区	8.2	60	5	610	角/侧垫
D2	角垫设计区	13	60	6	385	角/侧垫
D3	侧垫设计区	18	60	7	278	侧垫
D4	角垫设计区	15	50	7	333	角/侧垫
D5	角垫设计区	11	35	8	455	角/侧垫
D6	角垫设计区	7.2	25	10	680	角/侧垫
D7	侧垫设计区	22	55	8	227	侧垫
D8	侧垫设计区	15	28	10	333	侧垫
D9	侧垫设计区	6	18	15	833	侧垫(体积过大)
D10	动态破坏区	8	90	4	625	动态破损
D11	过包装缓冲区	4	40	6	1 250	包装面积大
D12	失稳破坏区	40	58	10	125	失稳

4 结语

本文提出一种基于最大加速度-静应力特征曲线的缓冲包装信息融合设计方法, 并通过多层信息的融合实现缓冲包装设计信息的可视化。

基于信息融合的思想, 将缓冲包装设计归结为系统性、多目标、多约束的设计问题, 将最大加速度-静应力特征曲线以通用函数形式表征, 引入最优设计准则, 构建缓冲设计基本方程组, 通过引入稳定性约束条件和基本方程组, 推导出缓冲失稳临界方程。

通过融合缓冲材料的最大加速度-静应力特征曲线与产品易损性参数、失稳约束条件、流通环境条件等信息, 将缓冲包装设计的特征信息向最大加速度-静应力特征曲线数据层进行可视化投影, 获得缓冲包

装信息融合设计边界图, 可以更直观地解析不同设计参数对缓冲效果的影响, 更高效地进行缓冲包装设计, 并做出相应的调整和决策。

本文所提出的思路和方法, 可以进一步应用于基于缓冲系数-最大应力曲线的缓冲包装设计, 提高设计效率。信息融合和可视化思想及技术, 也可以用于纸箱设计及木箱设计过程。

参考文献:

[1] 彭国勋. 物流运输包装设计[M]. 2 版. 北京: 印刷工业出版社, 2012: 1-5.
PENG G X. Logistics Transportation Packaging Design[M]. 2nd ed. Beijing: Printing Industry Press, 2012:

- 1-5.
- [2] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 缓冲包装设计: GB/T 8166—2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Package Cushioning Design: GB/T 8166—2011[S]. Beijing: Standards Press of China, 2012.
- [3] 郭彦峰, 许文才, 智文广. 最大加速度-静应力曲线的应用研究[J]. 包装工程, 1999, 20(1): 18-20.
- GUO Y F, XU W C, ZHI W G. Application Research on the Acceleration-Static Stress Curve[J]. Packaging Engineering, 1999, 20(1): 18-20.
- [4] KIPP W I. Developments in Testing Products for Distribution[J]. Packaging Technology and Science, 13(3): 89-98.
- [5] JIANG H Y, ZHAO D J, ZHANG W L, et al. Some Observations on Dynamical Cushioning Property of Overlay Cushion Combined with Dissimilar Materials[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 200: 122-125.
- [6] 滑广军, 陈琬, 卢富德, 等. 蜂窝纸板缓冲曲线特征分析[J]. 包装学报, 2018, 10(1): 1-7.
- HUA G J, CHEN W, LU F D, et al. Analysis of Buffer Curve of Honeycomb Paperboard[J]. Packaging Journal, 2018, 10(1): 1-7.
- [7] GE C F. Theory and Practice of Cushion Curve: A Supplementary Discussion[J]. Packaging Technology and Science, 2019, 32(4): 185-197.
- [8] 滑广军, 赵德坚, 肖颖喆, 等. 缓冲包装设计方法数学内涵探析[J]. 包装工程, 2013, 34(23): 64-67.
- HUA G J, ZHUAO D J, XIAO Y Z, et al. Discussion and Analysis on Mathematical Connotation of Cushioning Pack-Aging Design Method[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(23): 64-67.
- [9] 沈阳铁路信号有限责任公司. 一种缓冲包装的设计方法: CN202110723776.6[P]. 2021-09-21.
- Shenyang Railway Signal Co., Ltd. A Design Method for Buffer Packaging: CN202110723776.6[P]. 2021-09-21.
- [10] 潘泉, 于昕, 程咏梅, 等. 信息融合理论的基本方法与进展[J]. 自动化学报, 2003(4): 599-615.
- PAN Q, YU X, CHENG Y M, et al. The Basic Methods and Progress of Information Fusion Theory[J]. Acta Automatica Sinica, 2003(4): 599-615.
- [11] 王志胜, 姜斌, 甄子洋. 融合估计与融合控制[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 21-50.
- WANG Z S, JIANG B, ZHEN Z Y. Fusion Estimation and Fusion Control[M]. Beijing: Science Press, 2009: 21-50.
- [12] 王耀南, 李树涛. 多传感器信息融合及其应用综述[J]. 控制与决策, 2001, 16(5): 518-522.
- WANG Y N, LI S T. Multisensor Information Fusion and Its Application: A Survey[J]. Control and Decision, 2001, 16(5): 518-522.
- [13] CHE X Y, MI J S, CHEN D G. Information Fusion and Numerical Characterization of a Multi-Source Information System[J]. Knowledge-Based Systems, 2018, 145: 121-133.
- [14] RAUL G, VICTOR R, HORACIO P, et al. On the Use of Information Fusion Techniques to Improve Information Quality: Taxonomy, Opportunities and Challenges[J]. Information Fusion, 2022, 78: 102-137.
- [15] LEITE P N, PINTO A M. Fusing Heterogeneous Tri-Dimensional Information for Reconstructing Submerged Structures in Harsh Sub-Sea Environments[J]. Information Fusion, 2024, 103: 102126.
- [16] ZHANG Q H, YANG Y, CHENG Y L, et al. Information Fusion for Multi-Scale Data: Survey and Challenges[J]. Information Fusion, 2023, 100: 101954.
- [17] 赵彦东. 基于深度学习的信息融合方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017.
- ZHAO Y D. Research on Information Fusion Method Based on Deep Learning[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2017.
- [18] 株洲市红三角包装印刷有限责任公司. 基于加速度-静应力曲线的缓冲包装信息融合设计方法: CN20231162956.8 [P]. 2024-07-19.
- Zhuzhou Red Triangle Packaging and Printing Co., Ltd. Design Method of Buffer Packaging Information Fusion Based on Acceleration Static Stress Curve: CN20231162956.8[P]. 2024-07-19.
- [19] 株洲市红三角包装印刷有限责任公司. 一种信息可视化的缓冲包装跌落冲击设计方法和系统: CN202311630814.9[P]. 2024-05-24.
- Zhuzhou Red Triangle Packaging and Printing Co., Ltd. Information-Visualized Cushion Package Drop Impact Design Method and System: CN202311630814.9[P]. 2024-05-24.