

# 有规分形几何下的可持续包装设计

姚惠, 高瞩, 任钟鸣

(上海工程技术大学, 上海 201620)

**摘要:** **目的** 降低包装制造能耗, 通过分形几何的运算方法, 设计可持续分形包装, 有效控制包装的循环使用生命周期, 达到可持续发展的目的。**方法** 分类研究欧式几何学、设计几何学、分形几何学之间的关系及发展趋势, 将可持续设计的 5R 原则所对应的设计方法与分形几何的特点进行对比研究, 在可持续系统中梳理有规分形包装研究要点, 解析有规分形的运算法则, 基于运算法则下概念设计及研究。**结论** 通过分形对于原形迭代与递归的运算法则及“分维增量”与“分维模块”的设计, 以及结构组合和拆解, 可以有效提高包装的循环使用率。

**关键词:** 有规分形几何; 可持续设计; 包装设计; 递归迭代

**中图分类号:** TB482 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2018)14-0059-06

**DOI:** 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.14.012

## Sustainable Packaging Design Based on the Fractal Structure

YAO Hui, GAO Zhu, REN Zhong-ming

(Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

**ABSTRACT:** It aims to reduce energy consumption of packaging manufacturing through the operation method of fractal geometry, to design sustainable fractal packaging, to effective control the packaging life cycle, to achieve the goal of sustainable development. It studies the relationship and development trend of Euclidean geometry, design geometry and fractal geometry. The five r principles of sustainable design are compared with the corresponding design methods and the characteristics of fractal geometry. In the sustainable system, the research points of the rules and fractal packing are combed. The algorithm of fractal algorithm based on the concept design and research is analyzed. By means of fractal base for iteration and recursion algorithm and fractal increment and the fractal dimension module design, through the structure combination and dismantling, can effectively improve packaging circulation utilization.

**KEY WORDS:** fractal geometry; sustainable design; packaging design; recursive & iteration

21 世纪以来, 互联网经济下的实体经济迅猛发展, 包装制造业呈现出井喷且粗放式发展。据 2017 年统计全国快递业务量为 313.5 亿件, 而其中包装废弃物的年排放总量在 1 亿左右, 占城市固定废弃物的 15%~20%, 且以 11% 速度环比增长, 且各种不可降解的包装材料也成为影响环境的重要因素。由此可见, 包装设计的可持续设计方法及应用需要从设计的源头来进行重新思考与探索, 用更自然的方法去优化包装在生产能耗、流通物理空间、包装使用生命周期

等相关问题。

## 1 背景及意义

### 1.1 分形几何的发展与设计的关联研究

“分形”本意表示对象的破碎与不规整。美籍法国数学家曼德尔布罗特在 1967 年《科学》杂志上发表对于英国海岸线长度的统计中出现自相似和分数维度相关研究中提出, “在没有任何参照物的前提下,

收稿日期: 2018-04-20

基金项目: 上海市设计学 IV 类高峰学科资助项目 (DC17019)

作者简介: 姚惠 (1984—), 男, 上海人, 硕士, 上海工程技术大学讲师, 主要从事视觉传达设计、产品设计、可持续包装设计研究。

高空拍摄的 100 公里海岸线对比放大 10 公里的海岸线两张图片，看上去会十分相似”的观点，证明了海岸线局部形态与整体形态的相似性的存在，由此提出了分形的概念。研究不断证明，分形的多重相似性不仅仅存在海岸线，脑电图、小麦根须、树冠、花椰菜、山川的相关形状与结构都是典型的分形。在印度宗教宇宙观影响下的万神殿建筑也存在分形的特点，建筑师将人类的意识比喻为果实，将树枝、森林、星球、太阳系、银河之间的关系进行循环相似连接，万神纪念塔的层叠结构自下而上的嵌套包围形式，也证明了分形的存在与特点<sup>[1]</sup>。

1975 年，曼德尔布罗特创立分形几何学。分形几何学的创立，不仅能发现自然中的自相似性结构，更能够在社会、功能、信息、能量等方面具备统计范畴内相似型研究模式的建立。将两千多年的欧几里德几何学对比 40 年分形几何学研究成果，人们不难发现，欧式几何学研究的点、线、面是基于逻辑体系中的不变量，如角度、面积、体积等，其计算方法更适应于人造物体。分形几何学中的递归、迭代生成的自相似、自放射性等特性，为研究不规则自然形态发展提供了完整的思路结构<sup>[2]</sup>。纵观人类造物过程，对于造物中的重构、改良等行为都是运用几何学原理反映自然形态规律的过程，其中对于“自然美”、“尺度美”设计活动来说，如何运用模数化视角精确“美”的数学变动规律，来进行造物是至关重要的，如德国美学家蔡辛的黄金分割线、柯布西耶模数化后的美学辅助线规律等，都是当代设计几何学中的重要篇章。相对欧式几何与分形几何，设计几何学是欧式的分支，更侧重设计应用层面与探寻美学规律在数理标准上的研究<sup>[3]</sup>，但是对自然形态下的美学规律与复杂的设计、艺术创作过程中相关规律、互联网信息时代下的设计规律等是无法运用传统几何原理去解释的，对比可以发现三者都存在着极大的差异性，见表 1。

表 1 欧式几何、分形几何、设计几何对比研究  
Tab.1 European geometry, fractal geometry, design geometry comparative study

	欧几里德几何学	分形几何学	设计几何学
发展时间	两千多年	40余年	150年
研究对象	人造物体中的点、线、面、体的变量	自然不规则形态（功能、信息、能量等）	人造美与数学精确巧妙变动的关系、美学形态规律
参考尺度	单位与比例尺度	无尺度、具有无限细节性	人与自然对比尺度
演算方式	平面几何、立体几何运算公式	迭代与递归的运算法则	柯布西耶辅助、黄金分割等

1.2 可持续设计发展与分形几何的关联研究

18 世纪 60 年代，从第一次工业革命开始，工业机械化生产大量产生，同时也伴随着大量粗放型制造发展模式，并产生了大量的环境污染与能源型消耗与浪费，以至于自然环境资源再生系统严重破坏，一些能源接近消亡。在 1987 年世界环境与发展委员会上，布伦特兰将可持续发展定义为：满足当代人的需求，而又不损害后代人满足其需求的能力的发展<sup>[4]</sup>。这一观点的提出，迅速将设计作为连接科学、社会、经济的重要纽带，将设计中涉及到产品生命周期、对环境影响、人的需求等元素提前考虑进设计环节中去，从而达到协调整个产品使用循环利用、无害排放、能源再生以及产品使用生命周期闭环再循环的目标。

在经过大量设计实践之后，人们逐渐清晰了可持续设计的基本原则，将“少量化设计（Reduce）、再利用设计（Recycle）、循环利用设计（Reuse）、再生资源设计（Resource）、设计再造（Remake）”5 个影响因素作为可持续设计的“5R”原则，从而衍生出相对应的可持续设计方向，如能源节能、结构创新、材料研发等，经过大量设计实践与总结，将可持续设计具体的方法进行归纳整理，目前诸如浓缩少量设计法则、折叠式设计法则、模块化设计法则、可替换设计法则都是相对成熟的可持续设计法则<sup>[5]</sup>。黄金分割线、网格透视画法、黄金根号矩形、柯布西耶的辅助线等设计几何方法，长期被设计师们用来去创建人、机、自然三者的和谐比例关系。然而，这种和谐的比例尺度，更多关注的是人的自身，并没有以自然的视角、以自然运作的法则进行设计思考；相对于传统几何学，分形几何的发现是对自然进化演算的数理描述，有助于人们去真正了解世界万物存于地球的可持续共生法则，从而以真正的“道法自然”的观念来突破传统几何思维惯性，将分形几何中的迭代、递归、嵌套等特性融入可持续设计。笔者做了简单对比分析，从设计思维特征与设计形式表象上来看，分形的特点与两者密切相关，见表 2。在可持续设计中应该有意地去将分形观念及其相关的东西进行融合尝试。

2 分形几何解析与可持续包装设计的关联研究

2.1 有规分形原则解析及可持续包装设计原则的关联研究

在分形几何分类中，依据自相似性的不同程度，将分形归纳为“有规分形”与“无规分形”。有规分形是指可以通过基础的数学模型来进行描述自相似性的分形，比如三分康托集、希尔宾斯基三角、科赫雪花等。无规分形是指多重自相似性的统计意义上的自然随机分形，特点是局部与整体在形态上有相似性，但是绝不重复。

表 2 可持续设计方法特征与分形几何特征的对比研究  
Tab.2 Characteristics of sustainable design method & characteristics of fractal geometry comparative analysis

5R设计原则	研究方向	可持续设计方法	分形几何特点	设计思维
Reduce	能源节能	微缩设计方法	迭代运算	
Reuse	结构创新	折叠设计 A模块设计 B可替换设计	A自相似性 (递归运算) B嵌套形式	以1个点（一次元），联想到多个点（二次元），再从多个点引申至更多点（三次元），三次元中思维过程找到交叉点，融合为一次元继续纵深引导 <sup>[6]</sup>
Recycle, Remake, Resource	材料研发	可持续材料设计 旧物改造设计	无限放大结构 且对称循环	

2.1.1 分形的维度与包装结构的关系

在欧式几何学里，通常把点设定为零维（没有长宽高），线是一维（只有长度没有高度），面是二维（有长度、宽度没有厚度），体是三维（有长宽厚度、有体积、有 6 个面，存在 3 个维度），不难发现在传统几何学里的的维度都是整数，具有强烈的“人造”特

性，而自然中的纬度都是分数，比如一条分形线的维度是介于 1~2 之间的比如 1.16 维，可以做个比方：线的纬度是 1 维，当把这条线在深度上旋转、扭曲、盘绕但是绝不交叉的时候，我们就很难去判断这根线在纬度上的数字表示。这种维度不为整数的特性，就是分形几何中最关键的要素——分维<sup>[7]</sup>，见图 1。

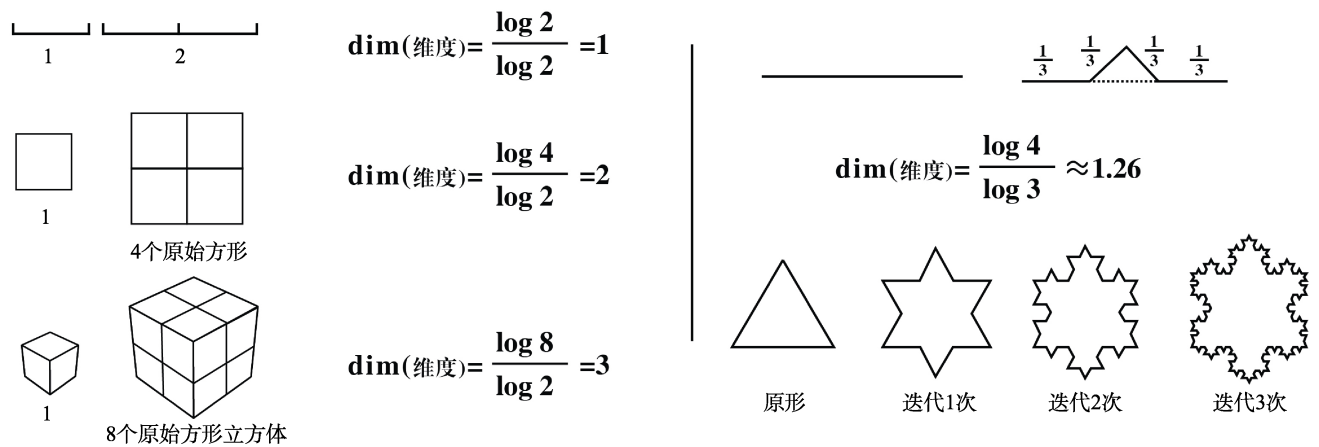


图 1 分形维度对比分析  
Fig.1 Fractal dimension comparison analysis

包装的维度一直被设计师控制在二维（结构）到三维（包装空间）的系统中，大多内包装结构会牺牲空间，利用几何造型保护产品，避免震动、冲击、摩擦，在拆除包装后丢弃（压扁二维）或者再利用（循环再利用三维）。由于材质与人为的关系，循环利用的生命周期也有一定限度，不符合可持续发展的要求<sup>[8]</sup>。对比分形几何中“分维”概念、分形计算方法、以及数

理关系的形体构造，可以探索基于分形数理原则下的可持续分维包装设计，这是一种介于二维与三维间正逆向互通的分形单元结构，通过结构性地组合与拆解，在包装使用过程中，利用分形结构进行组合或拆解，使其满足保护对象属性，进行运输、销售等活动，同时在包装使用完毕后，将分形包装单元体重构针对其他产品包装进行循环利用，见图 2。

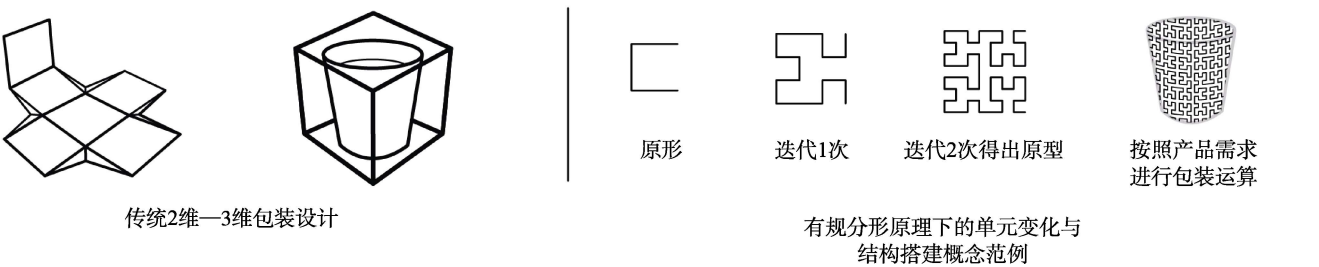


图 2 传统包装与分形包装对比  
Fig.2 Comparison of traditional packaging and fractal packaging

## 2.2 有规分形下的可持续包装设计要点

### 2.2.1 分形包装在可持续系统内的宏观应用分析

可持续设计的核心在于产品本身的生命周期模式、原材料加工与相关生产能耗、使用后污染排放三者间的关系, 如果可以有效控制“减少包装材料原料量的使用”、“使用后单元回收再利用”2 个阶段的输出, 那么就能有效形成包装使用生命周期闭环型的使用系统, 实现包装节能与包装结构的设计的进化, 从而颠覆性将包装的使用与材料生命周期无限衍生, 达到可持续设计的目的。在使用包装的过程中, 运输与销售是包装的主要功能, 如何将分形自相似模块化设计使两个流程互通, 以及分形包装中材料的再生与循环利用都是需要我们在本课题开始的时候需要思考的重点内容。

### 2.2.2 包装的不可持续现状与分形包装的关联

传统的包装设计将纸盒成型作为一种惯性的设计路径, 将包装的对象装入规整的空间, 从而进行运输与销售, 在使用后大部分的包装纸盒会被丢弃。包装(中小型)的空间大部分是被填充物以及保护产品的内包装所填满, 由于包装盒本身存放不便与各类环境因素, 大部分被作为垃圾丢弃进入垃圾场或回收中

心。随着互联网商品经济的刺激, 包装所产生的垃圾每天都在递增, 从环境角度观察只有加速污染。反观自然进化过程, 不论结构、形态、尺度、消亡、生长都是符合整个自然的运作规律。所以应运用自然的演算方法来革新传统包装设计思维模式。

不难发现, 基于有规分形的演算法则下的起始的数理原型, 都是简易的平面几何形, 通过迭代与递归的演算法则, 产生的结构与自然千百万年进化的结构几乎相同, 同时也可以将其顺向逆向往返演算, 将局部与整体有机组合, 形成自相似性, 这与可持续设计中模块化设计原则、可替换设计原则有着很大的相似度。针对以上两个观点和包装中不可持续的问题, 宏观梳理了有规分形下的可持续分形包装设计要点并对应了可持续生产系统: (1) 基于保护产品目的下的有规分形演算多元方程式开发及初始几何原型的开发, (2) 分形包装结构中整体与局部的模块化通用关系(拆分、组合、再利用)的设计, (3) 分形包装简易化设计及加工流程(原材料与加工能耗)的设计, (4) 分形包装 MET 分析矩阵对生命周期评估体系建立与使用的实验的设计与数据采集, (5) 分形包装材质的研发与应用, (6) 分形包装在互联网经济下的可持续消费行为研究, 见图 3。

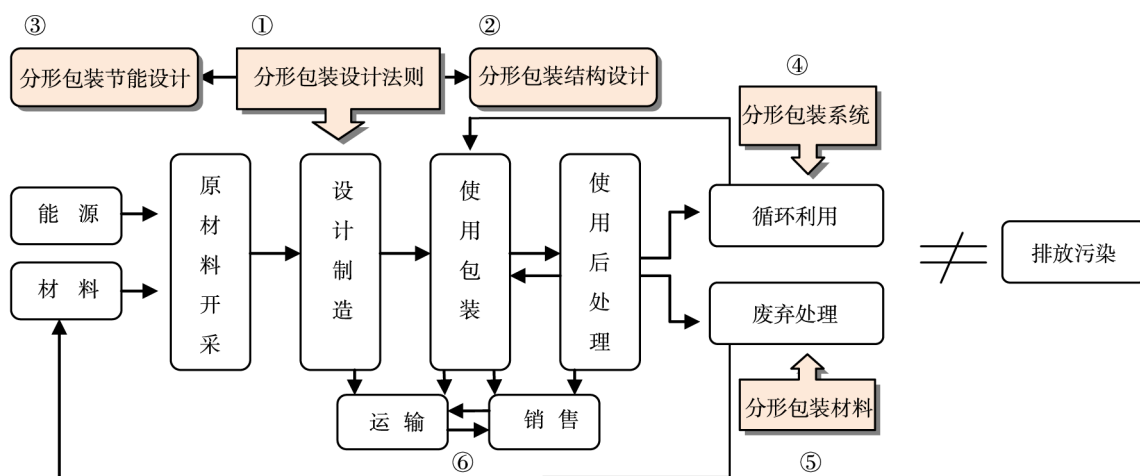


图 3 分形包装的研究在可持续发展中的应用点

Fig.3 The application of fractal packaging in sustainable development

## 3 基于有规分形几何包装概念设计探索

### 3.1 基于有轨分形迭代/递归运算法则的解析

#### 3.1.1 有规分形曲线的递归算法 (Koch 曲线)

在有规分形的算法上, 我们可以通过单位坐标的内的数理公式进行演算推导, 如 Koch 曲线; 在一条单位长度的线段上将其三等分, 并中间段换成一个去掉底边的等边三角形, 再使其每条直线上进行重复操作, 就可以得到 Koch 曲线的基本数理公式算法。将推导公式与坐标位置的变化参数编程, 可以非常直观地观察递归运算中的很多数理细节, 将自然中的的循

环往复无穷的算法, 进行量化处理<sup>[9-10]</sup>。

#### 3.1.2 FEPS 可持续分形包装概念设计

基于以上的递归运算法则, 依照包装的需求进行分形包装的原型运算, 笔者进行了演算实践, 见图 4。原形经过 3~4 次递归运算后, 所产生的图形都具备无限放大结构与自相似的模块化特性, 甚至可以通过折叠成为一个三维体, 完全可以基于这些基础分形多元方程式原形开发, 匹配对应产品进行数据归纳与整理, 初步形成一个以保护产品为基准的有规分形原型运算系统, 通过产品数据与分形几何的运算法则来演算出不同产品的分形包装结构。同时, 结合可持续设计的原则, 可以将



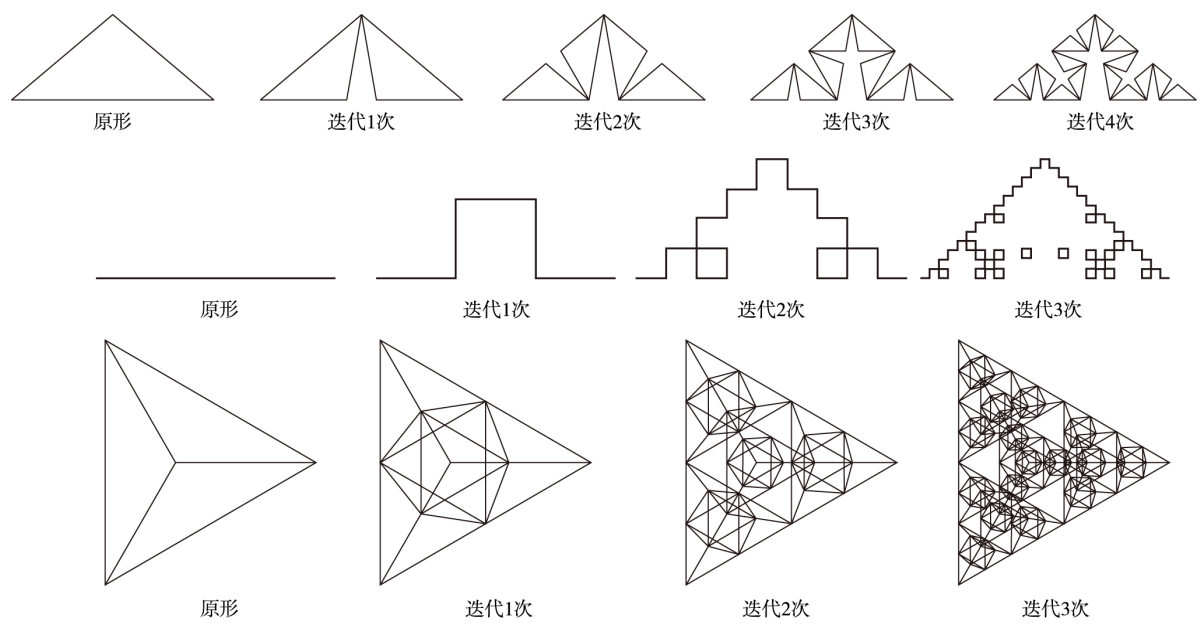


图 4 有规分形包装迭代运算实践  
Fig.4 The iterative operation practice of fractal packaging

生产能耗、结构、材料的相关变量增加进运算法则中，从而将包装生命周期的闭环融入设计初期<sup>[1]</sup>。

延续分形的运算法则，针对包装的需求在二维原形的基础上进行有目的地“分维增量”，并通过原形的迭代与递归，对结构的强弱进行演算，分别在包装单体的“分形模块”组合与组合间的分形生长做了概念包装设计探索。

“分形模块”设计：通过分形包装单体的组合与拆解，可以迅速地将分形包装按照产品的外形进行组合，在运输与销售完成后，可以继续将模块进行组合，或者存放，相比目前纸箱包装形式，其优势是显而易见的。在分形几何的计算方式下，模块的通用程度表现出的既能功能独立化也多相互多样化的特性，在模块组合的量上，分形包装都可以满足不同的人、机、环境、时间的不同的使用需求，见图 5。

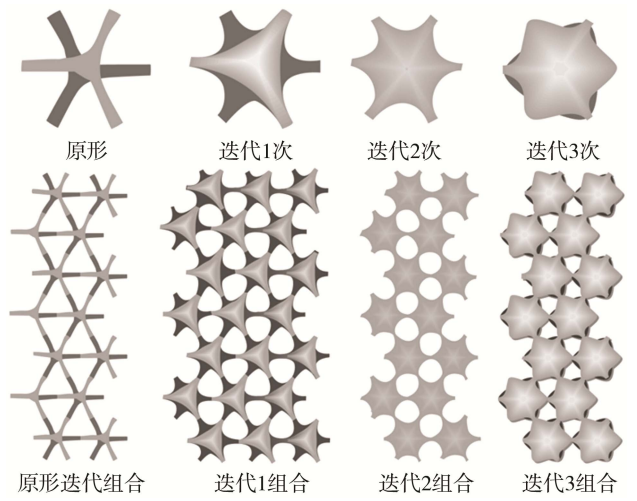


图 5 有规分形包装单元体概念设计  
Fig.5 Concept design of a fractal packaging unit

“分维增量”设计：基于二维原形的基础进行空间上的衍生增量，将 Z 轴继续迭代演算，依照包装的强弱程度，将“原形面”增量到“分形体”，通过运算将每个单元形成嵌套结构且自相似特征的个体，同时将单元体之间的衔接形态通过“非线性生长”运算法则，进行二次运算，融合分形包装单元体的每个部分见图 6。

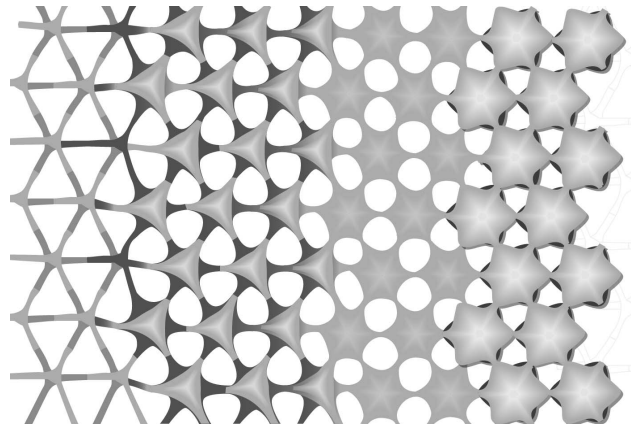


图 6 有规分形包装概念设计  
Fig.6 Conceptual design of orbital fractal packaging

#### 4 结语

分形几何的创立体现了数理美与自然美的有机融合，同样是人类探究自然形态结构和次序的工具，随着科学和设计的发展，越来越多学科开始交叉与融合。本文研究的有规分形下的可持续包装探索，正是建立在科学基础之上并融合可持续发展的设计研究行为，也是分形几何在包装设计领域与可持续设计领域中的全新探索。

## 参考文献:

- [1] 曹璐. 视觉艺术与几何学[D]. 北京: 中央美术学院, 2004.  
CAO Lu. Visual Arts and Geometry[D]. Beijing: China Central Academy of Fine Arts, 2004.
- [2] 郭亚旋. 分形图的美学价值及其设计应用研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2007.  
GUO Ya-ni. The Aesthetic Value of Fractal Graph and Its Application Research[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2007.
- [3] 贡布里希. 秩序感: 装饰艺术的心理学研究[M]. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1999.  
GOMBRIC H. Sense of Order: the Psychology of Decorative Art[M]. Changsha: Human Science & Technology Press, 1999.
- [4] 秦路芳. 可持续理念的持续性方法在产品中的应用[D]. 济南: 山东工艺美术学院, 2016.  
QING Lu-fang. The Application of Persistence Method in Product Design Based on the Ideas of Sustainable Development[D]. Jinan: Shandong University of Art & Design, 2016.
- [5] 孙慧敏. 产品设计的可持续性研究[D]. 西安: 西安美术学院, 2016.  
SUN Hui-min. The Sustainability Research of the Product Design[D]. Xi'an: Xi'an Academy of Fine Arts, 2016.
- [6] 王国栋, 宋魁彦. 分形理论对设计思维方法的启示初探[J]. 大舞台, 2011, 6(7): 171—172.  
WANG Guo-dong, SONG Kui-yan. The Revelation of the Fractal Theory to the Design Thinking Method[J]. Big Stage, 2011, 6(7): 171—172.
- [7] 李后强. 分形与分维[M]. 成都: 四川教育出版社, 1990.  
LI Hou-qiang. Deciphering Fractal & Fractal Dimension[M]. Chengdu: Sichuan Education press, 1990.
- [8] 丹尼森. 绿色包装设计[M]. 上海: 上海人民美术出版社, 2004.  
DENISON. Thinking Green Packaging Prototypes[M]. Shanghai: Shanghai People's Publishing House, 2004.
- [9] 王兴元. 分形几何学及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2016.  
WANG Xing-yuan. Fractal Geometry & Fractal Geometry Applications[M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [10] 李晨. 经典的分形算法[EB/OL]. (2014-10-07). <http://www.eechina.com/thread-133234-1-1.html>  
LI Chen. The Classic Fractal Algorithm[EB/OL]. (2014-10-07). <http://www.eechina.com/thread-133234-1-1.html>
- [11] 钟云飞. 分形艺术在包装上的应用研究[J]. 包装工程, 2003, 34(2): 67—69.  
ZHONG Yun-fei. Study on the Application of Fractal Art in Packaging[J]. Package Engineering, 2003, 34(2): 67—69.