

DOI: 10.13652/j.issn.1003-5788.2019.11.019

斜齿轮啮合位置点蚀损伤的力学特性分析

Mechanical characteristics analysis of face pitting damage on helical gear

吴丹¹ 张丽梅¹ 赵慧博² 齐兵² 路敏²

WU Dan¹ ZHANG Li-mei¹ ZHAO Hui-bo² QI Bing² LU Min²

(1. 北京工商大学材料与机械工程学院, 北京 100048;

2. 河北养元智汇饮品股份有限公司, 河北 衡水 053000)

(1. School of Materials Science and Mechanical Engineering, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China; 2. Hebei Yangyuan Zhihui Co., Ltd., Hengshui, Hebei 053000, China)

摘要:以高压均质机次级减速系统的斜齿轮为研究对象, 用 SolidWorks 建立模型并进行装配, 运用有限元软件 Workbench 设置齿轮啮合位置为面接触, 分析完好和损伤齿轮的力学特性, 并以主动轮转速、点蚀数目等为考察因素进行方差分析。结果表明: 转速、点蚀损伤情况对斜齿轮力学特性均有一定影响, 随着点蚀数目增加影响越来越显著; 同时考虑点蚀产生机理, 调整摩擦系数, 确定了摩擦和点蚀之间存在一定对应关系。

关键词:斜齿轮; 点蚀损伤; 力学特性; 接触; 摩擦系数

Abstract: In order to study the influence of face pitting damage on helical gear, the helical gears on the secondary deceleration system was taken as an object and the geometric model of gears were built and assembled by SolidWorks. Using the finite element software Workbench, the meshing position of gears set surface contact, and the mechanical properties of intact and damaged gears were analyzed. Next, the analyses of variance were done including the factors of the driving wheel speed and the number of pitting corrosion. The results showed that the rotational speed and pitting damage had a certain influence on the mechanical properties of the helical gear. With the increasing of the number of pitting corrosion, the influence was more and more significant. At the same time, considering the mechanism of pitting corrosion, the friction coefficient was adjusted and some correlation between friction and pitting corrosion was determined.

Keywords: helical gear; pitting corrosion damage; mechanical characteristics; contact; friction coefficient

基金项目:北京市教育委员会科研计划项目(编号: PXM2019_014213_000007, KM201910011002); 2019 年研究生科研能力提升计划项目资助

作者简介:吴丹, 女, 北京工商大学在读硕士研究生。

通信作者:张丽梅(1979—), 女, 北京工商大学教授, 博士。

E-mail: zhanglimei@btbu.edu.cn

收稿日期:2019-05-08

高压均质机是罐装食品生产中的常用设备, 其原理是通过柱塞在高压泵中的往复运动, 带动次级减速系统的斜齿轮和曲轴运转, 将物料输送至一级均值阀和二级乳化阀, 从而将液体物质或以液体为载体的固体颗粒超细化^[1]。由于运行平稳、低噪音的特点, 斜齿轮被广泛用于高速和重载情况下, 但在齿轮啮合时会产生轴向分力, 导致齿轮间摩擦力增大, 易于磨损。点蚀是一种常见的损伤情况, 齿轮在使用中会出现点蚀生长、齿面剥落、轮齿折断等现象, 一旦出现这些现象, 齿轮就容易发生故障, 给生产带来安全隐患。

近年来, 国内外学者在齿轮点蚀损伤方面进行了一些研究, 王正进等^[2]通过正交试验, 选出了最佳工艺参数, 并指出渗碳层深度比数值较大是造成齿轮点蚀的主要原因; 林锋等^[3]以风电齿轮箱第三级齿轮为例, 得到了不同点蚀直径、数目下齿轮的可靠度; Fukumasu 等^[4]研究了机械性能和残余应力对材料耐点蚀性的影响, 指出提高齿轮可靠度的设计变量; Chaari 等^[5]研究了点蚀缺陷对啮合刚度的影响, 并在时域和频域上对比了完好齿轮和损伤齿轮的动态响应。这些研究多集中在点蚀产生机理及发展过程, 而对运动中齿轮啮合处的力学特性研究较少。

常见的齿轮力学特性分析采用有限元方法, 如潘骏等^[6]运用有限元法模拟了齿轮初始裂纹扩展至点蚀的过程; 张占东等^[7]模拟了有不同数目点蚀缺陷的直齿圆柱齿轮, 分析了点蚀情况下齿面接触应力分布规律; 刘坤等^[8]通过 Ansys 分析了高压泵斜齿轮啮合处的变形和应力。在上述研究基础上, 试验拟以高压均质机次级减速系统斜齿轮为研究对象, 研究齿轮啮合处的力学性能, 以期为实际工程应用提供参考和借鉴。

1 装配模型和有限元模型建立

1.1 装配模型及参数

利用 SolidWorks 软件建立大、小齿轮的几何模型, 然

后将两个齿轮的分度圆进行相切配合,将齿轮的端面进行齿轮配合,比率为1:2。最后将曲轴、斜齿轮和凸轮进行连接,生成装配体,如图1所示。为节省计算时间,在

保证分析精度的基础上,保留一对啮合齿轮,如图2所示,其中小齿轮为主动轮,大齿轮为从动轮,几何参数如表1所示。

表1 斜齿轮几何参数

Table 1 Geometric parameters of helical gear

齿数	模数	螺旋方向	螺旋角/(°)	压力角/(°)	面宽/mm	标称轴直径/mm
30(主)	5	右手	30	20	30	30
60(从)	5	左手	30	20	30	65

1.2 有限元模型及参数

齿轮传动属于接触问题,在主、从动齿轮接触处设置面接触。其中从动轮为目标单元,主动轮为接触单元,摩擦系数为0.1。选用自动划分网格,如图3所示,节点数

为172 794,单元数为36 611。设置从动轮和主动轮的运动副类型为转动副,如图4所示。对主动轮设定转速分别为80,100,120 r/min。齿轮材料采用合金钢40Cr,设置各向同性,参数如表2所示。

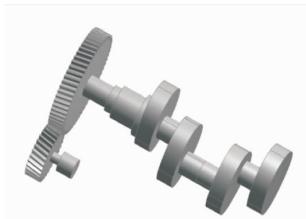


图1 装配体几何模型

Figure 1 Assembly geometric model

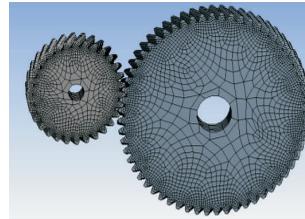


图3 有限元网格

Figure 3 Finite element mesh

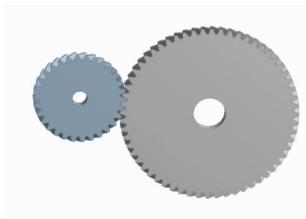


图2 斜齿轮模型

Figure 2 Helical gear model

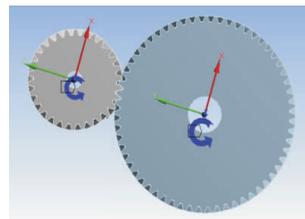


图4 边界条件

Figure 4 Boundary conditions

表2 材料属性

Table 2 Material properties

弹性模量/GPa	密度/(kg · m ⁻³)	泊松比	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	热膨胀系数/K ⁻¹
210	7 890	0.277	785	980	1.3E-005

2 斜齿轮力学特性分析

2.1 完好齿轮力学特性

对完好齿轮进行动力学分析,可得到其应力、应变分布如图5所示。啮合位置的应力、应变较大,因此重点对啮合位置进行分析,不同转速下完好齿轮啮合位置的应力、应变如图6、7所示。

从图5~7可以看出:①在齿轮啮合过程中,主要应力、应变集中在主、从动齿轮连接处;②从动轮接触位置的应力和应变较大,随着转速增加,两齿轮之间的相互作用力增加,当转速为100 r/min和120 r/min时,其应力

相对于80 r/min增加了26.3%和70.0%,应变增加了25.0%和69.6%。

2.2 斜齿轮点蚀的力学特性分析

点蚀可分为初期点蚀和扩展性点蚀,初期由于疲劳裂纹不断扩展,造成小块金属脱落,会形成不同形状的小凹坑;在初期点蚀的基础上,在两齿轮啮合冲击下,靠近节线位置会出现更多点蚀^[9]。基于此,采用小圆坑作为点蚀,主要考虑单点蚀损伤和多点蚀损伤对齿面应力和应变的影响。在主动轮啮合处设置半球体凹坑缺陷,缺陷直径为0.3 mm,数目分别为1和4,点蚀位置如图8、9所示。

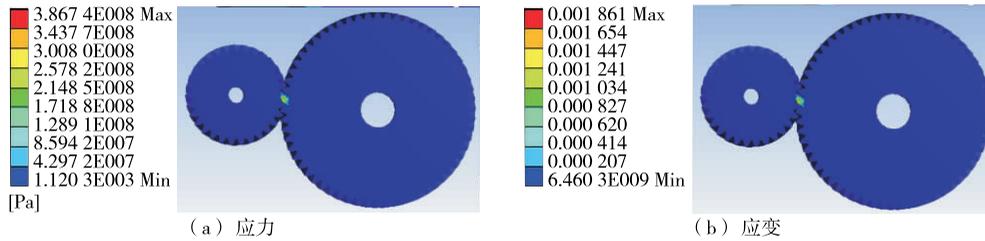


图 5 完好齿轮的应力、应变
Figure 5 Intact gears stress and strain

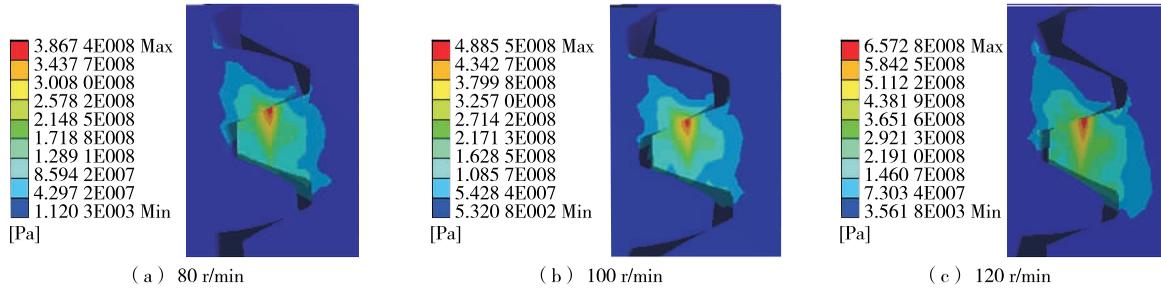


图 6 不同转速下啮合位置应力分布图
Figure 6 Stress distribution diagram of the meshing position at different speeds

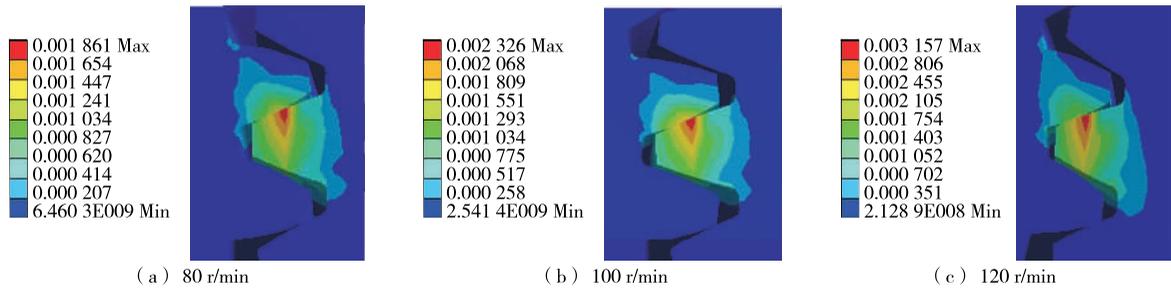


图 7 不同转速下啮合位置应变分布图
Figure 7 Strain distribution diagram of the meshing position at different speeds

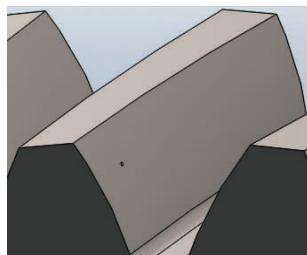


图 8 主动轮单点蚀位置
Figure 8 Pinion single pitting position

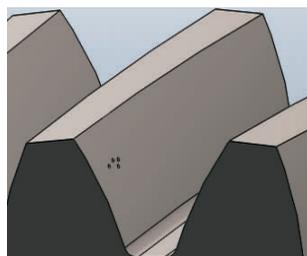


图 9 主动轮多点蚀位置
Figure 9 Pinion multi-pitting position

对齿轮啮合接触进行求解分析,以主动轮转速 80 r/min 为例,得到不同点蚀数目下的应力和应变如图 10、11 所示。不同转速下点蚀损伤的应力和应变如图 12、13 所示。

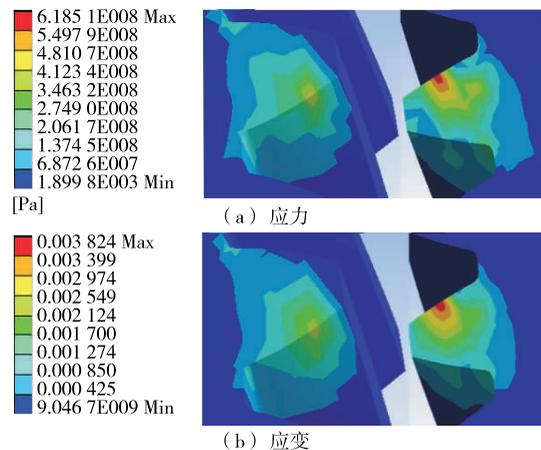


图 10 单点蚀的应力、应变分布图
Figure 10 Stress and strain distribution of single pitting

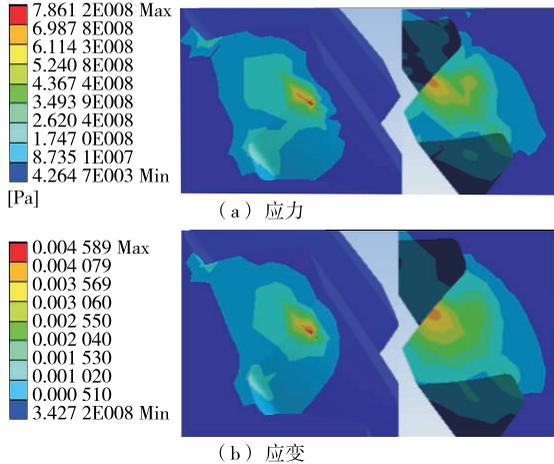


图 11 多点蚀的应力、应变分布图
Figure 11 Stress and strain distribution of multiple pitting

由图 10、11 可以看出:点蚀使齿面结构发生变化且相互接触面积变小,在从动轮的挤压和摩擦作用下,导致应力和应变均集中在点蚀附近区域。图 12、13 反映了齿轮应力和应变随转速和点蚀数目的变化规律,由于转速的增大,齿轮应力、应变显著增大。以上结果表明:完好齿轮的应力在许用应力的 35%~70%,当有点蚀损伤时,增加到 70%~99%,安全系数接近于 1,可靠度要求一般。

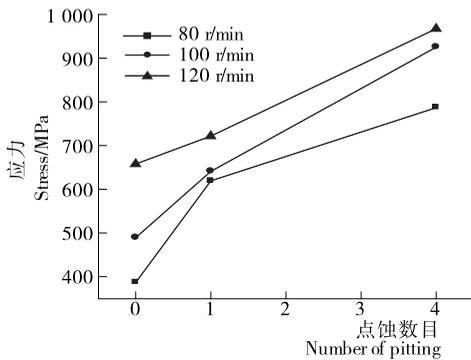


图 12 不同转速下点蚀的最大应力
Figure 12 Maximum stress of pitting at different speeds

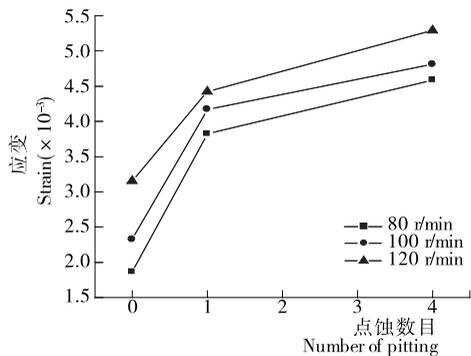


图 13 不同转速下点蚀的最大应变
Figure 13 Maximum strain of pitting at different speeds

在接触位置,1 个点蚀损伤的齿轮比完好齿轮应力高 29.2%,应变高 69.1%;4 个点蚀损伤的齿轮比完好齿轮应力高 74.8%,应变高 100%。

2.3 影响因素分析

2.3.1 极差分析 为了得到各因素对力学性能的影响,对图 12、13 的数据进行极差分析。以主动轮转速和点蚀数目为考察因素,分别取 3 个因素水平,以应力、应变为分析指标。根据文献[10]设 K_{jm} 为第 j 列因素第 m 水平所对应的结果指标和, \bar{K}_{jm} 为 K_{jm} 的平均值,根据 \bar{K}_{jm} 的大小可以判断第 j 列因素的优水平。 R_j 为第 j 列因素的极差,其表达式为:

$$R_j = \max(\bar{K}_{j1}, \bar{K}_{j2}, \dots, \bar{K}_{jm}) - \min(\bar{K}_{j1}, \bar{K}_{j2}, \dots, \bar{K}_{jm})$$

计算得到的齿轮应力与应变的极差如表 3 所示,主动轮转速和点蚀数目对齿轮的应力和应变影响均较大。根据极差的大小可知,点蚀损伤对齿轮力学性能的影响最大,应力为 54.44%,应变为 66.68%;转速对力学性能的影响较小,应力为 26.82%,应变为 22.45%。

表 3 极差分析
Table 3 Range analysis

指标	名称	转速	点蚀数目
应力/MPa	Max	782.10	892.95
	Min	597.12	510.86
	极差	184.98	382.09
应变	Max	0.004 291	0.004 897
	Min	0.003 425	0.002 448
	极差	0.000 866	0.002 449

2.3.2 方差分析 由于极差分析不能判断各因素是否为显著性影响因素,因此对其进行方差分析,利用 Matlab 软件对图 12、13 的数据进行双因素无交互作用方差分析,得到其 F 值和 P 值见表 4。

由表 4 可知,在应力和应变方面,点蚀数目的 P 值较小,且小于 0.01,是影响力学特性的高度显著影响因素,转速的显著性次之。同时可发现,转速和点蚀对应变的影响比应力要显著。

3 摩擦系数与点蚀损伤的关系

摩擦系数主要是接触材料、界面粘染物或表面润滑

表 4 方差分析
Table 4 Variance analysis

指标	转速		点蚀数目	
	F 值	P 值	F 值	P 值
应力	10.43	0.025 9	45.17	0.001 8
应变	14.12	0.015 4	116.79	0.000 3

剂的一个特征,根据现代摩擦理论,摩擦是接触表面原子之间的附着力引起的。实际中在接触应力、润滑油等反复作用下,啮合处齿轮会逐渐萌生微小裂纹,在齿面运动产生的摩擦力作用下,润滑油被挤入裂纹,从而形成高压油腔,导致裂纹扩展,最终形成点蚀。齿轮材质、工况、表面、润滑状态等均会对点蚀产生影响^[11],同时对齿面粗糙度也有影响,导致齿轮接触位置摩擦系数发生变化。鉴于此试验考虑了摩擦系数和点蚀之间的关系,在转速

80 r/min 的情况下,当摩擦系数分别为 0.10,0.20,0.25 时,分析啮合处的力学特性,并与不同点蚀数目下齿轮的力学特性进行对比,结果如表 5 所示。

从表 5 可以看出:摩擦系数为 0.20,0.25 时,应力增长率为 70.13%,102.03%;当点蚀数目为 1,4 时,应力增长速率为 59.93%,103.27%。摩擦系数与点蚀数目的插值曲线相同,即两者对应力的影响规律相同,相对误差不超过 6%,具有相关性。

表 5 不同摩擦系数和点蚀数目下的应力与应变

Table 5 Stress and strain under different friction coefficients and number of pitting

指标	摩擦系数			点蚀数目		
	0.10	0.20	0.25	0	1	4
应力/MPa	386.74	657.97	781.32	386.74	618.51	786.12
应变	0.001 861	0.003 133	0.003 721	0.001 861	0.003 824	0.004 589

4 结论

试验采用 SolidWorks 软件建模,基于有限元法,对斜齿轮啮合过程进行了数据仿真,并利用该方法研究了完好齿轮和有点蚀损伤的齿轮的力学特性。研究发现齿轮在正常啮合过程中,最大接触应力出现在节点附近,此时齿面最容易发生磨损,形成点蚀损伤。随着转速和点蚀数目的增加,齿轮的应力和应变均会增大,点蚀周围应力、应变值发生突变,最大应力和应变集中在点蚀区域。相较于转速,点蚀损伤对齿轮力学特性影响较大,其中应变受到的影响比应力要大。在啮合过程中,由于接触应力、润滑油等对表面粗糙度和点蚀产生影响,摩擦系数和点蚀数目对力学特性的影响存在线性相关性。

实际使用中,定期润滑养护决定了齿轮转动时的摩擦系数,进而影响齿面接触、啮合状况,摩擦系数的调整需要对使用中的设备进行定期试验测定,这方面有待进一步研究。

参考文献

- [1] 崔亚洲, 鲁永强, 王文磊. 高压均质机的原理及应用[J]. 中国乳品工业, 2007, 35(10): 55-58.
- [2] 王正进, 张露平. 发动机齿轮“点蚀”的正交试验研究[J]. 小型内燃机与车辆技术, 2012, 41(4): 14-16.

- [3] 林锋, 王威, 李剑敏. 疲劳点蚀下风电齿轮箱斜齿轮可靠度计算[J]. 机械传动, 2018, 42(9): 67-71, 111.
- [4] FUKUMASU N K, MACHADO G A A, SOUZA R M, et al. Stress analysis to improve pitting resistance in gear teeth[J]. Procedia CIRP, 2016, 45: 255-258.
- [5] CHAARI F, FAKHFAKH T, HADDAR M. Dynamic analysis of a planetary gear failure caused by tooth pitting and cracking[J]. Journal of Failure Analysis and Prevention, 2006, 6(2): 73-78.
- [6] 潘骏, 李旭平, 贺青川. 基于扩展有限元的齿轮微点蚀模拟分析[J]. 机械工程师, 2019(1): 32-35.
- [7] 张占东, 张广华. 点蚀缺陷对直齿圆柱齿轮齿面接触应力的影响研究[J]. 机械工程与自动化, 2017(5): 58-59.
- [8] 刘坤, 徐雷, 陈沛. 基于 ANSYS 的外啮合高压泵斜齿轮的接触应力及有限元模态分析[J]. 制造业自动化, 2017, 39(1): 4-7.
- [9] 程鹏. 行星齿轮点蚀故障刚度计算方法研究及动力学建模[D]. 成都: 电子科技大学, 2016: 32.
- [10] 姜晓帅, 李刚炎, 王平俊. 三缸发动机平衡系统弹性齿轮力学特性分析[J]. 机械制造与自动化, 2018, 47(5): 30-33.
- [11] ASLANTAŽ K, TAŽGETIREN S. A study of spur gear pitting formation and life prediction[J]. Wear, 2004, 257(11): 1 167-1 175.

(上接第 27 页)

- [24] 刘丽娅. 酪蛋白酸钠-多糖界面相互作用及其对乳液液稳定性的影响[D]. 广州: 华南理工大学, 2011: 58.
- [25] 罗垠, 陈野, 李鹏, 等. 挤压加工对豆渣中可溶性膳食纤维和豆渣物性的影响[J]. 天津科技大学学报, 2011, 26(2): 5-8.
- [26] 李季楠, 吴艳, 胡浩, 等. 食品纳米乳液的研究进展[J]. 食品与机械, 2019, 35(2): 217-225.
- [27] QUENNOUZ N, HASHMI S M, CHOI H S, et al. Rheology of cellulose nanofibrils in the presence of surfactants[J]. Soft Matter, 2016, 12: 157-164.
- [28] HU Ya, LUO Xiao-gang, WU Xia, et al. Cellulose gel disper-

sions: Fascinating green particles for the stabilization of oil/water Pickering emulsion[J]. Cellulose, 2017, 24: 207-217.

- [29] DICKINSON E. Biopolymer-based particles as stabilizing agents for emulsions and foams[J]. Food Hydrocolloids, 2017, 68: 219-231.
- [30] LI Qi, WANG Yi-xiang, WU Yue-han, et al. Flexible cellulose nanofibrils as novel Pickering stabilizers: The emulsifying property and packing behavior [J]. Food Hydrocolloids, 2019, 88: 180-189.
- [31] LI Mei-chun, WU Qing-lin, SONG Kun-lin, et al. Cellulose nanoparticles: Structure-morphology-rheology relationships[J]. ACS Sustainable Chemistry Engineering, 2015, 3: 821-832.