

轧制

## 外壁带凸台环件轧制成形规律

兰 箭<sup>1,2</sup>, 张思阳<sup>1,2</sup>, 郑继荣<sup>1</sup>, 杜 诺<sup>1</sup>, 万斯哲<sup>1</sup>

(1. 武汉理工大学 材料科学与工程学院, 湖北 武汉 430070; 2. 现代汽车零部件技术湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430070)

**摘要:** 提出了一种外壁带凸台环件的新成形工艺方法, 该方法实现了环件的连续成形, 既能完成环件的扩径, 还能在环件的外壁上成形高质量的凸台。利用 ABAQUS 有限元模拟软件, 建立了外壁带凸台环件轧制成形有限元模型, 并分析了轧制成形过程, 探究了轧制过程中几何形状、等效应变、凸台高度、轧制力的演变规律, 并通过试验验证了成形的可行性。结果表明: 成形过程分为扩径阶段与凸台长大阶段, 扩径阶段的变形与环件轧制相似, 凸台长大阶段的变形与挤压相似; 凸台长大阶段所需的轧制力远远大于扩径阶段, 并且与进给量相关; 凸台截面积对凸台高度的影响较大, 而凸台形状对凸台高度几乎没有影响。

**关键词:** 环件; 轧制; 几何形状; 等效应变; 凸台高度; 轧制力

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.01.020

**中图分类号:** TG306

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3940 (2023) 01-0144-05

## Rolling law of ring with bosses on outer wall

Lan Jian<sup>1,2</sup>, Zhang Siyang<sup>1,2</sup>, Zheng Jirong<sup>1</sup>, Du Nuo<sup>1</sup>, Wan Sizhe<sup>1</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

2. Hubei Key Laboratory of Modern Auto Parts Technology, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** A new forming process method for ring with bosses on outer wall was proposed, and the continuous forming of ring was realized, which not only completed the diameter expansion of ring, but also formed a high-quality bosses on the outer wall of ring. Then, the rolling finite element model of ring with bosses on outer wall was established by finite element simulation software ABAQUS, and the rolling process was analyzed. Furthermore, the evolution laws of geometry, equivalent strain, boss height and rolling force during the rolling process was explored, and the feasibility of forming was verified by experiments. The results show that the forming process can be divided into two stages of diameter enlargement stage and boss growing stage. The deformation in diameter enlargement stage is similar to ring rolling, and the deformation in boss growing stage is similar to extrusion. The rolling force required in the boss growing stage is much larger than that in the diameter enlargement stage, and it is related to the feeding amount. However, the cross-sectional area of boss has great influence on the boss height, but the boss shape has little influence on the boss height.

**Key words:** ring; rolling; geometry; equivalent strain; boss height; rolling force

随着航空航天事业的不断发展, 高性能的航空零部件的需求越来越大。航空零部件由于其服役场合的特殊性, 其材料、精度、性能等均具有极高的要求<sup>[1-2]</sup>。外壁带凸台薄壁环件作为机匣, 被广泛运用在航空发动机上。但是外壁带凸台薄壁环件的壁厚很小, 凸台又各自独立地分布在环件外壁上, 而且凸台形状复杂, 这些因素使环件成形困难。如何低成本、高效率地制造高性能外壁带凸台薄壁环件已经成为了航空零部件制造领域的前沿问题。环

件轧制是借助环件轧机和轧制孔型使环件产生连续的局部塑性变形, 进而实现壁厚减小、直径扩大、截面轮廓成形的塑性加工工艺<sup>[3]</sup>。目前, 大量学者对环件轧制成形工艺的研究主要集中在环件轧制理论<sup>[4-7]</sup>、工艺参数设计与优化<sup>[8-12]</sup>、加工过程智能化等方面。

前文提到的研究主要针对普通环件, 对于外壁带凸台环件不太适用: (1) 普通环件的轧制方法难以生产薄壁环件, 因为环件的周向没有完全约束, 圆度难以保证, 也十分容易毁坏环件<sup>[13-14]</sup>; (2) 普通环件轧制方法无法成形外壁上的凸台, 因为环件轧制是一个连续成形过程, 而凸台在外壁上各自独立分布, 导致无法直接成形。现有的方法是先通过

收稿日期: 2022-04-14; 修订日期: 2022-07-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51975439)

作者简介: 兰 箭 (1972-), 男, 博士, 教授

E-mail: jlan@whut.edu.cn

环件轧制工艺得到环坯，再通过加工中心加工出外壁上的凸台，其材料利用率低、效率不高。

鉴于此，本文提出一种外壁带凸台环件成形的新工艺方法，该方法实现了环件的连续成形，既能完成环件的扩径，还能在环件的外壁上成形高质量的凸台。

1 外壁带凸台环件轧制成形原理

成形原理如图 1 所示，其中  $v$  为芯辊进给速度， $\omega$  为驱动辊转速。根据目标零件的尺寸和凸台形状

确定成形瓣模的内部尺寸和成形孔的形状。驱动辊以恒定的转速带动成形瓣模转动，环件通过与成形瓣模之间的相互作用力和成形瓣模一起转动，同时驱动辊沿环件径向方向进给，整个成形过程分为扩径阶段和凸台长大阶段。扩径阶段，在成形瓣模与芯辊的作用下，环件主要发生环件壁厚减薄和扩径变形。凸台长大阶段，当环件外壁与成形瓣模内壁接触时，环件外径不再变大，开始进入凸台长大阶段。在成形瓣模的约束作用下，这一阶段发生的变形主要是材料从成形瓣模上的 4 个成形孔中挤出，成形出环件外壁上的凸台。

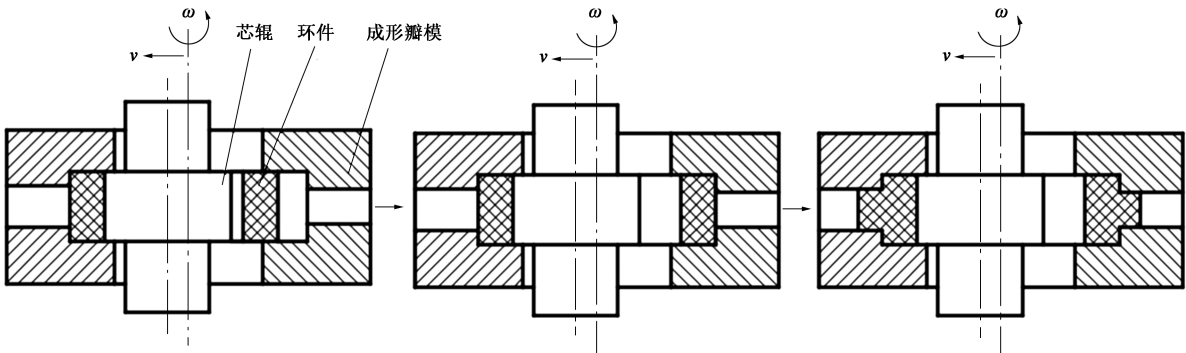


图 1 外壁带凸台环件轧制成形原理图

Fig. 1 Principle diagram of rolling for ring with bosses on outer wall

2 外壁带凸台环件轧制有限元模型

目标环件的外径为  $\Phi 170\text{ mm}$ 、内径为  $\Phi 105\text{ mm}$ 、高度为  $50\text{ mm}$ 。外壁上的凸台有 3 种形状，分别为圆形、三角形、矩形。其中圆形凸台的截面尺寸为  $\Phi 25$  和  $\Phi 30\text{ mm}$ ，三角形与矩形凸台的截面积与  $\Phi 30\text{ mm}$  圆形凸台保持一致。有限元模型如图 2 所

示。环件的初始温度为  $470\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，成形瓣模与芯辊的预热温度为  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。芯辊和成形瓣模设置为刚体，将运动简化为成形瓣模在成形过程中绕自身轴线旋转，芯辊沿环件径向进给，进给速度曲线如图 3 所示。环坯设置为变形体，环坯材料选用 2219 铝合金，环坯网格选用八节点六面体 C3D8RT 网格，网格数量控制在 50000 左右。成形瓣模的网格类型设置为离散刚体网格，为了避免计算出错和提

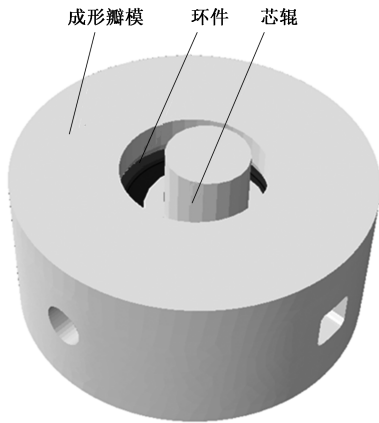


图 2 外壁带凸台环件轧制成形有限元模型

Fig. 2 Finite element model of rolling for ring with bosses on outer wall

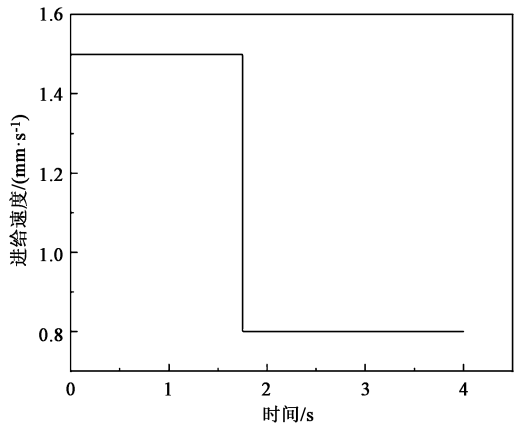


图 3 芯辊进给速度曲线

Fig. 3 Feeding speed curve of mandrel

高计算效率，在成形孔入口附近进行局部网格细化，网格数量设置为 4000~5000，其他模拟参数如表 1 所示。

表 1 外壁带凸台环件轧制成形有限元模拟参数  
Table 1 Finite element simulation parameters of rolling for ring with bosses on outer wall

参数	数值
进给量/mm	4
成形瓣模转速/(r·s <sup>-1</sup> )	0.5
成形瓣模外径/mm	Φ260
芯辊直径/mm	Φ90
环件与芯辊的摩擦因数	0.1
环件与成形瓣模的摩擦因数	0.4

3 模拟结果分析

3.1 环件几何形状变化过程

图 4 为环件在轧制成形过程中几何形状的变化过程。0~1.75 s 为扩径阶段，在这个阶段成形瓣模在环件的径向没有约束，只在环件的高度方向起约束作用，所以，在轧制过程中环件会有轻微的抖动。但是，随着环件的外径越来越大，环件与成形瓣模的贴合程度越来越高，轧制过程越来越稳定，当环件外径与成形瓣模内径一致时，扩径阶段结束。1.75~4.00 s 为凸台长大阶段，环件外壁的凸台起到钉扎的作用，环件与成形瓣模一起旋转，随着驱动辊的不断进给，材料不断流入成形孔中，凸台高度越来越高。当凸台高度达到预期要求时，整个成形过程结束。

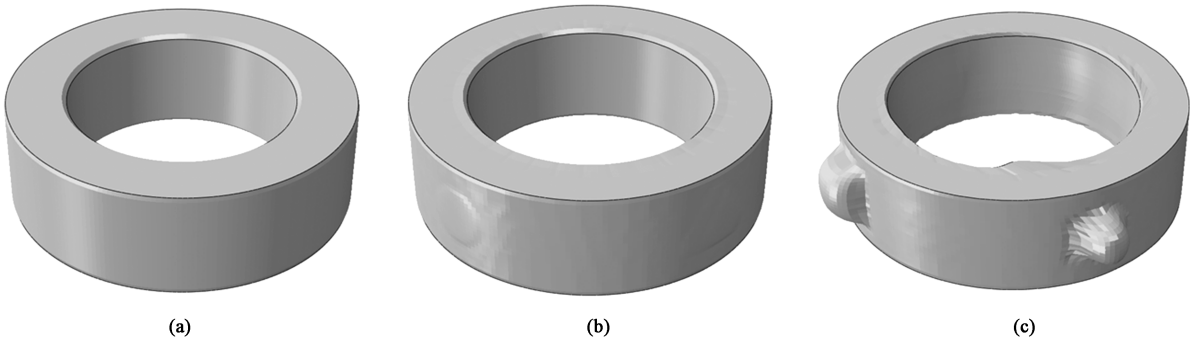


图 4 环件成形过程不同时刻的几何形状变化  
(a) 0 s (b) 1.75 s (c) 4.00 s

Fig. 4 Geometry changes of ring during different periods in forming process

3.2 等效应变变化

图 5 为环件成形过程中不同时刻的等效应变分布图。在扩径阶段，由于芯辊和环件的接触面积较小，环件内壁相较于外壁受到更大应力，所以，环件上产生了明显的应变分层现象，内壁的等效应变较

大，外壁的等效应变较小。同时，在环件内壁上端和下端各有一块等效应变较大的区域，这是因为此处为芯辊与成形瓣模的交界处，容易产生应力集中。在凸台长大阶段，当芯辊处于成形孔之间时，材料倾向于汇聚在芯辊前端，导致内壁的等效应变较大。

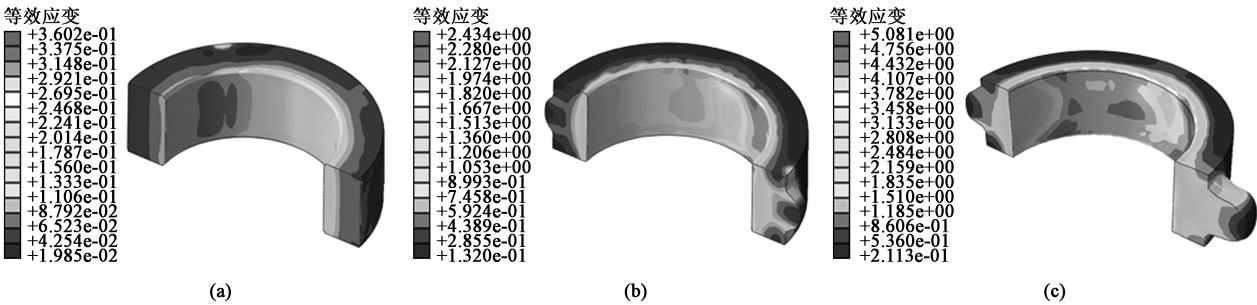


图 5 环件成形过程不同时刻的等效应变分布  
(a) 1 s (b) 3 s (c) 4 s

Fig. 5 Equivalent strain distributions of ring during different periods in forming process

当芯辊靠近成形孔时, 材料更倾向于填充至成形孔, 所以内壁的等效应变较小。凸台上的等效应变分布与材料挤压时的等效应变分布相似, 凸台外壁的等效应变较大, 而芯部的等效应变较小。

### 3.3 轧制力分析

如图6所示, 在整个轧制过程中, 轧制力在扩径和凸台长大阶段有较大的差异。在环件的扩径阶段, 由于环件未与成形瓣模完全贴合, 所以在轧制过程中, 材料在周向无约束, 可以自由流动, 轧制力比较小, 在100 kN左右。在环件与成形瓣模贴合的瞬间, 转为凸台长大阶段, 变形方式由环件轧制变为挤压, 环件受到成形瓣模的完全约束, 所以, 轧制力随着进给量的增加而迅速增加。在凸台长大阶段, 环件轧制力呈现明显波动。这是因为: 当芯辊处于两个成形孔之间时, 材料只能堆积在芯辊前端, 轧制力变大; 当芯辊正对成形孔时, 材料能顺利向成形孔中填充, 轧制力变小。

### 3.4 凸台高度变化

凸台高度随时间的变化曲线如图7所示。图7a

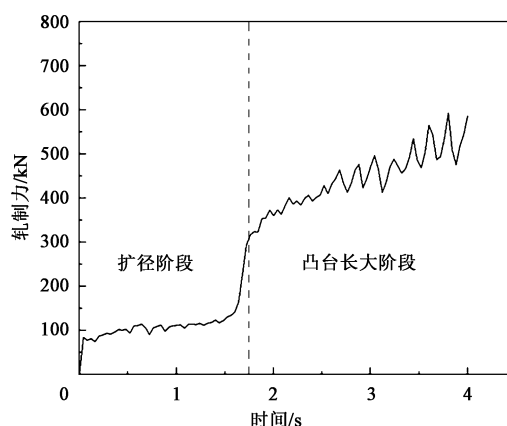


图6 轧制力随时间的变化曲线

Fig. 6 Variation curve of rolling force with time

表明凸台高度的变化与形状的关系比较小, 形状不同的3个凸台在成形过程中的高度变化相似。图7b表明凸台高度的变化与凸台截面积的关系较大, 因为截面积越小, 每个成形周期向成形孔中填充材料的时间越少, 流入成形孔的材料减少, 导致凸台高度不足。

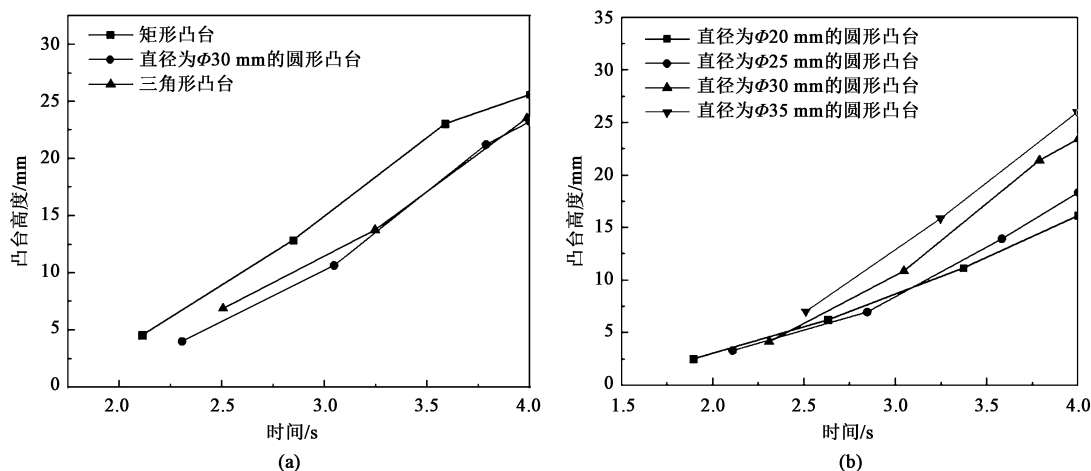


图7 凸台高度随时间的变化曲线

(a) 凸台形状不同, 截面积相同 (b) 凸台形状相同, 截面积不同

Fig. 7 Change curves of boss height with time

(a) Bosses with different shapes and same cross-sectional area (b) Bosses with same shape and different cross-sectional areas

### 3.5 试验验证

利用铅作为环件的材料进行试验, 验证新工艺成形的可行性, 试验中的进给量为4 mm, 轧制后的成品如图8所示, 从结果可以看到, 4个凸台形状基本成形。图9显示了试验和模拟中的凸台高度对比情况, 可以看到, 两者的高度比较接近, 凸台高度最大相差10%。综上证明, 提出的轧制新工艺是合理、可行的。

## 4 结论

(1) 整个成形过程分为两个阶段, 分别为扩径阶段和凸台长大阶段, 扩径阶段的形变与环件轧制相似, 凸台长大阶段的形变与挤压相似。

(2) 凸台长大阶段的轧制力要比扩径阶段大很多, 而且在凸台长大阶段, 随着进给量的增加, 轧





图 8 轧制成品

Fig. 8 Finished product after rolling

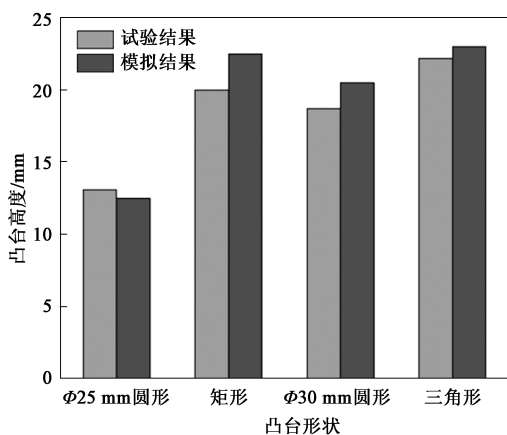


图 9 试验和模拟结果比较

Fig. 9 Comparison between experiment and simulation results

制力增长显著, 所以, 在工艺设计中需要注意机器吨位与进给量相匹配。

(3) 凸台形状对凸台高度的影响不大, 但是凸台截面积对凸台高度的影响很大。在条件允许的情况下, 选用更大截面积的凸台, 凸台的成形效果更好。

(4) 在模拟和试验中, 均能顺利成形出不同形状的凸台, 凸台高度也能达到预期, 证明所提出的新工艺是合理、可行的。

#### 参考文献:

- [1] 华林, 黄兴高, 朱春东. 环件轧制理论和技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.  
Hua L, Huang X G, Zhu C D. Ring Rolling Theory and Technology [M]. Beijing: China Machine Press, 2001.
- [2] 齐会萍, 李永堂, 华林. 环形零件辗扩成形工艺研究现状与发展趋势 [J]. 机械工程学报, 2014, 50 (14): 75-80.  
Qi H P, Li Y T, Hua L, et al. Research status and developing trends on the rolling forming process of ring part [J]. Journal of

- Mechanical Engineering, 2014, 50 (14): 75-80.
- [3] 黄天佑. 材料加工工艺 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.  
Huang T Y. Material Processing Technology [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.
- [4] Hua L, Qian D S, Pan L B. Deformation behaviors and conditions in L-section profile cold ring rolling [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209: 5087-96.
- [5] Quagliato L, Berti G A, Kim D, et al. Slip line model for forces estimation in the radial-axial ring rolling process [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2018, 138-139: 17-33.
- [6] Guo L, Yang H. Towards a steady forming condition for radial-axial ring rolling [J]. International Journal of Mechanical Sciences 2011, 53: 286-99.
- [7] Moon H K, Lee M C, Joun M S. Predicting polygonal-shaped defects during hot ring rolling using a rigid-viscoplastic finite element method [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2008, 50: 306-14.
- [8] 龚小涛, 杨帆. 驱动辊转速对环件轧制工艺影响规律研究 [J]. 轻合金加工技术, 2012, 40 (5): 47-52.  
Gong X T, Yang F. Effect of driving roll rotation speed on rolling process of ring [J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2012, 40 (5): 47-52.
- [9] 马君慧, 吴运新, 龚海, 等. 基于响应面法的异形截面环件轧制宏观成形缺陷的分析与优化 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (9): 135-144.  
Ma J H, Wu Y X, Gong H, et al. Analysis and optimization on macroscopic forming defect for profiled section ring rolling based on response surface method [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (9): 135-144.
- [10] 王志军, 付建华, 齐会萍. 异形环件多步辗扩模拟 [J]. 精密成形工程, 2016, 8 (6): 15-20.  
Wang Z J, Fu J H, Qi H P, et al. Multi-step simulation of expanding exhibition profiled ring [J]. Netshape Forming Engineering, 2016, 8 (6): 15-20.
- [11] 于华民, 董方, 吴运新, 等. 大型铝合金 C 形截面环轧制过程数值模拟和轧制区成形规律分析 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (11): 197-206.  
Yu H M, Dong F, Wu Y X, et al. Numerical simulation on rolling process and analysis on rolling zone forming law for large aluminum alloy C-shaped cross-section ring [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (11): 197-206.
- [12] 杨智皓, 路晓辉, 兰箭, 等. 环件轧制多尺度数值模拟研究进展 [J]. 塑性工程学报, 2022, 29 (3): 1-12.  
Yang Z H, Lu X H, Lan J, et al. Research progress in multi-scale numerical simulation of ring rolling [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 29 (3): 1-12.
- [13] Han X, Hua L, Zhou G, et al. FE simulation and experimental research on cylindrical ring rolling [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214: 1245-58.
- [14] Han X, Hua L, Zhou G, et al. An innovative eccentric ring rolling method for fabricating eccentric rings [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2017, 120: 120-35.