

碳纤维增强树脂基复合材料钻孔技术研究进展

刘泉鹏,李树健,周柏健,马继英

湖南科技大学

摘要: 碳纤维增强树脂基复合材料(CFRP)因性能优异,在航空航天领域的应用越加广泛,对其二次成形加工质量要求越来越高。本文综述了近年来碳纤维复合材料切削机理与钻孔工艺方法、刀具磨损机理、钻孔缺陷和损伤产生机理及其控制等方面的研究现状和进展,分析了存在的问题和新的挑战,并对 CFRP 钻孔技术的研究进行了展望。

关键词: CFRP;数值模拟;刀具技术;制孔质量;钻削工艺

中图分类号: TG52;TH16;TB332

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.1000-7008.2019.01.001

Research Progress of Drilling Technology for Carbon Fiber Reinforced Plastic

Liu Xiaopeng, Li Shujian, Zhou Baijian, Ma Jiying

Abstract: Carbon fiber reinforced plastics (CFRP) has been widely used in aerospace industry due to its excellent properties, and its secondary forming quality is required to be higher and higher. In this paper, the research status and progress of cutting mechanism and drilling technology, tool wear mechanism, drilling defect and damage mechanism and control of carbon fiber reinforced plastics in recent years are reviewed, the existing problems and new challenges are analyzed. Finally, the prospect of CFRP drilling technology is discussed.

Keywords: CFRP; numerical simulation; tool technology; hole quality; drilling technology

1 引言

在过去的几十年中,各种工业(如飞机、航天器、汽车、船舶、化学加工设备和体育用品)对高性能、轻质结构的需求不断增加,刺激了碳纤维增强树脂基复合材料(Carbon Fiber Reinforced Plastics, CFRP)的强劲发展。当前,大型飞机机体材料正以复合材料取代铝合金为主要材料,50wt.%复合材料用量是未来飞机的起点^[1]。通常,机械钻削加工是复合材料层合板零件的最终加工过程。但是,由于低钻削效率和不希望的钻削分层,复合材料层合板是公认的难加工材料。因此亟需对 CFRP 切削机理、刀具材料和结构、加工工艺等基础理论进行深入的研究^[2]。

制孔是 CFRP 构件装配和连接中必不可少的加工环节。当前,复合材料构件的制孔主要采用切削加工技术和特种加工技术。特种加工技术包括电火花加工技术^[3]、激光打孔技术^[4]、超声打孔技术^[5]和高压水射流技术等。特种加工技术采用非机械能去除被加工材料的余量,加工过程受力很小,无机械加工变形,主要用于加工小孔、异形孔和微孔。由于飞机零件尺寸较大的特点,现有的特种加工设备不

能满足飞机装配连接钻孔的要求,因此,在飞机上的连接孔加工主要采用机械的切削加工技术。钻孔是在工件材料上加工圆孔最常用的切削方法,也是复合材料制孔中最常见的加工方法^[6,7]。

由于复合材料在制孔过程中产生损伤(如分层、纤维拔出等)大大降低了构件的抗疲劳强度,从而降低了连接结构的使用寿命^[1]。本文综述了国内外复合材料层合板钻削的最新研究进展,主要包括 CFRP 切削机理研究、数值模拟技术、制孔刀具技术以及孔质量控制方法,并介绍了复合材料层合板的钻削技术。

2 CFRP 切削机理与数值模拟技术

CFRP 复合材料的各向异性和非均匀性使其与金属及其合金的钻削在许多方面存在显著差异^[8],因此 CFRP 的钻削加工成为切削加工领域的新挑战。Wern C. W. 等^[9]对纤维增强塑料(FRPs)切削过程中的应力场进行了光弹性研究,测量了加工过程中的切削力,并将其用于应力场分析,已加工表面的纤维表面形貌表明,纤维是通过剪切和拉伸断裂加工的;当纤维向刀具倾斜时,纤维通过剪切和弯曲而断裂。此外,观察到纤维基体脱粘的最大值发生在纤维方向角为 45°时,因此纤维取向对切削力和应力有很大影响。为了探求 CFRP 切削加工切屑的

形成及其对表面粗糙度的影响规律, Robert Voss 等^[10]采用快速落刀装置正交切削单向 CFRP 复合材料,研究不同纤维方向的切屑形成及其形态与纤维方向角之间的关系和变化规律,研究表明,对于 CFRP 层板,纤维铺设方向直接影响切屑形态及其表面粗糙度;Niu Bin 等^[11]基于微观力学模型研究切削 CFRP 单向板的材料去除机理,并建立了从微观到宏观的切削力预测模型;陈明等^[12]采用直角自由切削试验切削 T800 单向层合板,研究了不同纤维方向角的切削力和切削热,随后采用三尖钻和八面钻钻削 CFRP 层合板,研究了两种钻头钻削过程中切削力、扭矩和切削温度的变化规律及其对钻削缺陷形成的影响,并对孔壁加工表面进行分析。

由于 CFRP 复合材料自身的多尺度特征,其在力学载荷作用下的结构响应(如应力、应变以及损伤失效过程)也表现出较强的多尺度特征,与传统的金属切削相比,其材料去除过程复杂。因此,针对 CFRP 单向层合板钻削机理与制孔缺陷形成机理的研究,不能简单地套用经典金属切削理论,也不能片面地在某一个尺度下进行研究。

近年来,传统切削仿真在模拟各向异性复合材料纤维断裂等缺陷时难以精准实现这一问题日益凸显,新的 CFRP 切削加工数值模拟技术开始发展,Calzada K. A. 等^[13]建立了一种基于微观结构的 CFRP 复合材料加工的有限元模型,引入了一种新的界面建模方法,使用连续单元对材料界面进行建模,并允许其在拉伸或压缩过程中发生失效。该模型能够描述整个切屑形成过程中发生的纤维断裂模式,研究了纤维取向 0° 、 45° 、 90° 和 135° 时切屑中的纤维断裂特征及切削力。同时,CFRP 钻削加工的三维数值模拟技术正在缓慢发展,Phadnis V. A. 等^[14]通过实验和数值计算,研究了切削参数对钻削轴向力和扭矩的影响。针对复合材料层合板在钻头—工件界面处的复杂运动学问题,建立了独特的三维有限元模型。采用内聚区单元模拟复合材料中的层间分层,利用 X 射线微计算机断层成像技术对钻削损伤进行检测,结果对比可知表面数值模型与实验一致性很好。因此,该模型可用于预测 CFRP 复合材料的最佳钻削参数。Isbilir O. 和 Ghassemieh E.^[15,16]建立了 CFRP 复合材料的三维钻削有限元模型,该模型以 Hashin 失效理论为基础,采用粘结接触区的层间脱粘模型,对比了多种阶梯钻和麻花钻的钻削性能,证明了该模型可用于钻头几何结构优化的可行性。

复合材料二维正交切削数值模拟建模主要有三种方法:细观力学分析法、宏观等效均质法(EHM)和这两种方法的结合^[17]。细观力学法和宏观等效均质法(EHM)各有优缺点^[18]。G. V. G. Rao 等^[19,20]将细观力学法和 EHM 法相结合建模进行二维正交切削模拟,研究了纤维方向对切削力、切屑形成的影响以及对纤维的损伤程度、基体损伤和剥离的影响。随着微纳制造技术的发展,多尺度分析方法在切削过程数值模拟得到了应用^[21,22]。多尺度分析方法是考虑空间和时间的跨尺度与跨层次特征并将相关尺度耦合的新方法,是求解各种复杂的计算材料科学和工程问题的有效方法和技术^[23]。复合材料是指由两种或两种以上的具有不同物理、化学性质的材料,以微观、介观或宏观等不同的结构与层次,以复杂的空间组合而形成的一个多相材料系统。针对复合材料结构的力学性能模拟问题,多尺度分析方法相当有效^[24]。图 1 是复合材料损伤多尺度建模的示意图^[17]。

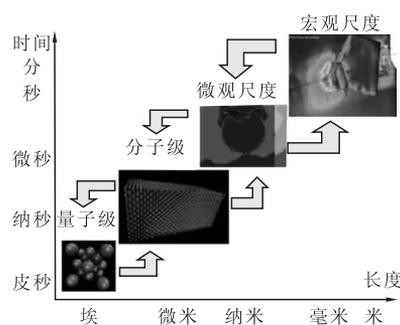


图 1 复合材料损伤多尺度建模

3 CFRP 制孔刀具技术

制孔加工是 CFRP 二次加工中的重要一环,但是,CFRP 单向层合板特有的高硬度、各向异性以及低层间应力等阻碍了 CFRP 制孔加工技术的发展。在 CFRP 层合板钻削过程中,分层损伤被认为是主要的制孔缺陷。据报道,在飞机制造领域的最终装配环节中,由于分层损伤导致含有 CFRP 叠层板的连接失效高达 60%,因而产生的损失也是巨大的^[25]。而研究表明,CFRP 层合板钻削过程中轴向力是引起分层损伤的主要因素^[26],钻削轴向力的影响因素很多,如刀具材料与几何结构、钻削参数和冷却液等,但是刀具几何结构对其影响最大^[27]。因此,要实现 CFRP 复合材料的高效精密制孔,必须提高刀具材料性能,改良刀具几何结构,获得可靠性高、使用寿命长的高性能制孔工具。刘洋等^[28]对双锋角钻头进行结构优化来提高加工质量。Jain

S.^[29]发现横刃宽度是影响轴向力的最主要因素,而刃口数量的增加可以减少最大轴向力。因此,“以磨代钻”这类多刃加工方式被引入CFRP的制孔加工,如鲍永杰等^[30]采用电镀金刚石套料钻钻削CFRP复合材料,同样,徐九华等^[31]将钎焊金刚石套料钻用于CFRP制孔中。研究表明,金刚石套料钻钻削CFRP时能获得较小的轴向力和较好的钻削质量,更适用于CFRP的加工。贾振元等^[32]为了研究钻头几何形状对轴向和出口分层的影响,采用4种不同的钻头钻削T800复合材料,实验结果表明,钻出阶段的轴向力降低速率越大,分层因子越大。Tsao C. C.等^[26,33]研究了麻花钻、锯钻(Sawdrill)、空心钻(Core drill)、分步钻(Step drill)等钻孔过程对纤维增强型材料分层缺陷的影响以及轴向力对材料分层缺陷的影响。Feito N.等^[34,35]通过仿真和实验分析,对比了阶梯钻和麻花钻的钻削特性,结果表明,阶梯钻在低速进给速度下能得到较低的推力和脱层系数。Xinyi Qiu等^[36,37]基于临界分层力和孔侧壁质量优化了阶梯钻第一、二钻削阶段的直径比值,在所用实验条件下比值为0.3-0.75较好。Jia Zhenyuan等^[38]提出了一种新型的钻头结构来改变出口的切削环境,结果可以有效减少出口损伤。Qiu Xinyi^[39]等在分析双锋角钻头、三尖二刃钻和匕首的优缺点后,设计了一种可以有效减少切削力和出口损伤的复合钻头。

钻削分层和刀具磨损已成CFRP钻削加工中最具挑战性的两大难题。改良刀具材料、优化几何形状是降低钻削损伤、实现低缺陷制孔的有效途径之一,同时也是提高刀具寿命的有效方法。新一代高模量CFRP的出现和应用对制孔工具提出更高要求,尤其在制孔环境更为复杂的CFRP/金属叠层结构时更为突出。

4 CFRP制孔质量控制方法

CFRP层合板在制孔过程中易产生毛刺、分层、烧蚀等加工缺陷,严重影响了连接结构的强度和疲劳寿命。S. R. Karnik等^[6]研究了CFRP平板钻削入口处钻削工艺参数和分层行为间的关系。C. C. Tsao等^[40]综合分析了麻花钻钻削碳纤维复合材料的钻头磨损与轴向力和钻削分层的关系,通过在不同主轴转速和进给速度条件下的磨损实验,得出磨损率越高轴向力越大,分层越易于发生的结论。Paulo Davim等^[41]基于Taguchi方法建立了钻孔实验计划,研究了CFRP薄板在特殊的切削压力作用

下的切削速度、进给速度与材料分层的关系。Bonnet C.等^[42]研究了钻削力、分层损伤和纤维方向之间的关联关系,给出了最大钻削力出现的纤维方向,建立了分层损伤与纤维方向之间的关系模型。Girof F.等^[43]研究了钻削力沿主切削刃和横刃的分布规律,建立了钻削CFRP分层模型。张厚江等^[44]研究了切削参数对分层缺陷、钻孔出口处撕裂和起毛缺陷的影响。孙路华等^[45]研究了高速钻削条件下刀具、转速、进给量、钻孔个数、材料厚度等钻削参数对轴向力的影响,并研究了材料厚度、转速、进给、轴向力与刀具磨损之间的关系。在CFRP中,碳纤维和环氧树脂的热膨胀系数有很大差别,钻孔过程中形成的温度场梯度很大,导致热应力的产生,恶化加工质量,严重情况下产生烧蚀缺陷。鲍永杰等^[46]针对金刚石磨料刀具建立了钻削温度场模型,Li N. Y.等^[47]研究了光纤光栅测温技术及切削温度对钻孔缺陷的影响。这些工作丰富了CFRP钻削过程热影响方面的研究。另外,近年来针对CFRP制孔的分层损伤也开展了在线检测技术的研究^[48],表明CFRP分层损伤的在线检测方法对于保持CFRP结构可靠性是必不可少的。

尽管CFRP已被广泛应用于航空航天、汽车等高端领域,但其制孔质量依然存在问题。复合材料钻削加工中产生的加工缺陷一直是阻碍复合材料钻削工艺发展的根本原因。CFRP层合板制孔缺陷是高质量、低成本制造的绊脚石,因此理清其制孔缺陷的成因和探索无缺陷制孔技术的研究是永恒的主题。

5 结语

通过以上分析表明,CFRP钻孔的研究还没有形成成熟的理论与方法,对其制孔行为、刀具磨损机理、制孔缺陷和损伤产生机理等还需要深入研究。

(1)目前,针对CFRP切削机理的研究局限在表象,如切削力、切削热、基体破坏和纤维断裂等,对更深层次的工件损伤研究和工件亚表面的破坏研究还不够,尤其缺乏基于多尺度结构耦合作用的CFRP层合板钻削机理和制孔缺陷形成机制深入研究。

(2)CFRP物理仿真建模、有限元仿真技术是研究切削加工过程特性的有效手段。由于仿真工具的复杂性和所需计算时间,使得加工模型在工业中实现仍然是一个挑战。与实验研究相比,钻削加工的数值模拟技术还未成熟,值得注意的是,针对各向异性CFRP的有限元仿真分析才刚起步,材料本构模

型、多相界面接触模型和失效模型的构建是实现复合材料精准仿真的重要前提。

(3) 钻削是一个复杂的加工过程,麻花钻切削刃的几何参数在加工过程会发生变化,切削刃上各点前角的变化很大,使得切屑形成的条件十分复杂。大量的文献主要集中在如何改变钻尖的几何参数来减小钻削轴向力,从而减少分层损伤。针对切削刃刃口结构对于钻削质量和钻头磨损影响方面的研究比较少。

参考文献

- [1] 陈燕,葛恩德,傅玉灿,等. 碳纤维增强树脂基复合材料制孔技术研究现状与展望[J]. 复合材料学报,2015,32(2):301-306.
- [2] Liu D F, Tang Y J, Cong W L. A review of mechanical drilling for composite laminates[J]. Composite Structures,2012,94:1265-1279.
- [3] Guu Y H, Hocheng H, Tai N H, et al. Effect of electrical discharge machining on the characteristics of carbon fiber reinforced carbon composites[J]. Journal of Materials Science, 2001,36:2037-2043.
- [4] Trevor M Young. Impact of Nd-YAG laser drilling on the fatigue characteristics of APC-2A-AS4 thermoplastic composite material[J]. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2008,21:543-555.
- [5] Hocheng H, Tai N H, Liu C S. Assessment of ultrasonic drilling of C/SiC composite material[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing,2000,31:133-142.
- [6] Karnik S R, Gaitonde V N, Campos Rubio J, et al. Delamination analysis in high speed drilling of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) using artificial neural network model[J]. Materials & Design,2008,29(9):1768-1776.
- [7] Tsao C C. Effect of pilot hole on thrust force by saw drill [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacturing,2007,47(14):2172-2176.
- [8] Koenig W, Wulf C, Grass P, et al. Machining of fibre reinforced plastics [J]. CIRP Annals Manufacturing Technology,1985,34(2):537-548.
- [9] Wern C W, Ramulu M, Shukla A. Investigation of stresses in the orthogonal cutting of fiber-reinforced plastics[J]. Experimental Mechanics,1996,36(1):33-41.
- [10] Voss R, Henerichs M, Kustera F, et al. Chip root analysis after machining carbon fiber reinforced plastics (CFRP) at different fiber orientations [J]. Procedia CIRP,2014,14:217-222.
- [11] Niu B, Su Y L, Yang R, et al. Micro-macro-mechanical model and material removal mechanism of machining carbon fiber reinforced polymer [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacturing,2016,111:43-54.
- [12] 陈明,邱坤贤,秦声,等. 高强度碳纤维增强复合材料层合板的钻削制孔过程及其缺陷形成分析[J]. 南京航空航天大学学报,2014,46(5):667-674.
- [13] Calzada K A, Kapoor S G, Devor R E, et al. Modeling and interpretation of fiber orientation-based failure mechanisms in machining of carbon fiber-reinforced polymer composites [J]. Journal of Manufacturing Processes,2012,14(2):141-149.
- [14] Phadnis V A, Makhadmeh F, Roy A, et al. Drilling in carbon/epoxy composites: experiment implementation [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing,2013,47:41-51.
- [15] Isbilir O, Ghassemieh E. Numerical investigation of the effects of drill geometry on drilling induced delamination of carbon fiber reinforced composites [J]. Composite Structures,2013,105:126-133.
- [16] Isbilir O, Ghassemieh E. Finite element analysis of drilling of carbon fiber reinforced composites [J]. Applied Composite Materials,2012,19(3-4):637-656.
- [17] Chinmaya R D, Yung C S. Modeling of machining of composite materials: a review [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacturing,2012,57:102-121.
- [18] 杨强,解维华,孟松鹤,等. 复合材料多尺度分析方法与典型元件拉伸损伤模拟 [J]. 复合材料学报,2015,32(3):617-624.
- [19] Rao G V G, Mahajan P, Bhatnagar N. Micro-mechanical modeling of machining of FRP composites: cutting force analysis [J]. Composites Science and Technology,2007,67:579-593.
- [20] Rao G V G, Mahajan P, Bhatnagar N. Machining of UD-GFRP composites chip formation mechanism [J]. Composites Science and Technology,2007,67:2271-2281.
- [21] Shiari B, Miller R E, Klug D D. Multi-scale simulation of material removal processes at the nanoscale [J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids,2007,55:2384-2405.
- [22] Sun X Z, Cheng K. Multi-scale simulation of the nano-metric cutting process [J]. Int J Adv Manuf Technol,2010,47:891-901.
- [23] 范镜泓. 材料变形与破坏的多尺度分析 [M]. 北京: 科学出版社,2008.
- [24] 郑晓霞,郑锡涛,缙林虎. 多尺度方法在复合材料力学分析中的研究进展 [J]. 力学进展,2010,40(1):41-55.
- [25] Stone R, Krishnamurthy K. A neural network thrust force controller to minimize delamination during drilling of

- graphite-epoxy laminates [J]. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 1996, 36: 985 – 1003.
- [26] Tsao C C, Hocheng H. Parametric study on thrust force of core drill [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007(192 – 193): 37 – 40.
- [27] Tsao C C, Chiu Y C. Evaluation of drilling parameters on thrust force in drilling carbon fiber reinforced plastic (CFRP) composite laminates using compound core-special drills [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2011, 51: 740 – 744.
- [28] 刘洋, 李鹏南, 陈明, 等. 双锋角钻头钻削碳纤维增强树脂基复合材料研究 [J]. *宇航材料工艺*, 2015, 45(6): 53 – 59.
- [29] Jain S, Yang D C H. Delamination free drilling of composite laminates [J]. *ASME J Eng Ind*, 1994, 116: 475 – 481.
- [30] 鲍永杰, 高航, 李凤全. 电镀金刚石钻头钻削碳纤维复合材料研究 [J]. *金刚石与磨料磨具工程*, 2009(3): 38 – 42.
- [31] 徐九华, 牟娟, 陈燕, 等. 钎焊金刚石套料钻 CFRP 制孔研究 [J]. *南京航空航天大学学报*, 2012, 44(5): 747 – 753.
- [32] 贾振元, 何春伶, 付饶, 等. 基于 CFRP 层合板钻削轴向力时变曲线的钻头几何形状分析 [J]. *复合材料学报*, 2016, 33(12): 2757 – 2765.
- [33] Hocheng H, Tsao C C. Effects of special drill bits on drilling induced delamination of composite materials [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2006, 46(12 – 13): 1403 – 1416.
- [34] Feito N, Diaz-álvarez J, López-Puente J, et al. Numerical analysis of the influence of tool wear and special cutting geometry when drilling woven CFRPs [J]. *Compos Struct*, 2016, 138: 285 – 294.
- [35] Feito N, Díaz-álvarez J, Lopez-Puente J, et al. Experimental and numerical analysis of step drill bit performance when drilling woven CFRPs [J/OL]. *Compos Struct* 2017. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.10.061>.
- [36] Xinyi Qiu, Pengnan Li, Qiulin Niu, et al. Influence of machining parameters and tool structure on cutting force and hole wall damage in drilling CFRP with stepped drills [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 97: 857 – 865.
- [37] Qiu X, Li P, Li C, et al. Study on chisel edge drilling behavior and step drill structure on delamination in drilling CFRP [J]. *Composite Structures*, 2018, 203: 404 – 413.
- [38] Zhenyuan Jia, Rao Fu, Bin Niu, et al. Novel drill structure for damage reduction in drilling CFRP composites [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2016(110): 55 – 65.
- [39] Xinyi Qiu, Pengnan Li, Changping Li, et al. New compound drill bit for damage reduction in drilling CFRP [J/OL]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, Published online: December 2018. DOI: 10.1007/s40684-019-00026-3.
- [40] Tsao C C, Hocheng H. Effect of eccentricity of twist drill and candle stick drill on delamination in drilling composite materials [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2005, 45(2): 125 – 130.
- [41] Paulo Davim J, Pedro Reis. Drilling carbon fiber reinforced plastics manufactured by autoclave experimental and statistical study [J]. *Materials and Design*, 2003, 24: 315 – 324.
- [42] Bonnet C, Poulachon G, Rech J, et al. CFRP drilling: Fundamental study of local feed force and consequences on hole exit damage [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2015, 94: 57 – 64.
- [43] Girot F, Dauc F, Gutiérrez-Orrantia M E. New analytical model for delamination of CFRP during drilling [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, 10.
- [44] 张厚江, 陈五一, 陈鼎昌. 碳纤维复合材料 (CFRP) 钻孔出口缺陷的研究 [J]. *机械工程学报*, 2004(7): 153 – 155.
- [45] 孙路华, 全燕鸣, 钟文旺. 碳纤维复合材料高速钻削力的研究 [J]. *纤维复合材料*, 2005(4): 30 – 32, 38.
- [46] 鲍永杰, 高航, 马海龙, 等. 单向 C/E 复合材料磨削制孔温度场模型的研究 [J]. *机械工程学报*, 2012, 48(1): 169 – 176.
- [47] Li N Y, Li Y G, Zhou J, et al. Drilling delamination and thermal damage of carbon nanotube carbon [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2015, 97: 11 – 17.
- [48] Munoz V, Vales B, Perrin M, et al. Damage detection in CFRP by coupling acoustic emission and infrared thermography [J]. *Composites Part B*, 2016, 85: 68 – 75.
- 第一作者: 刘泉鹏, 硕士研究生, 湖南科技大学机电工程学院, 411201 湖南省湘潭市
- First Author: Liu Xiaopeng, Postgraduate, College of Mechanical and Electrical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411201, China