

磁流变液在机械加工中的研究进展

江宏亮, 姚巨坤, 田欣利, 杨绪啟

装甲兵工程学院

摘要: 磁流变液(MRF)是将微米或纳米尺度的磁性颗粒分散在载液中制备而成的先进复合材料,在外磁场作用下能够产生连续可调可逆的阻尼力,具有优良的可控性和良好的减振性,从而可对振动系统的振动进行实时控制。本文简述了国内外磁流变液的研究现状及其在车削、镗削、抛光加工和柔性夹具中的应用,进一步探讨了磁流变液技术的发展方向。

关键词: 磁流变液;智能材料;机械加工;减振;研究进展

中图分类号: TB381;TB535.1;TG51/66

文献标志码: A

Technology of Magneto-Rheological Fluid and Its Application in Machining

Jiang Hongliang, Yao Jukun, Tian Xinli, Yang Xuqi

Abstract: Magneto-Rheological Fluid (MRF) is a kind of advanced composite material prepared by dispersing the magnetic particles of micron or nanometer scale in the carrier liquid, which can produce continuously adjustable and reversible damping forces under the action of the external magnetic field. With its good controllability and vibration damping, the vibration of a system can be controlled real time. The research status of the magneto rheological fluid and its applications in turning, boring, polishing and flexible fixtures at home and abroad are briefly introduced, and the development trend of magneto rheological fluid products are further discussed.

Keywords: magneto-rheological fluid(MRF); intelligent material; machining; vibration reduction; research progress

1 引言

磁流变液(Magneto Rheological Fluid)是一种新型智能材料,通过将微米或纳米级的软磁性颗粒分散在不同种类载液中制备而成^[1]。磁流变液被认为是 21 世纪最具发展潜力的新兴智能材料,目前已被广泛应用于机械工程、军事防护、精密抛光、航空航天和医疗康复等领域^[2]。其流变性能可随外加磁场连续、快速、可逆地变化,磁流变液的性能研究及其技术产品的研发得到越来越多的关注。

2 磁流变液的研究现状

美国国家标准局工程师 Rabinow J.^[3]于 1948 年研制了磁流变液,并基于磁流变液的流变性设计了磁流变离合器。与电流变液相比,磁流变液存在易沉降、应用装置控制磁路设计复杂等缺点,因此并没有得到足够的重视。1985 年后,因无法克服电流变液剪切屈服强度低和控制电压过高等缺点,磁流变液重新引起各国学者的关注。至今,国际电流变液与磁流变液大会(International Conference on Electro-rheological Fluids and Magneto Rheological Suspen-

sions)已举办 15 届,国内全国电磁流变会议也已举办 6 届,磁流变液相关技术研究及其应用日趋成熟。

2.1 国外研究现状

白俄罗斯学者 Shulman Z. P. 和 Kordonsky V. I. 等^[4,5]在 20 世纪 90 年代初就初步探明了磁流变液的结构、物理性能和动力学特性,并对磁流变液的应用前景进行了展望。随后美国洛德公司、福特汽车公司和德尔福汽车公司等相继开展了磁流变液相关研究,均取得了可喜进展^[6,7]。进入 21 世纪后,韩国 Choi J. S. 等^[8]研究表明,在磁流变液中加入 CI-PMMA 颗粒,可以有效防止磁流变液沉降;美国阿拉巴马大学 Bagaria H. G. 等^[9]在磁流变液用于加热治疗相关疾病的基础上对热疗进行优化,可实现选择性加热病变组织而不对健康组织造成任何伤害的治疗效果;印度 Premalatha S. E. 等^[10]研究了铁基磁流变液的机械特性以及各种添加剂对磁流变液特性的影响;罗马尼亚 Bica I. 等^[11]总结了磁流变液的流变性能、磁场控制方法以及磁流变液在减振器、阻尼器、离合器、磁阻电阻器、磁场传感器和超细抛光技术等方面的应用;伊朗 Ashtiani M. 等^[12]研究证实羰基铁微粒是极具潜力的软磁性颗粒,具有较高的磁饱和性、较低的磁矫顽力、较低的成本和良好的稳定性。目前国外磁流变液及其应用产品已经进入市

场,但是关于高性能磁流变液的研发和精确流变控制算法等问题仍在持续探索。

2.2 国内研究现状

国内最早于1996年出现关于磁流变液的报道。目前在磁流变机理、磁流变液配置、流变控制及工程应用取得了一些成果。中国科学技术大学唐新鲁博士^[13]较早对磁流变液的相关性质进行了初步探索,对挤压流动式的磁流变阻尼器进行了测试和建模。复旦大学潘胜等^[14]用羰基铁粉末配比了磁流变液,初步探索了温度对磁流变液屈服应力的影响。武汉理工大学程海斌等^[15]用有机分子修饰磁性颗粒铁粒子表面的方法研制了新型磁流变液,其抗沉淀能力和抗酸氧化的能力都得到明显改善,且零场粘度也有所降低。重庆大学赵春伟^[16]利用有限元软件对静磁场中磁流变液的磁性颗粒间作用力进行了分析,建立了磁流变液颗粒运动的动力学模型,并采用强化偶极子模型建立了磁流变液的微/宏观分析模型,较准确地描述了压缩模式下的法向应力。哈尔滨工业大学欧进萍院士等^[17]将磁流变阻尼器成功应用于渤海JZ20-2MUQ平台结构,可以有效减弱冰激振动和地震波的破坏力。沈阳大学王扬扬^[18]将磁流变技术应用于电梯缓冲器中,实现可控制的缓冲,使缓冲器产生恒定的阻尼力,提高缓冲效果。2015年7月14日,由重庆材料研究院有限公司和装甲兵工程学院联合起草的首个磁流变液行业的国家标准(JB/T 12512-2015)发布。该标准已于2016年1月1日正式实施,为我国磁流变液的术语、定义、技术要求、试验方法、检验规则以及包装、标志、运输、贮存提供了明确的技术参考和规范,为磁流变液及其应用产品的大规模商品化奠定了坚实基础。但是从目前磁流变产品流变控制技术和磁流变产品应用范围来看,我国与国外尚存在差距。

3 磁流变液在机械加工中的应用

3.1 磁流变液应用于车床加工

机械产品的加工质量受到多种因素的影响,而加工过程中刀具颤振被认为是影响产品质量最重要的因素。刀具颤振是一个动态过程,不仅会缩减刀具和机床使用寿命、降低加工表面质量,还会增加车床负载功率^[19]。各种类型的阻尼器被用于改善切削条件和延长刀具寿命,而磁流变阻尼器被证实为削减刀具颤振的最合适选择。

Sajedipour D.等^[20]提出了基于磁流变阻尼器半主动控制抑制车刀颤振的模型,该模型通过实时收

集车床颤振信息进行分析处理,然后反馈给阻尼器主动控制达到减弱振动的目的。仿真结果证明,该方案可以有效抑制颤振和以较低的能量消耗改善切削环境。Pauls P. S.等^[21,22]将磁流变阻尼器应用于机床硬切削研究。通过切削试验证明,磁流变阻尼器可以显著降低刀具振动、减小主切削力和降低切削温度,有效提高切削表面质量。切削试验还证明,在磁流变液中加入纳米颗粒可以更好地发挥阻尼作用,有效提高切削性能。同时还研究了氧化钛铁纳米颗粒对磁流变阻尼器减振性能的影响。研究表明,为了更好地发挥磁流变阻尼器阻尼能力和改善切削工况,可以用更大的直流电磁化纳米颗粒。张天宇^[23]设计并实现了基于磁流变阻尼器的机床减振半主动控制试验系统,完成了不同输入条件下的时间相应特性和频率响应测试。仿真结果证明,磁流变阻尼器可以有效减弱刀具颤振。张永亮等^[24-27]将磁流变液应用于抑制外圆车削刀具颤振,先后研制了如图1所示的剪切式磁流变减振器和基于挤压模式的磁流变车削减振仪,建立了基于磁流变减振器的车削系统动力学模型,通过Maxwell软件优化磁路可更好地抑制颤振。

运用磁流变阻尼器抑制刀具振动是近10年新兴的研究领域,国内外学者对此做了大量研究工作。目前减振方法也趋于统一,均是采用磁流变阻尼器半主动抑制颤振,同时还可以通过优化磁路设计和改善磁流变液配比来提高减振效果。因此,开发更好的磁路设计和性能更加稳定的磁流变液仍是研究的核心。

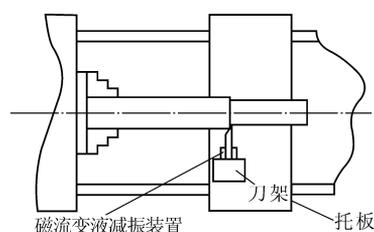


图1 磁流变减振装置安装位置

3.2 磁流变液应用于镗床加工

镗杆的长悬伸和大长径比会造成镗削系统结构刚度低,加工过程中难以避免颤振。颤振使机床承受交变载荷、在加工表面留下振痕和加剧刀具磨损,产生的噪声也严重危害操作者身心健康。

Balamurugan S.等^[28]建立了在线振动测量模型,并通过磁流变液抑制颤振。试验对加工过程中的振动信号进行采集,采取主动抑制的方法控制振动,取得了良好的效果。Alammari Y.等^[29]采用调

节磁流变液流变性来调节镗杆固有频率的方法抑制镗杆颤振,取得了良好效果。浙江大学的孔天荣等^[30,31]基于磁流变液的流变特性设计了如图2所示的磁流变智能镗杆,并且深入研究了磁流变智能镗杆的抑振机理,并在此基础上提出了相应的控制策略。在CA6140车床上搭建了磁流变智能镗杆的颤振抑制试验系统,验证了智能镗杆的优越性。杨月婷^[32]将磁流变液应用于镗杆减振系统,设计出一种新型半主动动力吸振镗杆,并进一步研究了镗杆系统的分岔和混沌特性。结果证明,镗杆系统存在Neimark-Sacker分岔、概周期分岔、倍分岔等多种非线性振动。庄润雨^[33]以镗削时镗杆动态稳定性的分析及减振镗杆的动力学模型研究两方面内容为核心,以期为镗削颤振的监测、预防和抑制提供理论依据和指导,减小颤振的危害。

国内外对于磁流变液应用于镗床减振的研究较为集中,主要采用磁流变液阻尼器抑制镗刀振动,或通过进一步采集振动信号用半主动控制的方法抑制刀具振动,提高了切削系统稳定性,同时提升加工质量和加工效率。

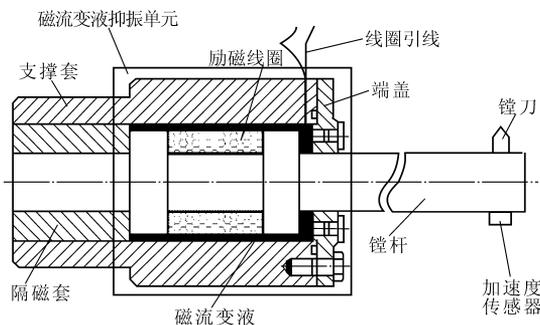


图2 磁流变智能镗杆结构

3.3 磁流变液应用于抛光加工

磁流变抛光(Magneto Rheological Finishing)技术是利用磁流变抛光液在强磁场中的流变性对工件表面进行确定性去除的方法,其工作原理如图3所示^[34,35]。自1986年白俄罗斯的William Kordonski等^[36]首次提出磁流变抛光技术后,磁流变抛光技术经历了飞速的发展。1992年,美国罗切斯特大学研制了第一台磁流变抛光样机;1996年成立QED公司,并于1998年开始推出商业化的Q22系列磁流变抛光机。该公司最新研发的Q-FLEX300磁流变抛光机使精密光学制造达到了新的高度,可以智能抛光非球面和自由形状表面。中国科学院长春光机所在磁流变抛光机和适合于磁流变抛光机的磁流变液等方面做了大量研究,先后研制出适合大口径非球面反射镜加工的带式磁流变抛光机和具有优良流

变性和较高抛光效率的新型磁流变液^[37]。国防科学技术大学焦飞飞等^[38]针对KDP晶体质地软、脆性高等难加工特性,提出了通过溶解作用完成加工的新型磁流变抛光技术,最终可以获得表面粗糙度 $PV = 13.7\text{nm}$, $Rms = 1.1\text{nm}$ 的超光滑表面。

磁流变抛光加工具有传统抛光加工不可替代的优点,并且广泛应用于精密和超精密机械加工和光学镜片的加工,还需进一步加强磁流变抛光非球形自由表面的研究,拓宽其加工适应性,提高加工效率,降低加工成本,使之在光学器件的加工以及精密机械加工中发挥更大的作用。

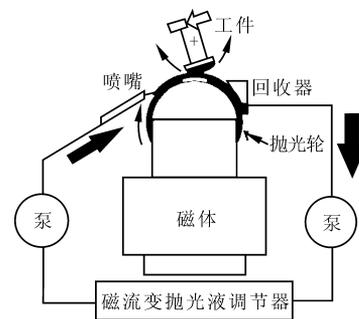


图3 磁流变抛光加工原理

3.4 磁流变液应用于柔性夹具

柔性夹具可以对大小和形状不同的零件进行定位和夹紧,具有快速适应和重复使用等优点^[39]。磁流变液良好的流变性和可控性恰好满足柔性夹具的设计要求。

基于磁流变液设计的柔性夹具原理如图4所示。将工件放置于磁流变液中,磁流变液在外加磁场作用下实现相变时,工件就会被固定。该夹具的优点在于适应性强,操作简单,具有良好的经济效益和应用前景。

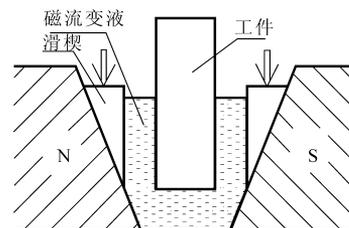


图4 磁流变液柔性夹具

2000年美国洛德公司的Jolly M. R.等^[40]基于磁流变液发明了磁流变智能手柄,能够自适应抓取钢笔、剃须工具和医疗运动器件等,具有非常好的实用性。2007年美国通用汽车公司的Sears I. G.等^[41]设计了一种用于柔性制造系统的柔性夹具,该夹具由主体部分和多个伸入主体的销轴组成。销轴底部有固定弹簧,放入待加工工件后弹簧自适应进

行调整,在外磁场的作用下,销轴底部磁流变液实现相变固定工件。Tang X. 等^[42]设计了一套磁流变液柔性夹具,该夹具相变之后可以提供 80kPa 左右的夹紧力,在磁场方向通过斜楔加压后夹紧力可达 800MPa,初步满足加工要求。2003 年张先舟等^[43,44]设计了一种基于磁流变液相变特性的柔性夹具。该夹具通过加压机构沿磁场方向给磁流变材料加压后,剪切强度达到 2MPa,工件被夹紧后可以承受 5kg 以上的拉力。2006 年张先舟等^[45]又发明了一种具有可变刚度的柔性表面的夹持装置。该装置由柔性膜和支撑件构成,调节电磁场可以实现无级调节柔性膜各个位置刚度的效果,能够适应不同形状、不同刚度的被夹持物,用于机器人、机械手或机械夹具的制造。肖璐等^[46]将磁流变夹具应用于薄壁件加工,并对加工中薄壁件变形进行有限元分析,发现工件应变减少近一个数量级。唐泳波^[47]提出了一种新型的采用模块化磁流变阻尼顶针的柔性夹具,该夹具可用于加工薄壁工件。刘松等^[48]设计的磁流变柔性夹具系统能够完成零构件定位、定心任务,可以无级调节夹紧力大小,吸收加工过程中振动能量,改善工件受力。

国内外都是从 21 世纪开始对磁流变液柔性夹具进行研究。由于现代制造业机械零件形状愈加复杂,机械加工也由批量化生产向着多样化、个性化发展,所以柔性夹具具有非常好的应用前景。目前磁流变液柔性夹具仍然处于探索和实验室阶段,各国应加强对提高夹持力进行深入研究,使之早日大量进入机械制造领域。

4 结语

磁流变液及其产品从发明至今经历了半个多世纪的迅速发展,性能更优的磁流变液和各类磁流变液应用产品(尤其是磁流变阻尼减振器)已经取得了非常广泛的应用。作为一种新兴的智能材料,其发展应用前景非常广阔,也将朝着以下方向发展:

(1) 技术成熟化。磁流变液的散热性和稳定性差是目前限制其大规模应用的瓶颈,磁流变液的准确流变控制难题至今没有解决,随着新技术新材料的发现,磁流变技术终将成为广泛应用的技术。

(2) 应用广度化。除了在机械加工中的应用外,磁流变液产品还可以用于铣床、钻床等机械加工设备以及医疗、军事等领域,随着科学技术的发展,磁流变产品将进一步拓宽其产品种类和应用范围。

(3) 商业生产化。有关磁流变液及其产品的大

量研究主要集中于 21 世纪,所以目前很多产品还处于实验室阶段,并没有实现真正的商业化。凭借其优良的可控性和广大科研工作者的辛勤付出,磁流变产品在未来也将规模化地应用于各个领域。

参考文献

- [1] 许阳光, 龚兴龙, 万强, 等. 磁敏智能软材料及磁流变机理[J]. 力学进展, 2015(45): 461 - 495.
- [2] 王慧军. 超声波磁流变复合抛光关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
- [3] Rabinow J. The magnetic fluid clutch[J]. Electrical Engineers Journal of the Institution of, 1948, 67(2): 1308 - 1315.
- [4] Shulman Z P, Kordonsky V I, Zaltsgendler E A, et al. Structure, physical properties and dynamics of magneto rheological suspensions [J]. International Journal of Multiphase Flow, 1986, 12(6): 935 - 955.
- [5] Kordonsky W I. Magneto rheological effect as a base of new devices and technologies [J]. Journal of Magnetism & Magnetic Materials, 1993, 122(1 - 3): 395 - 398.
- [6] Kordonsky W I, Demchuk S A. Additional magnetic dispersed phase improves the Mr - fluid properties[J]. Journal of Intelligent Material Systems & Structures, 1996, 7(5): 522 - 525.
- [7] J M Ginder, L C Davis, L D Elie. Rheology of magnetorheological fluids: models and measurements [J]. International Journal of Modern Physics B, 1996, 10(23n24): 3293 - 3303.
- [8] Choi J S, Park B J, Cho M S, et al. Preparation and magneto rheological characteristics of polymer coated carbonyl iron suspensions[J]. Journal of Magnetism & Magnetic Materials, 2006, 304(1): e374 - e376.
- [9] Bagaria H G, Johnson D T. Transient solution to the bio - heat equation and optimization for magnetic fluid hyperthermia treatment [J]. International Journal of Hyperthermia, 2005, 21(1): 57 - 75.
- [10] Premalatha S E, Chokkalingam R, Mahendran M. Magneto mechanical properties of iron based MR fluids[J]. American Journal of Polymer Science, 2012, 2(4): 50 - 55.
- [11] Bica I, Liu Y D, Choi H J, et al. Physical characteristics of magneto rheological suspensions and their applications[J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2013, 19(2): 394 - 406.
- [12] Ashtiani M, Hashemabadi S H, Ghaffari A. A review on the magneto rheological fluid preparation and stabilization[J]. Journal of Magnetism & Magnetic Materials, 2014(374): 716 - 730.
- [13] 唐新鲁. 有关电流变液、磁流变液机理若干问题的研究

- [D]. 合肥:中国科学技术大学,1996.
- [14]潘胜,吴建耀.磁流变液的屈服应力与温度效应[J].功能材料,1997(3):264-267.
- [15]程海斌,王金铭,马会茹,等.有机分子修饰铁粒子表面改善水基磁流变液的抗氧化性和稳定性[J].物理化学学报,2008,24(10):1869-1874.
- [16]赵春伟.基于微结构的磁流变液力学性能研究[D].重庆:重庆大学,2014.
- [17]杨颀,欧进萍.导管架式海洋平台磁流变阻尼隔震结构的模型试验[J].振动与冲击,2006,25(5):1-5.
- [18]王扬扬.客用电梯磁流变液缓冲器研究[D].沈阳:沈阳大学,2016.
- [19]杨毅青,刘强,王民.面向车削颤振抑制的多重阻尼器优化设计[J].振动工程学报,2010,23(4):468-474.
- [20]Sajedipour D, Behbahani S, Tabatabaei S M K. Mechatronic modeling and control of a lathe machine equipped with a MR damper for chatter suppression [C]// IEEE International Conference on Control and Automation. IEEE, 2010: 802-807.
- [21]Paul P S, Varadarajan A S. Effect of magneto rheological damper on tool vibration during hard turning [J]. Frontiers of Mechanical Engineering, 2012, 7(4): 410-416.
- [22]Paul P S, Iasanth J A, Vasanth X A, et al. Effect of nanoparticles on the performance of magneto rheological fluid damper during hard turning process [J]. Friction, 2015, 3(4): 333-343.
- [23]张天宇.基于磁流变阻尼器的机床减振半主动控制[D].西安:西安科技大学,2007.
- [24]张永亮,赵翊,周渊,等.车床刀架磁流变减振装置设计及三维磁路分析[J].机械设计与研究,2013,29(5):87-91.
- [25]周渊,张永亮.一种剪切式磁流变车削减振器的设计与减振试验[J].振动与冲击,2013,32(4):167-172.
- [26]张永亮,张玮,赵翊.车削加工磁流变减振装置设计及磁路分析[J].机械强度,2014,36(3):315-320.
- [27]张永亮,谷涛,潘健健.磁流变减振车刀的迟滞非线性特性建模及试验研究[J].机械强度,2016,38(4):691-697.
- [28]Balamurugan S, Alwarsamy T. Boring tool chatter suppression using magneto-rheological fluid damper through regression models [J]. International Review of Mechanical Engineering, 2013, 7(3): 556-562.
- [29]Alammari Y, Sanati M, Freiheit T, et al. Investigation of boring bar dynamics for chatter suppression [J]. Procedia Manufacturing, 2015, 1(s1-4): 768-778.
- [30]孔天荣,梅德庆,陈子辰.磁流变智能镗杆的切削颤振抑制机理研究[J].浙江大学学报(工学版),2008,42(6):1005-1009.
- [31]孔天荣,梅德庆,陈子辰.磁流变智能镗杆的动态特性测试与分析[J].浙江大学学报(工学版),2009,43(12):2314-2318.
- [32]杨月婷.半主动动力吸振镗杆的非线性动力学行为研究[D].石家庄:石家庄铁道大学,2014.
- [33]庄润雨.镗杆动态稳定性与动力学模型的研究[D].石家庄:石家庄铁道大学,2016.
- [34]李智.组合磁流变抛光的关键技术研究[D].长沙:湖南大学,2016.
- [35]Kordonski W I, Jacobs S D. Magneto rheological finishing. International Journal of Modern Physics, 1996, 10(24): 2837-2848.
- [36]Shorey A B, Kordonski W, Tricard M. Magnetorheological finishing and sub-aperture stitching interferometry of large and lightweight optics [J]. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2004, 5533: 81-90.
- [37]张峰.磁流变抛光技术在中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研究进展[J].激光与光电子学进展, 2015, 52(9): 266-272.
- [38]焦飞飞,彭小强,陈浩锋,等.磁流变抛光 KDP 去除机理实验研究[J].航空精密制造技术,2012(1):1-4.
- [39]宋灿,吕彦明.基于相变材料的柔性夹具结构设计[J].机械制造,2015,53(5):60-61.
- [40]Jolly M R, Bryan S R. Magnetorheological grip for handheld implements: US, US 6158910 A [P]. 2000.
- [41]Sears I G, Stevenson R, Menassa R J. Magnetorheological reconfigurable clamp for a flexible manufacturing system: US, US7204481 [P]. 2007.
- [42]Tang X, Zhang X, Tao R. Flexible fixture device with magnetorheological fluids [J]. Journal of Intelligent Material Systems & Structures, 1999, 10(9): 690-694.
- [43]张先舟,王琪民,张培强.基于磁流变液相变技术的柔性夹具[J].实验力学,2003,18(2):185-192.
- [44]张先舟,王琪民,张培强.磁流变柔性夹具:CN1490127A [P]. 2004.
- [45]张先舟,龚兴龙,张培强.有可变刚度的柔性表面的夹持装置:CN1799784 [P]. 2006.
- [46]肖璐,王凡,刘颖,等.用于薄壁件加工的磁流变夹具[J].新技术新工艺,2007(1):26-27.
- [47]唐泳波.磁流变液研究与磁流变柔性夹具结构设计[D].广州:广东工业大学,2011.
- [48]刘松,周瑾,李思磊,等.磁流变肉柔性夹具系统及夹紧方法:CN104308209 [P]. 2015.

第一作者:江宏亮,硕士研究生,装甲兵工程学院装备维修与再制造工程系,100072北京市

First Author: Jiang Hongliang, Postgraduate, Department of Equipment Remanufacture Engineering, Academy of Armored Force Engineering, Beijing 100072, China