

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.05.002

复合气压砂轮有限元仿真与光整试验研究*

计时鸣, 厉志安, 蔡东海*, 金明生, 曾 晰, 李 笑

(浙江工业大学 特种装备制造与先进加工技术教育部/浙江省重点实验室, 浙江 杭州 310014)

摘要: 为了提高气压砂轮针对激光强化模具的光整效率, 解决加工过程中高频小幅振动及长时间交变应力作用引起的气压砂轮基体产生细微裂纹的问题, 设计了芳纶浆粕(PPTA-pulp)增强丁苯橡胶的复合气压砂轮基体。通过对标准试样的轴向拉伸试验, 得到了复合气压砂轮基体的应力—应变关系和弹性模量, 利用 ANSYS/LS—DYNA 有限元仿真软件对复合气压砂轮的模态与应力分布特性进行了数值仿真, 得到了各阶模态的频率与接触应力分布曲线; 通过激光强化 Cr12 模具的光整加工试验, 验证了仿真的正确性。研究结果表明, 随着芳纶浆粕含量的增加, 复合气压砂轮各阶频率得到了显著提高, 且应力分布均匀性变好, 提升了对高硬度、高耐磨性模具的高效加工能力; 当添加 3.3% 的芳纶浆粕时, 兼顾了成形接触能力和应力分布的均匀性, 因而能较好地满足激光强化曲面模具的光整加工。

关键词: 复合气压砂轮; 丁苯橡胶; 滚动接触; 有限元法; 光整试验

中图分类号: TH117

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2014)05-0549-05

Finite element simulation and finishing experiment of the composited pneumatic wheel

JI Shi-ming, LI Zhi-an, CAI Dong-hai, JIN Ming-sheng, ZENG Xi, LI Xiao

(Key Lab of Ministry of Education for Province Jointed Mechanical Manufacture & Automation, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: In order to improve the finishing efficiency of pneumatic wheel for laser hardening mold, and solve the subtle crack problem of pneumatic wheel caused by high frequency vibration and prolonged pressure during the long time finishing, a composite pneumatic wheel of SBR reinforced by PPTA-pulp was designed. Through the axial tensile test of the standard sample, the stress-strain relationship and the elastic modulus of composite pneumatic wheel were received. Using ANSYS/LS-DYNA the modal and stress distribution of composite pneumatic wheel were simulated, the distribution curve of the modal frequency and contact stress were received. According to the finishing experiment of laser hardening mold, the correctness of the simulation was verified. The results show that the frequency of the composite pneumatic wheel has been improved significantly, and the stress distribution is uniform, so as to improve the finishing efficiency for mold with high hardness and wear resistance. If adding 3.3% PPTA-pulp, both the profile ability and the stress distribution would be preferable. That could be better for the laser hardening mold finishing.

Key words: composited pneumatic wheel; styrene-butadiene rubber(SBR); rolling contact; finite element; finishing experiment

0 引 言

在机械制造业中, 模具工业被称之为“工业之母”, 机械行业中 70% 以上零部件的加工与模具相关^[1-3]。为了延长模具的使用寿命, 提高其耐磨、耐疲劳性能, 往往需要对模具表面进行激光强化处理^[4], 但同时其硬

度、耐磨性能的提高也增加了激光强化模具在光整加工阶段的难度, 因此, 提高高硬度、高耐磨模具在光整加工阶段的效率具有极其重要的现实意义。

对此, 浙江工业大学计时鸣教授等人^[5-6]提出了一种软固结磨粒气压砂轮 (Soft-consolidation abrasives pneumatic wheel) 加工新方法。

收稿日期: 2013-10-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51175471, 50575208, 51205358); 浙江省自然科学基金资助项目(LQ12E05014); 浙江省教育厅资助项目(Y201225547)

作者简介: 计时鸣(1957-), 男, 浙江温州人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事先进加工技术方面的研究. E-mail: jishiming@zjut.edu.cn

通信联系人: 蔡东海, 男, 硕士, 助理研究员. E-mail: dhcai@zjut.edu.cn

为了解决这种软固结磨粒气压砂轮在光整中气压砂轮常出现高频小幅振动的现象,以及进一步提高该方法对激光强化模具光整的效率,本研究借助 ANSYS/LS-DYNA 有限元分析软件,进行针对芳纶浆粕增强气压砂轮基体后气压砂轮的模态以及光整中的接触应力分布特性分析,并对 Cr12 激光强化曲面模具进行光整加工试验。

1 气压砂轮光整技术

软固结磨粒气压砂轮光整加工方法利用高强度粘结剂在柔性气压砂轮表面聚集形成磨粒层,使每颗磨粒受力后又可局部微动,通过影响周边磨粒群的受力状况而发生群体效应,达到软性条件下的应力集中,以实现高效切削的目的。

软固结磨粒气压砂轮主要是由丁苯橡胶(SBR)构成的空心半球与磨粒层组成,克服了现有气囊抛光中采用游离态磨粒切削能力弱的缺点,其表面的柔性可以通过空心半球内部气压实时在线控制,并可方便地与机器人配合使用^[7]。

软固结磨粒气压砂轮光整系统与气压砂轮结构如图 1 所示。

研究软固结磨粒气压砂轮光整加工中被加工材料的材料去除量与加工工艺参数之间关系时,通常采用的是 Preston 方程,但针对特定加工环境下的关键因素,学者们对该方程式进行了很多的修正^[8-9]。根据前期研究,得出了应用于软固结磨粒气压砂轮的材料去除 Preston 方程^[10]:

$$M_R = NK_1K_2K_3P^{2/3}v \quad (1)$$

式中: M_R —被加工工件的材料去除率, K_1 —被加工工

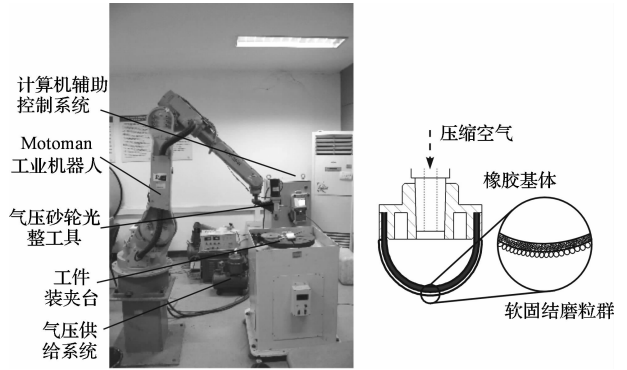


图 1 气压砂轮光整系统与气压砂轮示意图

件硬度系数, K_2 —磨粒硬度系数, K_3 —磨粒粒径系数, N —参与工作的有效磨粒数, P —气压砂轮接触压力, v —磨粒的切削速率。

对于表面激光强化模具而言,由于强化区的硬度和耐磨性均有大幅度提高,其抛光难度也随之有所增加。

根据式(1)可知,通过改变磨粒硬度和粒径、压力 P 以及切削速率 V 可以用来改变材料去除量。其中,压力 P 由气压砂轮基体通过粘结剂间接为磨粒供力,通过浆粕增强后的气压砂轮基体能够提高压力 P 的值。

2 复合气压砂轮的仿真分析

2.1 仿真参数与模型

添加不同含量芳纶浆粕后,气压砂轮基体的弹性模量由国标 GB/T528-2005 中规定的实验方法得到。拉伸试样为哑铃状结构,试验环境温度为 23 °C,拉伸速率为 500 mm/min,每种试样拉伸 3 次。

添加不同芳纶浆粕的复合气压砂轮基体应力-应变关系曲线如图 2 所示。

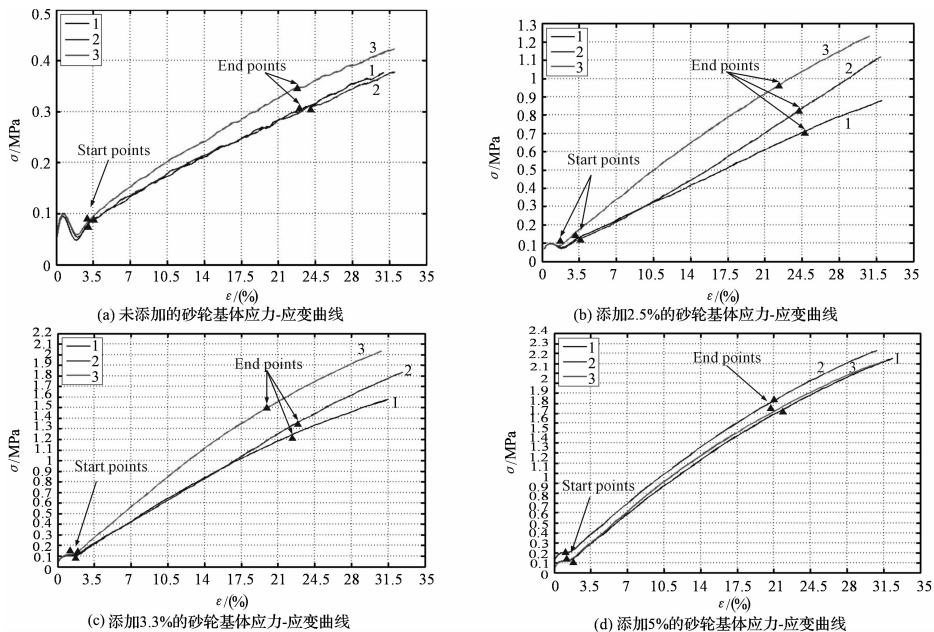


图 2 添加不同浆粕气压砂轮基体的应力-应变曲线

如图2(a~d)所示的曲线依次表示:未添加、添加2.5%、添加3.3%和添加5%芳纶浆粕短纤维的气压砂轮基体材料的轴向应力-应变关系曲线;在图中分别标识了数据拾取起点与拾取终点,可知两点间的曲线近似为直线,求得两点之间的斜率即为试样的弹性模量,取平均值得到的数值结果如表1所示。

表1 不同含量芳纶浆粕气压砂轮的弹性模量

编号	1	2	3	4
纤维含量(%)	0	2.5	3.3	5
平均值 E_c /MPa	1.09	2.43	3.42	5.53
泊松比 μ	0.499	0.494	0.492	0.489

由表1可知,气压砂轮基体的弹性模量随着芳纶浆粕的增加而增加。另外,工件的弹性模量为 2.1×10^6 MPa,泊松比为0.3,气压砂轮的泊松比 μ 可由混合率公式求得^[11],具体数值见表1。

气压砂轮光整加工有限元模型主要由气压砂轮和工件组成,所用的单元类型均为 Solid185 六面体单元,由于橡胶材料的模量小,变形相对较大,变形过程比较复杂,在网格划分时需要利用较小的网格尺寸来保证大变形下的精度,但是过小的网格尺寸会导致求解时间的大幅增加,这里控制气压砂轮的网格尺寸为0.001。

由于模具的弹性模量远大于气压砂轮,故在此可以将其视为刚体,网格可以较为粗大,亦不会影响求解精度,这里控制网格的尺寸为0.002。

2.2 模态分析

本研究对气压砂轮的上部边界全部约束,用 Black Lanczos 法求解,最终可以得到4种气压砂轮各阶振型的频率,气压砂轮基体的基频与纤维含量的关系如图3所示。

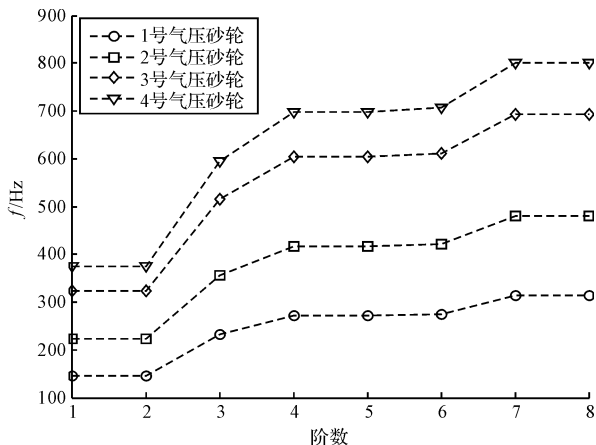


图3 气压砂轮基体的基频与纤维含量的关系

由图3可知:4种气压砂轮第一阶模态和第二阶模态均为对称模态,具有相同的频率,振型对称,振动方式和最大振幅发生的位置也基本相同,基频下气压砂轮的振型如图4所示。

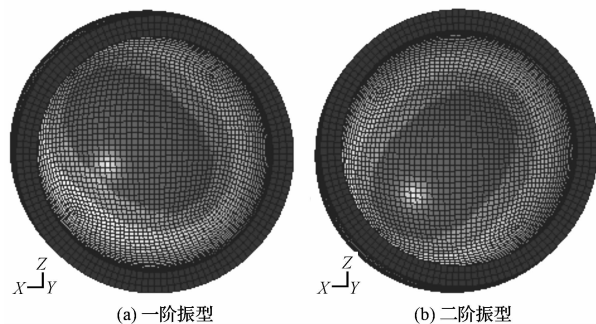


图4 基频下气压砂轮的振型

其次,由于芳纶浆粕短纤维的增强作用,使得气压砂轮基体的固有频率得到了显著的提高。如添加5%芳纶浆粕的气压砂轮,前六阶固有频率分布在370 Hz~710 Hz之间,显著高于未添加芳纶浆粕的气压砂轮的固有频率。其中,第一阶模态的基频从145.71 Hz提高至373.79 Hz,升幅达到156.5%。

因此,提高基频能有效地提高气压砂轮的抗振性。另外,对于其他高阶的振型,由于篇幅所限,本研究在此不作分析。

2.3 气压砂轮光整中的接触应力仿真分析

为了研究气压砂轮光整中的接触应力分布特性,先建立接触对,这里采用单面接触类型,其次设置气压砂轮沿z轴负方向对工件进行进给,进给速率为5 mm/s,转速为1200 rpm,气压砂轮下压量为2 mm,进动角20°,充气压力为50 kPa。

通过提取砂轮接触表面区域中沿x轴方向的应力值,可以得到接触区域的应力-位置关系曲线,如图5所示。

由图5(a~d)可知:气压砂轮的整体接触应力随着气压砂轮中芳纶浆粕含量的增加而增加,但是由于气压砂轮的进给运动,导致其受力出现不对称的现象,左侧峰值大于右侧峰值,并且中间位置的应力值明显小于两侧的应力值,呈M型分布,如图5(a)所示的未添加短纤维的应力分布尤为明显。但是随着短纤维含量的增加,气压砂轮这一现象逐渐改变,0刻度处的应力值逐渐增大,如图5(b~d)所示。当短纤维含量继续增加时,如图5(d)所示,气压砂轮的接触应力区较为集中,即两峰值较为接近,导致气压砂轮局部工作区域的受力出现较大,仿形接触区域减小,对于曲面模具的光整加工较为不利。

由此可见,并不能盲目增加短纤维的含量,而是要适当控制其含量,使气压砂轮绝大多数区域的受力比较均匀。因此,由上述分析结果可知,添加3.3%芳纶浆粕的3号气压砂轮的接触应力分布相对比较均匀,建议选用添加这一比例芳纶浆粕的气压砂轮。

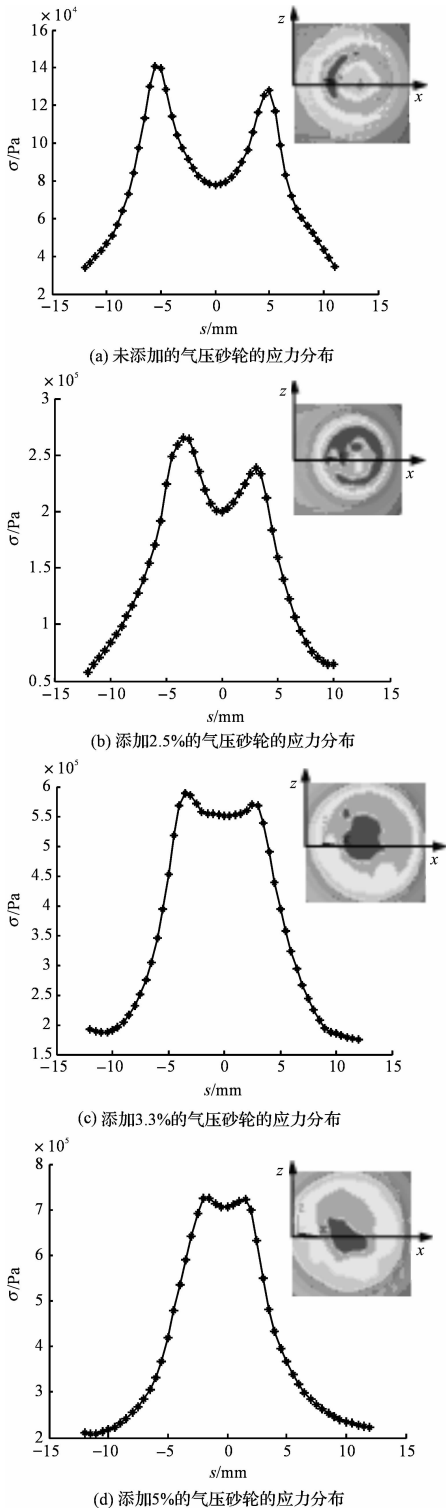


图 5 添加不同浆相气压砂轮基体的应力分布曲线

3 光整试验

芳纶浆粕增强气压砂轮的对比试验目的主要是为

了分析短纤维在基体中的质量分数由 0% 依次递增至 5% 后对抛光效果的影响。

试验所用模具的材质为 Cr12, 激光强化后维氏硬度为 835 HV, 初始表面粗糙度 Ra 为 $0.65 \pm 0.02 \mu\text{m}$, SiC 磨粒的目数为 80 目, 气压砂轮硬度为 40 HA, 充气压力为 0.05 MPa, 下压力为 2 mm, 进动角为 20° , 转速为 1 200 r/min。

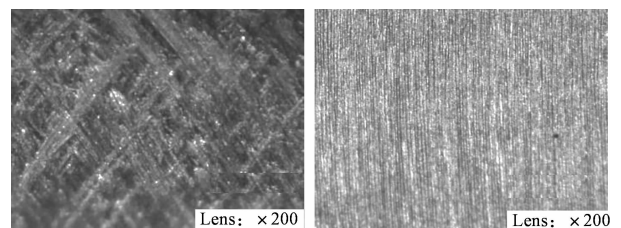
在加工 120 s 后对模具表面进行测量并取平均值, 得到的试验结果如表 2 所示。

表 2 不同短纤维比例气压砂轮试验结果

编号	1	2	3	4
纤维含量	0%	2.5%	3.3%	5%
去除率/($\text{mg} \cdot \text{min}^{-1}$)	1.16	1.05	1.42	1.67
粗糙度 $Ra/\mu\text{m}$	0.267	0.254	0.263	0.272

由表 2 中 40 HA 试验组的材料去除率值可知, 材料的去除率并非随着芳纶浆粕在基体中质量百分数的增加而增加, 例如当添加 2.5% 的芳纶浆粕后, 材料的去除率为 1.05 mg/min , 略小于未添加的 1.16 mg/min , 这是因为添加 2.5% 的芳纶浆粕后气压砂轮的接触仿形能力变小, 接触面积减小, 而接触力未有大幅度地提高, 导致出现材料去除率反而减小的特殊现象。当添加的比例增加后, 接触面积变化的幅度很小, 但是接触力却大大提高, 最终导致材料的去除率又重新增大, 并远超过 1.16 mg/min , 达到 1.67 mg/min , 材料去除效果较为显著, 由此验证了复合气压砂轮光整的高效性。

利用显微成像系统得到的模具光整前、后的表面形貌如图 6 所示。



(a) 光整加工前表面 (b) 光整加工后表面

图 6 激光强化模具光整前、后表面形貌对比

通过对上述试验组的对比可以得出结论: 针对表面激光强化处理的高硬度 Cr12 模具, 通过添加质量百分数超过 3.3% 的芳纶浆粕短纤维后, 可以获得较高的光整效率, 与仿真结果中的接触应力特性相验证, 其

(下转第 567 页)

本文引用格式:

计时鸣, 厉志安, 蔡东海, 等. 复合气压砂轮有限元仿真与光整试验研究[J]. 机电工程, 2014, 31(5): 549-552, 567.

Ji Shi-ming, Li Zhi-an, Cai Dong-hai, et al. Finite element simulation and finishing experiment of the composited pneumatic wheel[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2014, 31(5): 549-552, 567.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

- 进[J]. 汽车技术,2004(4):9-12.
- [7] 隋军. 传动系的弯曲振动及其对汽车飞轮壳强度影响的研究[J]. 汽车技术,1994(6):14-22.
- [8] 张旭升. 柴油机动力总成弯曲振动对飞轮壳强度影响的模拟研究[D]. 长春:吉林大学汽车工程学院,2004.
- [9] 高云凯. 汽车动力总成弯曲振动应力响应及其激励灵敏度分析[J]. 汽车工程,1996(3):163-167.
- [10] 李洪涛,周迅. 客车飞轮壳的载荷谱测试及疲劳寿命分析[J]. 浙江理工大学学报,2013,30(2):224-227.
- [11] GAGNON N H, GAGNON V G. Identification of power-train noise sources using sound intensity and modal analysis techniques[C]. SPIE International Society for Optical, 1997:2016-2020.
- [12] 闫宏伟. 基于NI-DAQ数据采集系统的设计与实现[J]. 可编程控制器与工厂自动化(PLC&FA),2004(9):109-113.
- [13] 严辉. 振动噪声信号在发动机转速提取中的运用[J]. 汽车工程师,2010(7):44-46.

[编辑:张翔]

本文引用格式:

牛健,俞小莉,黄瑞,等. 发动机飞轮壳道路载荷谱试验分析研究[J]. 机电工程,2014,31(5):563-567.

NIU Jian, YU Xiao-li, HUANG Rui, et al. Road load spectrum test analysis for engine flywheel cover[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2014,31(5):563-567.

《机电工程》杂志;<http://www.meem.com.cn>

(上接第552页)

中材料去除率可以提高50%以上,但是对于模具表面粗糙度不会产生较大的影响。

4 结束语

为解决利用气压砂轮激光强化模具过程中,由于高频小幅振动及长时间交变应力作用引起气压砂轮基体产生细微裂纹的问题。通过有限元仿真软件,本研究对芳纶浆粕增强复合气压砂轮的模态与光整中的接触区域应力分布特性的数值进行了分析,验证了通过添加短纤维方法改善气压砂轮抗振性与接触应力分布均匀性的可行性;并且得出结论:当添加质量分数为3.3%的芳纶浆粕时,可以兼顾复合气压砂轮仿形接触能力与应力分布的均匀性。

最后,通过光整加工试验的对比,本研究验证了复合气压砂轮对高硬度模具具有高效光整的可行性,能够较好地满足激光强化曲面模具的光整加工。

参考文献(References):

- [1] 晁拥军. 工模具材料强化处理应用技术[M]. 北京:机械工业出版社,2008.
- [2] 郑涌. 模具行业现状及其发展趋势[J]. 科技信息,2007(4):64-65.
- [3] 洪永昌,王明辉. 激光重熔和时效处理的镍基合金热喷焊层组织和性能的研究[J]. 机械工程学报,2012,48(10):75-81.
- [4] 何柏林,孙佳,史建平. 工模具材料激光表面强化处理应用与发展[J]. 热加工工艺,2009,38(18):85-89.
- [5] 计时鸣,曾晰,金明生,等. 软固结磨粒群加工方法及材料去除特性的分析[J]. 机械工程学报,2013,49(5):173-188.
- [6] 曾晰. 软固结磨粒气压砂轮的光整方法及加工机理研究[D]. 杭州:浙江工业大学机械工程学院,2013.
- [7] 计时鸣,金明生,张宪,等. 应用于模具自由曲面的新型气囊抛光技术[J]. 机械工程学报,2007,43(8):2-6.
- [8] LUO Q, RAMARAJAN S, BABU S V. Modification of the preston equation for the chemical-mechanical polishing of copper[J]. *Thin Solid Films*,1998,335(1):160-167.
- [9] TSENG W T, WANG Y L. Re-examination of pressure and speed dependences of removal rate during chemical mechanical polishing processes[J]. *Journal of the Electrochemical Society*,1997,144(2):15-17.
- [10] WRSCHKA P, HERNANDEZ J, HSU Y, et al. Polishing parameter dependencies and surface oxidation of chemical mechanical polishing of al thin films[J]. *Journal of the Electrochemical Society*,1999,146(7):2689-2696.
- [11] 沈观林,胡更开. 复合材料力学[M]. 北京:清华大学出版社,2006.

[编辑:罗向阳]