

文章编号: 1674-8085(2018)06-0072-05

# 42CrMo 钢激光冲击诱导残余应力的数值模拟

陈 彬

(安徽工业大学, 安徽, 马鞍山 243032)

**摘 要:** 42CrMo 钢具有较高的强度和韧性, 被广泛应用于装备制造行业。本文以 42CrMo 钢为研究对象, 在理论分析的基础上, 运用 ABAQUS 数值模拟的方法, 探讨了在相同激光能量(4J)和脉冲宽度(8ns)情况下, 不同光斑直径(1mm、2mm、3mm、4mm)对激光冲击强化后残余应力分布的影响。结果表明: 光斑直径越小, 激光诱导冲击波的峰值压力越大, 塑性强化层深度越深, 表面的最大 Von Mises 应力值越大; 光斑直径过大或者激光诱导冲击波的峰值压力过大, 均会影响残余应力的分布; 本文的数值模拟条件下, 2mm 直径的光斑, 激光冲击效果最好, 与理论分析结果一致。

**关键词:** 激光冲击强化; 42CrMo; 数值模拟; 残余应力

中图分类号: TG147

文献标识码: A

DOI:10.3969/j.issn.1674-8085.2018.06.013

## NUMERICAL SIMULATION OF RESIDUAL STRESS OF 42CrMo STEEL INDUCED BY LASER SHOCK PEENING

CHEN Bin

(Anhui University of Technology, Ma'anshan, Anhui 243032, China)

**Abstract:** 42CrMo steel is widely used in equipment manufacturing industry because of its high strength and toughness. In this paper, 42CrMo steel is researched. Based on the theoretical analysis, the effects of different spot diameters (1mm, 2mm, 3mm, 4mm) on the residual stress distribution after laser shock peening at the same laser energy (4J) and pulse width (8ns) are investigated by ABAQUS numerical simulation method. The results show that: the smaller the spot diameter is, the greater the peak pressure of laser induced shock wave is, the deeper the plastic strengthening layer is, and the larger the maximum Von Mises stress on the surface is. Residual stress distribution can be affected by the excessive spot diameter or the large peak pressure of laser induced shock wave. Under the numerical simulation condition of this paper, the laser shock effect of 2 mm diameter spot is the best, which is consistent with the theoretical analysis results.

**Key words:** laser shock peening; 42CrMo; numerical simulation; residual stress

## 0 引言

42 CrMo 钢具有较高的强度和韧性, 淬火处理时淬透性好、变形小, 经调质处理后具有良好的疲劳性能和抗冲击能力, 被广泛应用于装备制造行业。随着“中国制造 2025”战略的深入实施以及高

铁、风力发电、大飞机等先进技术装备的迅速发展, 对 42 CrMo 钢的力学性能、使用寿命和加工工艺提出了更高要求。李小龙等<sup>[1]</sup>研究了 42 CrMo 钢常规轧制工艺和控轧控冷工艺, 分析了不同工艺参数对材料金相组织和硬度的影响, 通过工艺参数的优化, 成功解决了直径 100 mm 以下规格 42 CrMo 钢

收稿日期: 2018-09-24; 修改日期: 2018-10-16

基金项目: 安徽工业大学青年教师科研基金项目(QZ201518)

作者简介: 陈 彬(1990-), 男, 安徽安庆人, 实验师, 主要从事先进制造技术方向研究(E-mail:chenbinahut@163.com).

热轧态硬度超标的问题。秦芳诚等<sup>[2]</sup>以装备制造领域中的 42 CrMo 钢轴承环件为研究对象,开展了离心制造、热辗扩成形及淬回火实验,分析了材料的微观组织及力学性能,并对淬回火过程中组织变化规律进行了研究,找到了适宜的回火温度。李文政等<sup>[3]</sup>对 42 CrMo 钢进行了渗氮处理,分析了不同工艺参数下材料的组织与力学性能,并对不同载荷下,材料的磨损机理进行了详细研究。孟庆帅等<sup>[4]</sup>针对 42 CrMo 钢点式移动感应淬火后,过渡区的残余拉应力会降低材料力学性能的问题,提出了喷丸强化改善方法,并借助数值模拟进行了系统性研究,取得了良好的效果。

激光技术近些年快速发展,2018 年的诺贝尔物理学奖也授予了从事激光技术研究的科学家。激光冲击强化技术是激光技术的重要应用之一,它是面向金属、陶瓷等材料进行表面改性的处理技术,它能使材料发生塑性变形并产生残余压应力,同时,材料的表面硬度提高、位错增多、晶粒细化,最终提高材料的力学性能和使用寿命。国内外学者对激光冲击强化技术进行了深入研究,邓仲华等<sup>[5]</sup>针对圆形光斑冲击存在的应力空洞、激光利用率低等问题,采用方形光斑对金属表面进行激光冲击强化处理,并使用 25 J 和 30 J 脉冲能量的激光分别冲击 20 CrMnTi 钢,研究发现,合适的激光功率密度可以提高材料的耐腐蚀性,过大的功率密度反而会加快表面腐蚀速率,并对该现象产生的原因进行了深入剖析。蒋苏州等<sup>[6]</sup>以激光冲击金属表面残余应力形成机制为切入点,提出了基于激光冲击诱导金属动态响应模型构建冲击工艺参数和残余应力分布

关系,从而对残余应力进行定量调控,同时对该工艺在航空航天等领域的应用进行了展望。段海峰等<sup>[7]</sup>对 H62 黄铜进行了单层和三层激光冲击强化实验,发现激光冲击后晶粒细化,出现了纳米结构层,试样磨损系数和磨损率变小,同时研究还表明,H62 黄铜的显微硬度和表面粗糙度随冲击层数的增加而增加,磨损系数和磨损率则随之变小。Yadav M J 等<sup>[8]</sup>从理论角度出发,探讨了激光参数、约束层和吸收层材料厚度等各种输入参数对残余应力和厚度的影响,并就此讨论了激光冲击强化技术的应用和挑战。Siddaiah A 等<sup>[9]</sup>研究了激光强度对 1045 钢表面形貌和摩擦学性能的影响。

目前,光斑直径对残余应力分布的影响和激光冲击强化 42 CrMo 钢后的残余应力分布研究均较少。本文在保持激光能量和脉冲宽度一定的情况下,先从理论维度探讨光斑直径对激光诱导冲击波的影响,并结合残余应力的弹塑性模型进行分析;然后运用数值模拟的方法,对不同光斑直径冲击后的残余应力分布进行仿真,并与理论分析结果进行对比,研究表明:在本文的激光冲击条件下,2 mm 直径的光斑冲击效果最好。

## 1 理论分析

### 1.1 光斑直径对激光诱导冲击波压力的影响

本文以 42 CrMo 钢作为激光冲击的靶材,其材料属性见表 1。吸收层选用铝箔,约束层选用水,激光能量为 4 J,脉冲宽度 8 ns。

表 1 42CrMo 钢的材料属性

Table 1 Material properties of 42CrMo steel

材料牌号	屈服强度 MPa	抗拉强度 MPa	硬度 HV	密度 kg/m <sup>3</sup>	弹性模量 N/m <sup>2</sup>	泊松比	伸长率 %
42CrMo	≥ 930	≥ 1080	≤ 320	7850	2.12×10 <sup>11</sup>	0.28	≥ 12

光斑直径会影响激光诱导冲击波的峰值压力,研究表明<sup>[10]</sup>:激光诱导冲击波的峰值压力  $P$ (GPa) 与折合声抗阻  $Z$ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )、激光功率密度  $I_0$ ( $\text{GW} \cdot \text{cm}^{-2}$ ) 和  $\alpha$  常数有关,折合声抗阻的大小受到吸收层  $Z_1$ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) 与约束层声抗阻

$Z_2$ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) 的影响,功率密度的大小受到激光能量  $E$ (J)、光斑直径  $d$ (cm)、脉冲宽度  $\tau$ (ns) 和吸收率  $\gamma$  的影响,公式如下:

$$P = 0.01 \sqrt{\frac{\alpha Z I_0}{2\alpha + 3}} \quad (1)$$

$$\frac{2}{Z} = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} \quad (2)$$

$$I_0 = \frac{4\gamma E}{\tau\pi d^2} \quad (3)$$

本文取  $\alpha=0.15$ 、 $\gamma=0.85$ 、 $\tau=8\text{ns}$ 、 $E=4\text{J}$ 、 $Z_1=1.41\times 10^6\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $Z_2=0.165\times 10^6\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ，将数据代入公式(1)、(2)、(3)，得到激光诱导冲击波的峰值压力与光斑直径关系式：

$$P = \frac{0.85}{d} \quad (4)$$

本文取光斑直径为 1、2、3 和 4 mm 进行研究，代入公式(4)，得到对应激光诱导冲击波的峰值压力见表 2，对应的冲击波压力时程曲线如图 1 所示。

表 2 不同光斑直径下激光诱导冲击波的峰值压力  
Table 2 Peak pressure of shock wave induced by laser at different spot diameter

序号	光斑直径 d/mm	峰值压力 P/GPa
1	1	8.50
2	2	4.25
3	3	2.83
4	4	2.13

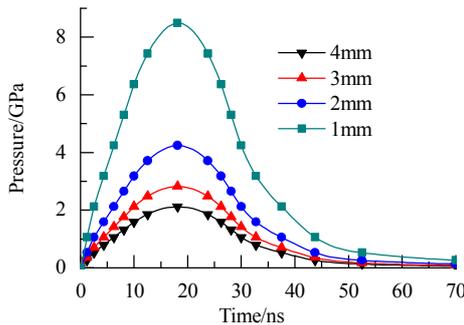


图 1 不同光斑直径下冲击波压力时程曲线

Fig.1 Time history curves of shock pressure at different spot diameters

## 1.2 残余应力的弹塑性模型

当冲击波的峰值压力大于冲击波传播方向上的最高弹性应力 (HEL) 时，金属会发生塑性变形；当峰值压力小于 HEL 时，金属就停止发送塑性变形。Johnson 和 Rhodes<sup>[11]</sup>推导出的最高弹性应力公式：

$$\text{HEL} = \frac{1-\nu}{1-2\nu} \sigma_Y^{\text{dyn}} \quad (5)$$

式中  $\nu$  为材料的泊松比，42CrMo 钢的泊松比  $\nu=0.28$ ； $\sigma_Y^{\text{dyn}}$  为材料高应变率下的动态屈服强度，单位 GPa，42 CrMo 钢高应变率下的动态屈服强度  $\sigma_Y^{\text{dyn}}=1.28\text{GPa}$ <sup>[12]</sup>。将数据带入式(5)，得到 42 CrMo 钢的最高弹性应力  $\text{HEL}=2.1\text{GPa}$ 。针对 42 CrMo 钢，

冲击波压力大于  $\text{HEL}=2.1\text{GPa}$ ，小于  $\text{HEL}=2.1\text{GPa}$  时，材料发生塑性变形；冲击波压力大于  $\text{HEL}=2.1\text{GPa}$  时，材料发生完全塑性变形；冲击波压力大于  $2.5\text{HEL}=5.25\text{GPa}$  时，表面释放波聚集并从冲击区边缘放大，从而改变残余应力场的值<sup>[13]</sup>。因此，最佳冲击波峰值压力在  $2\text{HEL}\sim 2.5\text{HEL}(4.2\text{GPa}\sim 5.25\text{GPa})$ 。当光斑直径为 2 mm 时，激光诱导冲击波的峰值压力为 4.25 GPa，冲击效果最好。

## 2 数值模拟

### 2.1 有限元模型

为了准确研究 42 CrMo 钢在不同光斑直径下，激光冲击强化后残余应力的分布，建立 1/4 计算模型如图 2 所示，该模型可以在不影响计算精度的情况下，提高计算机的运算效率，模型尺寸为  $\phi 10\text{mm}\times 3\text{mm}$ ，选择扫掠的方式划分网格，网格类型为 C3D8R，有限元模型如图 3 所示(光斑直径为 2 mm 模型)。对模型底部施加全约束，两矩形侧面施加对称约束。

采用 ABAQUS 模拟激光冲击强化诱导的残余应力场，模拟计算由显式动态分析步和隐式静态分析步组成，其中显式动态分析求解时间设定为 10000 ns，隐式静态分析步求解时间为 1s。

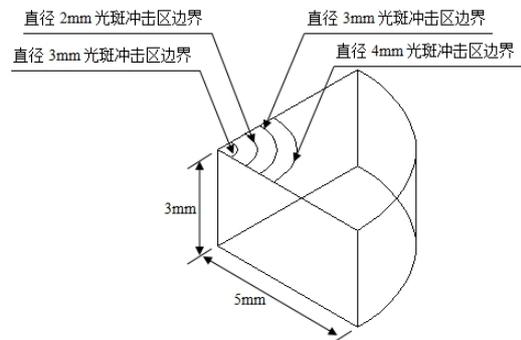


图 2 模型示意图

Fig.2 Schematic diagram of the model

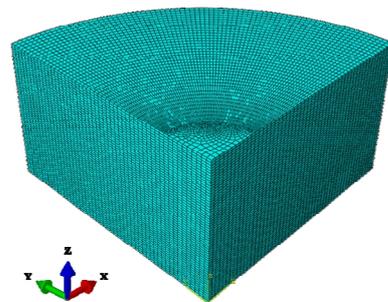


图 3 有限元模型(光斑直径: 2mm)

Fig.3 The finite element model (spot diameter: 2mm)

2.2 材料本构模型

由于 Johnson-Cook(JC) 模型充分考虑了金属材料的加工硬化、高应变率率和温度软化效应, 且激光冲击强化主要利用冲击波的力学效应而非热效应, 因此本文采用简化的 JC 模型<sup>[14]</sup>, 其主要的参数如表 3 所示。

表 3 42 CrMo 钢的 JC 模型参数<sup>[15]</sup>

Table 3 JC model parameters of 42CrMo steel

屈服强度 MPa	硬化模量 MPa	应变强化系数	硬化系数	塑性应变率
1059	528	0.008	0.211	1

2.3 数值模拟结果与分析

利用有限元软件 ABAQUS 进行数值模拟后得到如图 4 所示的表面 Von Mises 应力分布图。由图 4 可以看出, 激光能量和脉冲宽度不变的情况下,

采用 1、2、3 和 4 mm 的光斑直径冲击后, 在表面形成了一个扇形分布的 Von Mises 应力场, 最大 Von Mises 应力分别为 1059.0、886.2、439.5 和 161.6 MPa, 最大 Von Mises 应力值随着光斑直径的增大而减小, 主要原因是光斑直径越大, 激光诱导产生的冲击波压力越小, 导致激光冲击后产生的 Von Mises 应力值变小。从图 4 中还可以看出光斑直径为 2 mm 和 3 mm 时, Von Mises 应力场分布较为均匀; 直径为 4 mm 时, 冲击产生的 Von Mises 应力值过小; 直径为 1 mm 时, 最大 Von Mises 应力出现在光斑边缘的部分位置, Von Mises 应力场分布不均匀, 产生该现象的原因是光斑直径过小, 激光诱导产生的冲击波压力过大, 表面释放波聚集并从冲击区边缘放大, 与理论分析结果一致。

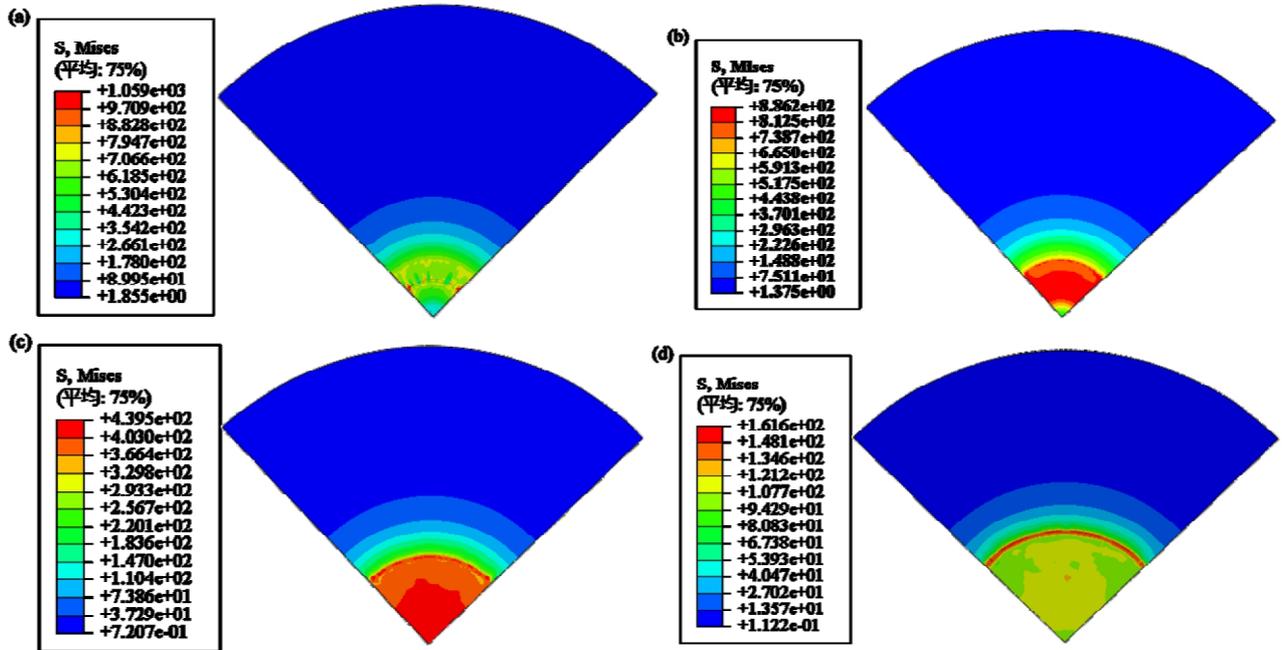


图 4 不同光斑直径下冲击后表面的 Von Mises 应力分布图 (a)1mm; (b)2mm; (c)3mm; (d)4mm  
Fig.4 Von Mises stress distribution after laser shock peening at different spot diameters  
(a)1mm; (b)2mm; (c)3mm; (d)4mm

在激光能量为 4 J, 脉冲宽度 8 ns 不变的情况下, 比较光斑直径对 42 CrMo 钢试样残余应力分布的影响。图 5 表示不同光斑直径下沿试样表面方向的残余应力分布。光斑直径为 3 mm 和 4 mm 时, 激光诱导冲击波的峰值压力分别为 2.83 GPa 和 2.13 GPa, 表面残余应力最大值均出现在光斑中心位置, 分别为 -409.4 MPa 和 -104.9 MPa。光斑直径为 4 mm 时,

由于冲击区域距离试样边界较近, 激光诱导应力波横向传播到试样边界时, 衰减较少, 反射后转化为拉应力波<sup>[16]</sup>, 且强度较高, 形成的残余拉应力场抵消了之前形成的残余压应力场, 导致表面残余应力值大大减少, 文献[17]对该现象进行了详细分析与阐释。当光斑直径为 2 mm 时, 激光诱导冲击波的峰值压力为 4.25 GPa, 最大残余应力分别为 -843

MPa, 残余应力分布较为均匀, 激光冲击强化后均出现了残余应力空洞<sup>[18]</sup>。当光斑直径为 1 mm 时, 激光诱导冲击波的峰值压力为 8.50 GPa, 最大残余应力为 -602 MPa, 光斑中心位置出现了残余拉应力, 残余应力空洞更为严重, 主要原因是激光诱导冲击波的强度高, 冲击波传播至边界位置反射回来冲击波强度也较高, 并且冲击波的峰值压力远远高于材料的最高弹性应力, 表面释放波聚集并从冲击区边缘放大, 两者共同作用影响了试样表面的残余压应力场, 使残余压应力值减小, 分布不均匀。

图 6 表示不同光斑直径下沿试样深度方向的残余应力分布。光斑直径为 1、2、3 和 4 mm 时, 塑性强化层深度分别为 0.7、0.45、0.4 和 0.25 mm, 同等激光能量情况下, 光斑直径越小, 激光诱导冲击波的峰值压力越大, 激光冲击强化后的塑性强化层深度越深, 当光斑直径为 1 mm 时, 由于激光诱导冲击波的峰值压力值远远大于最高弹性应力, 在表面产生了较高残余拉应力。残余应力的数值模拟结果与理论分析结果较为一致。

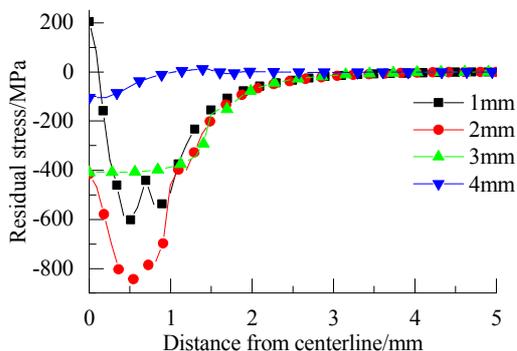


图 5 残余应力沿表面方向分布图

Fig.5 Residual stress distribution along surface direction

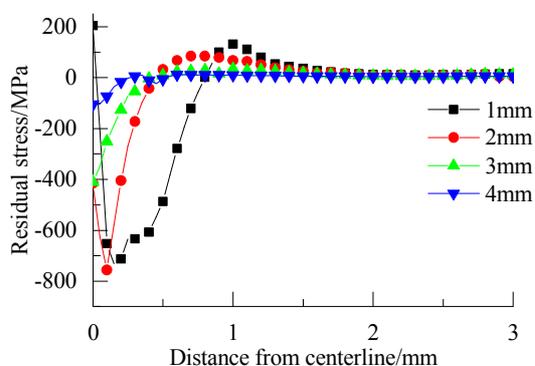


图 6 残余应力沿深度方向分布图

Fig.6 Residual stress distribution along depth direction

### 3 结论

1) 在同等激光能量和脉冲宽度情况下, 光斑直径越小, 激光诱导冲击波的峰值压力越大, 激光冲击强化后的塑性强化层深度越深, 表面的最大 Von Mises 应力值越大;

2) 随着激光诱导冲击波的峰值压力的增加, 会产生残余应力空洞现象, 表面残余压应力最大值位置发生偏移, 且激光诱导冲击波的峰值压力越大, 现象越明显;

3) 当模型尺寸较小时(文中取  $\phi 10$  mm), 光斑直径过大或激光诱导冲击波的峰值压力过大, 都会由于边界反射回来的拉应力波的影响, 改变原有的残余压应力场;

4) 在激光能量为 4 J, 脉冲宽度 8 ns, 试样尺寸为  $\phi 10$  mm  $\times$  3 mm 时, 光斑直径为 2 mm 冲击效果最好。

#### 参考文献:

- [1] 李小龙,周敦世,周立新,等. 42CrMo 钢轧制工艺优化[J]. 锻压技术,2017,42(1):71-74.
- [2] 秦芳诚,齐会萍,李永堂,等. 42CrMo 钢轴承环件铸锻成形及淬回火组织性能研究[J].机械工程学报,2017,53(2): 26-33.
- [3] 李文政,王博,郭正洪,等. 渗氮层组织调控对 42CrMo 钢磨损性能的影响[J].材料热处理学报,2018,39(1): 116-122.
- [4] 孟庆帅,汪舟,甘进,等. 喷丸强化改善点式移动感应淬火 42CrMo 钢残余应力数值模拟分析[J].表面技术,2017, 47(9):12-20.
- [5] 邓仲华,刘其斌,徐鹏,等. 方形光斑激光冲击强化金属表面的耐腐蚀性能及机理[J].材料工程,2018,46(8): 140-147.
- [6] 蒋苏州,曹宇鹏,花国然,等. 激光冲击金属表面残余应力形成机制的研究进展[J].热加工工艺,2018,47(14): 14-18.
- [7] 段海峰,罗开玉,鲁金忠. 激光冲击强化 H62 黄铜摩擦磨损性能研究[J].光学学报,2018,38(10):1014002.
- [8] Yadav M J, Jinoop A N, Danduk C, et al. Laser Shock Processing: Process Physics, Parameters, and Applications[J]. Materials Today Proceedings, 2017, 4(8):7921-7930. (参考文献[9]- [18]转第 105 页)

施, 激发居民和游客的观鸟兴趣和爱好, 提高其爱鸟护鸟的环保意识, 妥善处理公园开发与生物多样性保护之间的关系。

#### 参考文献:

- [1] 王强, 吕宪国. 鸟类在湿地生态系统监测与评价中的应用[J]. 湿地科学, 2007, 5(3): 274-281.
- [2] 袁军, 吕宪国. 湿地功能评价研究进展[J]. 湿地科学, 2004, 2(2): 153-160.
- [3] 崔鹏, 邓文洪. 鸟类群落研究进展[J]. 动物学杂志, 2007, 42(4): 149-158.
- [4] 钟福生, 杨春苑, 彭娜, 等. 广东梅县机场鸟类群落结构研究[J]. 井冈山大学学报: 自然科学版, 2014, 35(4): 99-106.
- [5] 盛和林, 王岐山. 脊椎动物学野外实习指导[M]. 北京: 人民教育出版社, 1983
- [6] Howes J, Bakewell D. Shorebird Studies Manual[M]. KualaLumPur: AWB Publication, 1989: 143-147.
- [7] 郑光美. 中国鸟类分类与分布名录[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2011.
- [8] 张荣祖. 中国动物地理[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [9] 马敬能. 中国鸟类野外手册[M]. 长沙: 湖南科学技术出版社, 2000.
- [10] 马克平. 生物群落多样性的测度方法[J]. 生物多样性, 1994, 2(3): 162-168.
- [11] 张海明. 多样性指数公式在鸟类群落应用的探讨[J]. 生态学杂志, 1990, 9(5): 50-55.
- [12] 丁平, 诸葛阳, 姜仕仁. 浙江古田山自然保护区鸟类群落生态研究[J]. 生态学报, 1989, 9(2): 121-126.
- [13] 陈领. 古北和东洋界在我国东部的精确划界——据两栖动物[J]. 动物学研究, 2004, 25(5): 369-377.
- [14] Robert S H. The southern boundary of the palaerctic realm in China and adjacent countries[J]. Acta Zoologica Sinica, 2001, 47(2): 121-131.
- [15] 杨月伟, 夏贵荣, 丁平, 等. 浙江乐清湾湿地水鸟资源及其多样性特征[J]. 生物多样性, 2005, 13(6): 507-513.
- [16] 陈军林, 周立志, 许仁鑫, 等. 巢湖湖岸带鸟类多样性的初步研究[J]. 动物学杂志, 2010, 45(3): 139-147
- [17] 王松, 常丽, 高飞, 等. 安徽颍州西湖湿地自然保护区水鸟多样性及季节动态[J]. 湿地科学, 2015, 13(5): 616-620.
- [18] 平磊, 周立志. 焦岗湖国家湿地公园鸟类群落多样性及其季节动态[J]. 生物学杂志, 2018, 35(1): 68-72.
- [19] 王松, 杨笑, 焦润杰, 等. 安徽三汊河国家湿地公园鸟类多样性及群落结构特征[J]. 淮北师范大学学报: 自然科学版, 2018, 39(1): 48-54.
- [9] Siddaiah A, Mao B, Liao Y, et al. Surface characterization and tribological performance of laser shock peened steel surfaces[J]. Surface & Coatings Technology, 2018, 351: 188-197.
- [10] Fabbro R, Fournier J, Ballard P, et al. Physical study of laser-produced plasma in confined geometry[J]. J Appl Phys, 1990, 68(2): 775-784.
- [11] Johnson J N, Rhode R W. Dynamic deformation twinning in shock loaded iron[J]. Journal of Applied Physics, 1971, 42(11): 4171-4182.
- [12] 卢也森. 42CrMo 钢力学性能研究及其动态本构描述[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
- [13] 黄舒, 周建忠, 陈毅彬, 等. 金属板料受控激光喷丸强化的残余应力场分析[J]. 农业机械学报, 2007, 38(12): 195-198.
- [14] Johnson G R, Cook W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures[C]. 7 th International Symposium on Ballistics, 1983, 21: 541-547.
- [15] 卢也森, 朱志武, 谢奇峻. 基于改进 J-C 模型的 42CrMo 钢本构关系研究[J]. 四川理工学院学报: 自然科学版, 2016, 29(3): 61-65.
- [16] 王礼立. 应力波基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 1985.
- [17] 张兴权, 章艳, 段士伟, 等. 圆杆在激光冲击作用下动态响应的数值模拟[J]. 中国激光, 2015, 42(9): 0903009.
- [18] 姜银方, 来彦玲, 张磊, 等. 激光冲击材料表面“残余应力洞”形成规律与分析[J]. 中国激光, 2010, 37(8): 2073-2078.

(上接第 76 页)