

文章编号: 0258-7025(2008)07-1073-05

LY12CZ 激光熔覆的疲劳性能

孙福娟 胡芳友 黄旭仁 王 斌 卢常亮 胡 滨

(海军航空工程学院青岛分院, 山东 青岛 266041)

摘要 通过有效控制固体 YAG 脉冲式激光器的电流、脉冲宽度、频率、光斑直径、扫描速度等有关工艺参数, 模拟飞机腐蚀损伤的铝合金试样表面激光熔覆 Al-Y(Y 的质量分数为 4%) 合金, Al-Si(Si 的质量分数为 12%) 合金, 充分时效后进行疲劳实验、疲劳断口分析和金相分析。结果表明, 熔覆 Al-Y 合金试样的安全寿命达到熔覆 Al-Si 合金试样寿命的 339%, 熔覆层和基体结合得比较紧密, 熔覆层气孔、夹杂等缺陷较少, 疲劳断口裂纹扩展区存在疲劳条带和疲劳台阶, 熔覆 Al-Si 合金试样的熔覆层气孔缺陷较多, 没有呈现低周疲劳的特征。

关键词 激光技术; 铝合金; 激光熔覆; 疲劳寿命; 疲劳断口; 金相组织; 稀土

中图分类号 TG 146. 2; TN 249 **文献标识码** A **doi**: 10. 3788/CJL20083507. 1073

Fatigue Performance of Laser Cladding on LY12CZ

Sun Fujuan Hu Fangyou Huang Xuren Wang Bin Lu Changliang Hu Bin

(Qingdao Branch of Naval Aeronautical Engineering Academy, Qingdao, Shandong 266041, China)

Abstract In order to find a good method to repair the corrosion damage of LY12CZ, laser cladding Al-Y (4%Y) and Al-Si (12%Si) powder on LY12CZ was studied by changing the technological parameters of the YAG pulsed laser, such as current, pulse width, frequency, spot diameter and scanning velocity. Through studying the fatigue test, analyzing the fatigue fracture and metallic phase, the result shows that the fatigue life of the laser cladding Al-Y is 339% of the cladding Al-Si alloy specimens. There was little pore and impurity in the Al-Y layer which joins with the substrate firmly. There is fatigue ribbon and fatigue setback in the expansion region of the crack. There are many holes in the Al-Si layer which does not appear the low-cycle fatigue characteristic.

Key words laser technique; aluminum alloys; laser cladding; fatigue life; fatigue fracture; microstructure; rare metal

1 引 言

航空常用铝合金材料 LY12CZ 工作在含有灰尘、水分甚至含有盐雾的大气环境中, 表面防护层往往在较短时间内失去作用, 使铝合金材料产生腐蚀, 降低疲劳性能, 减少使用寿命^[1]。激光熔覆是近年来新兴的一种材料表面修复技术, 是改善材料表面性能的有效手段^[2~5]。激光熔覆可以使熔覆层与基体材料之间实现良好的冶金结合, 提高材料的耐磨、耐蚀、耐冲击等性能。激光熔覆从 20 世纪 70 年代提出至今, 展开了在低碳钢、不锈钢、铸铁、铝合金以及特殊合金上激光熔覆钴基、镍基、铁基、钛、碳化

物、氧化物等的研究工作^[6~11], 工作主要集中在激光熔覆工艺参数、激光熔覆层的微观组织结构和金相分析等。根据 LY12CZ 腐蚀损伤修复的要求, 实验以常用航空材料 LY12CZ 为基材, 模拟飞机腐蚀损伤, 在其表面熔覆 Al-Y(Y 的质量分数为 4%), Al-Si(Si 的质量分数为 12%) 两种不同的合金粉末, 根据所受疲劳载荷的特点, 研究其抗疲劳性能。

2 实 验

2.1 试样的制备

以 LY12CZ 板材为原始材料, 包覆纯铝层, 热

收稿日期: 2007-10-29; 收到修改稿日期: 2007-12-25

作者简介: 孙福娟(1970—), 女, 山东人, 硕士研究生, 主要从事高强铝合金激光焊接及激光表面处理工艺方面的研究。

E-mail: sunfujian1970@126.com

导师简介: 胡芳友(1960—), 男, 辽宁人, 教授, 博士生导师, 主要从事激光加工技术在航空飞行器维修领域中的应用和新材料新技术等方面的研究。E-mail: fangyouhu@hotmail.com

处理状态为淬火加自然时效,其结构尺寸按国家标准 GB/T228-87 执行。在试样的中心用铣削的方法加工出一小坑,直径为 10 mm,坑深为 1.5 mm ± 0.1 mm,如图 1 所示。其作用是模拟飞机结构件上的腐蚀或损伤小坑,通过熔覆修补研究激光熔覆修理后铝合金结构件的性能。

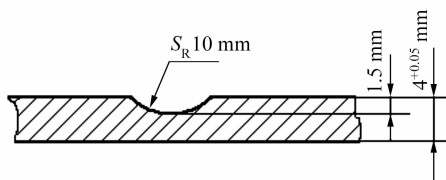


图 1 LY12CZ 熔覆前断面

Fig. 1 Fracture of the specimen before cladding

2.2 激光熔覆的实验条件与方法

2.2.1 实验条件

实验使用的激光器为 JHM-1GX-200B 型 YAG 脉冲式激光器,采用激光多层多道扫描。激光处理时试样表面由 Ar 气保护,光斑直径 0.5~1.2 mm,激光工作电流 160~300 A,脉冲频率 2~4 Hz,脉冲宽度 1.5~3.5 ms,激光扫描速度 0.4~1.2 mm/s。在此范围内选取一系列参数值进行正交实验,并根据其性能,得到一组优化后的参数值,即电流 300 A,脉冲宽度 3 ms,频率 3 Hz,光斑直径 1 mm,扫描速度 0.8 mm/s。

2.2.2 实验方法

熔覆实验分为两组,一组是熔覆 Al-Y(Y 的质量分数为 4%)合金,另外一组熔覆 Al-Si(Si 的质量分数为 12%)。激光熔覆的过程是铺粉,进行多层多道扫描。熔覆结束后将表面打磨平整,如图 2 所示。熔覆后室温放置 4 天以上,使试样充分时效。

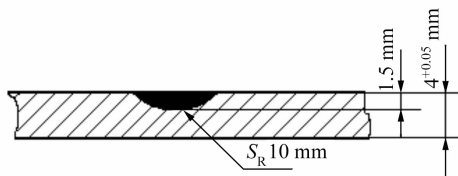


图 2 LY12CZ 熔覆后断面

Fig. 2 Fracture of the specimen after cladding

3 疲劳性能测试及断口分析

3.1 疲劳性能测试实验

将已完成熔覆并且已经时效的试样,进行疲劳实验,疲劳实验机为立式 INSSTRON-8502 型电液伺服疲劳试验机。实验条件为正弦波形,频率 8 Hz,实验最大应力 $\sigma_{\max} = 275$ MPa,最小应力 σ_{\min}

$= 55$ MPa, 负荷控制 (其中负荷 -100%, 变形 -50%), 拉-拉载荷, 疲劳实验结果如表 1 所示。

表 1 疲劳实验结果(周次)

Table 1 Result of the fatigue test (times)

Cladding Al-Y	10437	8472	12148	11573	9322
Cladding Al-Si	4218	5746	5792	6740	6276

3.2 实验结果分析

通常铝合金材料疲劳性能观测值母体分布规律为正态分布,在此前提下,由于实验采用的应力水平为屈服极限的 60% 以上 (LY12 的 $\sigma_b = 415$ MPa, $\sigma_{0.2} = 430$ MPa, $\sigma_{\max} = 275$ MPa), 母体的分散性较小。因此,每组试件数量为 5,属于小子样,可以用小子样数据估计母体参数。分布参数是根据样本的实验数据进行估计的,假设两组试样在应力水平下的疲劳寿命按对数正态分布,把两组试样的疲劳寿命 N_i 取对数 X_i ,即

$$X_i = \lg N_i.$$

根据表 1 数据及

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lg N_i = \hat{\mu}, \quad (1)$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n X_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n X_i \right)^2}{n-1}} = \hat{\sigma}, \quad (2)$$

分别计算出子样平均值 \bar{X} 和标准差 s 的数值,记入表 2。

取可靠度为 99%,查得 99% 可靠度的标准正态分布偏量 $u_p = -2.326$,将 \bar{X} 和 s 的数值代入

$$\hat{X}_p = \hat{\mu} + u_p \hat{\sigma} = \bar{X} + u_p s, \quad (3)$$

$$\hat{N}_p = \lg^{-1} \hat{X}_p, \quad (4)$$

分别求出对应 99% 可靠度的对数安全寿命估计量 \hat{X}_p 和安全寿命估计量 \hat{N}_p ,再记入表 2。

表 2 安全寿命估算及对比

Table 2 Contrast of safety life estimation

	\bar{X}	s	\hat{X}_p	\hat{N}_p
Cladding Al-Y	4.01	0.05	3.89	7762
Cladding Al-Si	3.76	0.17	3.36	2290

从表 2 中不难看出,熔覆 Al-Y 试样的安全寿命达到了熔覆 Al-Si 试样安全寿命的 339%。通过疲劳断口和金相组织来分析熔覆 Al-Y 试样安全寿命提高的原因。

3.3 断口分析

试样的疲劳断口均出现在熔覆层的位置,如图 3 所示。断口分析是在 JXA-8800R 电子探针上对试样断口进行扫描得出的结果。

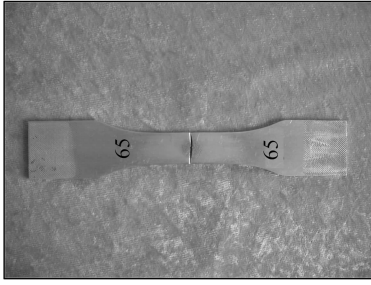


图 3 断口位置

Fig. 3 Position of the crack

3.3.1 熔覆 Al-Y 合金试样的断口分析

由于两组试样的疲劳周次均低于 $10^4 \sim 10^5$, 所以都属于低周疲劳。图 4 是熔覆 Al-Y 合金试样的疲劳断口。从图 4(a) 看出, 熔覆层和基体结合得非常紧密, 在熔覆层内仅存在着少量非常小且形状规则的气孔, 其他裂纹、夹杂等缺陷较少。这主要是因为稀土元素 Y 加入铝合金中, 使铝合金熔铸时增加成分过冷, 细化晶粒, 减少二次枝晶间距, 减少合金中的气体和夹杂, 并使夹杂相趋于球化, 同时降低了熔体表面张力, 增加流动性, 对工艺性能有明显的影 响。图 4 (b) 是裂纹扩展区, 在裂纹扩展区观察到疲劳条带和疲劳台阶, 并且疲劳条带的宽度较宽, 说明裂纹扩展的速率比较快。虽然轮胎花样是低周循环所独有的形貌特征, 但是在试样断口上没有观察到。

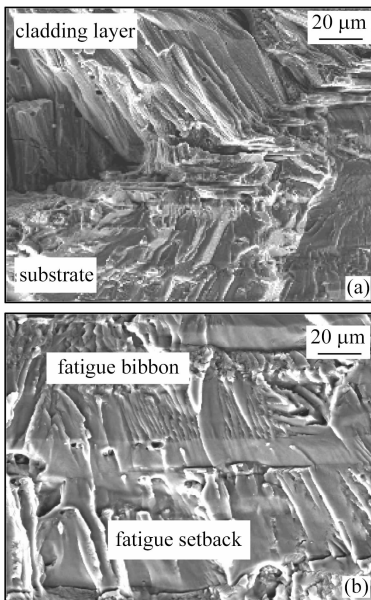


图 4 激光熔覆 Al-Y (Y 的质量分数为 4%) 试样的断口
(a) 熔覆层与基体过渡区; (b) 裂纹扩展区

Fig. 4 Fracture of the laser cladding Al-Y. (a) transition area of the layer and base; (b) extended area of the crack

3.3.2 熔覆 Al-Si 合金试样的断口分析

观察熔覆 Al-Si 合金试样的断口, 如图 5(a) 所示, 发现在熔覆区有大量形状规则和不规则的气孔存在, 气孔缺陷较多。分析原因, 气孔是在熔覆过程中产生的, 主要来源为保护气体、粉末的粘结剂、金属蒸气等。在断口中还有少量的“鱼眼”, 是由于熔覆时产生的组织缺陷, 即夹杂、未熔金属颗粒、孔洞、粗大的晶粒以及影响较大的弱化相等。在它们周围有许多微小的裂纹, 成为裂纹源。图 5 (b) 裂纹扩展区没有观察到低周疲劳的明显特征轮胎花样、骨脊状花样、海滩花样等, 说明熔覆区在较少循环数量的应力作用下萌生裂纹, 并且很快扩展至整个熔覆层^[12]。最初的裂纹可能在界面层和较大的气泡缺陷共同作用下产生, 先向表层快速扩展, 穿透熔覆层的裂纹在试样基体截面内产生更严重的应力集中, 使界面处的裂纹向基体扩展。

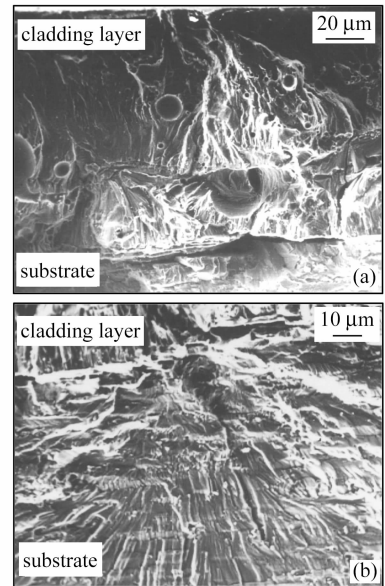


图 5 激光熔覆 Al-Si (Si 的质量分数为 12%) 试样的断口
(a) 熔覆层与基体过渡区; (b) 裂纹扩展区

Fig. 5 Fracture of the laser cladding Al-Si. (a) transition area of the layer and substrate; (b) extended area of the crack

4 金相分析

金相分析是在 JXA-8800R 电子探针上对试样断口进行扫描得出的结果。

4.1 熔覆 Al-Y 试样的金相分析

从图 6 看出熔覆层与基体的结合非常紧密, 熔覆层和基体没有明显的分界线, 但是熔覆层内有少量气孔和涂熔覆层时留下的孔隙。在熔覆层中看不

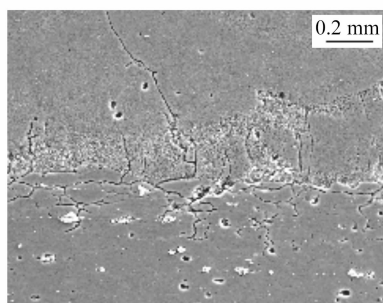


图6 激光熔覆 Al-Y 试样断口的金相组织

Fig. 6 Microstructure of crack of the laser cladding Al-Y 到明显的析出物,而基体上一些大的强化相析出颗粒却非常明显,说明熔覆层组织和析出强化相更加细密。基体上有许多弥散均匀分布的小坑,这是易侵蚀相在腐蚀试样时被腐蚀出的小坑。

4.2 熔覆 Al-Si 试样的金相分析

图7为 Al-Si 粉末熔覆层的金相组织,组织中灰色相为 α -Al, 白色片状组织为共晶硅,从熔覆层的金相组织中明显观察到有一定不规则的气孔缺陷存在,但熔覆层中组织较均匀,大尺寸白色片状的共晶硅可能对材料的疲劳性能造成不利影响,特别是当应力的方向垂直于晶粒轴线方向时,可能导致疲劳寿命大幅度降低。同时,明显可见分布较广的微观缺陷在承受交变载荷时将增加材料裂纹的形成和发展速率,从而降低疲劳寿命。

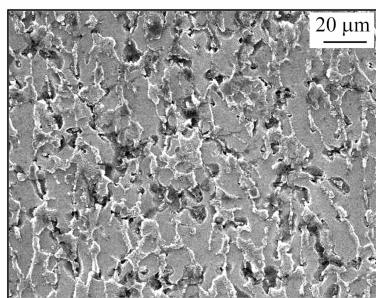


图7 激光熔覆 Al-Si 试样断口的金相组织

Fig. 7 Microstructure of crack of the laser cladding Al-Si

5 结 论

疲劳实验表明,熔覆 Al-Y 合金试样的安全寿命达到了熔覆 LY12 合金安全寿命的 339%,激光熔覆后冷速过快及稀土元素的综合作用形成了极其细小的柱状晶,从而起到了细晶强化的作用^[13]。表明 LY12CZ 铝合金激光熔覆 Al-Y 合金填补点蚀坑是一种有发展前途的激光应用技术。在电流为 300 A,脉冲宽度为 3 ms,频率为 3 Hz,光斑直径为

1 mm,扫描速度为 0.8 mm/s 的工艺参数条件下,LY12CZ 铝合金激光熔覆 Al-Y 合金熔覆层缺陷比熔覆 Al-Si 熔覆层的缺陷少,在疲劳断口发现明显的低周疲劳特征。

参 考 文 献

- Sun Fujuan, Liu Hongjun, Hu Fangyou. Effect of laser surface remelting on performance of LY12CZ [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(8):1159~1162
孙福娟,刘洪军,胡芳友. 激光表面重熔对 LY12CZ 性能的影响[J]. *中国激光*, 2007, **34**(8):1159~1162
- S. Tosto, F. Plerdominici, M. Bianco. Laser cladding and alloying of a Ni-base superalloy on plain carbon steel [J]. *Journal of Materials Science*, 1994, **29**:504~509
- Y. P. Hu, C. W. Chen, K. Mukherjee. Development of a new laser cladding process for manufacturing cutting and stamping dies [J]. *Journal of Materials Science*, 1998, **33**:1287~1292
- Cui Aiyong, Hu Fangyou, Hui Li. Microstructure and wear-resisting property of (Ti + Al/Ni)/(Cr₂O₃ + CeO₂) laser cladding on titanium alloy [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(3):438~441
崔爱永,胡芳友,回 丽. 钛合金表面激光熔覆(Ti+Al/Ni)/(Cr₂O₃+CeO₂)复合涂层组织与耐磨性能[J]. *中国激光*, 2007, **34**(3):438~441
- Ying Xiaodong, Li Wushen, Feng Lingzhi. Technology of laser surfacing modification and development situation domestically and abroad [J]. *Welding*, 2003, **1**:5~8
应小东,李午申,冯灵芝. 激光表面改性技术及国内外发展现状[J]. *焊接*, 2003, **1**:5~8
- Huang Kaijin, Zhou Jinxin, Xie Changsheng *et al.*. Crack repair and laser echnology [J]. *Heat Treat of Metal*, 2002, **27**(3):1~4
黄开金,周金鑫,谢长生等. 裂纹修复与激光技术[J]. *金属热处理*, 2002, **27**(3):1~4
- Ru Jigang, Yi Linna. Surface strengthen process for high strength aluminum alloy [J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 2004, **28**(1):182~184
汝继刚,伊琳娜. 高强铝合金表面强化工艺研究[J]. *稀有金属*, 2004, **28**(1):182~184
- Hao Qingwei, Kang Fengdi, Shao Zhongcai *et al.*. Search on surface treatment technology of aluminum and its alloys [J]. *Non-ferrous Mining and Metallurgy*, 2004, **20**(6):30~33
郝清伟,康凤娣,邵忠财等. 铝及其合金表面改性技术的进展[J]. *有色矿冶*, 2004, **20**(6):30~33
- Wang Gui, Zhou Xinchu, Gu Yongqiang *et al.*. Influence of connecting parameter on microstructure and mechanical properties of laser melting solidified layer [J]. *Heat Treat of Metal*, 2001, **26**(6):16~18
王 贵,周新初,顾永强等. 搭接参数对激光熔凝处理层显微组织和性能的影响[J]. *金属热处理*, 2001, **26**(6):16~18
- Zhao Yuzhen, Liu Jianping, Shi Yaowu. Study on the property of laser remelting high-carbon-high-alloy steel [J]. *Laser Technology*, 2003, **27**(3):205~207
赵玉珍,刘建萍,史耀武. 高碳高合金钢激光熔凝处理的性能研究[J]. *激光技术*, 2003, **27**(3):205~207
- Liu Zhenxia, Huang Weidong, Yang Sen. Numerical simulation of laser surface re-melting and its use in laser directional solidification [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2002, **12**(3):458~463
刘振侠,黄卫东,杨 森. 激光熔凝的数值模拟及其在激光定向凝固中的应用[J]. *中国有色金属学报*, 2002, **12**(3):458~463
- Hu Fangyou. Experimental research on repair of navy aircraft

aluminum alloys technical structure corrosion with laser [D]. Shenyang: Northeastern University (Ph. D. Dissertation), 2003
胡芳友. 海军飞机铝合金结构腐蚀损伤的激光修复实验研究 [D]. 沈阳: 东北大学(博士学位论文), 2003

13 Yang Zhiyong, Luo Lan, Chen Wei. Spectral analyses of rare-earth ions in solid luminescent materials [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(4):598~602
杨志勇, 罗 澜, 陈 玮. 稀土掺杂固体发光材料的光谱分析 [J]. 光学学报, 2007, **27**(4):598~602

征 稿 简 则

《中国激光》是由中国光学学会和中国科学院上海光学精密机械研究所共同主办, 科学出版社出版的学术期刊, 国内外公开发行。

1. 刊登内容

主要发表我国科技人员在激光理论与技术领域的最新进展, 栏目包括: 综述、实验技术与元件、激光物理与化学、全息技术、光束传输、光通信及其元器件、光纤元件、测量技术、材料、薄膜、激光应用、激光生物学与医学, 等等。请作者在来稿中注明所投栏目, 并注明所属中图分类号。

2. 投稿与查询

本刊接受 Email 投稿或网络投稿, 投稿信箱: submit@siom.ac.cn, 网络投稿与查询: 登录中国光学期刊网 www.opticsjournal.net。来稿请注明作者真实姓名、服务单位、详细通信地址、联系电话、邮政编码及电子信箱。本刊收到稿件后在 2~3 个工作日内 Email 发出收稿通知。作者投稿 2 个月内未收到本刊处理意见, 可另投他刊。但需事先告知本刊编辑部。编辑部有权对来稿删改。来稿请勿涉及保密内容, 并请提供相关单位证明。来稿请附所有作者签名, 作者顺序一经确定, 请勿任意删改。可同时提供 6~8 位国内外同行专家的详细通讯方式和研究领域, 供送审时参考。

3. 来稿要求

3.1 文字要求

来稿应含中英文题目、摘要、关键词和第一作者简介, 全文要求在 5000 字以内。来稿请用小 4 号, 1.5 倍或 2 倍行距, 另用不同颜色标明文内尤其公式内易混淆的大小写、上下角码、文种、算符等。计量单位一律采用国家标准 GB3100-3102-93 规定, 摘要和正文中的缩略词在第一次出现时都必须写出全称, 后附缩略词。

3.2 标题与摘要

标题应言简意赅, 字数控制在 20 字以内, 不使用不公开的外文缩写词(化学符号除外)。中英文摘要请用第三人称叙述, 不使用“本文”或“作者”等主语, 不引用参考文献、数学公式和化学式。内容应包括四个要素: 即研究目的、方法、结果、结论。中英文摘要内容应基本对应, 中文摘要 300 字左右, 英文摘要 150~180 个单词。

3.3 关键词

每篇论文应给出 4~8 个关键词, 第一个列出该文主要工作或内容所属的二级学科名称, 第二个列出该文研究得到的成果名称或文内若干个成果的总类别名称, 第三个列出该文在得到上述成果或结论时采用的科学研究方法的具体名称, 第四个列出在前三个关键词中没有出现的, 但作为主要研究对象的事或物质的名称, 如有需要, 还可以列出作者认为有利于检索和文献利用的第五、第六个等关键词。

3.4 图表

要求设计美观, 大小适中, 尺寸一般不小于 5 cm×7 cm, 线条均匀, 主辅线分明, 粗线一般为 0.25~0.5 mm, 细线一般为粗线的 1/2, 图中主线用粗线, 如函数曲线等, 辅线用细线, 如坐标轴线、指示线等; 照片要求对比度高, 层次清晰。推荐使用三线表。图题、表题须中英文对照, 图面、表面一律采用英文。

3.5 参考文献

应引用公开出版物, 并仔细核对; 欢迎作者充分引用本刊上同行的文献。每条文献应作相应的文献类型标识(见方括号内)。参考文献的原文献为英文, 请用英文表示, 如原文献为其他文种, 请译成英文, 在该文献最后用括号注明, 如原为日文, 则用(in Japanese), 如原文献为中文, 则给出中文和相应的英文译文。每条文献的顺序和标点如下: 专著[M]、学位论文[D]、报告[R]——著者(三名). 文献题名. 版本(专著用), 出版地: 出版者, 出版年. 起止页码; 期刊[J]——作者(三名). 论文题目[J]. 刊名, 出版年, 卷(期): 起止页码; 专利[P]——专利申请者. 专利题目[P]. 专利国别, 专利文献种类, 专利号, 出版日期; 文集[C]——作者(三名). 论文题目[C]. 编者, 论文集名, 出版地: 出版者, 年. 起止页码。

3.6 基金资助、作者简介

论文如获省、部级以上的基金资助, 须在首页的脚注位置注明基金资助单位全称及批准号。作者简介(含导师简介)应给出姓名(出生年一), 性别, 籍贯, 民族(汉族可省略), 职称, 学历, 研究方向, Email。

4. 收费

本刊遵照中国科协和中国科学院有关文件精神, 向录用稿件作者收取适量版面费以聊补本刊的高额亏损。

5. 版权

录用稿件一经刊出, 论文版权(含各种介质)均归编辑部所有。本刊向作者酌付稿酬及赠送该期期刊 1 册, 抽印本 10 份。

本刊已入编《中国学术期刊(光盘版)》和中国光学期刊网, 著作权使用费在奉寄作者稿酬中一次性支付。如有不同意将文章编入上述数据库者, 请事先声明, 本刊将作适当处理。

特别声明: 凡已在国内外正式出版物上登载过的稿件, 本刊一律不予刊登。若发现一稿多投者, 本刊三年内不接受其稿件, 并追补对本刊造成的损失。

凡本刊投稿者, 均视作接受上述各项规定, 本刊不再另行声明。

本刊在办刊过程中, 得到了社会各界的大力协助, 谨致谢忱。