

文章编号: 0258-7025(2008)02-0311-05

激光深熔焊接阈值表征及特性

韩 宁 张寰臻 肖荣诗

(北京工业大学激光工程研究院, 北京 100022)

摘要 采用 CO₂ 和 Nd:YAG 激光器焊接 A3 钢, 结合高速摄像和光谱分析, 研究激光深熔焊接阈值的表征及特性。结果表明, 以激光功率与光斑直径之比作为深熔焊接阈值的表征参量, 深熔焊接阈值与光斑大小无关; 而临界功率密度随光斑尺寸不同而变化。YAG 激光焊接模式转变阈值明显大于材料蒸发的阈值, 在模式转变前的热导焊接阶段, 金属材料已出现显著蒸发, 而焊接模式转变后, 蒸气羽辉的光谱保持不变。CO₂ 激光焊接模式转变前, 金属仅发生微弱的蒸发。深熔焊接时, 蒸发显著加强, 且蒸气部分电离。分析表明, CO₂ 激光焊接时, 蒸气电离形成等离子体, 增加金属对激光的吸收, 促进深熔焊接过程的建立。

关键词 激光技术; 激光焊接; 深熔阈值; 等离子体; 光谱

中图分类号 TN 249; TG 456.7 **文献标识码** A

Threshold Characterization for Laser Penetration Welding

Han Ning Zhang Huanzhen Xiao Rongshi

(Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract The threshold characterization for penetration welding of A3 steel was investigated using a Nd:YAG and a CO₂ laser with high speed camera and optical spectrometer. It is shown that the threshold ratio of the laser power to the beam spot diameter P/d for penetration welding is consistent with different beam spots. But the threshold power density changes with the beam spots. The transition threshold of welding mode of YAG laser is larger than the vaporization threshold of materials. The metal vaporizes obviously even in the period of conduction welding and the spectra of the vapor plume remain the same between the conduction and penetration welding modes in YAG laser welding. As for CO₂ laser welding, the metal vaporizes weakly before the mode transition occurs from conduction welding to penetration welding, and the metal vaporizes violently and the vapor ionizes partly in penetration welding. Analysis shows that the formation of a vapor plasma enhances the absorption of metal to laser beam and thus promotes the establishment of the penetration welding process in CO₂ laser welding.

Key words laser technique; laser welding; threshold for penetration; plasma; spectrum

1 引 言

激光焊接模式根据是否产生小孔效应分为两种, 即热导焊和深熔焊^[1]。在热导焊与深熔焊模式之间存在一个不稳定过渡区^[2,3]。

目前广泛采用平均功率密度来表征激光深熔焊接阈值^[4,5]。但对于大小不同的光斑, 激光加热边界条件不同, 造成深熔焊接阈值不一致。有学者认为应以光斑内的最高功率密度表征深熔焊接阈值^[6]。同时, 也有学者提出使用激光功率与光斑直

径的比值 (P/d) 来表征深熔焊接阈值^[7~9]。

本文采用 CO₂ 激光器和 Nd:YAG 激光器焊接 A3 钢, 验证采用激光功率与光斑直径的比值 (P/d) 表征深熔焊接阈值的有效性, 然后通过高速摄像和光谱实验研究激光焊接模式的转变特性。

2 实验条件和方法

实验采用 Rofin DC035 板条 CO₂ 激光器和 Rofin CW025 Nd:YAG 激光器。CO₂ 激光器最大输

收稿日期: 2007-05-22; 收到修改稿日期: 2007-09-03

基金项目: 国家教育部新世纪优秀人才支持计划 (NCET-04-0204) 资助项目。

作者简介: 韩 宁 (1977—), 男, 河北人, 硕士研究生, 主要从事激光与材料相互作用研究。E-mail: zhuomn513@bjut.edu.cn

导师简介: 肖荣诗 (1965—), 男, 湖南人, 教授, 博士生导师, 主要从事激光与材料相互作用、激光先进制造技术的研究。

E-mail: rsxiao@bjut.edu.cn

出功率为3500 W,光束模式为准 TEM₀₀ 模,采用旋转抛物反射聚焦镜,焦距300 mm,聚焦光斑直径0.27 mm.YAG 激光器最大输出功率2500 W,光束通过芯径为600 μm的石英光纤传输,聚焦镜为焦距120 mm的石英透镜,聚焦光斑直径0.36 mm.激光功率使用美国 Molectron 3sigma 激光功率/能量计测定,光斑大小采用 Prometec UFF100 光束光斑质量诊断仪测定。

实验材料为 A3 钢,试样尺寸80 mm×70 mm×8 mm.采用平板扫描焊接方式,焊接速度1 m/min.使用15 L/min He 作为辅助气体,喷嘴内径φ3 mm,与激光束轴线成45°布置,气流方向与焊接速度方向相同。调整离焦量得到不同大小的光斑,改变激光功率,实验确定不同光斑 CO₂ 和 YAG 激光焊接时熔深及焊接模式转变与激光功率密度或 P/d 的关系。

采用美国 PHOTRON Fastcam 1024R2 彩色高速摄像仪对焊接过程进行拍摄,拍摄频率2000 帧/s,采用美国 PI Acton Research Spectra Pro 2500i 瞬态光谱仪记录蒸气羽辉的光谱。

3 实验结果与分析

3.1 激光焊接深熔阈值的表征

不同光斑 Nd:YAG 和 CO₂ 激光焊接熔深与激光功率密度 (P/S) 的关系曲线分别如图 1 和图 2 所示。

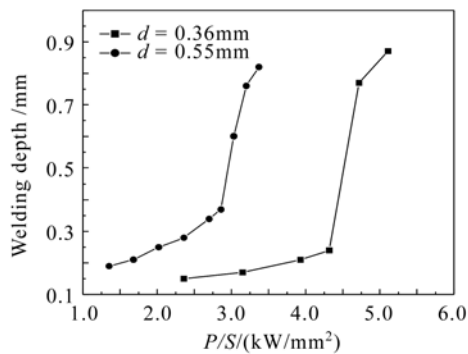


图 1 YAG 激光焊接熔深与激光功率密度的关系
Fig. 1 Relationship of weld depth and power density in YAG laser welding

YAG 激光焊接时,直径为 0.36 mm 和 0.55 mm 的光斑对应的深熔焊接功率阈值分别为 4.5 kW/mm² 和 3.0 kW/mm² 左右;CO₂ 激光焊接时,直径为 0.27 mm,0.32 mm 和 0.42 mm 的光斑对应的深熔焊接功率阈值分别为 9.0 kW/mm², 8.0 kW/mm² 和 7.0 kW/mm² 左右。可见,采用功

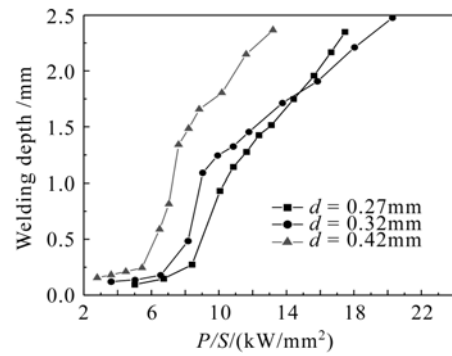


图 2 CO₂ 激光焊接熔深与激光功率密度的关系
Fig. 2 Relationship of weld depth and power density in CO₂ laser welding

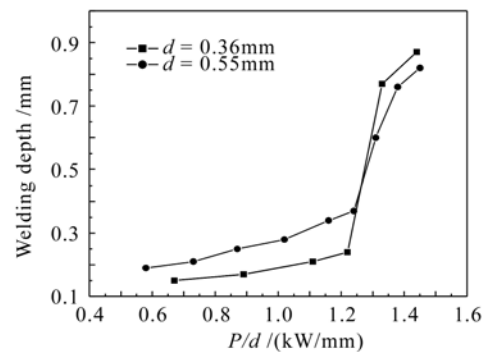


图 3 YAG 激光焊接熔深与 P/d 的关系
Fig. 3 Relationship of weld depth and P/d in YAG laser welding

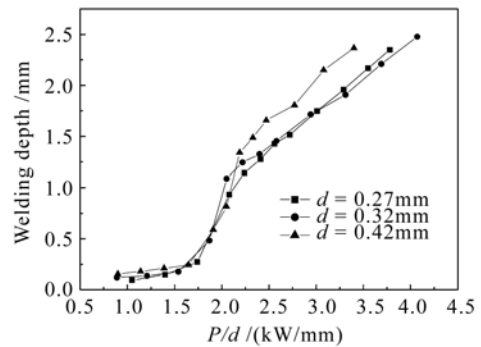


图 4 CO₂ 激光焊接熔深与 P/d 的关系
Fig. 4 Relationship of welding depth and P/d in CO₂ laser welding

率密度作为深熔阈值表征参量时,深熔焊接阈值随光斑大小变化,光斑越大,深熔阈值越低。

图 3 所示为 Nd:YAG 激光焊接熔深与 P/d 的关系曲线。两种不同尺寸激光光斑焊接深熔阈值均为 1.3 kW/mm 左右。图 4 所示为 CO₂ 激光焊接熔深与 P/d 的关系曲线。三种不同尺寸激光光斑焊接深熔阈值均为 1.9 kW/mm 左右。可见,采用 P/d 作为深熔阈值表征参量,不同大小光斑深熔焊接阈

值大致相同。

激光深熔焊接与材料的蒸发密切相关。无论是匀强光束, 还是高斯光束, 激光作用下材料表面光斑中心温度 $T \propto AP/d^{[2]}$, 其中 A 为吸收率。因此, 使用 P/d 表征深熔焊接阈值更为合理。

3.2 激光焊接模式转变特性

为直观起见, 用 0 代表热导焊接模式, 用 1 代表深熔焊接模式, 热导到深熔转变的不稳定过渡状态用深熔焊接焊缝长度之和占焊缝总长度的比值表示, 如图 5 所示。

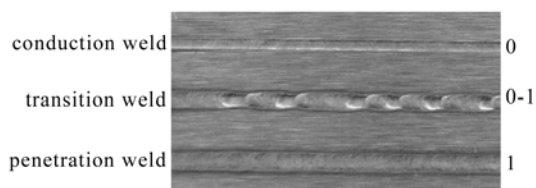


图 5 焊缝归一化处理

Fig. 5 Normalization of laser welds

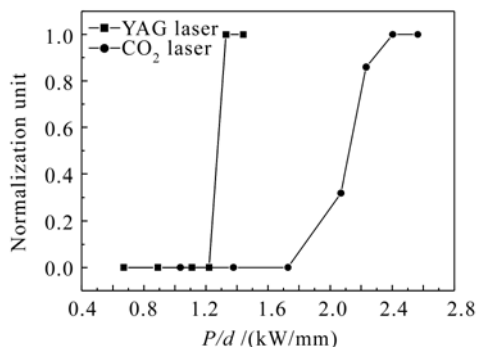


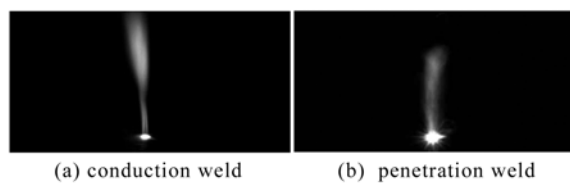
图 6 YAG 和 CO₂ 激光焊接模式转变归一化曲线

Fig. 6 Normalization curves of welding mode transition for YAG and CO₂ laser welding

YAG 激光和 CO₂ 激光焊接 A3 钢归一化处理焊接模式转变曲线如图 6 所示。YAG 激光焊接时, 焊接模式的转变发生在 $P/d = 1.22 \sim 1.33$ kW/mm 很窄的范围内, 而 CO₂ 激光热导焊与深熔焊接模式之间存在明显的不稳定过渡区, 对应的 P/d 范围为 $1.73 \sim 2.40$ kW/mm。

高速摄像显示, YAG 激光焊接模式转变前的热导焊接阶段 ($P/d = 0.89 \sim 1.22$ kW/mm) 就已出现金属的蒸发现象, P/d 值越大, 金属蒸发越强。当焊接模式转变为深熔焊接后, 金属蒸发加剧, 但羽辉色彩仍保持粉红色不变。图 7 所示为焊接模式转变临界点热导焊 ($P/d = 1.22$ kW/mm) 和深熔焊 ($P/d = 1.33$ kW/mm) 蒸气羽辉形态的比较。

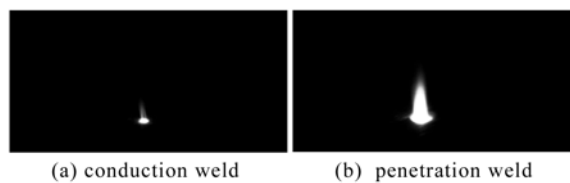
CO₂ 激光焊接时, 在热导焊的上临界点 1.73 kW/mm 时仅有微弱的粉红色金属蒸气羽辉出



(a) conduction weld (b) penetration weld

图 7 YAG 激光 (a) 热导焊 ($P/d = 1.22$ kW/mm) 与 (b) 深熔焊接 ($P/d = 1.33$ kW/mm) 羽辉形态

Fig. 7 Plumes of conduction and penetration mode in YAG laser welding at (a) $P/d = 1.22$ kW/mm and (b) 1.33 kW/mm



(a) conduction weld (b) penetration weld

图 8 CO₂ 激光热导焊与深熔焊接羽辉形态

Fig. 8 Plumes of conduction and penetration mode in CO₂ laser welding at $P/d = 2.23$ kW/mm

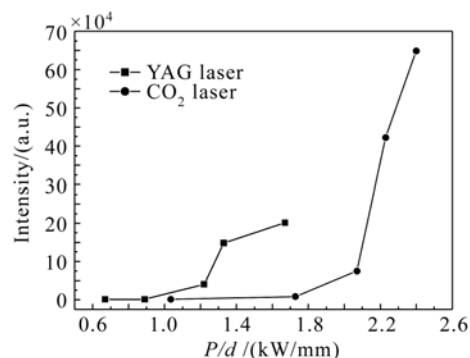


图 9 YAG 和 CO₂ 激光焊接羽辉的光谱强度

Fig. 9 Intensity of plume spectra in YAG and CO₂ laser welding

现, 在 $1.73 \sim 2.4$ kW/mm 之间, 焊接过程不稳定, 热导焊和深熔焊交替出现。与此同时, 金属蒸气羽辉形态和色彩均发生显著的变化, 在深熔焊接阶段, 金属蒸气羽辉尺寸增大, 色彩也由粉红色转变为耀眼的白色与天蓝色。图 8 所示为不稳定过渡区 ($P/d = 2.23$ kW/mm) 时, 热导焊与深熔焊接不同阶段蒸气羽辉的形态。

图 9 所示为 YAG 和 CO₂ 激光焊接 A3 钢时蒸气羽辉光谱相对强度的变化曲线。可以看出, YAG 激光深熔焊接实现前的蒸气羽辉光谱相对强度明显高于 CO₂ 激光焊接。焊接模式转变为深熔焊接后, 光谱强度都增强, 但 YAG 激光焊接的光谱强度增长幅度明显小于 CO₂ 激光焊接。

YAG 激光深熔焊接 ($P/d = 1.33$ kW/mm)

时,蒸气羽辉光谱如图 10 所示,以可见光波段内的连续谱为主,特征谱线较少,强度也不突出,主要是 Fe I 原子特征谱线。

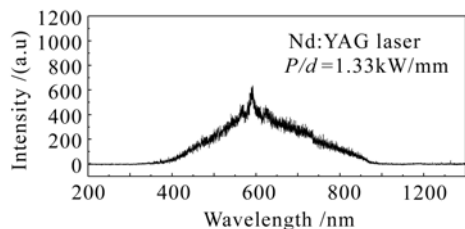


图 10 YAG 激光焊接羽辉光谱

Fig. 10 Plume spectra in YAG laser welding

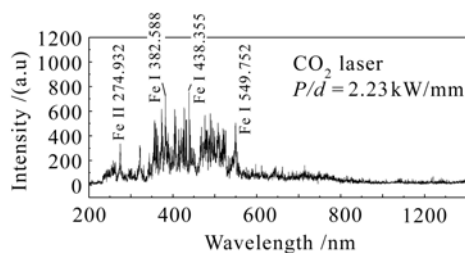


图 11 CO₂ 激光焊接羽辉光谱

Fig. 11 Plume spectra in CO₂ laser welding

图 11 所示为 CO₂ 激光焊接, $P/d = 2.23 \text{ kW/mm}$ 时深熔焊接阶段的羽辉光谱。可以看出,光谱以可见和紫外波段内的分立谱为主,特征谱线较多,相对强度突出,其中有 Fe II 274.932 nm 离子光谱,这说明金属蒸气部分发生电离,形成金属蒸气等离子体。

激光焊接时,只有当金属蒸发产生的压力达到某一临界值时,才能实现从热导向深熔焊接的转变^[10]。YAG 激光焊接模式转变前,金属材料出现强烈蒸发的现象进一步证实了这一论断。但是,CO₂ 激光焊接模式焊接过程的建立与等离子体的形成不可分。这说明金属蒸气击穿形成等离子体对 CO₂ 激光深熔焊接的实现产生了决定性的作用。

金属蒸气通过逆韧致辐射吸收激光能量,其有效吸收系数 $K_a \propto \lambda^2$ 。由于 YAG 激光波长仅为 CO₂ 激光波长的 1/10,这是 CO₂ 激光焊接易于产生等离子体的根本原因。等离子体的形成强化金属对激光的吸收,这种强化吸收机制常被解释为高温等离子体的短波长热辐射,即等离子体吸收激光能量之后再辐射出易于被金属吸收的短波光光子,吸收率可以达到入射激光功率的 30%~50%,蒸发加强^[11]。

因此,可以定性地描述 YAG 和 CO₂ 激光焊接模式转变的过程:YAG 激光焊接时,当 P/d 达到某一临界值时,金属材料蒸发产生的压力能够克服熔

池表面张力、静压力和液体的流动阻力而形成深熔小孔时,深熔焊接过程实现;CO₂ 激光焊接时,当 P/d 达到某一临界值时,金属蒸气击穿形成等离子体后,金属材料对激光的吸收增强,蒸发加剧,深熔焊接过程建立。不稳定过渡区的存在则是由于在临界状态时,材料及其表面状态、激光光束参数等的波动,造成金属蒸气击穿形成等离子体时断时续,不能建立起稳定的等离子体过程,而不是由于等离子体对激光的屏蔽作用^[3]。

4 结 论

1) 采用激光功率与光斑直径之比 (P/d) 作为表征参量,深熔焊接阈值与光斑大小无关。

2) YAG 激光焊接模式转变阈值明显大于材料蒸发的阈值,在模式转变前的热导焊接阶段,金属材料已出现显著蒸发。

3) CO₂ 激光焊接模式的转变与金属蒸气电离形成等离子体密切相关。等离子体的形成增强了金属对激光的吸收,促进深熔焊接过程的建立。

参 考 文 献

- 1 W. W. Duley. Laser Welding [M]. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1998. 5~6
- 2 Zuo Tiechuan. Laser Materials Processing of High Strength Aluminum Alloys [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002. 23~25
左铁钊. 高强铝合金的激光加工[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002. 23~25
- 3 Chen Wuzhu, Zhang Xudong, Ren Jialie *et al.*. Study on welding mode transition and stability of welding [J]. *Chinese J. Lasers*, 1996, **A23**(7):657~661
陈武柱,张旭东,任家烈等. 激光焊接时焊接模式转变规律及焊接过程稳定性的研究[J]. 中国激光, 1996, **A23**(7):657~661
- 4 Li Shenghe, Xie Zhiqiang, Jiang Yunbo *et al.*. Influential factors of threshold power density for Nd:YAG laser beam welding of beryllium [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2006, **27**(12):25~28
李盛和,谢志强,姜云波等. 钹的 Nd:YAG 激光焊接阈值功率影响因素[J]. 焊接学报, 2006, **27**(12):25~28
- 5 Wu Qiang, Chen Genyu, Wang Gui *et al.*. CO₂ laser welding of zinc coated high strength steel [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(8):1133~1138
伍强,陈根余,王贵等. 高强度镀锌钢的 CO₂ 激光焊接[J]. 中国激光, 2006, **33**(8):1133~1138
- 6 Xiao Rongshi, Chen Jimin, Chen Tao *et al.*. On the critical power density of CO₂ laser penetration welding [J]. *Applied Laser*, 2000, **20**(1):2~4
肖荣诗,陈继民,陈涛等. 关于 CO₂ 激光深熔焊接的临界功率密度[J]. 应用激光, 2000, **20**(1):2~4
- 7 H. Hügel, M. Beck, J. Rapp *et al.*. Laser welding of aluminum [C]. *SPIE*, 1997, **3092**:516~521
- 8 Friedrich Dausinger. Laser welding of aluminum alloys; from fundamental investigation to industrial application [C]. *SPIE*,

- 2000, **3888**:367~379
- 9 H. Hügel, A. Ruß, J. Weberpals *et al.*. Welding with the thin disc laser—new processing and application potentials [C]. SPIE, 2005, **5958**:595807-1~595807-12
- 10 Sun Chengwei. The Effect of Laser Irradiation [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002. 155~178
孙承伟. 激光辐照效应[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002. 155~178
- 11 Xiao Rongshi. Behavior of laser induced plasma during CO₂ laser penetration welding [D]. Doctoral Thesis of Beijing University of Technology, 1997. 57~65
肖荣诗. CO₂ 激光深熔焊接光致等离子体的行为研究[D]. 北京工业大学博士学位论文, 1997. 57~65

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, 不使用不公认的外文缩写词(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—), 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。