

空心钨极同轴填丝焊空间热场分布特征

杨义成^{1,2,3}, 杜兵¹, 黄继华², 徐锴³, 陈健³, 黄瑞生³

(1. 机械科学研究总院集团有限公司, 北京, 100044; 2. 北京科技大学, 材料先进焊接与连接技术研究所, 北京, 100083;
3. 哈尔滨焊接研究院有限公司, 哈尔滨, 150028)

摘要: 利用理论建模与试验相结合的方法, 系统研究了空心钨极同轴送丝焊接过程中焊丝熔化热量的来源. 结果表明, 基于磁流体力学的理论模型分析结果和实际情况高度吻合; 在高温电弧热辐射及钨极热传导共同作用下, 钨极内孔形成的梯度式高温区会对焊丝起到一定的预热作用; 环状空心钨极电弧中轴线上近几何中心区域的温度最高, 焊接电流 400 A 时温度高达 13 700 K; 熔滴与液态熔池接触后电势相等, 在最小电压原理作用下, 部分高温电弧的阳极作用区会由液态熔池转变至焊丝表面, 同时部分焊接电流会从焊丝流过, 形成的电阻热也是高效熔丝的主要原因之一; 熔滴过渡分析结果表明空心钨极同轴填丝焊接具有较高的工艺稳定性, 是一种极具发展前景的焊接新方法.

创新点: (1) 采用理论分析和试验验证相结合的方法, 对空心钨极同轴填丝焊接空间温度场进行了量化表征, 揭示了高效熔丝的理论基础.

(2) 建立了电弧信息和焊接关键过程之间的映射关系, 证实了空心钨极同轴填丝焊接工艺的可靠性.

关键词: 空心钨极; 同轴填丝; 熔化热; 熔滴过渡

中图分类号: TG 422 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.20210908001

0 序言

钨极氩弧及其旁轴填丝焊接是目前高质量、低成本焊接的代表性技术之一, 在国民经济发展的诸多领域发挥重要作用^[1]. 然而, 常规钨极氩弧焊旁轴填丝焊接具有焊枪空间尺寸大, 焊接过程具有方向性, 焊接效率低等技术特征, 使其在难焊金属或复杂异型构件的加工应用中存在较大局限性. 为解决该问题, Spaniol 等人^[2]在常规热丝非熔化极气体保护电弧焊 (tungsten inert gas welding, TIG 焊) 基础上, 提出一种间接电阻加热的新型 TIG 填丝焊技术, 该方法可在较低热输入情况下实现焊丝的高效率熔化. Ungethüm 等人^[3]采用间接电阻加热和大角度送丝的方法, 在一定程度上解决常规 TIG 焊具有方向性问题, 改善了封闭体一次堆焊成形的效果. 但该类方法存在设备投入大, 过程可控性差等

缺点, 使其在工业应用存在较大局限性. 空心钨极同轴填丝焊接是将焊丝从空心钨极内孔送出, 利用空心钨极引燃的电弧热将基体和焊丝一起熔化, 凝固后形成焊缝, 该方法有望真正解决加工过程具有方向的技术难题^[4].

目前, 国内外多围绕空心钨极电弧特性开展研究, Tashiro 等人^[5]通过数值模拟方法构建了钨极电弧特性的理论分析模型, 研究结果表明, 空心钨极尖端由于发射电子区域较大, 其电极附近的电流密度要低于常规钨极, 且电弧温度只有常规钨极的 60%, 有利于电极的长时间工作. Nerovnyi 等人^[6]针对真空环境下空心钨极电弧的热物理特性进行了系统分析, 结果表明, 随着焊接电流提高, 电弧形态由扩散型转变为收缩型, 电弧在材料表面的温度分布呈典型的高斯分布特征. Chen 等人^[7]对比分析了常规钨极电弧和空心钨极内孔负压电弧的压力分布特点, 研究结果表明, 空心钨极内孔形成负压后对电弧形态影响较大, 其电弧压力小于常规钨极电弧和空心钨极电弧, 焊接电流和电弧长度的改变对电弧压力分布特征的影响相对较小, 且空心钨极内孔负压电弧的压力分布特征更加均匀. 然而, 目前关

于空心钨极电弧同轴填材加工相关研究的报道却微乎其微,近年来只有部分专利涉及到该技术方案,徐国建等人^[8]利用半裂式钨极内壁制备绝缘涂层的方法,实现焊丝和空心钨极同轴且绝缘的目的.苗玉刚等人^[9]提出一种基于空心钨极分流熔化极电弧焊接装置,该焊炬不仅可以提高使用过程中的灵活性,还可以显著提升焊接效率.胡庆贤等人^[10-11]基于空心钨极的特点分别提出了空心钨极 TOPTIG (top tungsten inert gas welding) 焊接方法、气磁联合调控空心钨极 TOPTIG 焊接方法和空心钨极厚板填丝焊接方法.

国内外关于空心钨极同轴填丝焊接的研究多是从装置可行性角度出发提出空心钨极同轴填丝焊接的设想,至今尚未见到该技术机理相关的研究报告,为此采用数值模拟分析和试验相结合的方法,分析空心钨极同轴填丝焊接空间热场的分布特征,为焊丝熔化热的研究奠定基础,可进一步促进空心钨极同轴填丝焊接技术的发展与应用.

1 试验方法

采用哈尔滨焊接研究院有限公司自主开发设计的 HWI-HCW 型空心钨极同轴焊炬、山东奥太电气有限公司生产的 WSME-630 型非熔化极焊接电源和奥地利福尼斯公司生产的 KD7000 型送丝机;

基体材料为 Q235 钢,焊丝牌号为 H08MnSiA,焊丝直径为 $\phi 1.2\text{ mm}$.焊前利用机械加工的方法去除试板表面油污及铁锈.

如图 1 所示,首先,利用高速摄像观察分析电弧稳定燃烧时电弧的形貌特征;其次,分析焊丝从钨极内控送出时丝材的熔化过程,以及熔滴过渡行为.以实际焊接过程中电弧亮区面积信息的变化为基础,建立空心钨极同轴填丝焊接电弧光学信息与焊接关键过程之间的映射关系,实现对空心钨极同轴填丝焊接过程焊丝历经空间温度分布特征,以及焊接工艺稳定性分析目的.试验过程用到的高速摄像机拍摄帧数为 4000 帧/s,曝光时间为 $60\text{ }\mu\text{s}$.对于空心钨极同轴填丝焊接而言,涉及到的关键工艺参数如表 1 所示.

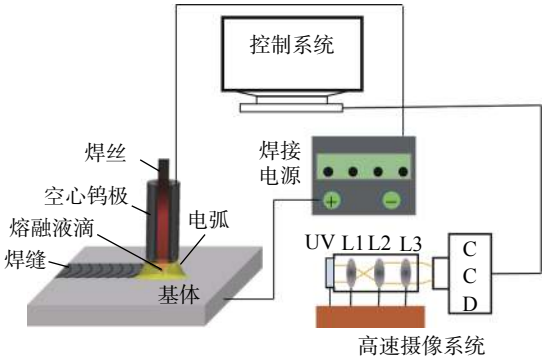


图 1 焊接过程示意图
Fig. 1 Schematic diagram of welding process

表 1 空心钨极同轴填丝焊接关键工艺参数

Table 1 Key process parameters of hollow tungsten electrode welding with coaxial filler wire

焊接电流 I/A	焊接电压 U/V	焊接速度 $v/(\text{m}\cdot\text{min}^{-1})$	送丝速度 $v_f/(\text{m}\cdot\text{min}^{-1})$	钨极距工件高度 D_1/mm	气体流量 $Q/(\text{L}\cdot\text{min}^{-1})$
400	11	0.4	4	4	20

2 试验结果与分析

2.1 熔滴过渡特性分析

图 2 为空心钨极同轴填丝焊接过程.焊丝从钨极内孔送出,焊丝末端开始熔化,形成高温熔滴,如图 2a 所示.随着焊丝的不断送进,熔滴开始与液态熔池接触时,此时焊丝的电势与工件及液态熔池的电势一致,由最小电压原理可知,由于焊丝与钨极内孔的距离更小,因此电弧更容易在钨极内孔和焊丝之间形成导电通道,此时电弧的亮度变暗,电弧形态也由钟罩型变为圆筒状,如图 2b 和图 2c 所示.当熔滴过渡完成时,电弧即刻回复至高亮状态,

如图 2d 所示.

当无电流从焊丝流过时,熔滴上方的焊丝呈高温固态,保持较好的挺直状态;而当电弧收缩为圆筒状时,焊丝挺直性变差,部分区域出现颈缩甚至弯曲现象,如图 2b 和图 2c 所示,这证明熔滴与液态熔池接触时,焊丝电势与工件相同,有部分电流经过焊丝构成回路,而电流流过焊丝形成的电阻热大幅度的提高了焊丝熔化效率.

空心钨极同轴填丝焊接过程中,熔滴形成阶段电弧正常燃烧呈高亮钟罩型,在熔滴过渡阶段,电弧亮度变暗,形态收缩为钟罩型.可以推断出电弧信息(形态、亮度)与焊接关键过程(焊丝熔化、熔滴过渡)之间存在映射关系.对高速摄像拍摄到的

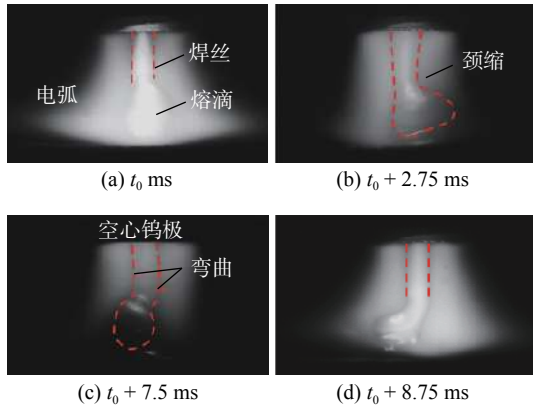


图2 空心钨极同轴填丝焊接过程

Fig. 2 Welding process of hollow cathode arc welding with coaxial filler wire. (a) t_0 ms; (b) $t_0 + 2.75$ ms; (c) $t_0 + 7.5$ ms; (d) $t_0 + 8.75$ ms

图像进行二值化处理,获得每一帧图像在一定亮度阈值范围内的亮区面积大小,即可实现对空心钨极同轴填丝焊接焊丝熔化过程及熔滴过渡过程的研究与分析。

对一段时间内高速摄像获取的时序电弧图像进行二值化处理,通过合理阈值的设定获取不同照片的亮度信息,进而可以分析出阈值范围内的亮区面积随时间的变化规律,17个熔滴过渡阶段对应的亮区面积变化信息如图3所示。在空心钨极同轴填丝焊接过程中,电弧亮区面积呈周期性变化,电弧亮度面积变大时,为焊丝熔化阶段;电弧亮度面积变小时,为熔滴过渡阶段,液滴和液态熔池接触阶段,高亮区像素面积显著下降,该阶段液滴完成向液态熔池的过渡。总体上,焊接过程中焊丝熔化阶段和熔滴过渡阶段呈现出较好的规律性,这说明空心钨极同轴填丝焊接的工艺性较为稳定,具备工程应用基础。

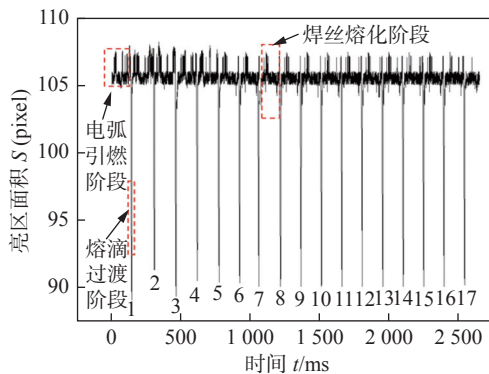


图3 焊接过程电弧亮度信息变化

Fig. 3 Change of arc brightness information during welding

2.2 焊丝熔化热分析

依据焊丝熔化过程及熔滴过渡过程可以看出,焊丝从钨极内孔送出后经高温电弧区域,熔化后形成液滴过渡进入液态熔池。在上述过程中,处于高温状态的钨极内孔对焊丝起到一定的预热作用,高温电弧对进入其中的焊丝起到直接加热作用。此外,熔滴与液态熔池接触后电流流经焊丝产生的电阻热对焊丝的高效熔化起到关键作用。

2.2.1 空心钨极内孔预热

钨极内孔直径为 3.0 mm, K 型热电偶外径为 2 mm, 利用设计的导向装置保证热电偶从空心钨极内孔中心位置送达钨极内部, 调整热电偶末端和钨极末端之间的相对距离 h , 测量电弧辐照及钨极热传导作用下, 空心钨极内孔不同位置处的温度随时间的变化规律, 空心钨极内孔的温度测试方法如图4所示。

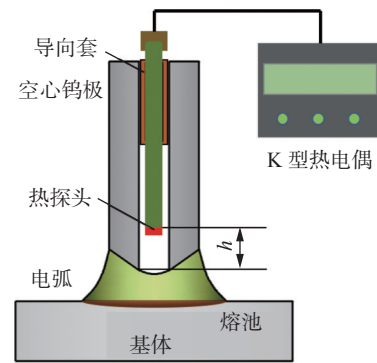


图4 空心钨极内孔温度测试方法

Fig. 4 Test method for inner hole temperature of hollow tungsten electrode

图5为空心钨极内孔不同位置处的温度随时间变化规律。从图5可以看出,热电偶距钨极末端的距离 h 越远,钨极内孔温度越低,从室温达到稳态温度所需时间也随之逐渐增加。例如,当热电偶

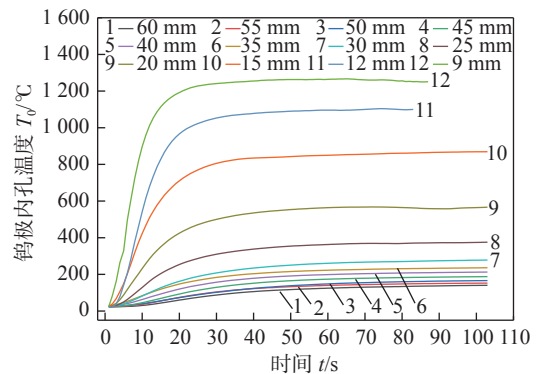


图5 钨极内孔不同位置处温度随时间变化规律

Fig. 5 Variation of temperature with time at different positions in the tungsten electrode inner hole

和钨极末端的距离为 60 mm 时, 达到稳态所需时间为 50 s 左右, 此时的稳态温度为 145 ℃; 当距离 h 为 9 mm 时, 达到稳态所需时间为 20 s 左右, 稳态约为 1 253 ℃.

由于热电偶的最高测温区间在 0 ~ 1 300 ℃ 之间, 靠近钨极末端的温度要高于传感器的测温范围, 因此不能直接测量钨极内孔所有区域. 为此, 采用三次多项式函数对已有数据进行拟合处理, 距钨极末端不同距离处的温度计算方法如式 (1) 所示.

$$T_0 = -0.02h^3 + 2.77h^2 - 130.7h + 2\,248.3 \quad (1)$$

式中: T_0 为钨极内孔温度; h 为热电偶末端距钨极末端的距离.

拟合方程的决定系数为 0.98, 这说明利用该方程预测钨极末端的温度分布情况具有较高可行性, 原始数据和拟合数据的结果如图 6 所示.

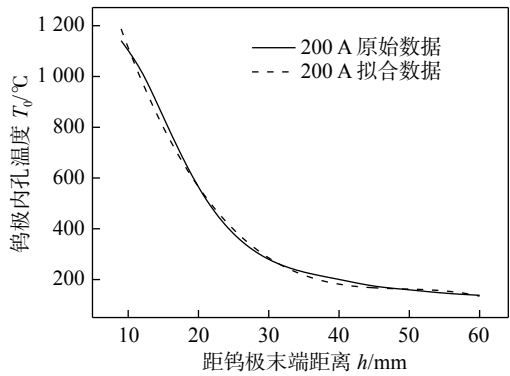


图 6 稳态时钨极内孔不同位置处的温度
Fig. 6 Steady state temperature variation at different positions of tungsten electrode inner hole

根据式 (1) 计算结果, 当 h 为 0 mm 时, 钨极末端的理论温度为 2 248.3 ℃.

2. 2. 2 空心钨极电弧模型的建立与分析

由于很难直接获取电弧内部区域的温度分布特征, 利用磁流体理论借助有限元分析软件 Comsol, 建立了焊接电流 400 A、空心钨极距工件距离 4 mm 时磁流体模型. 如图 7 所示, 模拟电弧和实际电弧形态高度吻合, 这说明所构建的空心钨极电弧模型和实际电弧的形态较为接近, 所建立的空心钨极磁流体模型具有较好的准确性, 可以利用该模型进一步分析电弧的物理特征.

利用该模型较为系统地分析了电弧的温度分布特征, 其结果如图 8 所示. 从图 8 可以看出, 自外向内等温线 1 至等温线 11 分别表达了温度从 5 500 ~ 13 500 K 的电弧温度分布特征. 如表 2 所示, 等温线 1 至等温线 7 的温度间隔为 1 000 K, 等温线

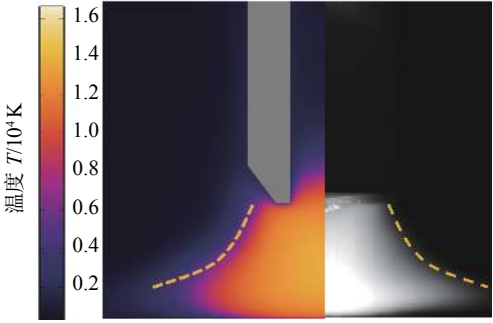


图 7 模拟结电弧与实际电弧对比
Fig. 7 Comparison between simulated arc and actual arc

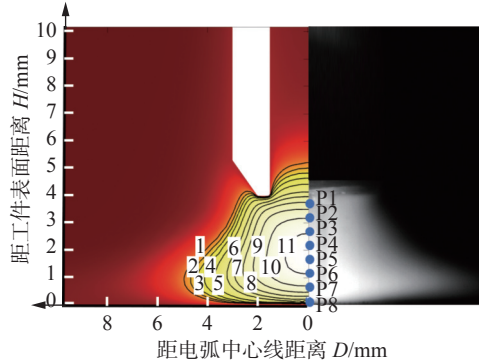


图 8 电弧温度场分析
Fig. 8 Analysis of arc temperature field

表 2 不同等温线对应的温度
Table 2 Temperature values corresponding to different isotherms

等温线编号	温度 T/K	等温线编号	温度 T/K
1	5 500.0	7	11 500.0
2	6 500.0	8	12 000.0
3	7 500.0	9	12 500.0
4	8 500.0	10	13 000.0
5	9 500.0	11	13 500.0
6	10 500.0		

8 至等温线 11 的温度间隔为 500 K. 根据等温线的分布特征可清晰的看出, 空心钨极电弧自外向内的温度梯度逐渐降低, 电弧中心区域的温度最高, 达到 13 700 K.

沿着空心钨极电弧中轴线, 间隔 0.5 mm 距离提取不同位置处电弧稳定时的温度值, 其结果如图 9 所示. 从图 9 可以看出, 在该工艺参数下空心钨极电弧中心区域正下方 2.5 mm 位置处电弧内部的温度达到最高值, 这与实心钨极钨极正下方附近区域电弧温度最高存在一定差异^[11]. 环状电极发射的电弧在中心区域汇聚可能是形成高温区下移的主要原因.

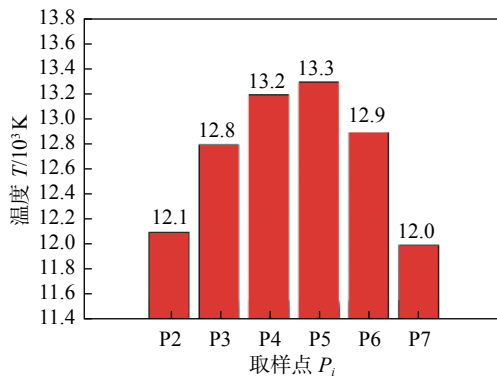


图9 电弧中轴线不同位置处的温度分布

Fig. 9 Temperature distribution at different positions of arc central axis

2.2.3 焊丝电阻热分析

结合图2焊丝熔化过程的分析可知,焊丝与工件接触时,焊丝变为地线,此时钨极电子发射端与焊丝之间的间距要远小于其与工件之间的距离,在最小电压原理作用下,电弧在钨极末端与工件之间燃烧的状态发生变化,一部分电弧开始从液态熔池表面快速“爬升”至焊丝表面,电弧由对熔池的加热,直接转变为对焊丝的加热,同时在该作用下一部分焊接电流也会从焊丝流过,产生电阻热,这部分热量对于焊丝的高效熔化具有十分重要积极意义。

3 结论

(1) 在高温电弧的热作用下,空心钨极内孔的温度以指数级快速下降,钨极末端的最高稳态温度可以达到2248.3℃左右。

(2) 建立的磁流体理论分析模型实现了对电弧形态的准确预测,电弧的温度分布结果表明,电弧内最高稳态温度可以达到13700 K,且该区域位于钨极正下方2.5 mm位置处。

(3) 空心钨极内孔的高温热辐射、电弧核心高温区的热传导,以及电弧阳极作用区改变附带产生的电阻热是实现空心钨极同轴填丝焊接高效熔丝的基础。

参考文献

- [1] 徐良, 欧阳凯, 海锋. K-TIG 焊接动态过程及组织和性能分析[J]. 焊接学报, 2020, 41(8): 73 – 77.

- Xu Liang, Ou Yangkai, Yang Haifeng, *et al.* Study on K-TIG welding process and properties of Q235 steel[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2020, 41(8): 73 – 77.
- [2] Spaniol E, Ungethüm T, Trautmann M, *et al.* Development of a novel TIG hot-wire process for wire and arc additive manufacturing[J]. Welding in the World, 2020, 64: 1329 – 1340.
- [3] Ungethüm T, Spaniol E, Hertel M, *et al.* Analysis of metal transfer and weld geometry in hot-wire GTAW with indirect resistive heating[J]. Welding in the World, 2020, 64: 2109 – 2117.
- [4] 杨义成, 陈健, 黄瑞生, 等. 空心钨极焊接关键技术问题及发展现状[J]. 焊接, 2021(5): 1 – 8.
- Yang Yicheng, Chen Jian, Huang Ruisheng, *et al.* Key technical problem and development status of hollow tungsten arc welding[J]. Welding & Joining, 2021(5): 1 – 8.
- [5] Tashiro S, Tanaka M, Nakatani M, *et al.* Numerical analysis of energy source properties of hollow cathode arc[J]. Surface and Coatings Technology, 2007, 201(9-11): 5431 – 5434.
- [6] Nerovnyi V M, Khakhalev A D. Hollow cathode arc discharge as an effective energy source for welding processes in vacuum[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2008, 41(3): 035201.
- [7] Chen S, Yan Z, Jiang F, *et al.* The pressure distribution of hollow cathode centered negative pressure arc[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2016, 23: 21 – 28.
- [8] 徐国建, 刘占起, 杭争翔, 等. 半裂式空心钨极同轴送丝惰性气体保护焊枪: CN207289135U [P]. 2018-05-01.
- Xu Guojian, Liu Zhanqi, Hang Zhengxiang, *et al.* Semi split hollow tungsten electrode welding gun with coaxial feeding wire in inert gas shielding: CN207289135U [P]. 2018-05-01.
- [9] 苗玉刚, 马照伟, 赵慧慧, 等. 一种基于空心钨极分流的熔化极电弧焊接装置及方法: CN109079291A [P]. 2018-12-25.
- Miao Yugang, Ma Zhaowei, Zhao Huihui, *et al.* A shielding gas arc welding device and method based on hollow tungsten electrode shunt: CN109079291A [P]. 2018-12-25.
- [10] 胡庆贤, 唐峰, 王晓丽, 等. 一种空心钨极高深熔 TIG 填丝焊接厚板的焊接方法: CN109332858A [P]. 2019-02-15.
- Hu Qingxian, Tang Feng, Wang Xiaoli, *et al.* A thick plate welding method using hollow tungsten electrode high penetration with filling wire: CN109332858A [P]. 2019-02-15.
- [11] 雷正, 朱宗涛, 李远星, 等. 空心钨极 TIG 焊电弧特性数值模拟[J]. 焊接学报, 2021, 42(9): 9 – 14.
- Lei Zheng, Zhu Zongtao, Li Yuanxing, *et al.* Numerical simulation of TIG arc characteristics of hollow tungsten electrode[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2021, 42(9): 9 – 14.

第一作者: 杨义成, 博士研究生, 工程师; 主要从事激光焊接和激光增材制造相关研究工作; Email: hwiyye@163.com.
通信作者: 杜兵, 博士, 研究员; Email: edwarddb@163.com.

(编辑: 戴红)