

# 钨极氩弧熔敷技术制备含TiC颗粒增强涂层的研究<sup>1</sup>

宋思利, 邹增大, 王新洪, 李清明

(山东大学材料科学与工程学院, 山东 济南 250063)

**摘要:** 在碳钢基体表面预涂一定混合比例的钛铁和石墨, 用钨极氩弧热源熔敷, 使Ti元素和C元素在高温下原位反应, 获得TiC颗粒增强的综合性能优异的铁基复合材料涂层; 试验测试和分析表明, 熔敷层中原位生成了TiC增强颗粒; 熔敷层微观组织主要有珠光体、铁素体、马氏体、少量残余奥氏体、TiC颗粒等组成; 涂层表面硬度达到了HRC55以上; 越靠近熔覆层表面, 硬度越高, 具备良好的耐磨性能。

**关键词:** 钨极氩弧熔敷 熔敷层(涂层) TiC颗粒 微观组织 宏观硬度

TiC颗粒硬度高、熔点高, 具有较好的热稳定性和综合机械性能<sup>[1,2]</sup>; TiC在复合材料中多以微细颗粒析出, 呈弥散分布, 对基体金属的韧性损害较小, 所以, 用熔覆技术制备含TiC颗粒增强的复合材料涂层, 增强了零件的表面强度和综合性能, 提高了材料的耐磨性能, 该领域研究具有重要工程意义<sup>[3-5]</sup>。这也使得制备含TiC颗粒增强的金属基复合涂层成为近年来表面强化技术研究的热点<sup>[6-8]</sup>。

目前研究多采用激光或等离子热源熔敷预置在基体表面的合金粉末, 以制备含TiC增强的复合涂层<sup>[9-11]</sup>。钨极氩弧虽不如激光、等离子热源的能流密度高, 但钨极氩弧产生的高温足以熔化碳钢基体并形成熔池, 热量集中, 完全可以满足Ti、C原位反应生成TiC的温度<sup>[3]</sup>, 而且熔池被氩气包围, 加热、反应过程中与空气隔离, 避免了合金元素的氧化与烧损, 而且操作简单, 成本低廉, 宜于推广, 具有工程实用价值。

本文利用钨极氩弧熔敷方法, 在普通碳钢表面上制备出原位合成TiC增强的复合材料涂层, 并对复合材料涂层的组织性能进行研究, 探讨了钨极氩弧熔敷制备TiC颗粒增强复合涂层的技术。

## 1. 实验材料与方法

### 1.1 试验材料

基体材料采用Q235, 试板尺寸为200mm×100mm×10mm, 熔敷表面用手持角磨机和砂纸打磨, 用无水酒精及丙酮清洗。熔敷粉末采用钛铁25(FeTi25, 纯度为99.5%, 200目)和石墨粉末(纯度为99.5%, 200目), FeTi25的主要成分如表一。钛铁粉中Ti元素和石墨粉中的C元素按照摩尔分数比Ti:C=1:1.2(质量分数比Ti:C=47.88:14.41)配成混合粉。

表一: FeTi25的主要化学成分(wt%)

牌号	Ti	Fe	Al	Si	C
FeTi25	25~25.5	余量	<8	<3	<0.1

混合粉采用球磨混和, 在球磨机中研磨混合30分钟混合均匀, 球磨时采用氩气保护。

### 1.2 试验方法

采用丙酮稀释自制的粘结剂, 将合金粉末粘结成糊状, 预涂在经过处理后的试板上, 空气中自然干燥。

第一层预涂厚度1.3mm, 钨极到工件表面的距离3.6mm, 电流150A, 电弧电压14V, 熔敷高度约为1.1mm;

<sup>1</sup>基金项目: 教育部博士点基金资助项目(20020422032)

作者简介: 宋思利(1970~), 男, 助理研究员, 在读博士。

第二层预涂层厚度为 2mm，钨极到熔敷层表面的距离 3.5mm，电流 150A，电弧电压 13V，两层熔敷高度约为 2.7mm；

第三层预涂层厚度为 1.6mm，钨极到熔敷层的距离 3.9mm，电流 150A，电弧电压 16V，三层总熔敷高度约为 4mm；

采用直径为 2.5mm 含 2% 钽的钨极，熔敷速度为 50mm/min，采用氩气保护，氩气流量 10L/min，每层均采用单道熔敷。

### 1. 3 试样制备

沿焊缝横断面制作金相试样，试样经研磨抛光后采用 5% 的硝酸酒精腐蚀，采用扫描电镜对熔敷层进行组织观察，利用电子探针对熔敷层成分进行元素分析，采用 X 射线衍射仪进行物相鉴定，利用洛氏硬度计测量熔敷层各部位硬度。

## 2. 实验结果与分析

### 2. 1 熔敷层的相组成

图（1）给出了熔敷层第三层表面（经研磨抛光）的X射线衍射谱线。衍射谱线出现了Fe、TiC、FeTi<sub>2</sub>、Fe<sub>3</sub>C及C的衍射峰。这表明经钨极氩弧熔敷后熔敷层已存在TiC相，生成了一些碳化物颗粒，还有未完全反应的FeTi合金和石墨等。

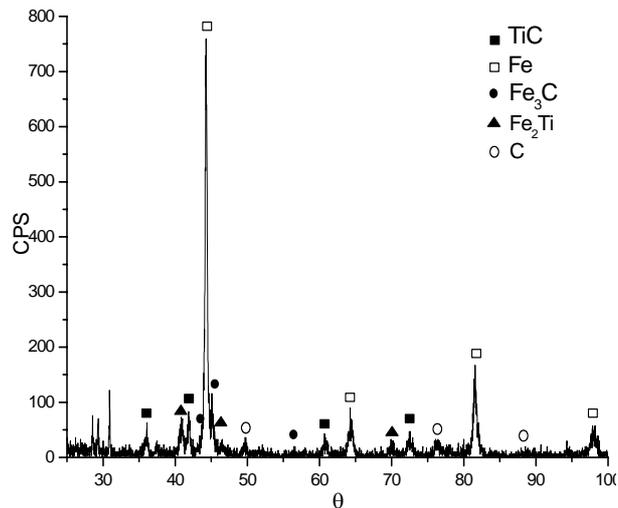


图 1 熔敷层第三层表面衍射谱线

由于熔覆过程是一个非平衡过程，高温停留时间短，合金反应过程复杂，而合金元素中的 Ti 元素和 C 元素没有完全充分反应，从而使得熔覆层中有 FeTi 合金和石墨存在。

### 2. 2 熔敷层微观组织分析

图 2 为钨极氩弧熔敷原位合成 TiC 陶瓷复合涂层接头的微观形貌。层内未见裂纹、气孔、夹渣、未熔合等明显缺陷。熔敷层与基体金属为良好的冶金结合。近熔合线的热影响区的组织与远离熔合线的基体金属相比，铁素体和珠光体组织有明显长大，晶粒较粗大，晶界清晰。

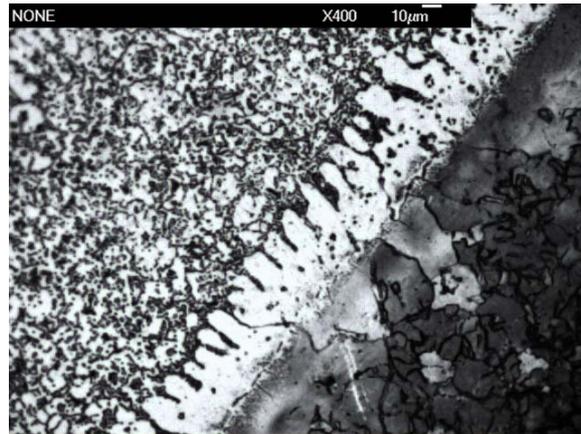


图2 熔覆熔敷接头的微观组织 (400×)

熔覆层与基体金属表面形成的熔合区晶粒以半熔化母材的晶粒为核向熔覆层内生长，形成垂直于熔合线指向熔敷层的柱状铁素体晶粒。晶间有少量粒状的 TiC 颗粒。

熔覆层的第一层由于稀释率较大，其组织主要由铁素体、珠光体和 TiC 颗粒、碳化物颗粒组成，TiC 颗粒和碳化物颗粒在晶界分布，如图 3。

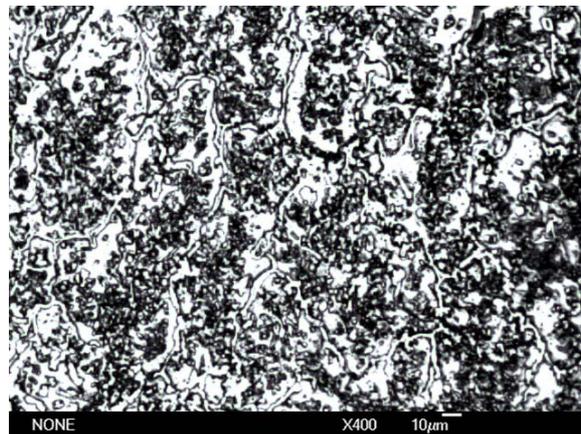


图3 熔覆层第一层微观组织 (400X)

在第二层的熔合区有类似第一层熔合区的组织特征分布，铁素体明显长长，TiC 颗粒及碳化物在晶内和晶界分布；由于基体金属的稀释率降低，C 含量较高，在第二层熔合区还形成了少量的针状马氏体组织，如图 4。

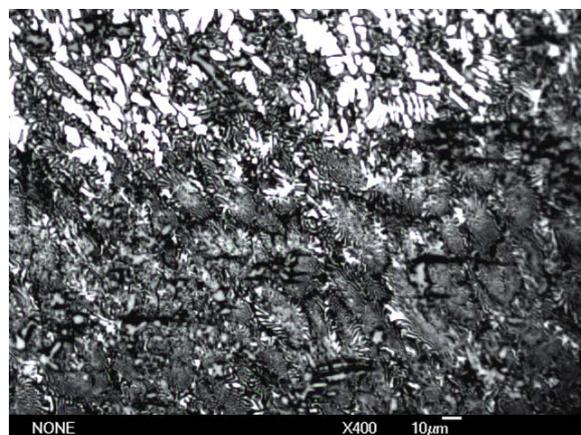


图4 熔覆层第一、二层间微观组织 (200X)

熔覆层的第二层主要有马氏体、残余奥氏体和 TiC 及碳化物组成。残余奥氏体枝晶粗大，有明显的方向性，指向熔覆层表面。越靠近第三层的微观区域，残余奥氏体、TiC 颗粒呈现聚集长大趋势。碳化物的微观组织特征不明显。

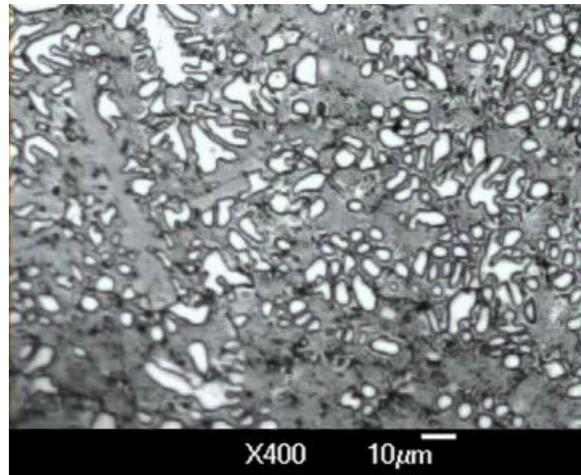


图 5 熔覆层第二层微观组织 (400X)

熔覆层的第三层微观组织与第二层没有明显区别，主要细小的岛状残余奥氏体和 TiC 颗粒组成，与第二层相比，残余奥氏体和 TiC 颗粒聚集长大明显，TiC 分布于残余奥氏体的晶间。

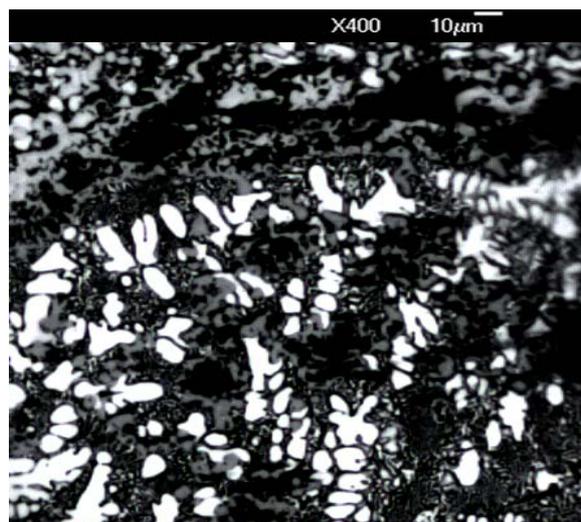
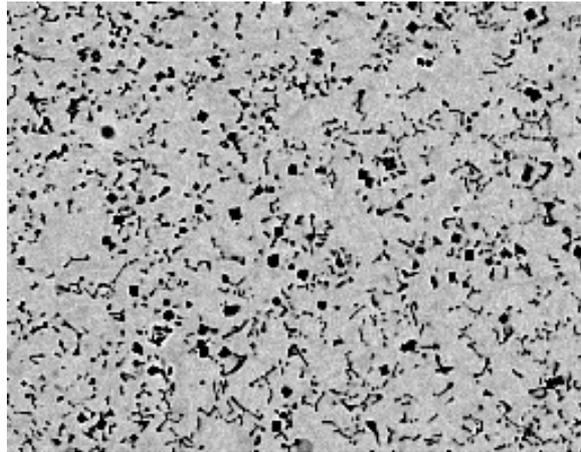


图 6 熔覆层第三层微观组织 (400X)

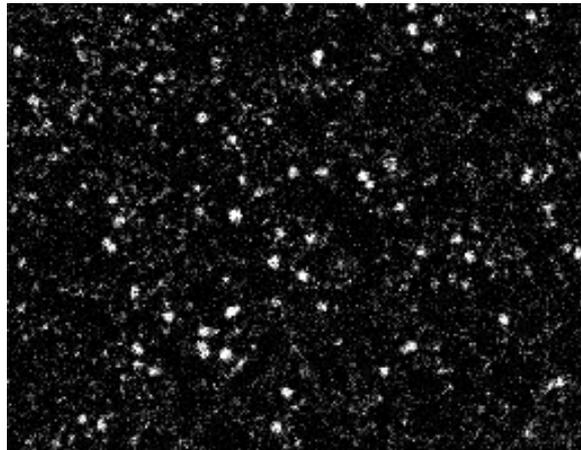
### 2.3 原位反应合成 TiC 的分析

在本实验条件下，钨极氩弧得温度高而集中，在氩弧吹力、电磁搅拌、保护气体吹力等的共同作用下，熔体搅拌对流强烈，反应成分搅拌较均匀，未出现成分严重偏析、聚集现象，熔敷层组织直接在半熔化状态的基体上形核，熔合区与热影响区的晶粒交互结晶长大，形成熔合区的柱状晶。

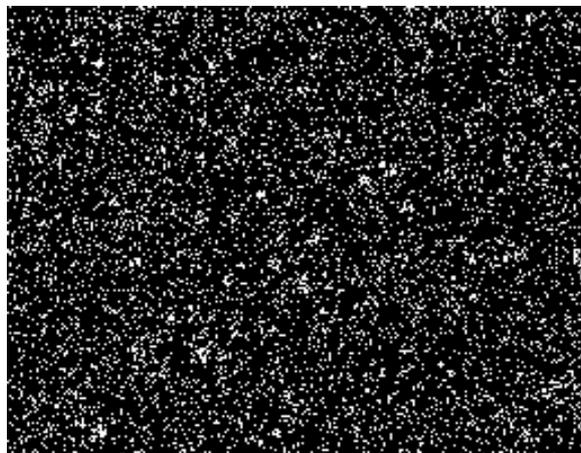
原位合成的 TiC 颗粒呈岛状或不规则颗粒状，弥散分布于晶界或晶内。图 7 给出了熔敷层微观组织的元素电子扫描图象 (SEM)，可以看出，组织中弥散分布的颗粒状物相含 Ti 和 C 元素，由此可以证明，颗粒状的物相即为 TiC 颗粒。



(a) SE 形貌



(b) Ti 元素



(c) C 元素

图 7 熔敷层微观组织的元素扫描图象 (SEM)

由于球磨使得两粉体的混合更加均匀,增加了Ti粉和石墨粉之间的接触面积,减小了两者在熔体中的扩散距离,球磨后的[Ti+C]混合粉末有利于反应 $Ti+C \rightarrow TiC$ 的进行,使近距离得石墨与Ti优先反应;当氩弧作用于预涂层时,预涂层因吸收大量的电弧热量而快速熔化,当Ti、C在熔体中的质量分数达到反应的浓度条件时,即通过原位反应合成TiC,生成的TiC颗粒不断分散到周围的Fe基熔体中<sup>[12,13]</sup>。同时,由于氩弧的搅拌、气体动力及重力等各种熔池力的作用,熔池中的Ti、C移动速度和方向不断发生变化,达不到TiC的理想配比,使局部C或Ti供给不足,形成局部的Ti元素剩余,与基体Fe形成FeTi合金;少量C元素剩余,溶于Fe中,形成高碳马氏体。由于氩弧加热的时间短,熔化和

冷却的速度都快, 阻碍了TiC颗粒之间的聚集长大, 因此, 熔敷层中部区域获得了弥散细小分布的TiC颗粒, 如图8所示。

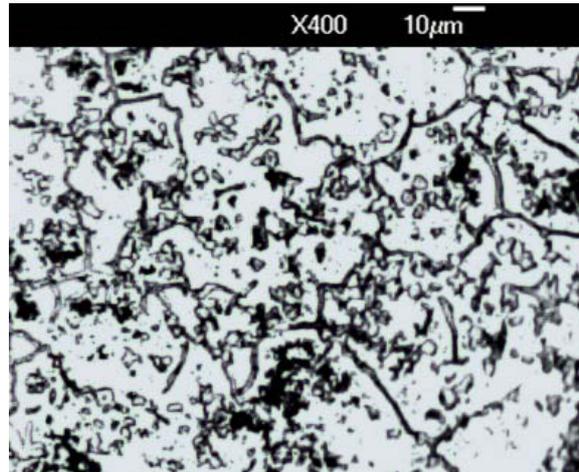


图8 熔覆层中间区域微观组织 (400X)

### 2.3 熔敷层的硬度

在很多工程应用场合, 材料的表面磨损性能是至关重要的, 一般来说, 材料的硬度和耐磨性能有直接而密切的关系, 通常其表面硬度高的材料耐磨性能也优异<sup>[14,15]</sup>。因此, 提高熔敷层的表面硬度是提高材料的耐磨性能的重要途径。试验中获得的熔敷涂层表面平均硬度为HRC58.5, 是基体金属的2倍以上。

由于TiC颗粒呈现由结合区底部到熔敷层表面逐渐增多的分布规律, 在硬度方面, 也呈现距离表面距离越近, 熔敷层硬度越高的规律。图10给出了沿垂直表面方向, 最大熔深为3.5mm的表面距离与硬度的关系曲线。如图所示, 在熔敷层表层硬度较高, 且数值距表层距离增加, 硬度缓慢降低, 而在熔敷层与基体的结合部位, 硬度下降较快, 到基体金属时HRC硬度降到了最低点。

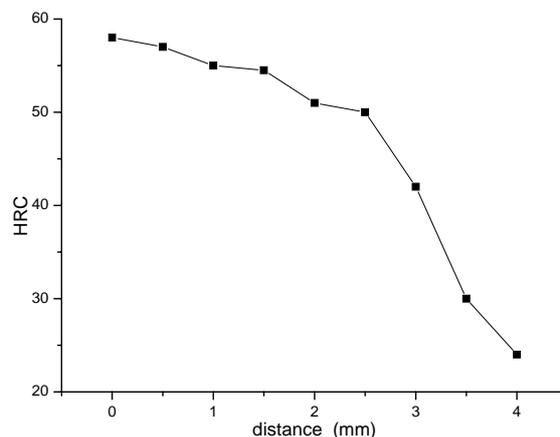


图10 熔敷层硬度与表面距离的关系曲线

### 3. 结论

1) 采用钨极氩弧熔敷工艺, 在Q235基体表面原位合成了TiC颗粒增强的铁基复合层; 熔敷层无裂纹、夹杂、气孔等缺陷;

2) 利用氩弧熔覆钛铁和石墨粉末, 使之反应原位合成TiC, TiC呈颗粒状、块状或花瓣状, 弥散分布于熔敷层组织中。

3) 熔敷层微观组织主要有珠光体、铁素体、少量残余奥氏体、原位合成TiC颗粒等组成; 呈现

越靠近熔覆层表面,合金稀释越小,马氏体、残余奥氏体、TiC 颗粒越多的微观组织特征越明显。

4) 熔敷层的表面硬度较高,平均 HRC>58.5。距离熔敷层表面距离越近,熔敷层的硬越高;熔敷层与基体结合处硬度下很低,基本处于 Q235 的硬度水平。

### 参考文献

- [1] 李荣久主编. 陶瓷金属复合材料[M], 北京: 冶金工业出版社, 1995.
- [2] 徐滨士等. 表面工程的理论与技术[M], 北京: 国防工业出版社, 1999.
- [3] 宋思利, 王新洪, 邹增大. TiC 增强铁基堆焊层组织与性能的研究[J], 山东大学学报(工学版), 2004, Vol.34, No.2, 1-5.
- [4] Wang xinhong, Song sili, Zou zengda, Qu shiyao. Development of new type of wear and crack resistant hardfacing electrode[J]. Transactions. of Nonferrous Metals of China. 2004, Vol.4, No.4, 660-664.
- [5] Wang xinhong, Zou zengda. Effect of Rare Earths on Microstructure and Properties of TiC-based Cermet/Cu Alloy Composite Wear Resistant Materials[J], Journal of Rare Earths, 2003, Vol.21, No.3, 375-379.
- [6] 杨尚磊, 吕学勤, 邹增大, 楼松年. 基于 TiC-VC 的抗磨粒磨损堆焊焊条[J], 机械工程材料, 2004, Vol.28, No.6, 20-22.
- [7] 吴玉萍, 彭竹琴, 林萍华. 等离子原位合成 TiC 颗粒增强 Ni 基复合涂层[J], 材料科学与工艺, 2004, Vol.12, No.4, 429-432.
- [8] 索忠源, 邱克强, 胡亚伦. 原位自生 TiC 和 (TiW) C 增强 Fe 基复合材料的研究[J], 辽宁工学院学报, 2003, Vol.23, No.4, 37-41.
- [9] 王新洪, 张敏, 邹增大, 曲仕尧. 激光熔覆 TiCp/Ni 基合金复合涂层的显微组织与性能[J], 机械工程学报, 2003, 2.
- [10] 田永生, 陈传忠, 王德云, 王振林. 激光熔覆生成碳硅钛化合物及其组织性能研究[J], 中国激光, 2004, Vol.31, No.7, 879-882.
- [11] Xu binshi, Zhang wei, Xu weipu. Influence of oxides on high velocity arc sprayed Fe-Al/Cr-3C-2 composite coatings[J], Journal of Central University of Technology, 2005, Vol.12, No.3, 259-262.
- [12] 赵宇光, 蒋启川, 任露泉, 秦庆东. Fe-C-Ti-Mn 合金系 TiC 原位生成反应的热力学分析[J], 吉林大学学报(工学版), 2004, Vo.123, No.3, 201-205.
- [13] 严有为, 魏伯康, 林汉同. 原位 TiC 颗粒增强灰铸铁复合材料的组织及摩擦磨损性能[J], 摩擦学学报, 2003, Vol.23, No.4, 37-41.
- [14] 胡丽娟, 钟元龙, 苏广才, 林元祖. 原位反应 TiCp/Fe 基复合材料在冲击磨料磨损条件下耐磨性能的研究[J], 铸造技术, 2004, Vol.25, No.8, 602-604.
- [15] 王新洪, 邹增大, 宋思利, 曲仕尧. TiC-VC 免预热耐磨堆焊焊条[J], 焊接学报, 2002, Vol.23, No.4, 31-34.

## Study on the microstructure of in-situ TiC particle reinforced composites coating layer processed by Tungsten arc welding

Song Sili, Zou Zengda, Wang Xinhong, Li Qingming  
Shandong University 250063

### Abstract

In this paper, the in-situ TiC particle reinforced composites coating layer had been produced by prepared ilmenite, graphite powder on carbon steel through metallurgy interaction in tungsten arc welding. The result shows that the microstructure of coating layer included of pearlite, ferrite, martensite, residual austenitic

and in-situ TiC particles and the TiC particles dispersed in matrix compounded of martensite and residual austenitic. The composite coating layer has higher surface rigidity of exceed HRC 55 and better abrasion resistance properties.

**Keywords:** Tungsten arc welding, TiC particle, Coating layer, microstructure, Surface rigidity

---

基金项目：教育部博士点基金资助项目(20020422032)

作者简介：宋思利(1970~)，男，助理研究员，在读博士.