

LF6 防锈铝与 HR-2 抗氢不锈钢摩擦焊接

傅 莉¹, 毛信孚^{1,2}, 史学芳²

(1. 西北工业大学, 西安 710072; 2. 西安航空动力控制工程
有限责任公司, 西安 710077)

摘 要: 通过试验研究了铝合金系列含镁量最高的 LF6 防锈铝与 HR-2 抗氢不锈钢异种材料摩擦焊接头的组织与性能, 探讨了其摩擦焊接性。经焊前对焊接界面的特殊处理, 清除了 LF6 与 HR-2 待焊接表面上的氧化膜, 并采用以纯铝为介质的三元摩擦焊接工艺方法, 避免或减少焊接界面上金属间化合物的生成, 所焊接制品的抗拉强度可以达到或超过 LF6 防锈铝母材所要求的供货状态 $\sigma_b \geq 270$ MPa 的技术要求。

关键词: 摩擦焊接; 金属间化合物; 异种材料; 拉伸性能; LF6 合金; HR-2 钢

中图分类号: TG456.9 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2003)01-09-05



傅 莉

0 序 言

中国科学院物理研究院预研项目 LF6 防锈铝薄壁球体与 HR-2 抗氢不锈钢薄壁管的特种压力容器, 拟由球径为 $\phi 75$ mm 和壁厚 $\neq 1$ mm 的 LF6 防锈铝薄壁球体, 与外径为 $\phi 3.8$ mm 和壁厚 $\neq 1$ mm HR-2 抗氢不锈钢薄壁管进行焊接。现经多种焊接方法焊接性的比较, 其中电子束焊, 焊缝抗拉强度只能达到 LF6 母材强度的 75%; 激光焊时, 焊缝不连续, 均无法满足生产需要, LF6 合金与 HR-2 钢的焊接性成为该项目产品能否试制成功的技术关键。

据有关文献^[1~7]称谓: “铝合金与不锈钢的物理性能差别悬殊, 焊缝及其近缝处会产生较大热应力; 铝与镁、铜等元素在摩擦界面上会形成脆性的金属间化合物。其中铝镁系合金 LF6 防锈铝中镁含量最高, 而镁元素具有促使金属间化合物形成与发展的趋势, 对焊接性起着极为不利的作用。于是不锈钢与铝合金异种材料难以实现摩擦焊接, 焊接接头强度难以达到铝合金母材强度。”

鉴于以上的背景情况, 作者对摩擦焊接规范参数和工艺方法进行了优化选择, 并在对摩擦焊接头成分、组织和常规力学性能试验分析的基础上, 使防锈铝 LF6 与不锈钢 HR-2 异种材料焊接接头的抗拉强度达到了产品的性能要求。以期为进一步实现该产品的产业化生产提供较为可靠的技术依据。

1 试 验

1.1 试验材料

试验采用直径范围为 $\phi 18 \sim 24$ mm 的 LF6 防锈铝与 HR-2 抗氢不锈钢棒材。供货状态 LF6 为退火态, HR-2 为固溶态。

1.2 试样制备与焊接

为保证摩擦焊接质量, 焊接端面与外表面相垂直, 垂直度不超过 $13 \mu\text{m}$ 。并使焊接端面心部有足够的热塑性变形, 将不锈钢端面机械加工成 172° 锥面, 光洁度为 $0.1 \sim 0.4 \mu\text{m}$ 。铝合金焊接端面机械加工成平面, 光洁度为 $0.2 \sim 1.3 \mu\text{m}$ 。中间过渡金属为厚度 0.05 mm 的 L6 纯铝箔。焊前必须车削焊接端面, 清除氧化膜。其中铝箔焊前用 85% 正磷酸、3% 硝酸和 12% 蒸馏水溶液侵蚀以清除氧化膜。此外, 经车削后的焊接端面要立刻进行焊接, 以防止在空气中再次形成氧化膜。焊接时铝侧采用封闭钢环套夹持, 使之飞边成形良好。

不锈钢与防锈铝的摩擦焊试验是在 250 kN 的连续驱动摩擦焊机上进行。该焊机配置有研华 586 工业控制计算机以及由转速、压力、位移和扭矩等传感器组成的测控系统, 对焊接参数可以进行实时检测与控制。试验采用的摩擦焊接参数见表 1。

1.3 试验方法与设备

取自 LF6 防锈铝与 HR-2 抗氢不锈钢摩擦焊接头的纵向剖面试样经磨制抛光侵蚀后, 在 Neophot-2 型金相显微镜上进行显微组织分析; 在 AMRAY-1000B 型扫描电镜 (SEM) 上观察拉伸试样断口形貌特征; 在 TEM-200CX 型透射电镜 (TEM) 上观察

表 1 LF6 与 HR-2 摩擦焊接参数

Table 1 Friction welding parameters for LF6 and HR-2

Sample No.	Diameter D/mm	Rotation speed $n/(r\cdot min^{-1})$	Friction pressure P_1/MPa	Forge pressure P_2/MPa	Friction time t_1/s	Forge time t_2/s	Braking time t_3/s	Burn-off length L/mm
1-1	19	1 475	1.4	2.6	3	6	0.5	8.0
2-1	18	1 475	0.4	0.8	4	10	0.5	3.0
2-2	19	1 475	0.4	1.0	4	10	0.5	3.2
2-3	22	1 475	0.7	1.4	5	10	0.5	4.2
2-4	21	1 475	0.7	1.4	5	10	0.5	1.56
3-1	22.5	1 475	0.7	1.4	5	10	0.5	3.4
3-2	19.5	1 475	0.5	1.0	4.5	10	0.5	3.02

焊接接头焊合区微观亚结构;在 TN-5500 型能谱仪上进行微区成分分析;拉伸试验在德国机械摆式全能试验机上进行,焊后先将焊接接头车削去除飞边后,每种焊接规范取 5 件进行整体拉伸试验。

2 试验结果与分析

2.1 飞边形貌

飞边均在 LF6 防锈铝一侧成形,其外观一般有两种情况:一种是均匀连续的形貌特征,有相互平行曲折状较浅细的飞边裂纹,飞边色泽呈浅灰色;另一种是不均匀、炸裂状的形貌特征,并有相互平行曲折状粗细和深浅不一的飞边裂纹,飞边色泽呈银亮色。飞边裂纹均存在于飞边内,飞边切除后,焊接接头焊合区表面没有发现裂纹。LF6 与 HR-2 摩擦焊接头宏观形貌如图 1 所示。

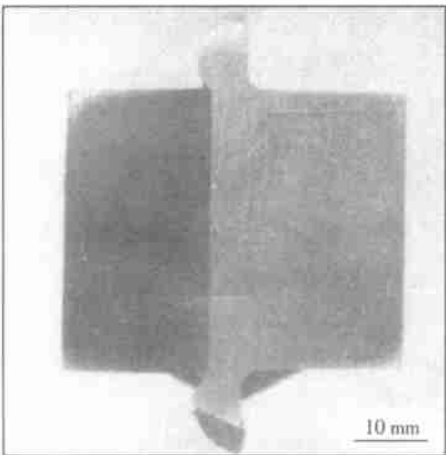


图 1 LF6 与 HR-2 摩擦焊接头宏观形貌

Fig. 1 Macro-appearance of LF6 and HR-2 friction welded joint

2.2 纤维组织

摩擦焊接过程中,强烈扭转和挤压塑性变形区内,在摩擦扭矩、轴向压力的共同作用下,由于 LF6 防锈铝塑性变形大,原有平行于轴向的金属纤维组织,随着金属的热塑性流变,其流线方向逐渐由轴向以不同的圆弧角度向径向弯曲,而在焊合区及其近区的纤维组织几乎与摩擦表面相平行。HR-2 抗氢不锈钢侧塑性变形甚微小,其焊合区的纤维组织仍与轴向纤维组织的取向保持一致。LF6 与 HR-2 摩擦焊接头低倍组织见图 2。LF6 热塑性变形区,沿轴向的心部的宽度约 1 mm,边缘的宽度约 3~4 mm。

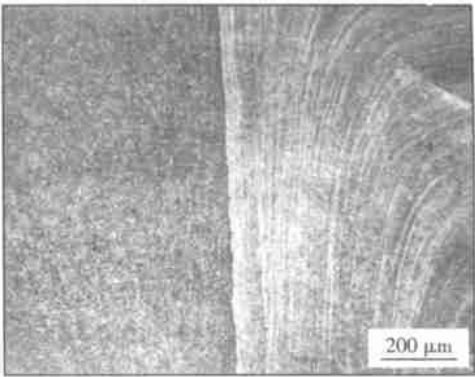


图 2 LF6 与 HR-2 摩擦焊接头低倍组织

Fig. 2 low-times structure of LF6 and HR-2 friction welded joint

2.3 力学性能

拉伸试验根据中国科学院物理研究院机械制造工艺所的有关技术标准进行,其试验结果见表 2。试验结果表明,带有中间过渡金属铝箔的 LF6 防锈铝与 HR-2 抗氢不锈钢摩擦焊接头焊合区的平均

抗拉强度均能达到中国科学院物理研究院技术标准所规定的 ≥ 270 MPa 的要求。而采用了相同焊接参数, 但没有加入中间过渡金属铝箔的试样, 或实际操作中焊接表面在空气中停留时间较长的试样, 其抗拉强度均达不到所规定的要求。

表 2 LF6 与 HR-2 摩擦焊接头的抗拉强度

Table 2 Tensile strength of friction welded joint for LF6 and HR-2

Sample No.	Material	Sample area	Ultimate load before fracture	Ultimate tensile strength
		S/mm ²	P _f /kN	σ_f /MPa
1-1	LF6+HR-2	78.53	19.28	247.47
2-1	LF6+Al+HR-2	176.63	57	322.71
2-2	LF6+Al+HR-2	194.48	62	318.8
2-3	LF6+Al+HR-2	265.77	87	327.35
2-4	LF6+Al+HR-2	254.34	65	255.9
3-1	LF6+Al+HR-2	298.5	86	288.1
3-2	LF6+Al+HR-2	221.56	53.8	242.8

2.4 断口分析

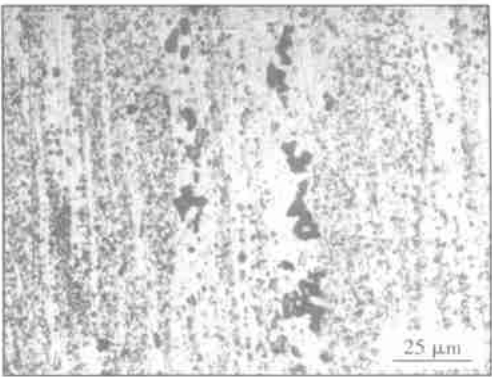
不锈钢拉伸试样断口大致可分为三种类型的宏观形貌特征: (1)均匀银灰色, 焊接情况良好, 具有 100% 焊合的特征; (2)银灰色和不锈钢原有光泽的混合色泽, 特别是心部和近外圆周边处有不锈钢金属光泽, 说明焊合程度各不相同, 焊接端面没有 100% 焊合; (3)银灰色、暗黑色和黄褐色的混合色泽, 并有顺、逆时针方向的旋叶状纹线, 在纹线交汇处呈暗黑色泽, 这是与焊接界面的氧化情况有关, 致使焊合不良。由于不锈钢热塑性流变微小, 各试样的焊接端面均保持有车加工痕迹。摩擦时间较长的试样不锈钢焊接端面除心部有车加工痕迹外, 其余部位因热塑性变形而消失。

试验结果还表明, 带有中间过渡金属铝箔的 2-1、2-2 和 2-3 防锈铝与不锈钢拉伸试样断口均是第一种类型的宏观形貌特征, 既无氧化, 又能 100% 焊合, 而且具有良好的力学性能。

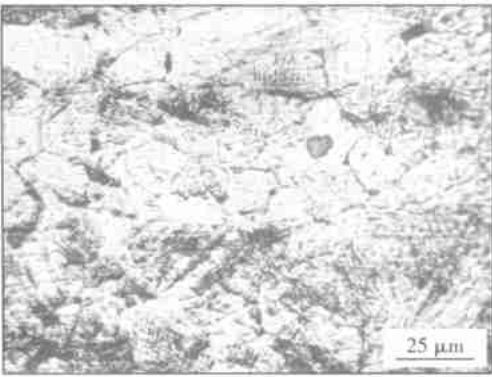
2.5 显微组织

LF6 防锈铝与 HR-2 抗氢不锈钢摩擦焊接接头焊合区的防锈铝一侧没有发现因过高的热塑性变形温度而引起的复熔球共晶组织、三角晶界以及晶界粗化等过烧现象。其显微组织经热塑性变形后, 化合物破碎沿压延的金属流动方向分布, 并从 α (Al) 基体中析出大量的 β (Mg_2Al_3) 和 $(FeMn)Al_6$ 等相的质点。抗氢不锈钢一侧没有发现明显的因热塑性流变的动态再结晶组织变化, 仍保持着原奥氏体

基体的晶粒大小和等轴、多边形以及轻度变形晶状的组织形貌, 而在易于滑移面上呈现多系滑移。带有中间过渡金属铝箔的摩擦界面及界面近区还未发现金属间化合物的生成。LF6 合金与 HR-2 钢的摩擦焊接头各特征区基体的显微组织如图 3 所示, 奥氏体晶粒中多系滑移的平行束簇状和交叉状滑移线和双晶组织见图 4。HR-2 抗氢不锈钢的热塑性变形区经透射电镜分析可以观察到位错网络, 位错网络的透射电镜像 (TEM) 见图 5。



(a)



(b)

图 3 焊接接头焊合区金属的显微组织

Fig. 3 Microstructure on weld zone of friction welded joint

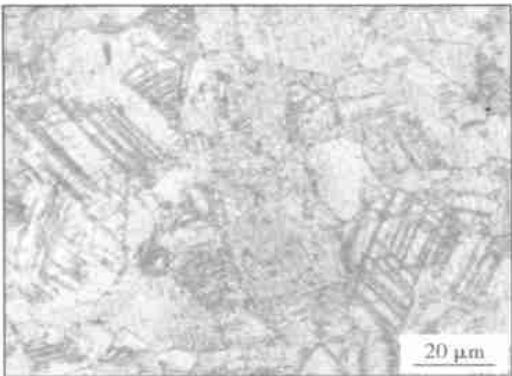


图 4 HR-2 奥氏体晶粒中多系滑移

Fig. 4 Slippages of austenitic grains in HR-2 steel

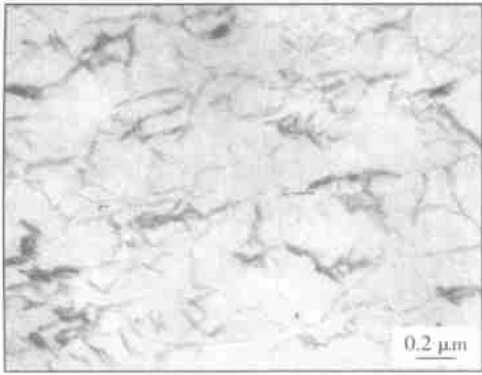


图 5 HR-2 位错网络(TEM)

Fig. 5 Dislocation network in HR-2 steel

2.6 全元素扫描定性分析

摩擦焊接头 2-1 拉伸试样经拉伸试验, 在焊合区断裂, 外观 HR-2 抗氢不锈钢试样横向断面为均匀银灰色, 是焊接情况良好的形态特征。采用能谱仪对其整个径向断面全元素扫描进行定性分析, 其成分标识特征曲线如图 6 所示。结果表明, 加入中间层 Al 薄膜的拉伸试样断面上是在 HR-2 抗氢不锈钢主要合金元素铬、镍和钛的基体上覆盖了分布的纯铝元素, 而没有 LF6 防锈铝的合金元素镁、锰和铜。由此表明借助于纯铝介质来延迟异种金属的直接焊合, 减轻或避免了防锈铝中镁促使焊合区脆性金属间化合物的形成和发展, 这与焊合区没有观察到金属间化合物的结果是一致的。

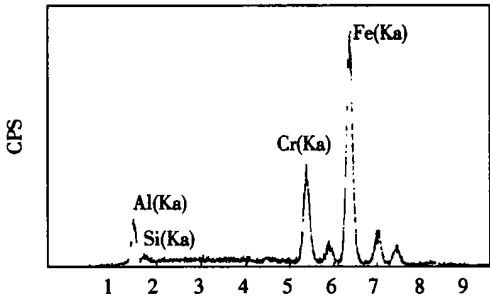


图 6 拉伸试样断面上合金元素成分标识特征曲线

Fig. 6 Elements mark curve on tensile fracture surface

2.7 硬度测定

摩擦焊接头在显微硬度计上沿其轴向分别用 500 g 和 200 g 负荷各自测定 HR-2 抗氢不锈钢和 LF6 防锈铝的维氏硬度值, 硬度沿轴向截面的分布曲线如图 7 所示。测试结果表明, 摩擦焊接头沿轴向截面硬度分布情况是, 抗氢不锈钢和防锈铝分别距焊接界面约 0.65 mm 和 1.25 mm 处硬度开始递增。各自由母材的原始硬度平均值约 221 HV 和 106 HV, 增加到焊区的硬度平均值约 234 HV 和

121.5 HV。焊区硬度增加, 显然与应变强化等因素有关。

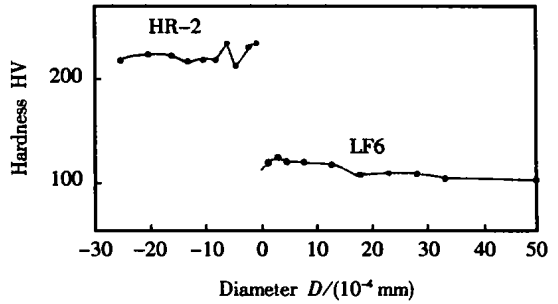


图 7 LF6 与 HR-2 摩擦焊接头显微硬度曲线

Fig. 7 Micro-hardness curve of friction welded joint for LF6 and HR-2

3 分析与讨论

3.1 焊接界面的抗拉强度

其中名义上为相同焊接参数和工艺方法的拉伸试样 2-3, 2-4 和 3-1, 试验结果抗拉强度相差悬殊。这是由于实际工艺操作中有所差别。经试验分析, 还没有发现过高的摩擦压力、顶锻压力和过长的摩擦时间使热塑性变形温度过高而形成金属间脆性化合物或铝合金过烧; 而热塑性变形温度过低时, 则不能达到良好的热塑性流变, 轴向缩短量低, 摩擦焊接界面处不能很好地焊合, 特别是焊接件心部及其附近基体金属得不到足够的热塑性变形而不能 100% 焊合(如 2-4 试样)。此外, 焊接界面于焊前及焊接过程中因氧介质的侵入, 焊接界面氧化等因素, 均会使焊接界面抗拉强度显著降低(如 3-2 试样)。同时, 不加中间合金的 LF6 与 HR-2 摩擦焊接头虽经多次试验, 均因焊接界面上金属间脆性化合物生成的影响, 其抗拉强度均不能达到技术标准规定的要求。

3.2 金属晶体的塑性变形及其组织结构

LF6 防锈铝与 HR-2 抗氢不锈钢摩擦焊接过程中在摩擦压力和轴向顶锻压力的共同作用下, 发生热塑性流变, 于是在扭转和挤压塑性变形的焊区内各自发生了组织结构的变化。对于 HR-2 抗氢不锈钢因其摩擦焊接温度远低于其热塑性变形温度, 热强度较高, 其变形量也不大; 又因热塑性变形温度在其再结晶温度以下, 因此仍属于冷塑性变形范畴以及由此引发的一些组织结构是奥氏体晶粒没有沿金属流变方向伸展, 仍保持原有的等轴晶粒的特征。但在扭转和挤压塑性变形区内, 由于外力和几个滑移系的相对取向相同, 外力又达到了屈服强度值, 几个滑移系的分切应力同时达到了临界值, 在

分切应力作用下, 各奥氏体晶粒中的位错沿着同一滑移面滑移, 就形成了多系滑移线, 见图 4。金属晶体的塑性变形是位错在应力作用下不断地在滑移面上增殖和运动而得以逐步进行。而 HR-2 抗氢不锈钢低层错能材料, 由于位错的移动性差, 变形后位错杂乱地排列在晶体中, 成为位错网络^[8-9], 见图 5。

4 结 论

(1) 带有中间过渡金属铝箔的三元摩擦焊接方法优化的规范参数及工艺方法为焊件直径 $\phi 22$ mm 时, 摩擦压力 $P_1 = 0.7$ MPa, 顶锻压力 $P_2 = 1.4$ MPa, 轴向缩短量 4 mm 左右; 焊件直径 $\phi 18$ mm 时, $P_1 = 0.4$ MPa, $P_2 = 1.0$ MPa, 轴向缩短量 3 mm 左右, 转速均为 $n = 1\ 475$ r/min, 顶锻保压时间 $t_2 = 10$ s, 提前刹车时间 $t_3 = 0.5$ s, 工进速度 $v = 5$ mm/s。

(2) 采用优化焊接规范参数及工艺方法施焊的焊接接头摩擦焊接界面处, 特别是靠近心部的基体金属能得到足够的热塑变形, 焊接界面宏观断口呈均匀银灰色, 表征焊接情况良好, 具有 100% 焊合的特征。

(3) 采用优化焊接规范参数及工艺方法施焊的焊接接头力学性能可以达到或超过 LF6 防锈铝(退火态)技术标准规定的 $\sigma_b \geq 270$ MPa 的技术要求。

参考文献:

- [1] 潘春旭, 胡化骥. 铝基复合材料—不锈钢摩擦焊接过渡区的显微结构特征[J]. 金属学报, 1996, 32(8): 810~816.
- [2] 郭久柱. 不锈钢与铝合金薄壁管的摩擦焊接[J]. 焊接学报, 1992, 13(4): 231~236.
- [3] 张田仓. 纯铝与不锈钢异种材料惯性摩擦焊接的研究[J]. 航空工艺技术, 1998, (3): 33~37.
- [4] 刘中青. 异种材料焊接[M]. 北京: 科学出版社, 1990. 271~291.
- [5] Sassani F, Neelam J R. Friction welding of incompatible Materials [J]. Welding Journal, 1988, 67(11): 264~270.
- [6] Yashan D, Tsang S, Johns W L, et al. Inertia friction welding of 1100 aluminum to type 316 stainless steel [J]. Welding Journal, 1987, 66(8): 27~36.
- [7] Okita K, Kishimoto W. Studies on friction welding of SUS 304 austenitic stainless (Report) [J]. 溶接学会誌, 1979, 48(11): 991~995.
- [8] 胡康祥. 金属学[M]. 上海: 科学技术出版社, 1980. 256~261.
- [9] 刘小文, 毛信孚. 电磁纯铁与不锈钢摩擦焊接工艺的研究[A]. 第八次全国焊接年会论文集[C]. 北京: 机械工业出版社, 1997. 247~249.

作者简介: 傅 莉, 女, 1968 年 12 月出生, 副教授, 博士研究生。主要研究方向为摩擦焊接工艺及设备、摩擦焊接过程控制和摩擦焊接过程物理模拟技术。发表论文 30 余篇。

Email: fuli@nwpu.edu.cn

[上接第 8 页]

表 2 中, 第一类错误表示原假设为真而拒绝原假设的错误; 第二类错误表示原假设为假而错误地接受原假设的错误。

5 结 论

多变量统计过程控制(MSPC)考虑了所有的数据并提取过程变化的“方向”信息, 能克服单变量统计过程控制的不足。因此, 将其引入焊接领域是一个很有意义的尝试。大量的试验也证实了将 MSPC 技术用于在线监测是可行的。

参考文献:

- [1] Quinn T P, Smith C, McCowan C N, et al. Arc sensing for defects in constant-voltage gas metal arc welding [J]. Welding Journal, 1999, 78(9): 322~328.

- [2] Adolfsson S, Bahrami A, Bohmsjo G, et al. On-line quality monitoring in short-circuit gas metal arc welding [J]. Welding Journal Research Supplement, 1999, 78(2): 59~73.
- [3] Li Di, Song Yonglun, Ye Feng. Weld defects for short-circuit gas metal arc welding based on the self-organize feature map neural networks [C]. Proceeding of the Computer Technology in Welding and Manufacturing, Copenhagen, Denmark, 2000. 6~7.
- [4] 李 迪, 宋永伦, 叶 峰, 等. 基于电弧传感的 GMAW 过程焊缝缺陷识别方法[J]. 焊接学报, 2000, 21(1): 30~34.
- [5] Uwe Thissen, Willem J. Melsen, et al. Nonlinear process monitoring using bottle-neck neural networks [J]. Analytic Chimica Acta, 2001, 446: 371~383.
- [6] Martin E B, Morris A J, Zhang J. Process performance monitoring using multivariate statistical process control [J]. IEE Proc-Control Theory Appl, 1996, 143(2): 132~134.
- [7] 王学仁, 王松桂. 实用多元统计分析[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1990.

作者简介: 曾 安, 女, 1978 年出生, 博士研究生。主要研究方向为智能网络技术。发表论文 3 篇。

Email: zengan@163.net