

钛合金整体叶盘线性摩擦焊技术综述

Linear Friction Welding Technology for Titanium Alloy Disc

北京航空制造工程研究所 姚希珍 胡 泽



姚希珍

馆员, 就职于北京航空制造工程研究所科研管理部, 从事科技情报与文献管理工作。

整体叶盘是新一代航空发动机实现结构创新与技术跨越的重要部件。它具有减重、减级、增效并提高可靠性等优点。美国国防部与工业界开展的综合高性能涡轮发动机技术计划(IHPTET)中指出: 到2020年, 战斗机的涡轮都将采用整体叶盘结构。整体叶盘与叶片和盘装配结构相比能够减少零件重量20%以上,

采用线性摩擦焊加工整体叶盘可以节约大量的贵重合金, 可以对损坏的单个叶片进行修理; 还可以将2种不同材料焊接在一起, 这样可以根据叶片、轮盘的工作条件选用不同的材料, 使转子结构的重量进一步降低。

并能极大提高工作效率, 从而节省燃油并减少气体排放。如果进一步集成焊接盘鼓或纵排整体叶盘, 结构将更紧凑, 重量也更轻。

目前整体叶盘绝大多数采用钛合金材料, Rolls-Royce 公司指出, 整体叶盘涡轮重量最多可减少50%。美国F-119、F-135航空发动机的风扇和压气机均为整体叶盘结构。F119高压压气机共6级, 都是整体叶盘结构, 其中1~2级使用钛合金材料, 最初采用整体锻件铣削加工成叶盘, 最近改用叶片和盘分别加工后用线性摩擦焊连接成整体叶盘。欧洲EJ200发动机钛合金风扇和压气机第一级原采用电子束焊接叶盘, 后改

用线性摩擦焊连接^[1]。

线性摩擦焊的原理

线性摩擦焊的原理如图1所示, 线性摩擦焊焊接过程是待焊的一对工件中, 一件加持于往复运动机构中, 称为线性往复运动工件, 另一件夹持于尾座夹具中, 称为移动工件。

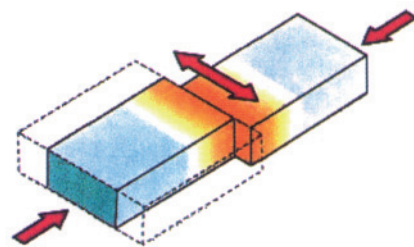


图1 线性摩擦焊原理图

2011年第16期·航空制造技术 43

焊接时往复运动工件在动力源驱动下开始高频、小振幅往复运动,移动工件在压力的作用下逐步向往复运动工件靠拢,当工件接触后,在摩擦界面上的凸起部分首先发生摩擦粘结与剪切并产生摩擦热;随着压紧,实际接触面积增大,摩擦力迅速升高,摩擦界面温度也随之上升,摩擦界面逐渐被一层高温粘塑性金属所覆盖,此时,工件的相对运动实际上已发生在这层粘塑性金属层的内部,产热机制已由初期的摩擦产热转变为粘塑性金属层的塑性金属发生动态再结晶,随摩擦热量由摩擦面向工件的传导,焊接面两侧温度逐渐升高,在压力作用下焊合区金属发生塑性流动形成飞边,缩短量逐渐增大。当摩擦焊接区的温度和变形达到一定程度后,焊件对齐并施加顶锻压力,此时缩短量急剧增大,在顶锻过程中焊合区金属通过相互扩散与再结晶使两侧金属牢固焊接在一起从而完成整个焊接过程。

该项技术相对于其他焊接方法有以下优点:

- (1) 它是一项固相焊接技术,不存在传统熔焊过程的疏松、夹杂、气孔及裂纹等缺陷;
- (2) 无焊接弧光、飞溅;
- (3) 不需要保护气;
- (4) 焊接接头性能稳定;
- (5) 可以进行异种材料焊接;
- (6) 可焊接方形、圆形、多边形截面的金属或塑料工件,设计合适的工装夹具还可焊接不规则的构件,如叶片与涡轮盘的焊接;
- (7) 较窄的热影响区,低应力、小变形、高完整性;
- (8) 焊接过程可完全机械化和自动控制,可靠性高^[2]。

线性摩擦焊的工艺流程

1 工艺流程概述

(1) 初始摩擦阶段。

待焊工件接触伊始,摩擦表面相

互作用,产生较大的摩擦压力和运动速度,使不平的表面迅速产生塑性变形和机械挖掘现象,而且由于表面的凹凸不平,会引起设备振动,但随着摩擦时间的增加,温度逐渐升高。

(2) 不稳定摩擦阶段。

摩擦破坏了待焊面的原始状态,未受污染的材质相接触,真实的接触面积增大,同时也由于界面区温度的进一步升高,塑性增高和强度下降,加热功率迅速降低。在这个阶段中,摩擦变形开始增大,并在接触面的四周开始出现飞边。在不稳定摩擦阶段,机械挖掘现象减少,振动消除,表面逐渐平整,出现高温塑性状态金属颗粒的“粘结”现象,而粘结的金属受剪切力的作用而剪断,并相互过渡,接触良好的塑性金属封闭了摩擦表面,使之与空气隔绝。

(3) 稳定摩擦阶段。

在这个阶段,材料的局部粘结现象减少,分子作用增强、摩擦系数小,摩擦加热功率稳定在较低的水平,变形层在焊接压力的作用下,不断从摩擦表面挤出,飞边逐渐增多。

(4) 停振阶段。

伴随着振动工件振幅和频率的减少,热输入减少。此时对焊件施加较大的焊接顶锻力,大量的塑化金属以飞边的形式被挤出,变形量进一步增大,此阶段直到振子完全停振为止。

(5) 顶锻维持阶段。

振动工件完全停振后,顶锻力上升到最大值,并且保持一定时间直到程序停止。

线性摩擦焊的主要工艺参数包括振动频率、振幅、摩擦力、顶锻力、摩擦时间及顶锻时间。其中,振动频率、振幅和摩擦时间直接影响着焊缝的热量输入,且与热量输入呈正比。而摩擦力和顶锻力对焊接接头的焊缝质量有着重要影响,同时这2个工艺参数还影响飞边的形态,如其他参数不变时,摩擦力和顶锻力越大,挤

出的飞边越薄。顶锻时间影响着焊接接头的质量,如顶锻时间过短,焊接界面的金属未完全扩散,可能会影响焊缝的质量^[3]。

2 线性摩擦焊加工和修理整体叶盘示例概述

通过对国内外各类文献的检索和分析,从制造技术实用性角度分析专利文献较非专利文献为佳。通过对欧洲专利数据库和美国专利数据库的检索,以“LINEAR FRICTION WELDING”和“LINEAR FRICTION WELDING' AND blisk”分别检索出52条和7条记录,线性摩擦焊工艺和设备专利主要集中在英国的罗·罗公司、法国的斯奈克玛公司、德国的MTU中心、美国波音公司、美国联合技术公司和中国西北工业大学。现以最典型的罗·罗公司线性摩擦焊加工和修理整体叶盘的方法为例进行示例概述^[4]。

2.1 发明技术的背景和目的

该文献叙述的方法是先在涡轮盘的周向表面上加工出凸台,通过凸台的径向外表面确定焊接连接面。焊缝在轴向和周向呈环形分布,而在其他方向则是平面的。将叶片径向安装在凸台上,通过对叶片施加压力,使叶片在第三方向产生振荡,从而焊接在凸台上。

该发明专利涉及了改进摩擦焊及与摩擦焊工艺有关的内容,具体说就是采用线性摩擦焊制造和维修整体叶盘。制造整体叶盘通常有2种方法,一种是直接由实体坯料加工出来;一种是通过摩擦焊将单个叶片固定到涡轮盘上;作为最终加工程序还需去除毛刺或焊接飞边,这已经成为最终加工程序的必要组成部分。从实体坯料加工出叶盘成本昂贵且材料浪费巨大,尤其是加工大规格尺寸的整体叶盘。线性摩擦焊可以作为维修技术替换损坏的单个叶片,而不管叶盘是用何种方法加工出来的。

通过摩擦焊将叶片焊接到涡轮

盘上,允许分别优化叶片和涡轮盘的参数,可以采用铸造叶片和模锻涡轮盘以及不同的材料。整体叶盘转子的制造和维修方法,涉及到在英国2篇专利文献中叙述的涡轮盘外缘凸台结构。尽管在上述2个专利文献中都提及过凸台的结构和外形,但是,两者都未考虑到凸台的顶面结构,即连接表面的结构形式。这些专利中的技术参考图所显示的凸台顶面是平面。但是它们并未把线性摩擦焊作为一种可能的连接技术,仅将它作为一种可能的加热连接的技术方法之一,而没有进行任何更深的论述。但是,焊接通过径向向下运动,更有利于将新叶片安装到叶盘凸台上。

为了避免零件之间的横向位移或变形,焊接连接面应该在与径向垂直的平面上。通常涡扇发动机转子并不是设计成圆柱形轮廓的,所以涡轮盘的外缘相对于涡轮盘的旋转轴呈内敛形状。在某些采用宽弦叶片的风扇及低压压气机中,涡轮盘表面也可以是凹进或凸起的结构,涡轮盘表面上的叶根是三维度。例如,涡轮盘外缘的位置是焊接位置,摩擦焊接时涡轮盘是夹紧的,由另一个夹具夹持的叶片在焊接处与涡轮盘表面摩擦,并在接触面上产生摩擦热量。当摩擦损耗达到预期的长度后,便使叶片突然停留在涡轮盘的预定位置上,且将叶片压在涡轮盘上一段时间,以增强焊接效果。当焊接面冷却后,最终的机械加工操作(如去除毛刺或焊接飞边)即可进行。如果叶型损坏,比如被吸入发动机的异物打伤,就可以去掉损坏的叶片,并用摩擦焊技术焊上替换叶片,这样可避免整体地更换损坏的涡轮叶盘。

2.2 发明概述

该专利文献的目的是提供一种用线性摩擦焊设备对叶盘进行初始加工和维修的方法。例如,加工和修理上述的具有倾斜角(倾斜角是涡轮

盘轴和涡轮盘外表面切线的夹角)和弯曲环面的、满足设计和制造标准的整体叶盘。

本专利文献提供了制造和维修整体叶盘的方法,即把叶片用线性摩擦焊方法焊接到涡轮盘的圆锥形外表面上,焊接时,通过焊接作用力使叶片在涡轮盘上沿预定方向做线性振动,同时施加焊接作用力,在涡轮盘焊接表面形成外缘上的凸台,其上部平面高出涡轮盘外缘。平面固定高度、叶片截面和涡轮盘的外缘面决定了凸台的轴向焊接面和圆周方向,并且,在预先设定平行于焊接振动方向的第三坐标直线,使叶片上形成的焊接面与凸台表面相吻合。

另一方面,该专利文献提示了燃气涡轮发动机叶盘在外缘形成至少一个凸台结构,使叶片叶身可以用摩擦焊接方法焊接,其中在轴向和圆周方向的凸台的边缘的形状决定了焊接到涡轮盘外缘的叶片和凸台表面的焊接面,包括平行于涡轮盘外缘切线的焊接振动线所形成的轨迹。该发明专利也提供了燃气涡轮发动机涡轮盘周向上存在的大量相互分离的凸台结构,即叶片叶身可以用摩擦焊方法焊接在轴向和圆周方向,凸台结构形成叶片焊接所需的断面,且涡轮盘外缘和凸台的表面形成的焊接面也包括平行于叶片弦向的由焊接振动形成的轨迹。

线性摩擦焊的应用

线性摩擦焊最初主要应用于塑料的焊接。在20世纪80年代后期,MTU公司与罗·罗公司合作,开始把线性摩擦焊用于发动机整体钛合金叶盘的制造并取得了成功。采用线性摩擦焊加工整体叶盘可以节约大量的贵重合金,可以对损坏的单个叶片进行修理;还可以将2种不同材料焊接在一起,这样可以根椐叶片、轮盘的工作条件选用不同的材料,使转子结构的重量进一步降低。据称,用于当前新研制战斗机的发动机,如果不采用整体叶盘是不可想象的事。据英国焊接研究所的有关资料介绍,线性摩擦焊的潜在用途包括齿轮、链环、汽车保险杠、导电板、行李箱盖和地板块等塑料和金属部件、双金属叶片以及金属与塑料的复合连接^[5]。

1 线性摩擦焊在整体叶盘制造中的应用

整体叶盘采用线性摩擦焊的加工过程如图2所示:首先分别制造出单个叶片与轮盘(图2(a)),轮盘的轮缘处已做好了连接叶片的凸座,而叶片根部处留有较厚的裙边(由于轮缘上已有一段叶片的凸座,所以叶片比正常的叶片要短);第二步将叶片紧压在轮盘轮缘的凸座上(图2(b)),高频往复运动,使叶片底部表面与凸座表面间高速摩擦,产生足以



图2 整体叶盘线性摩擦焊的工艺过程

使两者之间原子相互转移所需的高温,当达到所需的高温后,往复运动停止并保持将叶片紧压在轮盘轮毂上,直到两者结合成一体为止;然后铣掉焊缝的飞边(图2(c))。

与其他方法相比,采用线性摩擦焊加工整体叶盘具有以下技术优势。

(1) 与用钛合金整体锻坯在五坐标数控铣床上加工或电化学加工相比,线性摩擦焊可以节约大量贵重的材料。例如罗·罗公司为JSF(联合攻击机)用的升力风扇发动机生产钛合金整体叶盘的风扇转子(该转子是目前世界上最大的整体叶盘,其外径为1.27m)时,采用整体锻坯用五坐标数控铣床加工,坯料重840kg,加工后成品件重97.6kg,即材料损耗高达88%。除此之外,采用线性摩擦焊还可减少加工时间。

(2) 可以对已损坏的单个叶片进行修理,采用整体叶盘,特别是在风扇第1级采用该结构时,能否对整体叶盘进行修理是要考虑的一个重要问题。因为发动机在使用中不可避免地会遇到外物特别是鸟打伤叶片的情况。采用常规的连接可以轻易地更换损伤的叶片,而整体叶盘就不能更换叶片,因此如没有方便而适用的修理损坏叶片的方法,整体叶盘的应用就会受到限制。有了线性摩擦焊的加工方法,就可以将损坏的叶片切去后再焊上新叶片。

(3) 线性摩擦焊可以将2种不同材料焊在一起,这样可根据叶片、轮盘的工作条件选用不同的材料,使转子结构的重量进一步减少。

2 线性摩擦焊在航空发动机上的应用

国外实践表明,线性摩擦焊接技术是制造钛合金宽弦风扇叶片整体叶盘结构行之有效的方法。整体叶盘线性摩擦焊接技术在欧洲战斗机EJ200的3级风扇整体叶盘制造中的成功应用,标志着线性摩擦焊接技术的应用达到了登峰造极的程

度。目前罗·罗公司和MTU公司已用该技术成功地制造了钛合金宽弦风扇整体叶盘,并为欧洲战斗机(Typhoon)计划提供线性摩擦焊接的整体叶盘。美国F-35战斗机所用F135发动机也采取用线性摩擦焊接的整体叶盘结构。2003年,罗·罗公司为处在系统开发与验证(SDD)阶段的F135发动机生产并交付了第一个风扇整体叶盘^[6]。

欧洲实施的DUTIFRISK项目(双材料钛合金摩擦焊接整体叶盘)在整体叶盘技术方面取得重大进展,开发和试验了一种新的双合金线性摩擦焊整体叶盘。这项研究为开发更经济、高效的发动机所需的新一代整体叶盘铺平了道路。

该项目的研究目的是开发和验证双高强度钛合金/双微结构线性摩擦焊接整体叶盘。采用2种材料目的是取得重量和强度的最佳平衡。改进的整体叶盘技术能够使叶片和盘材料选择最佳,从而极大地增强循环性能和可靠性,同时显著减少重量。项目的参与者是SNECMA和

MTU航空发动机公司,另外还包括奥地利锻造公司以及法国、德国和西班牙研究院。SNECMA和MTU航空发动机公司计划在下一代发动机上采用这一技术。

在为F-22研制的F119发动机中,全部风扇及高压压气机转子均采用了整体叶盘,第一级风扇工作叶片做成空心的,用线性摩擦焊将钛合金空心叶片连接到轮盘上,这是用线性摩擦焊来加工最先进的发动机整体叶盘的一例。目前普惠公司已经为F119发动机生产出生产型线性摩擦焊接的风扇整体叶盘,该线性摩擦焊接系统以250Hz高频往复震动,振幅为 $\pm 4\text{mm}$,位置精度可达到 $<0.25\text{mm}$,施加的压力甚至达到 $<400000\text{kN}$ 。美国21世纪初计划生产3000架JSF联合攻击战斗机,其采用的F135发动机亦将采用线性摩擦焊接的整体叶盘结构;GE公司和罗·罗公司研制的JSF备用型F136发动机的3级叶片全部采用线性摩擦焊接的整体叶盘结构;美国通用电气公司航空发动机部也在探索

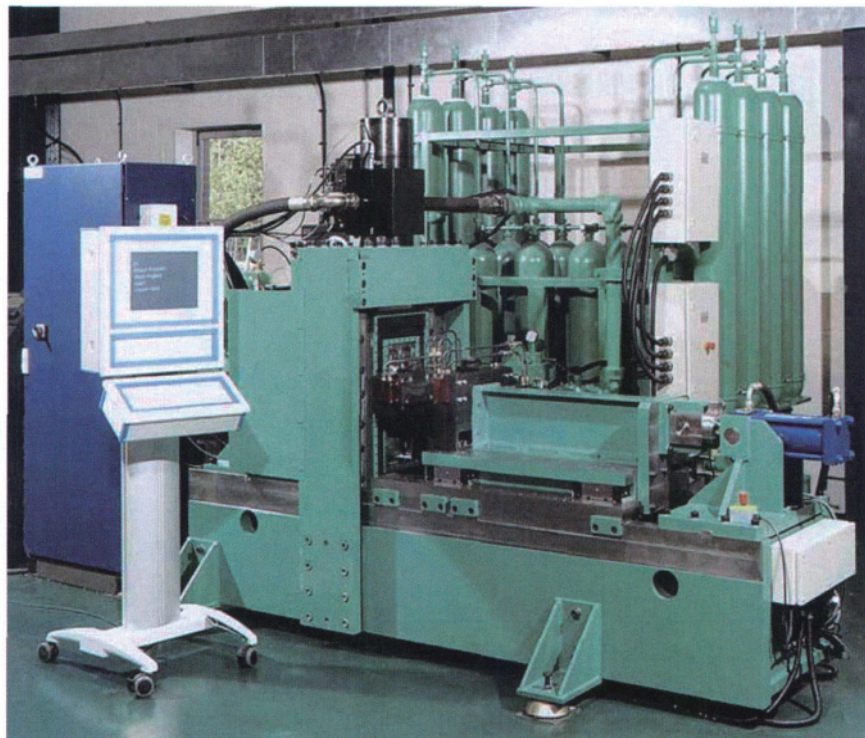


图3 “LinFric”项目研制的线性摩擦焊设备

在将来航空发动机的制造和维修中使用线性摩擦焊^[7-8]。

线性摩擦焊接设备

TWI 在 80 年代中期改造完成了第一台线性摩擦焊设备,1990 年设计完成了第一台线性摩擦焊设备,设备的主要指标为振动频率:25~75Hz; 振幅:

$\pm 3\text{mm}$; 顶锻力:150kN; 波形:正弦波。2001 年 TWI 设计制造的设备指标为振动频率:25~125Hz; 振幅: $\pm 3\text{mm}$; 顶锻力:200kN; 可以提供正弦波、三角波及矩形波。

由 TWI 负责组织 8 家公司共同进行了线性摩擦焊项目(LinFric 项目)研制,主要是通过研究降低线性摩擦焊的制造费用,使线性摩擦焊设备能够在更多的领域中得到应用,如在能源、汽车及航空等领域。与以前的设备相比,该项目研制的设备(图 3)在驱动方式上进行了改进,设备的核心部件是液压振荡器。

“LinFric”项目设备的性能指标为频率:25~125Hz; 振幅: $\pm 3\text{mm}$; 顶锻力:150kN; 能够提供非正弦振动曲线。设备的制造费用降低了 60%~75%。

英国 BLACKS 公司制造了世界上第一台商业用线性摩擦焊设备,该焊机由 1 个主驱动电机(功率 89kW)、振荡器及夹具组成,振荡器可产生线性振动,振幅 0~3mm。夹具带有分度机构,可对工件进行分度、定位和固定,并传递夹紧力、顶锻力和摩擦力。振荡器可以在焊接工序完成时的几分之一秒内使振幅为 0,保证被焊叶片的定位精度,瑞士的一家公司可以提供与之配套的高速磨床和理想的软件包。

21 世纪初,应波音、罗·罗、MTU 等知名航空厂家的要求,英美德等国的一些公司开展了有关线性摩擦焊

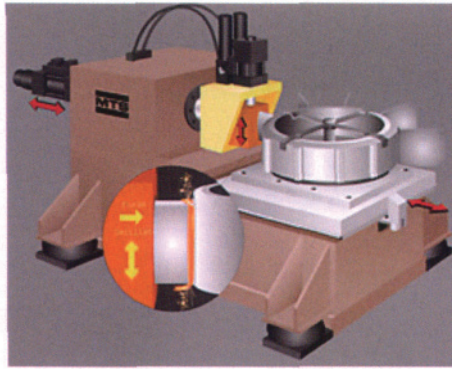


图4 BLACKS公司生产的第一台商业用设备

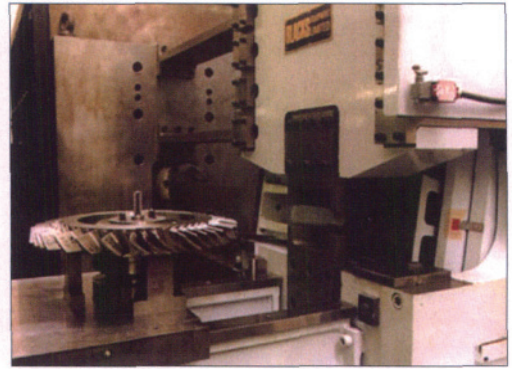


图5 MTS公司制造的线性摩擦焊设备

设备的新一轮技术研究。在此过程中,美国公司退出了有关线性摩擦焊设备的研究制造工作,从而 BLACKS 公司成为目前唯一的成熟线性摩擦焊设备的制造商(图 4)。2006 年,英国 Thompson 公司将 BLACKS 公司收购至麾下,并继续在线性摩擦焊设备领域里进行研究和生产。德国 MTU 焊接航空发动机用的设备是由 Mercedes-Benz 公司设计制造的,1992 年德国 MTS 公司为航空发动机厂研制了线性摩擦焊设备(图 5)。

英国 Bristol 大学也进行了线性摩擦焊设备的研制,主要的指标为振幅:0.05~3mm; 频率:10~1000Hz; 并且可调节摩擦和顶锻压力。A.Vairis、M.Frost 等设计研制了试验用的线性摩擦设备,该设备重量轻,比一般商用设备有更高的振动频率,能够达到 1kHz,能够在不同振幅条件进行焊接,而且该设备能够检测焊接温度、试样是否过烧及焊接顶锻力等。瑞士的一家公司可以为各类线性形摩擦焊接设备提供与之配套的高速磨床和理想的软件包。

目前,由于线性摩擦焊设备的造价较高,故其应用领域主要集中在航空发动机整体叶盘的制造与维修中。因此,研发低成本经济型的线性摩擦焊设备是促进线性摩擦焊技术快速发展的前提条件。虽然距第一台线性摩擦焊机的出现已经有近 20 年,但其机理研究还处于初步阶段,产热传热、变形流动和组织转变等方面的

试验研究还很不充分,数值模拟手段的应用也不够,进行大量基础性的理论试验研究十分必要。

线性摩擦焊接技术在国内尚处于研制攻关阶段,与国外相比有很大差距。随着我国航空航天工业的快速发展,相关设备的制造对焊接技术提出了越来越多新的要求和挑战,研究包括线性摩擦焊在内的新型焊接技术对提高我国的航空航天水平有着重要的意义。在开展此项研究的单位中,西北工业大学和北京航空制造工程研究所处于国内领先水平。从 20 世纪 90 年代开始,西北工业大学就开始了针对性的相关研究,并在焊接机理和材料性能研究方面取得了很大进展,申报了若干项专利,另外还利用自有设备改装成线性摩擦焊专用试验设备。北京航空制造工程研究所在先进摩擦焊技术领域一直在国内处于领先水平,已针对新一代军、民用飞机动力技术开展了整体叶盘结构制造技术研究,已成为国家和行业相关重大攻关课题研究的责任单位。北京航空制造工程研究所发挥专用设备研发技术优势,已开发出线性摩擦焊专用设备样机,开始进行航空发动机相关材料的焊接工艺性试验研究。

本文共有参考文献 8 篇,因篇幅所限,未能一一列出,如有需要,请向本刊编辑部索取。

(责编 良辰)