

激光快速成型技术在精密金属零件快速制造中的应用

Application of Laser Rapid Prototyping Technology in Rapid Manufacturing of Precise Metal Part

华南理工大学机械与汽车工程学院 杨永强 王 迪 杨 斌 罗子艺 卢建斌



杨永强

工学博士,教授,现任华南理工大学机械与汽车工程学院焊接科学与技术研究所所长、机械电子工程研究所副所长、广东省机械工程学会焊接分会理事长等。主要研究方向为激光加工和快速成型技术与装备。发表论文 116 篇,获得授权的发明专利 3 项。成功研制出国内第一台选区激光熔化快速成型机,可以实现金属零件的直接快速成型制造等。

激光快速成型(Laser Rapid Prototyping, LRP)技术是近 20 年来制造技术的一项重大突破。该技术是一种涉及多门学科的新型综合制造技术,其对制造业的影响力可

激光快速成型(Laser Rapid Prototyping, LRP)技术是近 20 年来制造技术的一项重大突破。该技术是一种涉及多门学科的新型综合制造技术,其对制造业的影响力可与 20 世纪五、六十年代的数控机床相比。

与 20 世纪五六十年代的数控机床相比。金属零件快速制造技术代表了 RP 技术的最新发展方向^[1]。国外对 RM 的理论研究与工艺研究也相对成熟,而且在近几年已有多家公司推出商品化的设备。而国内主要是对基础工艺的研究,主要研究单位包括西北工业大学^[2]、北京航空航天大学^[3]、华南理工大学^[4]、华中科技大学^[5]、南京航空航天大学^[6]、清华大学^[7]等。RM 技术最大的优势是其不需要模具或工具加工,直接获得需求的功能零件。虽然快速制造(Rapid Manufacturing, RM)技术在材料选择、设计自由性、以及研发成本控制等方面具有很大的竞争优势,但由于 RM 技术在国内市场上刚刚出现并且关键技术不成熟,还没有被市场普遍接受。

目前,真正能够制造精密金属零

件的快速成型技术只有选区激光熔化和选区激光烧结。选区激光烧结(Selective Laser Sintering, SLS)成型方法成型金属零件时,多采用树脂或低熔点材料包覆的金属粉末作为原材料^[8],通过激光扫描使树脂熔化将金属粉末固结在一起,在成型后经过脱脂、浸渗低熔点金属(如青铜等)来提高致密度。SLS 技术成型金属零件工序复杂且零件强度与精度多数情况下仍达不到要求。而选区激光熔化(Selective Laser Melting, SLM)技术是一种极具创新的快速成型技术,能一步加工出具有冶金结合,相对密度接近 100%,具有复杂结构、高的尺寸精度的金属零件^[9]。

金属零件快速制造技术

金属零件快速制造系统可分为 3 类:

(1) 使用激光照射预先铺展好的金属粉末,即金属零件成型完毕后将完全被粉末覆盖。目前这种方法在市场上、各科研院所采用最多,包括选择性激光烧结(SLS)、直接金属激光烧结成型(Direct Metal Laser Sintering, DMLS)^[10]、选区激光熔化^[11]、Laser Cusing^[12]等。

(2) 使用激光照射喷嘴输送的粉末流,激光与输送粉末同时工作,也称为激光净成型(Laser Engineered Net Shaping, LENS)^[13]。该方法目前在国内使用比较多,如西北工业大学^[14]研究的激光立体成型、北京航空航天大学^[15]采用此方法成型大型钛合金件。

(3) 采用电子束熔化(Electron Beam Melting, EBМ)预先铺展好的金属粉末。此方法与第1类原理相似,只是采用热源不同,分别为高功率激光和电子束。在瑞典已出现商品化EBM设备^[16],国内清华大学^[17]进行了前期的设备开发与工艺研究。

因目前市场上RM设备型号繁多,本课题主要对第一类成型系统进行总结,即主要包括SLM/DMLS和SLS技术。电子束熔化成型技术在原理与成型过程中与上述2种技术类似,也进行了部分说明。

1 SLM/DMLS 技术

SLM/DMLS成型过程原理与SLS基本相同。DMLS技术使用材料多为不同金属组成的混合物,各成分在烧结过程中相互补偿,有利于保证制作精度。为了保证金属粉末材料的快速熔化,SLM技术需要高功率密度激光器,光斑聚焦到几十 μm 到几百 μm 。SLM技术目前最常使用光束模式优良的光纤激光器的激光功率在50W以上,功率密度达 $5 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ 以上。国外研究人员总结发现,影响SLM成型效果的影响因素达到130多个,而其中13个因素具有决定作用^[18]。根据自身经验将影响SLM成型质量的因素

分为六大类,包括:材料(成分形貌、粒度分布、流动性、物性等),激光与光路系统(激光模式、波长、功率、光斑直径),扫描特征(扫描速度、扫描方法、层厚、扫描线间距等),外界环境(氧含量、湿度),几何特性(支撑添加、几何特征、空间摆放等),机械因素(粉末铺展平整性、成型缸运动精度、铺粉机构的稳定性等)。考查SLM成型件的指标,主要为致密度、精度、表面粗糙度、零件内部残余应力、强度与硬度6个,其他特殊应用的零件需根据行业要求进行相关指标检测。SLM成型过程的主要缺陷有球化、翘曲变形、裂纹。目前SLM技术所面临的最大挑战为:成型效率、可重复性、可靠性(设备稳定性),这也是RM行业所面临的最大挑战。

2 选择性激光烧结成型(SLS)

SLS技术分为直接制作金属零件和间接制作金属零件2种。直接制作金属零件采用至少2种以上熔点的金属粉末,通过熔化低熔点成分润湿并填充高熔点结构金属粉末颗粒间隙,将结构材料粘结起来烧制成金属零件的方法。SLS直接制作金属件还可以通过激光熔化金属粉末颗粒的外层,而粉末颗粒的内部并没有熔化的方式,将粉末颗粒通过外层烧结粘结在一起。SLS间接制作金属零件是采用高分子聚合物材料包裹高熔点的金属粉末,激光熔化聚合物材料以将金属粉末粘结起来获得原型件的方式,然后经过焙烧、熔浸低熔点金属液、热等静压等后处理工序提高制件的密度。SLS两种成型金属零件的方法由于都是使用低熔点粉末粘结高熔点粉末,使得SLS制件的力学性能差,特别是延伸率很低,很少能够直接应用于功能零件的制造上。SLS技术的关键是新型材料的研制,适用于SLS技术的材料范围广泛,该技术本身生产效率高,成型过程易于控制。

3 电子束熔化成型技术(EBM)

EBM与SLM/DMLS系统的差别主要是热源不同,成型原理基本相似。EBM技术成型室必须为高真空,才能保证设备正常工作,这使得EBM技术整机复杂度提高^[16]。因使用电子束作为热源,金属材料对其几乎没有反射,多以能量吸收率大幅提高。在真空环境下,材料熔化后的润湿性也大大提高,增加了熔池之间、层与层之间的冶金结合强度。但是,EBM技术成型还存在如下问题:(1)在真空室抽气过程中粉末容易被气流带走,造成系统污染;(2)在电子束作用下,粉末容易溃散。因此,EBM技术需要将系统预热到 $> 800^\circ\text{C}$,使得粉末在成型室内预先烧结固化在一起。优点是EBM成型过程效率高,零件变形小,成型过程不需要金属支撑,微观组织致密等。缺点是高预热温度对系统整体结构提出非常高的要求,加工结束后零件需要在真空成型室中冷却相当长一段时间,降低了零件的生产效率。

商品化RM设备及性能

世界范围内,已经有多家成熟的RM设备制造商,包括德国EOS公司(EOSING M270, DMLS技术)^[19]、德国MCP公司(Realizer系列, SLM技术)^[20]、Concept laser公司(M Cusing系列, laser Cusing技术)^[12]。瑞典Acram公司的EBM^[16]设备也占有重要地位。目前,近年来几乎所有的SLM/DMLS设备都采用光纤激光器,因为光纤激光器几乎免维护、光束质量优良、光电转化效率高等优点使其应用于RM优势很明显。随着光纤激光器的发展,使用的光纤激光器的功率有逐渐加大的倾向,从初始的50W到目前的主流200W。值得注意的是,concept laser公司的laser Cusing技术并没有采用振镜扫描,而使用非主流的x/y轴数控系统,通过伺服电机带动激光头根据零件的轮廓轨迹在x/y方向运动,所以其成型

零件范围可以不受振镜扫描范围的限制,其所成型零件效率与尺寸精度可达到 SLM/DMLS 技术同一水平。

1 各公司商品化设备系列

表 1 为各公司 RM 设备及对应的能量源、成型尺寸参数。大部分生产商将设备进行系列化生产,配置不同的能量源与成型零件尺寸以满足不同客户的需求。SLM/DMLS 技术要求粉末完全熔化,激光功率密度要求高。商品化的 RM 设备几乎全部采用光纤激光器, MCP 公司与 EOS 公司已经研发 400W 的光纤激光器应用以提高成型效率。

2 各公司对应设备成型制造性能

表 2 是各 RM 系统使用的典型材料、层厚及成型件的主要性能指

标。各设备制造商选用的材料种类相似,主要包括不锈钢、钛合金、工具钢、钴铬合金等,其中 EOS 公司成型所用材料主要为自主研发。各 RM 设备的层厚一般设定在 50 μm 左右。层厚太薄,虽然能够提高成型的质量,但降低加工效率,而当层厚加大,将使成型质量变差。比较各生产商的 RM 设备成型件的质量发现,在致密度、尺寸精度与表面粗糙度等方面, EOS、MCP 与 Concept laser 公司达到同一水平,而 Arcam 公司 EBM 成型在尺寸精度与表面粗糙度上相对差一些,主要是因为电子束聚焦光斑比较大而造成。

3 应用举例

目前 SLM/DMLS 快速成型系统

主要应用在航空航天、汽车、医学个性化件制造、小型注塑模具及镶件等领域,还针对小批量、个性化的一些复杂件进行加工。使用 RM 设备最多的还是一些研究机构与军工单位。RM 技术的最大优势是其在几何形状上几乎无限制。SLM/DMLS 就如同激光加工行业兴起之初,设备生产商对激光技术应用于哪一行业还没有完全摸清,只能一步步的从传统加工行业中挖掘潜在的应用。同样 RM 技术需要行内专业人士寻找潜在的应用。

国外研究方向与进展

国外针对 RM 研究包括以下几个方面:基础的理论研究^[21]、成型工艺研究^[22-25]、应用研究^[26]、成型新材料探索研究^[27-29]等。此外,还包括新的应用领域探索,如功能梯度材料零件的直接制造^[30]。

最新研究表明, SLM/DMLS 成型特定的几种材料能够达到近乎 100% 的致密度^[18]。成型材料包括 316L 不锈钢、钛和钛合金、工具钢、钴铬合金、铜合金、铝合金等。针对 RM 成型零件致密度的研究是此领域内的一个核心问题,首先要求致密度达到近乎 100%,至少达到与铸造件相当的力学性能。另外,致密度根据需求可以自由控制,达到可控致密度或梯度致密度。EOS 公司与 Arcam 公司使用的扫描策略便是建立在此理论基础之上,零件最外几层采用低速扫描,而内部采用高速扫描,大大节省了加工时间。为提高零件致密度,研究人员采用的研究方法包括工艺参数搜索^[25]、使用特殊的扫描策略^[30-32]、表面重熔和改变材料的物理特性^[28]等方法。另外,扫描成型过程中熔池飞溅、球化和粘粉等因素导致 SLM/DMLS 表面粗糙度较高,是限制该技术广泛应用的一个重要因素。虽然 RM 设备厂家通过后处理的方法可以大大提高表面质量,但针对一

表1 市场上RM设备总结^[12,16,19-20]

| 制造商 | 工艺名称 | 设备名称 | 能量源 | 成型件范围/mm |
|---------------|--------------|--------------|---------------------|-------------------|
| EOS | DMLS | EOSING M270 | 200W fiber laser | 250 × 250 × 215 |
| MCP | SLM | Realizer 100 | 50W fiber laser | φ 100 × 100 |
| | | Realizer 150 | 100W fiber laser | φ 150 × 100 |
| | | Realizer 250 | 200W fiber laser | φ 250 × 250 × 240 |
| Concept laser | Laser Cusing | M1 Cusing | 50W fiber laser | 120 × 120 × 120 |
| | | M2 Cusing | 200W fiber laser | 250 × 250 × 280 |
| | | M3 Cusing | 200W fiber laser | 300 × 350 × 300 |
| Arcam | EBM | EMB12 | 3500W electron beam | 250 × 250 × 180 |
| | | A2 | 5000W electron beam | 250 × 250 × 400 |

表2 各RM设备对应的材料、加工层厚、成型件性能指标^[12,16,19-20]

| 设备名称 | 典型材料 | 层厚 / μm | 聚焦光斑直径 / μm | 致密度 / % | 尺寸精度 / μm | 表面粗糙度 R_a / μm | 最小壁厚 / mm |
|--------------|---------------|---------|-------------|---------|-----------|------------------|-----------|
| EOSING M270 | 铁基合金、铜合金等 | 20~100 | 100~500 | 近乎 100 | 20~80 | 15~40 | 0.3~0.4 |
| Realizer 100 | 不锈钢、钛合金、钴铬合金等 | 20~50 | 30~50 | 近乎 100 | 20~50 | 5~15 | 0.2~0.3 |
| Realizer 150 | | 20~50 | 50~100 | | 20~80 | 10~15 | 0.2~0.3 |
| Realizer 250 | | 20~100 | 70~200 | | 20~100 | 10~15 | 0.3~0.4 |
| M1 Cusing | 不锈钢、钛合金、钴铬合金等 | 20~50 | 30~50 | 近乎 100 | 20~50 | 5~10 | 0.2~0.3 |
| M2 Cusing | | 20~50 | 50~200 | | 20~80 | 10~15 | 0.3~0.4 |
| M3 Cusing | | 20~50 | 70~300 | | 20~100 | 10~15 | 0.3~0.4 |
| EMB12 | 钛合金 | 50~200 | 300~500 | 近乎 100 | 200~400 | > 35 | > 0.4 |
| A2 | | 50~200 | 300~500 | | 200~400 | > 35 | > 0.4 |

些内腔表面复杂,或者部分精细零件,后处理将可能导致成型件损坏。SLM/DMLS 成型过程中有一些缺陷是其本身固有的,如残余热应力的存在和成型面朝下时容易发生塌陷、粘渣等缺陷。对于残余热应力,国外已经基本解决,主要是通过特殊的扫描方法,促使成型过程中热量分布均匀,或者通过后续的热处理消除热应力。虽然 SLM/DMLS 技术宣称可以加工任意复杂的金属零件,对几何形状没有限制,但作者在实际成型过程中发现:一些薄壁、平行于 Z 轴方向的圆孔、方孔容易产生薄壁损坏、Z 轴孔隙塌陷等缺陷。SLM/DMLS 技术对于一些精细结构(如 $< 0.3\text{mm}$ 的孔)成型难度也较大。

RM 另一个重要课题是对如何提高成型效率的研究。相对于传统的模具制造方法, RM 技术虽然大大缩短了产品研发周期,可以直接制造功能零件或者注塑模具,但因 RM 的加工层厚薄,即使小体积单个零件也可能需要加工几个小时,而体积大的单个零件更需要 20~30h,甚至几天时间,长时间的加工对 RM 设备的可靠性提出了非常严格的要求。而如果采用 RM 技术进行批量生产零件,提高生产效率显得非常重要。国外已经针对此课题进行了初步研究,主要思路是灵活改变激光功率、扫描速度与改变加工层厚,也可以根据零件的使用要求采用特殊的扫描策略等。具体方法如下:(1)在加工件致密度下降不大的情况下,适当的提高扫描速度和加工层厚,相应的提高激光功率值。(2)采用外轮廓低速扫描,内部实体高速扫描的方式,也能够大大提高生产效率。

国内研究现状

国内目前在 RM 方面开展研究的单位主要包括西北工业大学(激光净成型技术)^[14]、北京航空航天大学(激光堆积成型技术)^[15]、清华大学

(EBM 技术)^[17]、华南理工大学(SLM 技术)^[6]、华中科技大学(SLS/SLM 技术)^[7]。国内在 RM 方面起步晚,落后于欧洲国家 6~8 年,且研究的方向也较为单一,主要还是集中在工艺、理论与设备的基础研究。目前国内还没有商品化的 RM 快速成型设备,研究费用大多来源于国家攻关项目资助、各级政府部门的资助。

2007 年华南理工大学在 DiMetal-240^[33] 基础上,与广州瑞通激光科技有限公司合作开发了第二套 SLM 制造设备样机 DiMetal-280,新系统的特点包括以下 6 方面^[34]。

(1)为满足直接成型高精度全致密金属零件需要,采用了具有高光束质量($M2 \leq 1.1$)、短波长(1075nm)、高稳定性、低维修成本的 200W 光纤激光器。

(2)配备高速高精度的振镜扫描系统及德国进口 f- θ 透镜。扫描振镜分辨率可达 $12\mu\text{rad}$,重复精度可达 $40\mu\text{rad}$,最高定位速度 $> 7\text{m/s}$ 。激光束通过 f- θ 透镜可在工作平面上任一点获得功率分布均匀直径为

$30\sim 50\mu\text{m}$ 聚焦光斑。

(3)系统采用高精度六轴伺服电机控制实现粉末的精确铺设。成型缸及铺粉缸的升降精度可达 $\pm 10\mu\text{m}$ 。还专门针对金属零件快速制造工艺的特点,设计了独特的铺粉刮板,该铺粉刮板能自动维护成型过程稳定进行。

(4)针对金属粉末在熔化过程中的氧化,采用整体和局部惰性气体保护,并安装了烟气过滤装置,保护气体包括氩气和氮气,成型过程中成型室内含氧量控制在 0.1% 以下。

(5)所用软件包括激光成型过程控制软件、SLM 扫描路径生成与优化软件、Magics13.0 数据处理软件等,其中激光成型过程控制软件及 SLM 扫描路径生成与优化软件都是自主研发,可以针对金属零件成型的工艺特点获得最优的激光参数、铺粉参数以及扫描路径。

(6)设备直接成型高致密且具有较高成型精度的金属零件,仅需简单喷砂或抛光后处理即可投入使用。成型零件相对密度 $\geq 97\%$,尺寸精度

表3 Dimetal-280 SLM设备技术指标与国外同类设备的对比数据^[19-21]

| 对比条目 | EOSINT M270 | Realizer 150 | 华南理工大学 Dimetal-280 |
|--|-----------------------|---------------------------|-----------------------|
| 成型速度 / ($\text{cm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$) | 2~20 | 5 | 2~10 |
| 成型厚度 / μm | 20~100 | 20~50 | 20~50 |
| 激光 | Yb 光纤激光 200W | Yb 光纤激光 100W | Yb 光纤激光 200W |
| 光学系统 | F-theta 聚焦镜 高速扫描振镜 | F-theta 聚焦镜 高速扫描振镜 | F-theta 聚焦镜 高速扫描振镜 |
| 扫描速度 / ($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$) | 典型为 750 | 典型为 250 | 典型为 200~600 |
| 聚焦光斑直径 / μm | 70~200 | 50~100 | 50~200 |
| 致密度测量 / % | 近乎 100 | 近乎 100 | 90~99 |
| 材料 | 自行研制的铁基合金、钛合金、铜合金等 | 商品化的钛合金、Co-Cr 合金、工具钢、不锈钢等 | 不锈钢、钛合金与工具钢等 |
| 尺寸精度 / μm | 20~80 | 20~80 | 20~100 |
| 表面粗糙度 (无后处理) / μm | 10~15 | 10~15 | 20~30 |

± 0.1mm/100mm。

当前 Dimetal-280 设备样机性能指标基本接近国外商品化样机水准,表 3 是该设备的技术指标与国外同类设备的对比数据。

从表 3 可以看出,目前 Dimetal-280 在某些性能方面已经可以与国外同类产品相比较,比如成型件的精度与致密度等。因国外 RM 设备成型室内环境控制比较好,在材料成分控制方面也相当严格,整机的系统稳

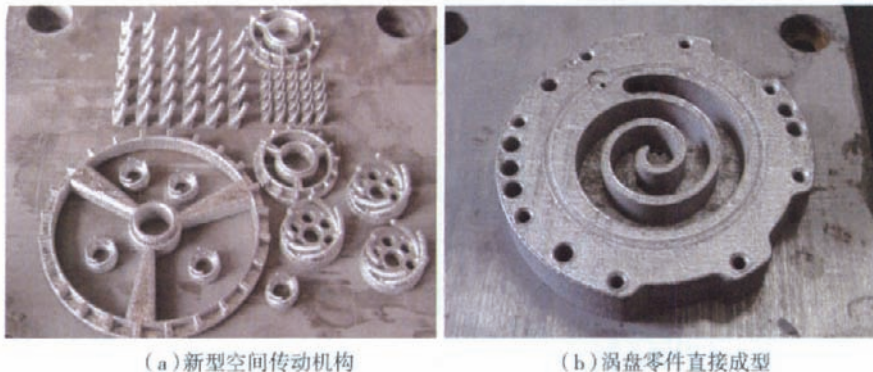


图1 华南理工大学Dimetal-280 设备成型典型样件

定性优良,这也是下一步努力的目标。SLM 设备所需要的关键部件包括光纤激光器、F-theta 聚焦镜、高速扫描振镜等是进口。Dimetal-280 设备先后成功成型了各种复杂形状的金属零件,如图 1 所示,这些零件具有 ≥ 97% 的致密度,力学性能接近铸锻水平,仅需简单的喷砂后处理后即可投入使用。

图 2 为 SLM 成型 316L 不锈钢零件的微观组织。对 SLM 成型 316L 不锈钢试件进行拉伸性能测



图2 Dimetal-280成型316L不锈钢件微观组织

试表明^[35],拉伸强度 > 600MPa,延伸率 > 15%,试件显微硬度值为 HV 250~275。显微硬度测试压力为 3N,压力施加时间为 15s。

SLM 技术应用领域

是否选用 RM 制造,要考虑零件的尺寸(零件的体积)与形状复杂度,而零件的质量要求是最重要的因素。其中零件的体积与形状复杂度直接决定加工成本,而零件的质量要求决

定了 RM 技术是否能够满足实际需求。

(1) 零件尺寸与复杂度: 零件越小且复杂,选用 RM 技术将有更大优势。当零件小而复杂, RM 每次成型可以达到几十甚至几百个,相比传统的机加工将更有优势。RM 制造成本与零件体积大小成正比例关系。

(2) 质量要求: 包括零件的强度、尺寸精度、表面质量等。也许目前 RM 技术遇到的最大问题就是零件质量还不能够完全达到传统加工方法。相比传统方法, RM 技术在尺寸精度、材料可靠性、表面质量等方面还较为逊色。因此,当零件强度与表面质量要求很高时, RM 技术可能不合适。

RM 技术目前主要应用于新概念产品的快速研发中,以缩短加工周期。用于批量产品的加工还很少有报道, EOS 公司报道 DMLS 技术应用用于牙桥牙冠的批量生产工艺较

为成熟,一次成型牙冠可以达到 500 个^[19]。

SLM 在国内推广的难点与下一步工作方向

国外 SLM 设备售价大概在 500~700 万元,这并不包括后续的材料使用费等。国内的科研院所或者企业一般承担不了如此高的成本, SLM 设备需要专业人士操作,操作人员需要对其技术原理深入的了解也是限制设备应用的一个重要因素。SLM 设备维护费用较为昂贵,包括保护气体、从原厂商购买成型材料等。但巨大的市场价值,使得国内很多高校与科研机构开始涉足 SLM 技术的研究。但目前国内 SLM 技术的发展与推广还存在一些问题。主要是该技术系统集成度高,需要综合材料、光学、软件、数控、机械等多门类人才共同研发。设备研发周期长,技术难度大,导致设备昂贵,而应用领域相对还较狭窄。国内配套部件的稳定性还不到国外的水平,目前也还只能制作一些尺寸较小的工件。在配套材料的研发上也缺少成熟的理论支撑。只有研发出高可靠性和高技术指标、具有自主知识产权的 SLM 设备,同时拥有配套的工艺路线,才能在我国较大范围推广这项技术。

华南理工大学激光加工实验室将在 SLM 技术方面不断创新,继续推进 SLM 设备的升级:(1)设计与制造第 3 代 SLM 成型设备,根据市场需求进行设备的系列化研发,使得设备紧凑,更为人性化。(2)努力将 Dimetal 系列设备推向市场。(3)改进设备的机械与控制稳定性,完善相关软件,开发多种材料成熟工艺,并持续寻找 SLM 技术的市场应用。

本文共有参考文献 35 篇,由于篇幅所限未能一一列出,读者如有需要,请向本刊编辑部索取。

(责编 良辰)