

·油气钻采工程·

# 非常规天然气增产改造技术研究进展及其发展方向

任闽燕<sup>1,2</sup>, 姜汉桥<sup>1</sup>, 李爱山<sup>3</sup>, 张濂源<sup>3</sup>, 周元龙<sup>1</sup>, 邢振宇<sup>4</sup>

(1.中国石油大学(北京)石油工程学院,北京 102249; 2.中国石化胜利油田分公司技术发展处,山东 东营 257000; 3.中国石化胜利油田分公司采油工艺研究院,山东 东营 257000; 4.西安石油大学石油工程学院,陕西 西安 710065)

**摘要:**非常规天然气是中国天然气的后备资源,提高非常规天然气的勘探开发效果具有重要的战略意义。增产改造技术是非常规天然气开采的关键技术,由于地质条件的复杂性和特殊性,增产改造技术相对落后,严重制约了中国非常规天然气开发的步伐。通过分析中外非常规天然气的勘探开发现状和增产改造技术研究进展,重点探讨了中国非常规天然气增产改造技术的发展历程:在页岩气增产改造技术方面,目前尚处于现场试验阶段,技术还不完善;煤层气增产改造已进行了一系列的研究与现场试验;致密砂岩气增产改造已经形成了较为完善的技术体系。通过分析中外非常规天然气增产改造技术研究现状与存在问题,提出了非常规天然气室内实验、低伤害压裂液技术、水平井分段压裂技术、深层致密气藏改造技术、煤层区块整体压裂改造排采技术和裂缝监测技术是今后攻关的主要方向。

**关键词:**非常规天然气 致密砂岩气 煤层气 页岩气 增产改造

**中图分类号:**TE37

**文献标识码:**A

**文章编号:**1009-9603(2013)02-0103-05

非常规天然气是中国天然气的后备资源,对其进行高效开发具有重要的战略意义。非常规天然气是指在成藏机理、赋存状态、分布规律或勘探开发方式等方面有别于常规天然气的烃类或非烃类资源,主要指页岩气、煤层气和致密砂岩气等<sup>[1]</sup>。这类资源的勘探开发存在很大难度,需要应用特殊的增产改造技术。经过近几年的研究,在非常规天然气的勘探开发中,已经积累并形成了一系列增产改造技术。其中,在致密砂岩气增产改造技术上已经形成了较为完善的技术体系;在煤层气增产改造技术上已进行了一系列的研究与现场试验;在页岩气增产改造技术方面目前尚处于现场试验阶段,技术尚不完善。为此,笔者重点分析了中外非常规天然气增产改造技术研究现状,提出了非常规天然气增产改造技术开发中面临的问题及下步攻关方向。

## 1 勘探开发现状

中外非常规油气资源丰富,分布广泛,非常规天然气总资源量达 $921.4 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ,是常规天然气的2.1倍。从表1可见,页岩气的资源量为 $456 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ,

相当于煤层气( $256.1 \times 10^{12} \text{ m}^3$ )和致密砂岩气资源量( $209.6 \times 10^{12} \text{ m}^3$ )之和,其中北美、中亚和中国、前苏联的非常规天然气资源量就占了整个世界非常规天然气资源量的58%左右。

中国天然气总资源量为 $108 \times 10^{12} \sim 119 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ,其中,常规天然气总资源量为 $35 \times 10^{12} \sim 43 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ,非常规天然气总资源量为 $73 \times 10^{12} \sim 76 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ,后者

表1 非常规天然气资源量统计  $10^{12} \text{ m}^3$

区域	煤层气	页岩气	致密砂岩气	总量
北美	85.4	108.7	38.8	232.9
拉丁美洲	1.1	59.9	36.6	97.6
西欧	4.4	14.4	10.0	28.8
中欧和东欧	3.3	1.1	2.2	6.7
前苏联	112.0	17.7	25.5	155.2
中东和北非	0	72.1	23.3	95.4
撒哈拉以南非洲	1.1	7.8	22.2	31.0
中亚和中国	34.4	99.8	10.0	144.2
太平洋地区	13.3	65.5	20.0	98.7
其他亚太地区	0	8.9	15.5	24.4
南亚	1.1		5.5	6.7
合计	256.1	456.0	209.6	921.4

收稿日期:2013-01-04。

作者简介:任闽燕,女,高级工程师,博士,从事油气田开发方面的研究。联系电话:13954659069, E-mail: rmy0808@sina.com。

基金项目:国家“973”计划“中国南海相页岩气高效开发的基础研究”(2013CB228000)。

是前者的1.8~2.1倍。页岩气总资源量为 $24.5 \times 10^{12}$  m<sup>3</sup>,占非常规天然气总资源量的33%,开发潜力巨大。

自20世纪60年代以来,相继在松辽、渤海湾、柴达木、吐哈、酒西、江汉、南襄、苏北及四川等盆地发现了规模不等的泥岩裂缝油气藏或重要的油气显示,由于前期对泥页岩中的油气显示不够重视,对页岩气的吸附机理研究较少,未认识到泥页岩可以作为主要天然气储层并具有巨大储集能力,导致针对页岩气的勘探开发较少,勘探开发工作滞后于美国和加拿大等国<sup>[2]</sup>。目前,中国石化于2009年正式启动了页岩气选区评价工作,并进行了5口页岩气井的压裂改造及试气先导试验,分别是华东分公司的方深1井、江汉油田的建111井与河页1井、河南油田的安深1井及川东北的元坝9井,并在页岩气增产改造技术上取得了一些进展。

据中国新一轮煤层气资源评价结果可知,埋深小于2 000 m的煤层气地质资源量为 $36.81 \times 10^{12}$  m<sup>3</sup>,埋深小于1 500 m的煤层气可采资源量为 $10.87 \times 10^{12}$  m<sup>3</sup>,煤层气平均资源丰度为 $0.98 \times 10^8$  m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>。其中鄂尔多斯盆地、沁水盆地、准噶尔盆地、滇东黔西、二连盆地等9个大型含气盆地(群)累积地质资源量为 $30.97 \times 10^{12}$  m<sup>3</sup>,累积可采资源量为 $9.32 \times 10^{12}$  m<sup>3</sup>,分别占中国累积地质资源量和累积可采资源量的84.13%和85.76%,是煤层气资源分布的主体地区。与美国、加拿大、澳大利亚相比,中国煤层气勘探开发总体进展缓慢。但近年来取得了明显进展,截至2009年底,钻探煤层气直井2 800余口,多分支水平井160口,投产1 419口,已形成煤层气年生产能力为 $15 \times 10^8$  m<sup>3</sup>,年产气量约为 $7.5 \times 10^8$  m<sup>3</sup>。

中国自1971年发现川西中坝气田之后,逐步系统地开始了对致密砂岩含气领域的研究。目前,致密砂岩气年产量占中国天然气总年产量的1/5左右,成为天然气产量增长的亮点。中国石化经过30多年的探索和研究,在鄂尔多斯盆地和四川盆地致密砂岩气藏的勘探开发已取得显著成效,堪称中国致密砂岩气藏勘探开发的典范<sup>[3]</sup>。

## 2 增产改造技术研究进展

### 2.1 国外

页岩气的最终采收率依赖于有效的压裂技术,压裂改造效果直接影响着页岩气开发的经济效益。从20世纪80年代开始,美国Barnett页岩气的

开发经历了高能气体压裂、二氧化碳泡沫压裂、交联凝胶压裂、减阻水压裂、水平井压裂、水平井多段清水压裂、水平井同步压裂、重复压裂的技术发展阶段。压裂成败的关键在于能否形成大规模的、相互沟通和稳定的裂缝网络。在压裂工艺方面,主要以水平井多段清水压裂为主。正是这些先进技术的应用,促进了以美国为代表的国外页岩气开发的快速发展<sup>[4]</sup>。

煤层气开发的主导技术主要包括排水降压、定向羽状水平井、裸眼洞穴完井和压裂改造。排水降压技术是有效提高单井煤层气产量的最经济可行的方法之一。美国CDX公司开发的Z形定向羽状水平井钻井系统处于世界领先水平。在压裂增产改造技术方面,主要有二氧化碳泡沫压裂及活性水压裂,两者均具有施工液量小、滤失量小、造缝能力强和对煤层伤害小等特点,在煤层压裂改造后能取得较好的效果<sup>[5]</sup>。

致密砂岩气增产改造技术主要包括大型压裂、分段压裂、水平井压裂、重复压裂及压裂裂缝监测。1985年美国相关技术人员明确提出了压裂改造经济优化的概念<sup>[6]</sup>,2000年以来逐渐采用不动管柱的分段压裂、合层排液技术。20世纪90年代初,分段压裂技术主要采用液体胶塞隔离分段压裂,90年代中后期出现了分段桥塞和水力喷砂分段压裂技术,2005年以来,投球滑套分级分段压裂技术<sup>[7]</sup>日益成熟并大规模推广应用。在重复压裂技术方面,国外不仅对重复压裂机理、油藏数值模拟、压裂材料、压裂设计和施工等方面进行了研究,同时也对重复压裂井裂缝方位发生转向<sup>[8]</sup>进行了研究。在压裂裂缝监测方面,发展了井间微地震等多种裂缝监测技术。在压裂液方面,对减少稠化剂浓度、增加压裂液返排能力开展了很多研究,目前压裂液类型以交联胍胶压裂液、低稠化剂浓度压裂液、滑溜水压裂液、混合水压裂液、清洁压裂液和泡沫压裂液为主。在支撑剂方面,开发了预固化树脂包层砂、纤维防砂支撑剂、热塑膜支撑剂、可变形支撑剂和超低密度支撑剂等一系列新型支撑剂。

### 2.2 中国

#### 2.2.1 页岩气

页岩既是天然气的烃源岩,也是储层和封盖层。页岩作为独立的、“自生自储”的含油气系统,具有源储一体、原位持续聚集、早成藏的特点。页岩气由岩石孔隙与天然裂缝中的游离气和吸附于有机物与矿物表面的吸附气构成。游离气是初期

高产的主要贡献者,吸附气则是中—后期低产、稳产的主要来源。根据北美页岩气发展史和对页岩气成因的分析可知,页岩气来源以干酪根热降解和液态烃热裂解的热成因为主,在特殊条件下可存在生物成因页岩气<sup>[9]</sup>。

中国石化通过5井次的页岩气井压裂改造<sup>[10]</sup>及试气先导试验<sup>[11]</sup>,形成了以滑溜水大型压裂为主导的储层改造技术,并配套了辅助工艺,主要包括:①射孔,优选高杨氏模量、低泊松比、脆性好的层段进行簇式射孔;②压裂液体系,应用低伤害、低成本的减阻水压裂液;③压裂规模,建议采用排量大于10 m<sup>3</sup>/min、总液量大于2 000 m<sup>3</sup>的大规模压裂;④支撑剂,优先选用70/100目和30/60目的小粒径、低密度陶粒作为支撑剂<sup>[12]</sup>;⑤泵注,采用高前置液、多段塞、低砂比的泵注工艺;⑥裂缝监测,首选微破裂影像技术;⑦返排,采用强制裂缝闭合及快速返排技术。

### 2.2.2 煤层气

煤层气增产改造机理与常规油气井的增产改造并无本质的区别,在完井方式和水力压裂技术上充分借鉴了常规油气井的经验,但由于煤层气的赋存状态、储层特征、岩石力学性质不同于常规砂岩储层,使得煤层气裂缝扩展规律及增产机理不同于常规砂岩储层。

煤层气增产改造技术主要包括:①以活性水加砂压裂为主导的增产改造技术。经过室内实验和大量现场压裂生产实践,目前已经形成了以活性水加砂压裂、二氧化碳泡沫压裂、分层压裂、重复压裂等主导的技术,其中活性水加砂压裂技术在中国石化应用较为广泛。形成的配套压裂技术主要有射孔优化、裂缝参数优化、缝高控制、前置段塞、不同粒径组合加砂、变排量施工、套管加砂与大排量携砂技术、压降测试分析及裂缝监测<sup>[13]</sup>。②定向羽状水平井完井增产改造技术。该技术是20世纪90年代中后期在常规水平井和分支井的基础上发展起来的。截至2012年底,中国已钻定向羽状水平井160余口,中国石化在定向羽状水平井完井技术上也进行了一系列的研究与试验<sup>[14]</sup>,并取得了良好效果,定向羽状水平井单井日产气量为直井的3~7倍。

### 2.2.3 致密砂岩气

致密砂岩气藏普遍具有低孔、低渗透和孔隙结构复杂等特点,气、水及少量的油赖以流动的孔道狭窄,导致渗流阻力增大。同时由于液、固界面及

液、气界面的相互作用力增强,使得液相滞留效应和应力敏感性明显增强,并导致油、气、水渗流规律存在差异,而且气体渗流存在严重的滑脱效应和非达西特性,因此低渗透致密砂岩气藏具有复杂的渗流特征。致密砂岩气藏中岩石的渗透率对周围压力变化很敏感,压力的变化可以引起气液渗流孔道的收缩,致使气藏渗透率降低。故气层通常具有较强的压力敏感性,且低渗透气层的高压力敏感性更强。有别于页岩气和煤层气,多数致密砂岩气藏在压裂过程中裂缝起裂和扩展规律与常规砂岩气藏并无本质不同,但由于储层的非均质性,以及地应力和工况条件的变化,导致了水力裂缝扩展规律的复杂性<sup>[15]</sup>。

致密砂岩气藏的压裂改造技术<sup>[16]</sup>主要有:①低伤害压裂,该技术是在低伤害或无伤害压裂材料基础之上发展建立起来的,可有效降低储层伤害,形成与储层特征相匹配的人工裂缝形态及导流能力,从而达到低伤害、深穿透、高导流的目的;②大型加砂压裂,对于致密砂岩气藏,考虑到储层基质的低渗透性,支撑裂缝对气藏内部的渗流机理的改变起着决定性作用;③多层分段压裂,致密砂岩气藏储层纵向上都具有多层系、多砂体叠置的特点,为了保护储层,减少投入,提高经济效益,压裂改造必须沿着一次管柱多层分段压裂的方向发展,从而实现气藏增产和稳产、达到提高气藏开发效益的目的;④水平井分段压裂,对于致密砂岩气藏,水平井与直井一样往往难以获得自然产能,为了经济高效开发,提高单井控制储量,水平井仍需要改造,特别是分段加砂压裂。但由于水平井具有井眼弯曲、暴露的产层段较长等特点,水平井压裂与直井压裂相比难度更大。因此,在数学建模的基础上,研究了水平井完井方式<sup>[17]</sup>、分段压裂裂缝条数、裂缝位置、裂缝长度和导流能力等参数对水平井产能的影响,优选了限流射孔、限流工艺及前置段塞等方法,设计开发了水平井分段压裂的施工管柱和分段压裂工具,配套的压裂方式和施工工艺,提高了水平井开发效果;⑤水力喷射压裂,该技术集射孔、压裂、隔离于一体,主要采用动态封隔法代替常规的机械封隔法,使压裂液沿着井眼流入特定的裂缝中。即运用高压水射流技术,先完成水力喷砂射孔,之后通过2套泵压系统分别向油管 and 环空中泵入流体共同完成压裂;若需要进行分段压裂,则依次对其他目的层重复进行水力喷砂射孔和压裂,整个工艺过程不需要机械封隔装置;⑥泡沫压裂,针对低压气藏、

水敏性强的气藏及常规压裂液中的聚合物残渣会对人工裂缝造成伤害等影响储层改造效果的现状,形成了泡沫压裂液和压裂工艺。泡沫压裂液是由气体和高分子聚合物等形成的不稳定分散泡沫体系,具有携砂能力强、滤失量低、地层增能助排、降粘、防膨和降阻等多种低伤害特性,所以适用于低压、水敏、水锁性强的复杂岩层;⑦重复压裂,该技术采用高砂比压裂形成高导流能力裂缝,采用强制闭合有效地阻止裂缝内支撑剂回流<sup>[18]</sup>,使改造井段达到最大充填,从而延伸了原有的人工裂缝长度,并使新裂缝的方位角和附近地应力发生转向,比初次压裂具有更高的导流能力,达到了提高单井产量和气藏采收率的目的;⑧压裂液高效返排,结合致密砂岩气藏压裂液返排机理和压裂后压裂液返排的影响因素,提出了致密砂岩气藏压裂后高效返排的技术对策,缩短了返排时间,提高了压裂液的返排率,有效降低了压裂液对储层的伤害,保证压裂改造效果。

### 3 技术瓶颈和技术发展方向

#### 3.1 技术瓶颈

**页岩气** 页岩气增产改造技术存在的瓶颈主要包括:尽管国外对泥页岩水平井分段压裂增产改造技术的研究取得了巨大成功,但是对于水平井水平段长度与产量的关系、水平段段数与产量的关系尚认识不清楚;水平井固井完井技术尚不完善;水平井多级数压裂技术需要进一步攻关;压裂材料如滑溜水体系性能需要进一步提高;裂缝监测技术不完善。

**煤层气** 煤层气增产改造技术存在的瓶颈主要包括:对煤层气吸附解析规律认识不清楚;目前主要以单井压裂改造为主,受煤层气成藏机理的影响,排采技术不完善;没有形成区块整体压裂改造排采技术。

**致密砂岩气** 致密砂岩气增产改造技术相对来说比较完善,但仍存在一些阻碍技术发展的瓶颈,主要包括:压裂后裂缝伤害大,有效裂缝支撑时间短;多薄层水力裂缝扩展规律数值模拟分析技术尚不完善;长井段水平井多级分段压裂工艺及产能预测、裂缝参数优化技术有待提高和完善;水平井封隔器分段改造的压裂滑套存在改造级数受限、地层出水滑套不能关闭的问题,严重制约了水平井分段改造级数的加大和水平井压裂后出水风险的控

制;对于地层破裂压力和裂缝延伸压力均较高的深层致密砂岩气藏,裂缝延伸规律的差异性、储层伤害和裂缝伤害等方面制约了压裂后产量的提高。

#### 3.2 技术发展方向

中国非常规天然气增产改造技术无论是在室内实验条件还是技术方面,都与国外存在着较大的差距,今后须进行以下6个方面的攻关。

**非常规天然气室内实验** 目前非常规天然气的室内实验主要针对煤层气和致密砂岩气,而针对页岩气的室内实验尚不完善,因此今后须针对页岩气储层进行室内实验研究,如岩石力学实验、大尺寸裂缝扩展规律物理模拟实验等。

**低伤害压裂液技术** 低伤害压裂是非常规天然气压裂改造的发展方向,而低伤害压裂技术的核心是低伤害压裂液技术<sup>[19]</sup>。对于致密砂岩气藏储层改造,降低稠化剂浓度、压裂液表面张力、储层贾敏效应,防止压裂液对地层造成水锁伤害<sup>[20]</sup>,提高压裂液的防膨率和压裂液快速返排率等是低伤害压裂液技术的发展方向;而进行降阻剂和降阻压裂液的研制,有效降低管串摩阻,实现大排量施工是非常规气藏压裂液技术的攻关方向。

**水平井分段压裂技术** 非常规天然气水平井压裂技术的发展方向是:加大分段改造级数和改造规模,实现体积改造,增大泄气的面积和体积,从而增加单井产量。其发展趋势主要包括2个方面:①水平井分段压裂理论研究,如分段段长优化、裂缝参数优化和产能预测等;②水平井分段技术,如裸眼封隔器分段压裂、套管封隔器压裂、可钻桥塞分段压裂、连续油管带底封分段压裂、分段限流压裂及井下分段工具的国产化等。不限级数压裂滑套的研发及连续油管带底封拖动喷射压裂工具国产化为下步攻关方向。在“十二五”期间,中国石化水平井分段压裂技术要求达到水平井段长度为2 000 m、压裂层段达20段、加砂规模达1 000 m<sup>3</sup>的水平,水平井完井和改造投资占钻井成本的50%以上。

**深层致密砂岩气藏改造技术** 深层致密砂岩气藏具有埋藏深、温度高、压力高、岩石致密和地质特征复杂等特点,因此,在施工过程中,地层破裂压力和水力裂缝延伸压力较高,导致缝宽较窄和近井多裂缝,加上压裂液滤失严重等,导致储层改造难度较大。中国石化川西深层致密砂岩气藏压裂改造正积极攻关,以寻求技术突破。

**煤层气区块整体压裂改造排采技术** 目前煤层气压裂主要以单井压裂改造为主,但是受煤层气

成藏机理的影响,煤层气排采技术尚不完善,没有形成区块整体压裂改造排采技术,需要加快技术研发。

裂缝监测技术 压裂裂缝监测是评价压裂改造效果的重要手段,是优化压裂工艺和设计的重要途径。裂缝监测技术的关键是地层压裂破裂信号的采集和数据处理,如何获得真实的地层破裂信号和精确的数据解释是裂缝监测技术的发展方向,特别是采集信号的硬件设备和数据解释的软件系统的国产化也是重点发展方向。

## 4 结束语

随着世界对天然气资源需求的不断增加和常规天然气储量的日益减少,很多国家将非常规天然气作为重要的后备资源,一些国家已进行了大规模的勘探开发,并获得了可观的经济效益和社会效益。中国非常规天然气资源分布广,资源量丰富,潜力很大,对其进行有效地勘探开发是实现油气生产可持续发展的重点领域和方向之一。“十二五”期间非常规天然气勘探开发技术是科技工作部署的重点之一,增产改造技术是实现非常规天然气资源有效开发的重要手段。在初步探讨了中外在非常规天然气勘探开发中积累并形成的一系列增产改造技术的基础上,分析了严重制约非常规天然气开发的技术瓶颈,提出了技术改进的发展方向。通过进一步的技术攻关,可逐步推动该技术的进展并实现突破,从而形成较为完善的技术体系。

### 参考文献:

- [1] 刘成林,范柏江,葛岩,等.中国非常规天然气资源前景[J].油气地质与采收率,2009,16(5):26-29.
- [2] 孙海,姚军,孙致学,等.页岩气数值模拟技术进展及展望[J].油气地质与采收率,2012,19(1):46-49.

- [3] 徐梦雅,廖新维,何逸凡,等.完井方式对致密气藏压裂水平井产能的影响[J].油气地质与采收率,2012,19(2):67-71.
- [4] 胡文瑞.开发非常规天然气是利用低碳资源的现实最佳选择[J].天然气工业,2010,30(9):1-8.
- [5] 潘继平,王楠,韩志强,等.中国非常规天然气资源勘探开发与政策思考[J].国际石油经济,2011,19(6):19-25.
- [6] 何艳青.非常规天然气开采技术[J].国际石油经济,2010,18(3):9-10.
- [7] 郑辉锋.大牛地气田DP35-1水平井分段压裂技术[J].油气地质与采收率,2008,15(4):100-101,104.
- [8] 李宪文,樊凤玲,赵文,等.转向压裂工艺在长庆油田的适应性分析[J].油气地质与采收率,2010,17(5):102-104.
- [9] 胡文瑞.中国非常规天然气资源开发与利用[J].大庆石油学院学报,2010,34(5):9-16.
- [10] 孙海成,汤达祯,蒋廷学,等.页岩气储层压裂改造技术[J].油气地质与采收率,2011,18(4):90-93,97.
- [11] 陈会年,张卫东,谢麟元,等.世界非常规天然气的储量及开发现状[J].断块油气田,2010,17(4):439-442.
- [12] 温庆志,翟恒立,罗明良,等.页岩气藏压裂支撑剂沉降及运移规律实验研究[J].油气地质与采收率,2012,19(6):104-107.
- [13] 魏国齐,焦贵浩,张福东,等.中国天然气勘探发展战略问题探讨[J].天然气工业,2009,29(9):5-8.
- [14] 雷群,王红岩,赵群,等.国内外非常规油气资源勘探开发现状及建议[J].天然气工业,2008,28(12):7-10.
- [15] 宁宁,王红岩,雍洪,等.中国非常规天然气资源基础与开发技术[J].天然气工业,2009,29(9):9-12.
- [16] 邱玲,刘林,李永明,等.提高低压力藏改造效果的关键技术——以川西LD气田为例[J].油气地质与采收率,2011,18(4):98-101.
- [17] 史雪枝,陈琛,杨永华.川西及川东北气田完井技术应用现状及展望[J].油气地质与采收率,2011,18(3):103-105.
- [18] 潘继平,胡建武,安海忠.促进中国非常规天然气资源开发的政策思考[J].天然气工业,2011,31(9):1-7.
- [19] 姚凤英.低渗透储层压裂液伤害核磁共振评价方法[J].油气地质与采收率,2011,18(2):102-104.
- [20] 姚广聚,彭红利,雷炜,等.低渗透气藏低压低产气井解水锁技术研究及应用[J].油气地质与采收率,2011,18(5):97-99.

编辑 常迎梅

欢迎广大科技人员踊跃投稿