

孔底动力回转空气潜孔锤研究进展

岳永东, 谭春亮, 渠洪杰, 冉灵杰, 林广利

(北京探矿工程研究所, 北京 100083)

摘要:孔底动力回转空气潜孔锤钻进技术在改善气体钻进条件下钻杆柱受力情况、提高定向钻进施工效率等方面具有广阔的应用前景。孔底动力回转空气潜孔锤可分为自回转式空气潜孔锤及气动螺杆驱动式空气潜孔锤两类, 本文分别介绍了其发展现状、工作原理、技术特点、试验应用等情况, 并分析了当前研究存在的不足, 以期为进一步开展技术攻关提供参考。

关键词:空气潜孔锤; 气动螺杆; 孔底动力; 定向钻进

中图分类号: P634.3; TE924 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2023)S1-0032-06

Research progress of downhole power rotary pneumatic DTH hammer

YUE Yongdong, TAN Chunliang, QU Hongjie, RAN Lingjie, LIN Guangli

(Beijing Institute of Exploration Engineering, Beijing 100083, China)

Abstract: The downhole power rotary pneumatic DTH hammer drilling technology has broad application prospects in improving the force situation of the drill pipe string under the condition of gas drilling and improving the efficiency of directional drilling. Two types of downhole power rotary pneumatic DTH hammers exist namely the pneumatic DTH hammer with self-rotation bit and the pneumatic DTH hammer driven by screw motor. This paper introduces their development status, working principles, technical characteristics, experimental applications, and analyzes the shortcomings of current research in hope to provide reference for further technical research.

Key words: pneumatic DTH hammer; Pneumatic screw motor; downhole power; directional drilling

0 引言

空气潜孔锤钻进工艺以冲击回转方式碎岩, 有利于岩石产生体积破碎, 提高机械钻速, 尤其适用于硬岩、卵砾石层、破碎地层等, 此外还具有适合缺水地区施工、绿色环保、可保护有益储层等优点, 是提高钻探施工效率、降低施工成本的最佳方法之一^[1-2]。

然而, 常规空气潜孔锤钻进时需要由钻杆驱动其旋转, 这在应用过程中存在一定的限制, 具体表现在: (1) 钻杆柱受力情况恶劣。气体钻进条件下, 由于缺少泥浆的润滑与粘滞阻尼, 钻杆旋转过程中

与井壁的偏磨更加剧烈, 会大幅降低钻杆的疲劳寿命; (2) 不适用于定向钻进。常规空气潜孔锤钻进若想实现井眼轨迹调整, 只能通过调整钻具组合中扶正器或稳定器的位置或者采用带斜面的钻头来进行造斜, 这对钻机回转能力提出更高要求, 且进一步加剧钻杆柱偏磨, 同时也无法实现钻孔轨迹的精确控制。

为改善钻杆柱受力情况, 更为重要的是拓展空气潜孔锤钻探工艺在定向钻进中的应用, 近年来, 国内外研究人员开始探索孔底动力回转空气潜孔锤钻进技术, 其在硬岩、强研磨性地层定向钻进施

收稿日期: 2023-05-31; 修回日期: 2023-08-15 DOI: 10.12143/j.ztgc.2023.S1.005

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目“地质矿产勘查钻探技术升级与应用示范”(编号: DD20230036); 北京探矿工程研究所科研项目“自回转式空气潜孔锤的研制”

第一作者: 岳永东, 男, 汉族, 1990年生, 工程师, 硕士, 探矿工程专业, 从事浅层钻探技术及装备的研发与应用, 北京市海淀区学院路29号探工楼, 442710173@qq.com。

引用格式: 岳永东, 谭春亮, 渠洪杰, 等. 孔底动力回转空气潜孔锤研究进展[J]. 钻探工程, 2023, 50(S1): 32-37.

YUE Yongdong, TAN Chunliang, QU Hongjie, et al. Research progress of downhole power rotary pneumatic DTH hammer[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(S1): 32-37.

工及“三低”油气藏勘探开发中,被认为具有广阔的应用前景^[3-4]。

孔底动力回转空气潜孔锤钻进技术研发所采用的技术路线可分为自回转式空气潜孔锤及气动螺杆驱动式空气潜孔锤两类,目前总体仍处于理论与样机研制阶段,仅在国外开展过少量现场试验。本文综述了国内外两类孔底动力回转空气潜孔锤的研究进展,从工作原理、技术特点、试验应用情况等方面进行介绍,以期为进一步开展技术攻关提供参考。

1 自回转式空气潜孔锤研究进展

现有自回转式空气潜孔锤的结构方案形式多样,但其原理普遍为在锤体内部增加回转装置,利用活塞的线性往复运动驱动钻头旋转,避免钻头重复

冲击同一位置形成凹槽从而导致钻头齿损坏,破岩仍以冲击为主,钻头回转为间歇运动。

1.1 国外研究进展

1992年起,Smith公司开始研究可控冲击空气钻井系统(SPADS),提出一种具有自旋转功能的空气锤,其转动机构包括一个外表面具有螺旋槽的活塞,以及单向转动的楔块式超越离合器。活塞的螺旋槽通过啮合球和离合器内圈相连,离合器的外圈固定在外管上,活塞往复运动过程中,由于螺旋运动副的关系,活塞与离合器内圈必有一个转动。活塞回程时,离合器内圈转动;活塞冲程时,离合器锁紧旋转面从而迫使活塞旋转,同时活塞和钻头相互锁定,从而将转动传递到钻头。其主要技术参数见表1。

表1 SPADS系统自回转式空气锤主要技术参数

钻头外径/mm	空气锤外径/mm	输出扭矩/Nm	冲击频率/Hz	转速/(r·min ⁻¹)	空气锤长度/m
200~222.25	171.45~174.625	1355.8	20~25	20~30	1.52~2.13

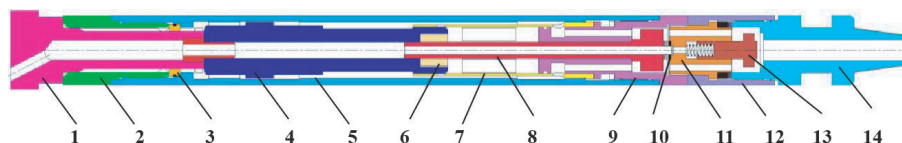
1994年起 SPADS 系统开展了数次实钻试验,最大进尺 33.5 m,最高机械钻速 27.4 m/h,可以获得较为理想的造斜率。与此同时也发现 SPADS 系统对钻压非常敏感,超过最佳钻压后回转扭矩显著增大,活塞冲击功减小,直至钻头卡死而导致活塞冲击失效,为此又进一步研制了扭矩监测及持续钻压短节,以保证相对持续稳定的钻压加载^[5]。

1.2 国内研究进展

2007年起,吉林大学在国内最早开始自回转式空气潜孔锤的研究,目前已完成多种结构方案设计,根据回转机构的安装位置,可分为后驱型与前驱型两类,其中前驱型首次实现了适用于反循环钻进的

自回转式空气潜孔锤设计。

后驱型自回转式空气潜孔锤的回转装置借鉴了凿岩机转钎机构,结构如图1所示^[6-7],采用螺旋棒+螺旋母配合棘轮棘爪单向离合器的方案。棘轮与配气座设计为一体,配气座与潜孔锤外管螺纹连接,螺旋棒的一端是棘爪座,其上的棘爪与棘轮配合,另一端铣有螺旋齿,与活塞中的螺旋母配合。活塞回程时,活塞的直线运动带动螺旋棒转动,此时棘爪逆齿,带动棘轮转动,进而通过配气座将回转传递到潜孔锤外管,从而带动钻头回转;活塞冲程时,棘爪顺齿,螺旋棒空转,钻头不回转。



1—钻头;2—前接头;3—钎头卡环;4—活塞;5—外管;6—螺旋母;7—内缸;8—螺旋棒;9—配气座;10—推力球轴承;11—回转隔离接头;12—连接套;13—逆止阀;14—后接头

图1 吉林大学后驱型自回转式空气潜孔锤结构示意图

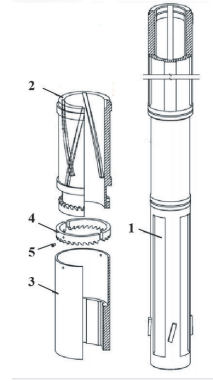
前驱型自回转式空气潜孔锤其回转装置采用带键活塞+螺旋衬套配合牙嵌式单向离合器的结构方

案,结构如图2所示^[8]。活塞回程时,其斜键推动螺旋衬套向上移动至螺旋衬套下端楔形齿与花键套上

齿圈啮合,之后带键活塞继续上行,其斜键带动螺旋衬套转动,花键套与钻头钎尾始终保持配合,经花键套将转动传递至钻头;活塞冲程时,其斜键带动螺旋衬套与花键套脱开,钻头不回转。

目前前驱型自回转式空气潜孔锤已完成了反循环潜孔锤样机加工,并开展了室内试验,验证了方案的可行性,后驱型自回转式空气潜孔锤尚未完成室内试验。

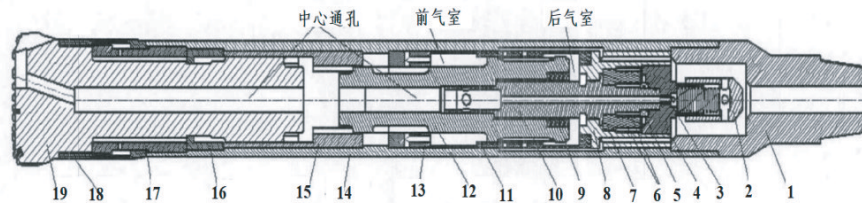
2011年,中石油川庆钻探公司与西南石油大学联合设计了采用螺旋棒+螺旋母配合楔块式超越离合器的自回转式空气潜孔锤,其结构如图3所示^[9]。活塞回程时,离合器处于逆齿状态,螺旋棒被锁死,带螺旋母的活塞沿螺旋线方向转动一定角度,活塞端部与钻头钎尾始终位于传动套内,进而通过传动



1—带键活塞;2—螺旋衬套;3—传动花键套;4—花键套上齿圈;5—销钉

图2 吉林大学前驱型自回转式空气潜孔锤回转装置结构

套将转动传递到钻头上。该方案完成了样机加工及试验,验证了实现钻头自回转功能的可行性。

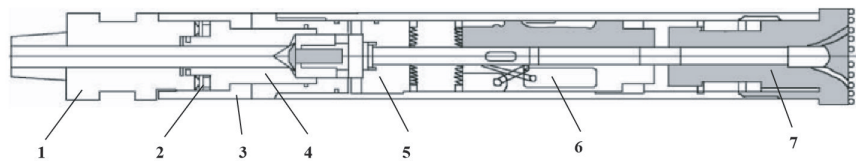


1—上接头;2—逆止阀;3—节流塞;4—配气座盖;5—止推轴承;6—键;7—楔块式超越离合器;8—配气座;9—螺旋母;10—螺旋棒;11—内缸;12—导向套;13—活塞;14—外缸;15—传动套;16—钎头卡环;17—下接头;18—防掉接头;19—钎头

图3 中石油自回转式空气潜孔锤结构

2011年,中石化西南石油局与西南石油大学联合提出一种冲击齿型自回转式空气潜孔锤方案,结构如图4所示^[10]。其原理是在活塞上端与配气座下端均圆周布置有锯齿,当活塞回程运行到接近上死

点,活塞上端锯齿冲击配气座下端锯齿,使配气座产生很大的周向力,配气座的转动经回转轴传递到潜孔锤外管,进而带动钻头转动一定角度。



1—上接头;2—止推轴承;3—回转隔离接头;4—回转轴;5—配气座;6—活塞;7—钻头

图4 中石化自回转式空气潜孔锤结构

1.3 自回转式空气潜孔锤方案对比

对比国内外自回转式空气潜孔锤研究现状,可以发现各方案具体的区别体现在回转机构类型、活塞回转作用位置、钻头回转传动方式及单向离合器类型等方面(表2)。

1.3.1 回转机构类型

回转机构类型包括螺旋运动副及锯齿状冲击自转机构。典型的螺旋运动副如图5所示,结构可靠,转速可控,但其缺点是运动副之间的摩擦力会影响活塞运动速度,降低活塞冲击性能,也易在高频往复

表2 自回转式空气潜孔锤对比

型号	回转机构	回转作用位置	传动方式	单向离合器类型	研究进展
SPADS	螺旋槽+啮合球	活塞冲程	内传动	楔块式单向离合器	已有样机,已开展实钻试验
吉林大学后驱型	螺旋棒+螺旋母	活塞回程	外传动	棘轮棘爪式单向离合器	已有样机
吉林大学前驱型	螺旋槽+斜键	活塞回程	内传动	牙嵌式单向离合器	已有样机
中石油川庆钻探	螺旋棒+螺旋母	活塞回程	内传动	楔块式单向离合器	已有样机
中石化西南局	冲击齿型	活塞回程	外传动	—	方案设计阶段,无样机

运动中发生磨损失效,此外螺旋运动副还需起到气路密封作用,对加工要求很高。锯齿状冲击自转结构的优点是结构简单,对常规空气潜孔锤的结构改动较少,输出的扭矩较大,其缺点是对冲击齿强度要求很高,可靠性较差^[11-12]。

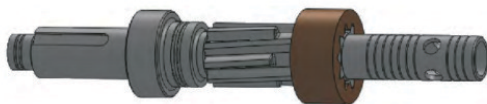


图5 螺旋运动副示意

1.3.2 回转作用位置

活塞回转作用位置可以分为活塞冲程与活塞回程两类。冲程作用式对钻压更为敏感,随着钻压上升,冲击功下降更加明显。回程作用式合理地利用了活塞回程能量来转动钻头,同时可以借助钻头冲击后的反弹,在孔底回转阻力最小时转动钻头。

1.3.3 回转传动方式

钻头回转传动方式有内传动与外传动两类。内传动即由锤体内部零件带动钻头回转,通常是带键槽的传动套,其优点是能量损失较小,缺点是传动套的存在在结构上会限制活塞的行程和潜孔锤内部零件的径向尺寸。外传动即由潜孔锤外管带动钻头回转,此时潜孔锤的上接头需要具有隔断回转的功能,其优点是外管承载能力更大,缺点是转动外管需要克服的阻力更大。

1.3.4 单向离合器类型

采用螺旋运动副回转机构,必须配合单向离合器使用,以确保钻头单向回转。目前采用的方案有棘轮棘爪式、楔块式及牙嵌式单向离合器。棘轮棘爪式在凿岩机中应用普遍,但其棘爪等零件强度有限,传递扭矩相对较小,同时径向结构尺寸相对较大。楔块式单向离合传递扭矩大,可靠性高,但其径向结构尺寸也相对较大。牙嵌式离合器的径向轮廓尺寸小,承载能力较高,其缺点是需要通过轴向移动

才能实现离合作用。

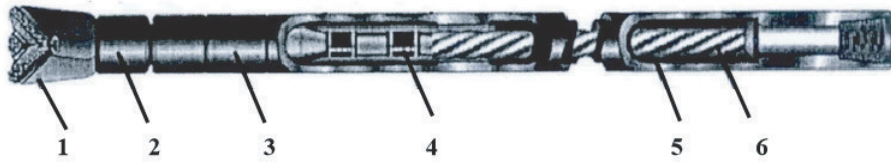
2 气动螺杆驱动式空气潜孔锤研究进展

气动螺杆驱动式空气潜孔锤钻进技术依靠气动螺杆提供潜孔锤的旋转扭矩,回转不干涉冲击性能,钻头可连续回转。该技术的核心部件为气动螺杆马达,配套常规空气潜孔锤即可使用。

2.1 国外研究进展

1991年L.Shale等人研发出了首款气动螺杆钻具Mach1/AD^[13],其结构如图6所示。气动螺杆工作原理与液动螺杆类似,螺杆马达总成由定子和转子组成,定子包括钢制外筒和内壁螺旋橡胶套,转子为表面镀铬的钢制螺旋杆,定子橡胶套头数比转子多一头,与转子形成螺旋曲面的型腔,压缩空气在马达进出口形成一定压差推动转子旋转,转动通过万向轴总成和传动轴总成传递给钻头。在结构上,气动螺杆针对气体钻井工况进行了相应的改进,主要包括取消旁通阀总成、传动轴总成设计为密闭润滑油结构、采用大头数比设计、增大腔体容积以适应气体钻井大流量的需求等。目前气动螺杆产品已相对成熟,在国内外“三低”油气藏开发及软煤层开采中均有应用。

2010年前后,美国EQT公司在Appalachian盆地强研磨性的Berea砂岩储层等4种岩层中,首次尝试使用气动螺杆驱动式空气潜孔锤进行定向钻井,其钻具组合为:6 1/4in钎头+5 3/8 in冲击器+5 3/8 in弯外壳气动螺杆(头数9/10,级数2.1,弯螺杆度数0.39°,最大扭矩6779 Nm,气量55 m³/min)+减振短节+螺旋稳定器+钻铤及随钻测量装置(1 in=25.4 mm,下同)。配套研制的减振短节,可以减轻空气锤高频冲击对测量装置的影响,同时也有助于稳定井底的钻压。该钻具组合造斜率较低,因此只能用于水平段稳斜钻进。共试验了37口井,在钻井周期和成本上有明显改善,机械钻速可提高至30m/h,单



1—钻头;2—可调弯接头;3—传动轴总成;4—万向轴总成;5—定子;6—转子

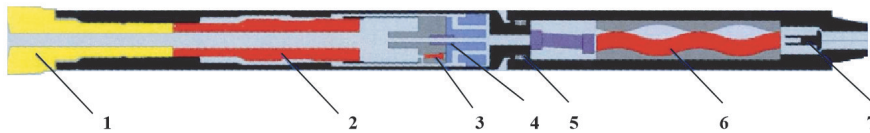
图6 Mach1/AD型气动螺杆钻具

井钻探成本可节约1/3以上^[14]。

2.2 国内研究进展

2015年西南石油大学赵之提出采用带有中空转子的气动螺杆马达作为空气锤回转机构的水平井用空气锤设计方案,并针对水平工作状态优化了空

气锤往复冲击结构,其结构如图7所示。中空转子的存在,使得即便孔底阻力过大导致螺杆停转,空气锤也能保持往复冲击状态,从而利用冲击破岩过程中钎头反弹产生的扭矩为零的这段时间让气动螺杆旋转进而转动空气锤锤体^[15]。



1—钎头;2—活塞;3—启动阀;4—节流塞;5—传动轴;6—中空转子气动螺杆马达;7—逆止阀

图7 西南石油大学气动螺杆驱动式空气潜孔锤结构

采用气动螺杆驱动式空气潜孔锤开展实钻试验,国内缺乏相关研究工作。

3 当前研究存在的问题

3.1 自回转式空气潜孔锤存在的问题

3.1.1 回转干涉冲击,输出扭矩较小,对钻压较敏感

通过活塞往复运动驱动钻头回转时,回转零部件的摩擦阻力必然会影响活塞的冲击性能。受限于气体可压缩性强的性质及潜孔锤的结构尺寸,自回转式空气潜孔锤输出扭矩相对较小,对钻压较敏感。钻压增加会导致扭矩增加,钻压过大会造成钻头压死在岩石上,冲击与回转同时失效,甚至会造成潜孔锤损坏。因此将钻压控制在合理范围内是保证自回转潜孔锤使用寿命、提高机械钻速的关键因素。

3.1.2 结构略显复杂,可靠性差

自回转式空气潜孔锤内部结构复杂,且各零部件配合要求高,加工难度大;高频冲击回转工况下零部件受力情况恶劣,螺旋运动副、单向离合器、冲击齿等可靠性有待加强。

3.1.3 实钻试验相关研究较少

自回转式空气潜孔锤的研究目前以方案设计及理论分析为主,仅国外SPADS系统开展过少量现场试验,对其性能、特点和可靠性没有完全掌握。

3.2 气动螺杆驱动式空气潜孔锤存在的问题

气动螺杆驱动空气潜孔锤回转,可以有效避免因回转扭矩增加而导致的冲击功降低问题,但是,气动螺杆驱动式空气潜孔锤也存在以下问题需要解决。

3.2.1 气动螺杆寿命短,输出机械特性“软”,工作性能不稳定

目前国内外气动螺杆多用于泡沫钻井,在干气条件下的应用尚不成熟。钻具寿命较短,一般在30~50 h之内。同样受限于气体性质,气动螺杆输出机械特性“软”,输出扭矩小,且工作性能不稳定,随负载扭矩下降输出转速迅速上升,易发生飞车现象。

3.2.2 气动螺杆与潜孔锤转速不匹配

一般情况下气动螺杆输出转速(80~150 r/min)高于空气潜孔锤的适用转速(30~50 r/min),易导致潜孔锤钻头磨损加速,影响使用寿命,配套空气潜孔锤使用的气动螺杆相关优化研究仍较不足。

3.2.3 定向钻进工况下常规空气潜孔锤存在死点问题

定向钻进特别是水平钻进工况下,由于缺少重力的归位作用,常规潜孔锤可能存在死点问题,即活

塞处于配气行程的膨胀做功区间,此时通入压缩空气活塞无法顺利启动。适用于水平钻进工况的空气潜孔锤相关优化研究仍较欠缺。

4 结论与展望

(1)孔底动力回转空气潜孔锤包括自回转式空气潜孔锤与气动螺杆驱动式空气潜孔锤两类,具有改善气体介质条件下钻杆柱受力情况、可应用于定向钻进并显著提升硬岩及强研磨性地层钻进效率等优点,但也表现出输出机械特性“软”、输出扭矩小、寿命短、可靠性差等缺陷,有待进一步优化改进,目前孔底动力回转空气潜孔锤钻进技术尚未形成成熟产品。

(2)自回转式空气潜孔锤结构形式多样,但基本思路均为通过机械传动将活塞的往复运动转化为钻头的回转运动,尚未解决输出性能不理想、对钻压较敏感的问题。建议进一步优化结构布局、材质强度、运动部件设计等,降低摩擦阻力,改进回转干涉冲击的缺陷,此外可考虑加入活塞防卡设计,并通过样机试验验证方案可行性。

(3)气动螺杆驱动式空气潜孔锤在国外现场应用中展现出较好的应用潜力,建议国内加强对适用于干气条件下的低速大扭矩长寿命气动螺杆及定向钻进专用空气潜孔锤的研发,并积极开展现场试验,充分暴露问题从而持续优化改进。

参考文献:

- [1] 卢予北,王建华,陈莹,等.空气潜孔锤在松散地层中的钻进试验[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(7):9-11,27.
- [2] 石荆京,张海林,苏园园,等.空气潜孔锤钻进技术在舜皇山基岩地热深井的应用[J].钻探工程,2021,48(10):36-42.
- [3] 李宸晓,周长虹,范黎明.气体钻定向井水平井动力钻具技术探讨[C]//2016年全国天然气学术年会论文集.2016:1-9.
- [4] 胡贵,孟庆昆,王向东,等.空气锤钻井技术在定向井中的应用[J].石油机械,2012,40(4):18-21,25.
- [5] H. D. BUI, J. A. MEYERS, ALBERT B. Steerable percussion air drilling system[C]//1998 ASME Energy Sources Technology Conference, Houston, 1998.
- [6] K. Bo, B. Chen, Y. Hu, et al. Design optimization and feasibility analysis of pneumatic DTH Hammer with self-rotation bit[J]. Journal of Vibroengineering, 2022,24(2):305-316.
- [7] 呼咏.钻头自回转型潜孔锤研究及仿真分析[D].长春:吉林大学,2007.
- [8] 曹品鲁,曹宏宇,曹金娥,等.一种定向钻进用空气反循环潜孔锤自回转钻具:CN202110163748.3[P].2021-06-08.
- [9] 王德贵.新型自转式空气锤产品研制[D].成都:西南石油大学,2011.
- [10] 熊继有,刘小军,陈林,等.新型自转式空气锤破岩机理研究[J].钻采工艺,2011,34(2):4-7.
- [11] He Chao, Han LieXiang, Chen XiaoBin, et al. Development of air hammer with self-propelled round bit and the contact analysis of the key components[C]//Advanced Manufacturing Systems. Trans Tech Publications, 2011:243-249.
- [12] 刘小军.7英寸定向空气锤研制[D].成都:西南石油大学,2011.
- [13] Shale L. Development of air drilling motor holds promise for specialized directional drilling applications [C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Dallas, 1991,.
- [14] Pletcher J, Scarr A, Smith J, et al. Application of air percussion drilling improves drilling efficiency in horizontal sandstone wells[C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Florence, 2010.
- [15] 赵之.气体钻水平井用空气锤工作性能研究及改进设计[D].成都:西南石油大学,2015.

(编辑 王文)