

# 东海超深大位移小尾管井 TCP 射孔技术

王友春

中海油田服务股份有限公司上海分公司 上海 200050

通讯作者:Email:461000179@qq.com

引用:王友春. 东海超深大位移小尾管井 TCP 射孔技术[J]. 油气井测试,2020,29(4):68-72.

Cite: WANG Youchun. TCP perforation technology for ultra-deep wells with large extension and small liners in the East China Sea [J]. Well Testing, 2020,29(4):68-72.

**摘要** 超深大位移小尾管井完井射孔面临校深难度大、射孔器直径小、射孔穿深小、正压射孔压实严重等问题。大位移小尾管井 TCP 射孔技术优化了射孔管柱结构,模拟射孔枪起爆压力分析,保证了射孔管柱安全;针对泵送校深和随钻校深方式,采用预校深方式,提高了射孔准确性,保证了射孔校深作业的成功;优选了超深穿透射孔弹,配合后效体射孔技术,在保证穿透污染带的同时,解除了压实带影响,达到了扩孔扩容的目的。该技术在东海某2井成功进行完井射孔作业,初始原油产量达到96 m<sup>3</sup>/d,远超预期,为同类型井完井射孔施工提供了有益借鉴。

**关键词** 超深井;大位移井;小尾管井;TCP射孔;正压射孔;压实带;后效体射孔

**中图分类号**:TE353 **文献标识码**:B **DOI**:10.19680/j.cnki.1004-4388.2020.04.012

## TCP perforation technology for ultra-deep wells with large extension and small liners in the East China Sea

WANG Youchun

Shanghai Branch of China Oilfield Services Co., Ltd., Shanghai, 200050, China

**Abstract:** Perforating completion of ultra-deep wells with large extension and small liners has problems such as difficulty in depth calibration, shallow penetration of perforators with small diameters, and serious compaction of positive pressure perforations. The TCP perforation technology optimizes the structure of the perforating string and simulates the initiating pressure of the perforating gun to ensure the safety of the perforating string. It improves the accurate perforation and successful calibration while pumping or drilling through pre-calibration. The ultra-deep penetrating bullet and post-calibration perforation technology ensure to penetrate the polluted zone and reduce the influence of the compact zone, so the purpose of hole expansion can be achieved. The technology has been successfully used for perforating completion in a No. 2 well drilled in the East China Sea. The initial production of crude oil reached 96 m<sup>3</sup>/d, and far exceeded the expected. The technology provides a useful reference to perforating completion of similar wells.

**Keywords:** ultra-deep well; large-extension well; small-liner well; TCP perforation; positive pressure perforation; compact zone; post-calibration perforation

超深大位移井,就是指测量深度等于或大于真实垂深2倍,井深大于5 000 m,水平位移大于3 000 m的井。对于这种大位移超深井,射孔工艺的实施难度较大。姜伟<sup>[1]</sup>认为,常规依靠电缆和仪器自重无法输送到位,造成校深困难。针对这种情况,可以应用水力泵送的方式和随钻伽玛校深方式。但是这两种方式都需要在井口施加一定的泵压排量。小直径尾管的应用,限制了射孔管柱直径,进一步增大管柱压耗,存在射孔液压起爆装置提前激发的可能。另外,射孔管柱起爆瞬间会产生瞬间冲击

波<sup>[2]</sup>。郭希明等<sup>[3]</sup>认为,射孔冲击波形成的动态载荷会使射孔管柱震动,并使管柱产生轴拉伸或压缩,严重情况下会使射孔管柱弯曲变形,甚至断裂。因此,管柱的设计既要避免因井口泵压过高导致提前引爆,又要能够满足管柱射孔动态安全分析。

聚能射孔器爆轰所产生的金属射流在造孔的同时,会在孔眼周围形成一定厚度的压实带<sup>[4-5]</sup>。为了消除压实带的影响,常规方法是采用降低井筒内液面,使井筒内静液柱压力低于地层压力。牛超群等<sup>[6]</sup>认为由于负压差的存在,在射孔后地层流体

产生负压冲击回流,冲洗孔道附近的地层和孔道内的爆炸残余物,畅通了油气流通道。但是在实际应用过程中,很多时候这种负压射孔并不是很理想。Eelco Bakker 等<sup>[7]</sup>试验表明,射孔弹起爆后的冲击波造成了井筒内压力瞬间变化后上升,当井内流体进入射开的枪身后下降,产生了射孔后的动态负压,孔眼内流体瞬间回流,冲洗孔道和压实带。这种动态负压射孔主要是通过增加射孔枪上孔眼数目和面积。但是对于小井眼射孔,实现动态负压有一定的困难。新型后效射孔工艺,采用射孔弹相结合,聚能、后效的两级做功、合理叠加,整个做功过程是在孔眼内完成,能够起到消除压实,扩孔扩容,改善孔道流通的作用。

小直径尾管的应用,限制了大尺寸射孔器的使用。宫建等<sup>[8]</sup>认为,射孔弹装药量的大小直接影响了射孔弹的穿深性能,增加装药量可以提高射孔弹的穿透深度,弹装药量又受到射孔枪枪体直径的影响。此次使用的超深穿透 89 射孔弹,在保持与常规 89 射孔弹装药量基本相同的情况下,通过优化设计射孔弹形状,装弹方式,提高炸高,大大提高了穿透深度,最终打靶穿深达到常规深穿透射孔弹的 2.5 倍,有效穿透污染带,提高射孔产能。

1 井况与射孔难点分析

东海海域团三南构造位于八角亭构造和团结亭构造之间。为落实东海团三南构造花岗岩组和平湖组储层展布和含油性,钻探了某 2 井。某 2 井深 7 329 m,最大井斜 74°,保持 74°稳斜超过 4 400 m,水平位移 5 382 m,其井身结构如图 1 所示。

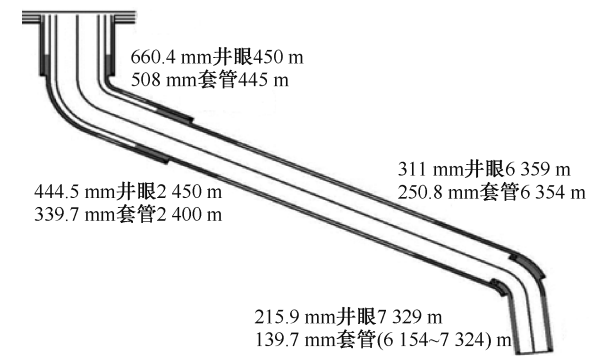


图 1 某 2 井井身结构示意图  
Fig.1 Schematic diagram of well bore structure of Well x2

从最终的测井解释结果分析确定,该井的射孔段共 4 层,分别为 H4 油层、H6 差油层、P5 气层和 P8 差气层(表 1)。射孔层组的孔隙度 15%~20%,渗透率 8~100 mD,属于中低孔渗储层。射孔层组

底部压力为 40.5 MPa,温度 137 ℃。总射孔跨度 585 m,实际射孔 23 m,最大夹层 314 m,最小夹层 116 m。

表 1 某 2 井射孔数据  
Table 1 Perforation data of Well x2

层组		深度/m	厚度/m	解释结论
花岗岩组	H4	6 414.5~6 423.5	9	油层
	H6	6 539.5~6 542.5	3	差油层
平湖组	P5	6 856.5~6 862.5	6	气层
	P8	6 994.5~6 599.5	5	差气层

经过对井况资料的分析可以看出,这口井的 TCP 作业面临以下难点:

- (1)实际射孔段较少,而射孔跨度较大,射孔枪较多,传爆可靠性降低,断爆风险大。
- (2)215.9 mm 井眼使用了 139.7 mm 小套管,水泥环厚度大,地层埋深大且强度高,对于射孔管柱强度和射孔器材的选择限制较大。
- (3)井斜大,稳斜段超长,常规电缆校深仪器无法依靠重量下放到位,之前没有类似情况的水力泵送电缆校深成功案例,而 LWD 伽玛校深借鉴经验也很少。

2 射孔关键技术

相比较常规 TCP 射孔工艺,大位移小尾管井的 TCP 射孔管柱设计需要解决射孔管柱的结构、管柱强度和点火方式,以及校深方式的问题,这是射孔能否实施的根本。

2.1 校深设计

某 2 井的井斜较大,且大斜度稳斜段特别长。所以,依靠仪器重力下放的常规电缆校深方式是不适用的。针对这种情况,选择了两种校深方式,分别为水力输送伽玛校深和随钻伽玛校深<sup>[9]</sup>。

实施水力输送测井需要在井口配备一台液压泵,在测井仪器下连接一个直径大于仪器直径的水力塞,来增大推进的压力面积,水力塞直径大小由射孔管柱最小内径决定。现场作业时,先依靠仪器自重,下放仪器至自然遇阻,然后启动液压泵,将液流泵送至射孔管柱,并作用到水力塞上,推动伽玛仪器至目的深度。该校深方式施工工艺简单,校深精度高,成本低,但是占井口时间较长,且存在泵送不到位,电缆损伤等风险。

随钻伽玛仪器与射孔管柱组合,在立柱或单根的接箍处上提校深,测量时需要测出射孔层的 GR 资料及射孔层以上套管同位素标记深度,并通过对比随钻 GR 资料,确定套管同位素标记深度<sup>[10]</sup>。该

校深方式施工工艺成功率高,能够节省占井口时间,但是作业费用高,存在射孔震动损坏仪器的风险。

为保证射孔作业的成功率和安全性,不管是实施水力泵送校深,还是实施随钻伽玛校深,都应在下射孔管柱之前的刮管程序中进行预校深作业,从而获得基础泵压和排量,为后续正式射孔管柱校深作借鉴<sup>[11]</sup>。

## 2.2 射孔管柱设计

由于校深仪器无法依靠自身重力下放至目的深度,校深设计中采用了泵送校深或者随钻伽玛校深。这两种校深方式井口都需要一定的泵压施加,就决定了只能采用正压点火平衡射孔的方式<sup>[12]</sup>。射孔管柱设计需要设计相应的循环接头。根据井身结构,为消除校深时激动压力对压力起爆装置的影响,避免起爆装置剪切销钉受力疲劳,在顶部压力起爆装置以上设计了一个盲堵加压接头。图2为随钻伽玛校深射孔管柱设计。泵送校深射孔管柱设计基本与随钻校深管柱设计相同,不同的只是将随钻伽玛工具换成放射性接头。

射孔枪起爆瞬间高压,对射孔管柱的设计影响至关重要。射孔管柱设计时,必须根据具体情况进行爆炸压力分析,保证射孔管柱的安全性<sup>[13]</sup>。图3

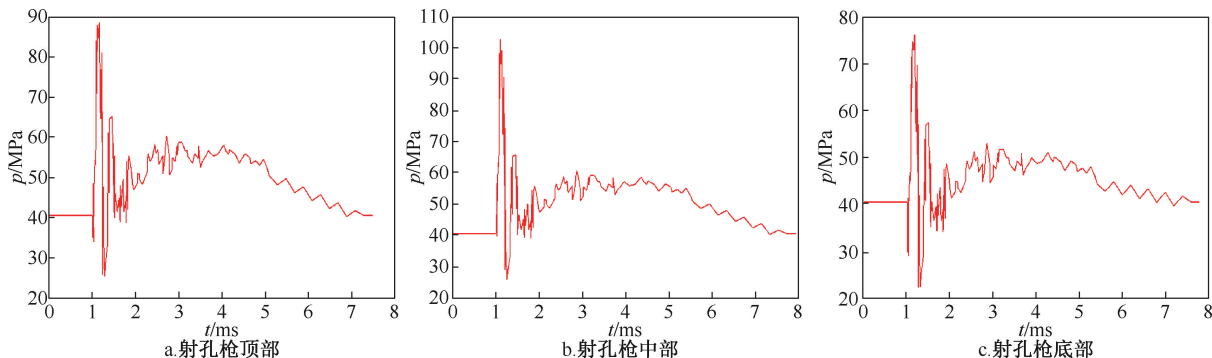


图2 随钻伽玛校深射孔管柱设计  
Fig. 2 Design of the perforating string with gamma depth correction while drilling

图3 射孔枪爆炸压力分析曲线

Fig. 3 Exploding pressure curve of perforating gun

## 2.3 射孔器优化选择

这口超深大位移井目的层段 215.9 mm 井眼采用了 139.7 mm 套管,有别于常规钻完井井身设计。地层温度、地层强度、钻井污染带、小尺寸套管等不利因素,大大限制了射孔器的选择。为保证选择的射孔弹能够穿透套管、水泥环和污染带地层,满足产能要求,必须对射孔器进行优选。

污染带的存在会大大降低地层与井筒之间的有效沟通,影响地层产出。根据污染深度计算公式,得到污染深度<sup>[14]</sup>,即

为某2井的射孔枪顶部、中部和底部的瞬间压力模拟。可以看出,射孔枪起爆瞬间最大压力为 105 MPa,88.9 mm 射孔枪抗压 130 MPa,满足压力要求,其余 127 mm 或 149 mm 钻杆也满足抗压要求。射孔管柱设计满足射孔安全要求。

$$L_d = \frac{1}{2} Br_w [\ln(r_w + 2A\sqrt{\Delta r r_L HT}) - \ln r_w]$$

式中:  $L_d$  为污染深度, cm;  $r_w$  为井眼半径, cm;  $B$  为结构参数(值取为 1.291);  $A$  为回归常数(值取为 0.06476);  $T$  为钻井液浸泡时间, h;  $\Delta r$  为钻井液密度与压力系数差, MPa;  $H$  为井深, m;  $r_L$  为钻井液失水, mL。

地层岩石强度的大小是影响井下射孔穿深的主要因素。根据 Thompson 岩石力学法,可以预测井下射孔穿深<sup>[15]</sup>,即

$$L_{pdh}/L_{pb} = e^{0.01247(UCS_{\text{bera}} - UCS)}$$



式中: $L_{\text{pth}}$  为井下穿透深度, mm;  $L_{\text{pb}}$  为贝雷砂岩靶穿透深度, mm;  $UCS$  为地层抗压强度, MPa;  $UCS_{\text{bera}}$  为贝雷砂岩靶强度, MPa。

经过软件模拟,最终选择 89 射孔枪,搭配使用 SDP40HMX25-1 超深穿透射孔弹。根据 API19B 标准,地面打靶穿深 1 304 mm,孔密 16 孔/m。该型射孔弹穿深能够满足常规完井射孔要求,穿深达到了污染带的两倍以上。

## 2.4 后效体增效射孔工艺

由于在 139.7 mm 小尾管选择了 89 射孔枪,实现动态负压没有足够的压力释放空间<sup>[16]</sup>。后效体射孔工艺较好地解决了射孔孔道改造的问题。后效体射孔工艺的核心理念是一次点火,分仓做功。射孔弹起爆后,金属射流产生的涡流场引力,将后效体微粒后续曳入至射孔孔道内,在局部热点作用下,这些微粒被云雾离子化后爆炸,瞬间释放出冲击能量瓦解了压实带<sup>[17-18]</sup>。此时,孔眼内产生的瞬间高压大于井筒内压力,被瓦解后的压实带碎屑回流至井筒中。相比较常规射孔弹,后效体射孔孔眼入口扩大,末端成开放状。图 4 为 89 型 16 孔/m 后效射孔装配示意图。可以看出,后效射孔技术与常规射孔唯一不同之处,就在射孔弹上设计了后效体。图 5 为后效射孔地面水泥靶打靶效果图。可以看出,孔眼末端成发散状,孔眼周围压实带被有效破除。

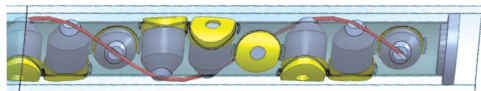


图 4 89 型 16 孔/m 后效射孔装配示意图

Fig. 4 Schematic assembly of post-calibration perforation for 89 type 16 holes/m



图 5 后效体打靶效果图

Fig. 5 Post-calibration targeting effect diagram

## 3 作业施工

经过严密科学的模拟论证和现场精细化操作,最终顺利完成某 2 井的完井射孔作业,初始原油产量达 96 m<sup>3</sup>,射孔增效效果远超预期。当然,施工过

程中也遇到了一些问题,主要表现在射孔校深上。

### 3.1 泵送校深失败

通过软件模拟,某 2 井校深设计先通过重力自由下入至 3 700 m (稳斜段),然后泵送到目的深度后,上提校深。但是,井上实际作业预校深时,校深仪器在钻杆中仅仅自由下入到 1 700 m 左右,此处井斜 72°。然后,启动井口液压泵进行泵送作业。液压泵以不同排量动作,校深仪器都未能继续下放。电缆起出井口后,发现电缆头以上有打扭现象。出现以上原因,分析认为是校深仪器较轻,而电缆磨阻过大,仪器未能自由下入至软件模拟深度。因为 149 mm 钻杆内径较大,而水力塞的外径较小(63 mm),启动液压泵作业,泵入钻杆内的水流,未能有效作用到水力塞上,无法推动校深仪器下移。

### 3.2 随钻伽玛校深井口泵压过大

因泵送校深无法实现,某 2 井启动随钻伽玛预校深方案。预校深管柱按照射孔管柱设计,自上而下分别为:149 mm 钻杆,127 mm 钻杆,随钻 GR 仪器,73 mm 钻杆和钻头。

预校深管柱在井下 500 m 和 1 500 m 时,对随钻伽玛工具进行功能测试,发现在 1 500 m 处,保证伽玛工具要求的最小排量时井口泵压达到了 11 MPa,非常接近射孔设计的点火头安全压力。分析认为,井口泵压过大主要原因是管柱设计中有 300 m 的 73 mm 钻杆造成了压耗较大。为避免井口压力过大,重新设计井的校深管柱,在随钻伽玛仪器与 73 mm 钻杆之间增加了一个循环接头,规避了 73 mm 钻杆的钻杆影响。最终预校深和正式校深时,井口泵压最大为 4 MPa,解除了提前引爆的风险。

## 4 结论

(1)通过对超深大位移小尾管井完井射孔技术的深入研究及在东海某 2 井作业中的成功应用,证明了针对超深大位移小尾管井进行的射孔管柱设计、射孔弹优选、孔眼改造等是科学的、合理有效的。

(2)虽然随钻伽玛校深的使用,有效地解决了大位移超深井的射孔校深问题,但现场施工时应优化管柱设计,避免射孔枪提前引爆的风险。

(3)射孔管柱设计时优化减少管柱的内径变化,选择合适外径的泵送接头,或者设计可变径的泵送接头,能增加电缆泵送的成功率,有效降低作

业成本。

致谢:感谢中海油有限公司上海分公司工程技术作业中心同意本文公开发表。

## 参考文献

- [1] 姜伟. 歧口 17-2 油田大位移水平井 TCP 射孔技术[J]. 中国海上油气(工程), 2002, 14(2): 30-34, 47.  
JIANG Wei. TCP perforation technique in the extended reach well of Qikou 17-2 oil field [J]. China Offshore Oil and Gas (Engineering), 2002, 14(2): 30-34, 47.
- [2] 于秋来. 基于哈根-泊肃叶流的 TCP 管柱下放压力场分析[J]. 油气井测试, 2018, 27(5): 7-12.  
YU Qiulai. Pressure field analysis of setting down the TCP string based on Hagen-Poiseuille flow [J]. Well Testing, 2018, 27(5): 7-12.
- [3] 郭希明, 蒋宏伟, 郭庆丰, 等. 油管输送式射孔技术起爆方式的设计与应用分析[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版), 2011, 13(3): 96-99.  
GUO Ximing, JIANG Hongwei, GUO Qingfeng, et al. Application and design of detonating models of tubing conveyed perforation technology [J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Sciences Edition), 2011, 13(3): 96-99.
- [4] 李东传, 唐国海, 孙新波, 等. 射孔压实带研究[J]. 石油勘探与开发, 2000, 27(5): 112-114.  
LI Dongchuan, TANG Guohai, SUN Xinbo, et al. A study on perforation crushed-zone [J]. Petroleum Exploration and Development, 2000, 27(5): 112-114.
- [5] 李东传, 曹振斌. 聚能射孔器同孔重复射孔作用效果试验研究[J]. 油气井测试, 2019, 28(2): 40-44.  
LI Dongchuan, CAO Zhenbin. Test on effect of repetitive perforation of jet perforator with the same hole [J]. Well Testing, 2019, 28(2): 40-44.
- [6] 牛超群, 张玉金. 油气井完井射孔技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 1994: 108-115.
- [7] EELCOBARKER K V, LARRYBEHRMANN P M, GRAYSTIRTON A S, 等. 动态负压射孔新技术[J]. 国外测井技术, 2004, 19(5): 48-60.  
EELCOBARKER K V, LARRYBEHRMANN P M, GRAYSTIRTON A S, et al. New technology of dynamic negative pressure perforating [J]. World Well Logging Technology, 2004, 19(5): 48-60.
- [8] 宫建, 武云龙, 王煊, 等. 小井眼深穿透射孔技术的研究与应用[J]. 石油天然气学报(江汉石油学院学报), 2007, 29(3): 414-416.  
GONG Jian, WU Yunlong, WANG Xuan, et al. Research and application of the technique of small borehole for the deep penetrating perforation [J]. Journal of Oil and Gas Technology (J. JPI), 2007, 29(3): 414-416.
- [9] 秦仓林. 水平井超长井段射孔技术在普光气田的应用[J]. 油气井测试, 2014, 23(3): 34-36.  
QIN Canglin. Application of long horizontal well perforating technology in Puguang gas field [J]. Well Testing, 2014, 23(3): 34-36.
- [10] 李艳飞, 葛俊瑞, 李三喜, 等. 海上超深大位移大斜度井射孔技术研究与应用[J]. 海洋石油, 2018, 38(2): 72-76.  
LI Yanfei, GE Junrui, LI Sanxi, et al. Study and application on perforation technology for extended-reach and high-inclination well in offshore field [J]. Offshore Oil, 2018, 38(2): 72-76.
- [11] 蔡斌, 葛俊瑞, 李艳飞, 等. 东海超深大位移气井完井技术实践[J]. 海洋石油, 2019, 39(2): 96-101.  
CAI Bin, GE Junrui, LI Yanfei, et al. Well completion technology application on ultra-deep extended-reach well in the East China Sea [J]. Offshore Oil, 2019, 39(2): 96-101.
- [12] 王俊威. 胜利油田小套管完井水平井试油技术优化设计与应用[J]. 油气井测试, 2017, 26(5): 73-74.  
WANG Junwei. Optimization design and application of small casing completion test in Shengli Oilfield [J]. Well Testing, 2017, 26(5): 73-74.
- [13] 郭美华, 邢仁东, 盛廷强. 渤海区块大位移侧钻小井眼完井工艺优化设计及安全性评估[J]. 测井技术, 2017, 41(2): 243-246, 252.  
GUO Meihua, XING Rendong, SHENG Tingqiang. Design of well completion process optimization and safety assessment of large displacement lateral drilling well of slim hole in Bohai Oilfield [J]. Well Logging Technology, 2017, 41(2): 243-246, 252.
- [14] 陆大卫. 油气井射孔技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 2012: 221-223.
- [15] HARVEY J, GROVE B, ZHAN L. Shaped charge penetration into stressed rock — Penetration depth experiments and modeling [C]. The 44th US Rock Mechanics Symposium and 5th U. S.-Canada Rock Mechanics Symposium, held in Salt Lake City, June 27 - 30, 2010.
- [16] 刘方玉, 刘桥, 蔡山. 动态负压射孔技术研究[J]. 测井技术, 2010, 34(2): 193-195.  
LIU Fangyu, LIU Qiao, CAI Shan. Dynamic under-balanced pressure perforating technology and its application [J]. Well Logging Technology, 2010, 34(2): 193-195.
- [17] 葛俊瑞, 李三喜, 李艳飞, 等. 后效复合射孔技术在海上低孔渗油气藏的探索应用[J]. 海洋石油, 2018, 38(4): 52-56.  
GE Junrui, LI Sanxi, LI Yanfei, et al. Exploration and application of aftereffect compound perforation technique in low-porosity & low-permeability reservoirs in offshore fields [J]. Offshore Oil, 2018, 38(4): 52-56.
- [18] 徐志国, 乔亚波. 射流着靶角度对射孔弹性能的影响[J]. 油气井测试, 2019, 28(5): 27-32.  
XU Zhiguo, QIAO Yabo. Influence of jet target angle on the perforating charge performance [J]. Well Testing, 2019, 28(5): 27-32.

编辑 刘振庆

第一作者简介: 王友春, 男, 1982 年出生, 工程师, 2005 年 7 月毕业于中国石油大学(华东) 勘查技术与工程专业, 现主要从事套管井测井、射孔等工作。电话: 021-22833535, 13822549045; Email: 461000179@qq.com。通信地址: 上海市长宁区通协路 388 号中海油大厦 D 座 603 室, 邮政编码: 200050。