

# 光管式与螺纹管式泥浆制冷换热器的对比分析研究

刘卫卫, 孙友宏, 郭威, 李冰, 李卓明

(吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130026)

**摘要:**介绍了泥浆制冷系统及同轴套管式换热器的结构与工作原理,采用传热计算和传热数值模拟分析方法,对光管式换热器与螺纹管式换热器从传热系数和换热面积进行对比分析研究。对比分析结果表明,在满足水合物钻探取样的条件下,螺纹管式换热器可增大换热面积,从而使螺纹管式换热器的体积和质量较光管式换热器可减少50%~60%,在相同规格条件下,螺纹管式换热器的换热效率大约是光管式换热器的2~3倍。

**关键词:**泥浆制冷系统;换热器;光管;螺纹管;数值模拟

**中图分类号:**P634.3 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2013)02-007-05

**Comparative Analysis and Research on Light Pipe and Threaded Pipe Type Heat Exchanger of Mud Refrigeration/LIU Wei-wei, SUN You-hong, GUO Wei, LI Bing, LI Zhuo-ming** (College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China)

**Abstract:** This paper introduces the structure and working principle of mud refrigeration system and coaxial pipe heat exchanger. By the means of the theoretical analysis and numerical simulation, analysis comparative research is made on heat transfer coefficient and heat exchange area of light pipe heat exchanger and thread tube heat exchanger, the results show that the threaded pipe type heat exchanger can increase the heat exchange area when the hydrates drilling sampling conditions are provided, so that the volume and weight of threaded pipe type heat exchanger can reduce 50%~60% comparing with that of light tube heat exchanger. Under the same specification conditions, the heat transfer efficiency of threaded pipe type heat exchanger is about 2~3 times of light tube heat exchanger.

**Key words:** mud refrigeration system; heat exchanger; light pipe; threaded pipe; numerical simulation

## 0 引言

在天然气水合物钻探取样中,由于水合物特殊低温高压赋存状态,对钻井液循环温度也必须严格控制,抑制水合物在钻进过程中发生分解。如果钻井液循环温度高于水合物温度引起水合物分解,不仅会导致无法钻获水合物,还会引起大量气体分解,使井径扩大,套管被压扁,井口装置或防喷器失去承载能力而发生倾斜,有可能导致井喷及井塌事故。而且,分解后的气体可能破坏周围环境,有时地层还会出现溶洞,使天然气水合物地层下沉,出现地基沉降事故。因此,在冻土层天然气水合物钻探取样中,必须要使用泥浆制冷系统动态制冷泥浆,保证钻井泥浆温度始终保持在0℃以下或0℃左右的低温状态。

加拿大马更些三角洲永冻层天然气水合物钻探取样和试采工程中,使用的泥浆冷却装置是一种平板式的换热器,将泥浆冷却至-1~2℃。美国阿拉

斯加北坡永冻层天然气水合物钻探中采用的是美国DrillCool公司研制的泥浆冷却装置,采用的是一种螺旋板式换热器的泥浆制冷器,泥浆被冷却至-2℃。我国在冻土带天然气水合物钻探中所采用的是由吉林大学研制的泥浆制冷系统,特别适用于高原恶劣环境,能够将泥浆动态的维持在低温范围内,该套泥浆制冷系统采用的是光管式同轴套管式换热器。

## 1 泥浆制冷系统结构与工作原理

天然气水合物钻井泥浆制冷系统主要由载冷剂制冷部分、泥浆制冷部分和温度监测部分组成。系统结构组成如图1所示。

首先通过制冷机组制冷载冷剂,然后载冷剂输送泵将载冷剂从载冷剂箱输送至光管式同轴套管式换热器,同时,冲洗液输送泵将泥浆池内的冲洗液也输送至同轴套管式换热器,二者在换热器内通过逆

收稿日期:2012-09-27

基金项目:中国地质调查局项目(GZHL20110320)、(GZHL20110326);大学生创新实验计划(2012B63183)

作者简介:刘卫卫(1987-),男(汉族),江苏淮安人,吉林大学建设工程学院硕士研究生,地质工程专业,研究方向为天然气水合物钻采技术,吉林省长春市西民主大街6号,lww810@hotmail.com;孙友宏(1965-),男(汉族),江苏如皋人,吉林大学建设工程学院院长、教授,博士生导师,地质工程专业,从事地质工程和新能源勘探开发的科学与科研工作,syh@jlu.edu.cn;郭威(1979-),男(汉族),吉林公主岭人,吉林大学建设工程学院副教授,地质工程专业,博士,主要从事天然气水合物钻采技术研究,guowei6981@jlu.edu.cn。

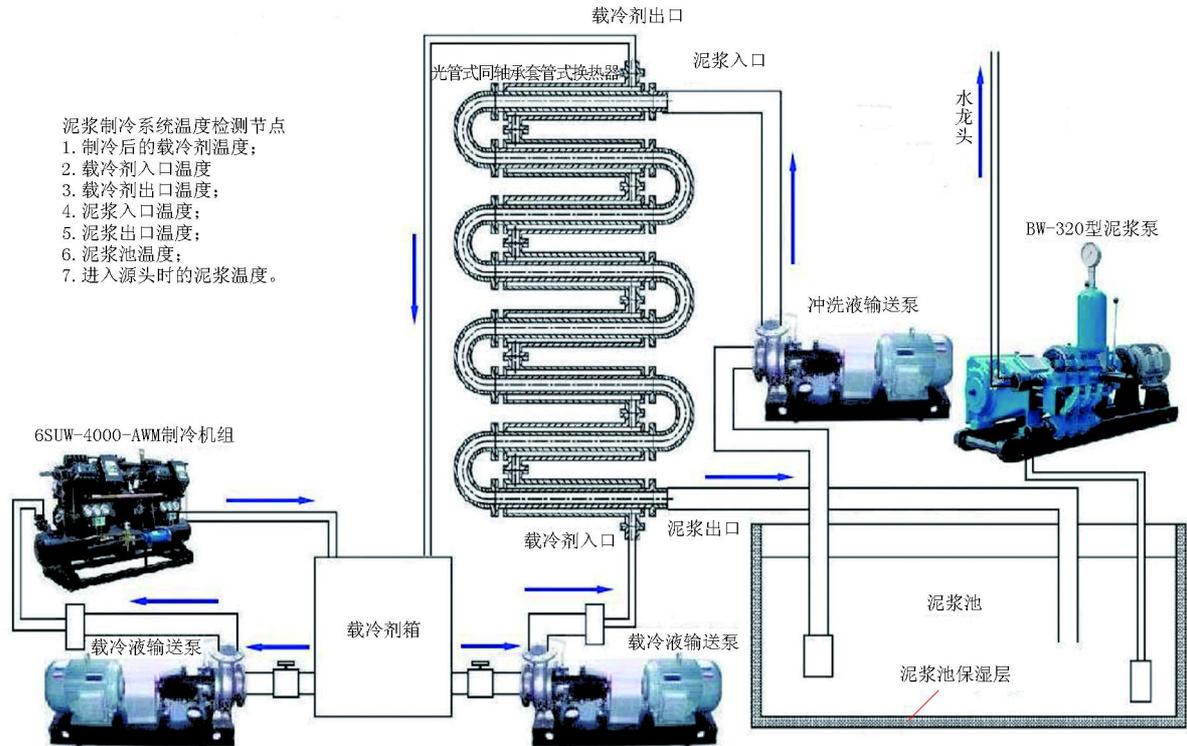


图1 泥浆制冷系统结构与工作原理图

向流动实现热交换,将冲洗液冷却,实现冲洗液的动态制冷,冷却后的冲洗液供钻探泥浆循环,从而能够在钻井过程中冲洗液温度始终达到使用低温状态。同时,通过温度检测部分,检测系统关键点的温度,根据检测的温度及时调整系统相关参数,以满足低温泥浆钻井需要。

系统的关键部件是套管式换热器,采用光管式结构。从本质上说,它是采用同心圆套结构,一根管同心地套在一根直径较大的管内而组成。它主要用于无相变流体的加热或冷却,其特点是传热面积虽不大,但使用和安装的灵活性较大,且清洗容易。套管式换热器结构原理见图2。要进一步优化套管式换热器的结构并提高制冷效率,可采用螺纹管式内管,即螺纹管式换热器,可增加换热面积,提高传热系数。

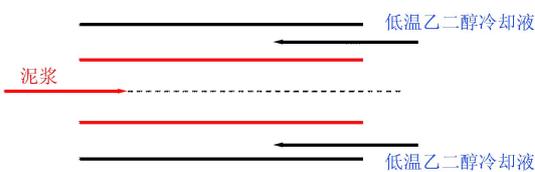


图2 套管式换热器结构原理图

## 2 光管式与螺纹管式换热器传热计算对比分析

为了确定螺纹管换热系统对换热效率的提高效果,对光管和螺纹管2种结构就传热系数和有效传

热长度进行计算和对比。

### 2.1 传热系数计算分析对比

光滑管(见图3)是用标准管子与管件组合而成,结构简单,易于清洗除垢,所以适用于容易结垢的流体。

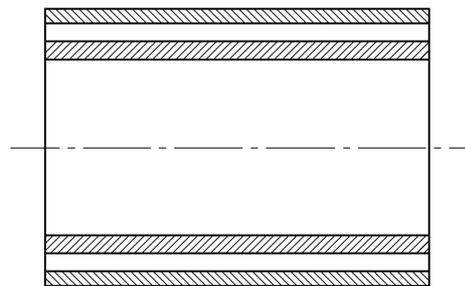


图3 光滑管结构示意图

螺纹管是采用钢管或不锈钢管通过一次挤压出螺纹状的一种高效换热管(见图4),它的强化作用是在管外,一方面体现在螺纹增加了换热面积,另一方面是环隙中乙二醇水溶液流经螺纹管表面时,表面螺纹对层流边层产生分割作用,减薄了边界层厚度,更容易形成湍流,而且表面形成的湍流也较光管强,进一步减薄边界层厚度。

根据对流传热基本公式:

$$Q = kA\Delta t_m \quad (1)$$

根据此式,在平均温差 $\Delta t_m$ 一定的条件下要增

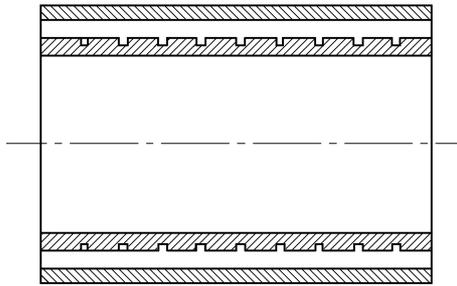


图4 螺纹管结构示意图

大换热量 \$Q\$,最有效的办法是增强传热系数 \$k\$ 和增大传热面积 \$A\$。

### 2.1.1 传热量的计算

$$Q = Q_1 = c_1 \rho_1 G_1 (t_{12} - t_{11}) \quad (2)$$

式中: \$Q\$——换热量, kW; \$Q\_1\$——泥浆换热量, kW; \$c\_1\$——泥浆比热, kJ/(kg·K); \$\rho\_1\$——泥浆密度, kg/m<sup>3</sup>; \$t\_{11}\$——泥浆在换热器进口温度, °C; \$t\_{12}\$——泥浆在换热器出口温度, °C。

### 2.1.2 平均温度差 \$\Delta t\_m\$ 的计算

$$\Delta t_m = \frac{(t_{11} - t_{22}) - (t_{12} - t_{21})}{\ln[(t_{11} - t_{22}) / (t_{12} - t_{21})]} \quad (3)$$

式中: \$t\_{21}\$——载冷剂乙二醇水溶液在换热器进口的温度, °C; \$t\_{22}\$——载冷剂乙二醇水溶液在换热器出口的温度, °C。

### 2.1.3 传热系数 \$K\$ 的计算

雷诺数计算公式:

$$Re = \rho d v / \mu \quad (4)$$

式中: \$\rho\$——密度, kg/m<sup>3</sup>; \$d\$——管径, 对于乙二醇水溶液所对应的直径为当量管直径, mm; \$v\$——流速, m/s; \$\mu\$——动力粘度, mPa·s。

威热斯实验关联式:

$$Nu = 0.0673 (Re)^{0.8} (Pr)^{1/3} (\mu/\mu_w)^{1/3} \quad (5)$$

式中: \$Pr\$——普朗特数。

换热系数公式:

$$\alpha = Nu \lambda / d \quad (6)$$

式中: \$\lambda\$——内管导热系数, W/(m·K)。

传热系数经验公式:

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{\alpha_2} + r_o + \frac{\delta}{\lambda} \cdot \frac{D_o}{D_m} + r_i \cdot \frac{D_o}{D_m} + \frac{1}{\alpha_1} \cdot \frac{D_o}{D_i} \quad (7)$$

式中: \$\alpha\_2\$——载冷剂乙二醇水溶液对内管壁对流换热系数, W/(m<sup>2</sup>·K); \$r\_o\$——管外壁污垢系数, 取 \$r\_o = 0.0001\$ m<sup>2</sup>·K/W; \$\delta\$——管壁厚度, mm; \$D\_o\$——内管外径, mm; \$D\_m\$——内管的平均直径, mm; \$r\_i\$——管内壁污垢系数, 取 \$r\_i = 0.0004\$ m<sup>2</sup>·K/W; \$\alpha\_1\$——泥浆对内管壁对流换热系数, W/(m<sup>2</sup>·K);

\$D\_i\$——内管内径, mm。

由式(4)~(7)可得传热系数 \$K\$ 与载冷剂流量 \$G\_2\$ 的关系式:

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{\frac{0.0673 \lambda_2 (P_{r_2})^{1/3} (\frac{\mu_2}{\mu_w})^{1/3} (\frac{\rho_2 d_2}{\mu_2})^{4/5} (\frac{G_2}{\pi d_2^2 / 4})^{4/5}}{d_2}} + r_o + \frac{\delta}{\lambda} \cdot \frac{D_o}{D_m} + r_i \cdot \frac{D_o}{D_m} + \frac{1}{\frac{0.0673 \lambda_1 (P_{r_1})^{1/3} (\frac{\mu_1}{\mu_w})^{1/3} (\frac{\rho_1 d_1}{\mu_1})^{4/5} (\frac{G_1}{\pi d_1^2 / 4})^{4/5}}{d_1}} \cdot \frac{D_o}{D_i} \quad (8)$$

假设工况条件:

泥浆流量 160 L/min, 进口温度 0 °C, 出口温度 -2 °C; 载冷剂乙二醇水溶液进口温度 -15 °C。泥浆和乙二醇的性能参数见表 1。

表1 两种流体物理性能参数

性能参数	运动粘度 \$v / (\times 10^{-6})\$ m <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup>	动力粘度 \$\mu / (\text{mPa} \cdot \text{s})\$	导热系数 \$\lambda\$ /[W·(m·K) <sup>-1</sup> ]	比热 \$c\$ /[kJ·(kg·K) <sup>-1</sup> ]	密度 \$\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})\$
泥浆	10.73	12.42	0.55	3.706	1157.7
乙二醇水溶液(-15 °C)	7.23	7.51	0.464	3.62	1038

在该工况条件下,在换热量一定时,以式(8)为依据,比较相同规格组合的光滑套管式换热器与螺纹套管式换热器的传热系数 \$K\$ 随载冷剂流量变化的趋势(如图 5 所示)。

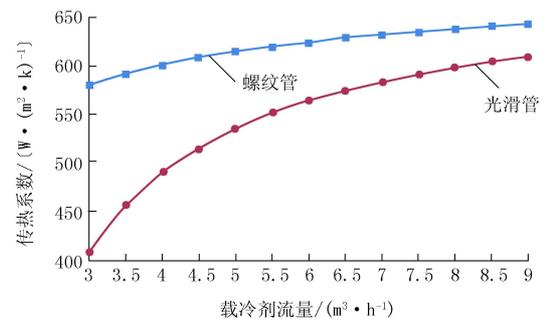


图5 传热系数随载冷剂流量增加变化曲线对比图

由图 5 可以看出,螺纹管传热系数随载冷剂流量的增加变化幅度很小;光滑管在载冷剂流量从 3 m<sup>3</sup>/h 增加到 6 m<sup>3</sup>/h,传热系数增长较快,之后随着载冷剂流量的增加,传热系数增长率明显下降。

因为螺纹管在较低的载冷剂流量下就达到了紊流状态,环隙载冷剂对流换热系数相对于内管泥浆对流换热系数很大,若再增加载冷剂流量提高载冷剂换热系数,对传热系数影响很小,所以该螺纹管随

着载冷剂流量的增大,传热系数变化幅度不大;光滑管在载冷剂流量  $< 5 \text{ m}^3/\text{h}$  时,环隙载冷剂为层流状态,载冷剂换热系数对传热系数影响相对较大,随着载冷剂流量的增大,载冷剂换热系数增长快,对传热系数的提高影响明显。随着载冷剂换热系数对传热系数影响比重的降低,载冷剂流量的增大传热系数变化幅度明显也减小。

### 2.2 传热长度对比分析

由式(1)可得:

$$A = Q/k\Delta t_m \quad (9)$$

则有效换热管长:

$$L = A/(2\pi D_0) \quad (10)$$

由式(8)~(10)即可得所需管长与载冷剂流量  $G_2$  的关系式。

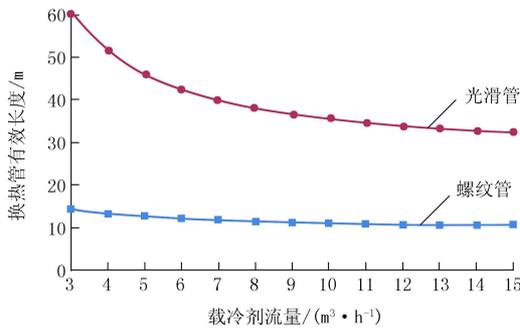


图6 所需管长随载冷剂流量增加变化曲线对比

由图6可以看出,在同一流量下,波纹管比光滑管换热管长要短,大约是光滑管的  $1/3 \sim 1/2$ 。

### 3 光管式与波纹管式换热器传热数值模拟对比分析

采用 FLUENT 流体分析与仿真软件,建立物理模型,对光管式与波纹管式换热器进行数值模拟,通过数值模拟的效果来验证理论分析的可靠性。

#### 3.1 建立物理模型

模型长度 1 m,具体参数如表 2 所示。

表2 光管式与波纹管尺寸参数

管型	内管/mm	外管/mm	槽深/mm	槽宽/mm	槽距/mm
光滑管	Ø54 × 3	Ø69 × 3			
波纹管	Ø54 × 3	Ø69 × 3	2	2	10

#### 3.2 数值模拟结果

数值模拟过程中所采用的泥浆及乙二醇的性能参数见表 1。模拟结果见图 7~10。

从图 7 可以看出,光管内泥浆轴向和径向速度分布均匀,边界层较厚;而波纹管分布不均匀,边界层薄,湍流强度大,换热系数大。

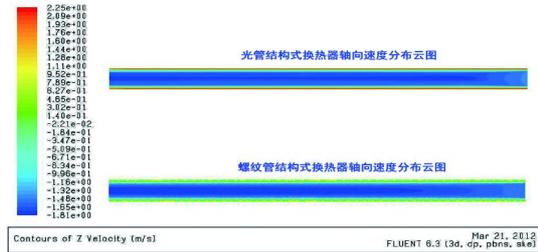


图7 光滑管式换热器与波纹管式换热器轴向速度分布云图

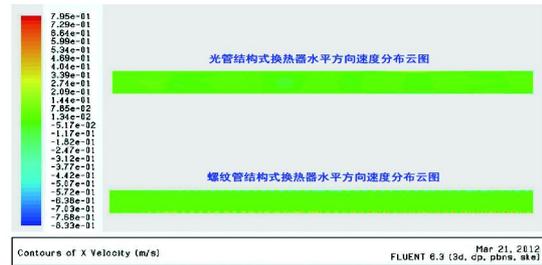


图8 光滑管式换热器与波纹管式换热器水平方向速度分布云图

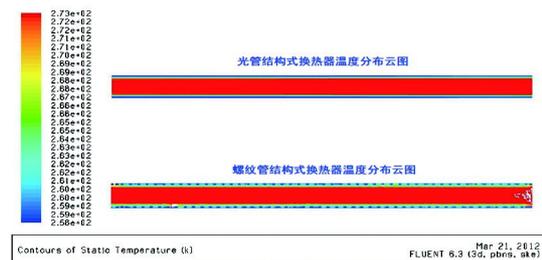


图9 光滑管式换热器与波纹管式换热器温度分布云图

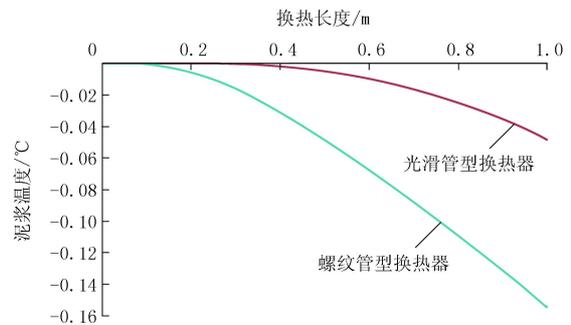


图10 换热器泥浆出口温度随换热长度变化曲线

从图 8 可以看出,波纹管的泥浆有沿水平方向的速度,说明有一部分泥浆是沿着槽螺旋运动,增大换热长度,换热系数提高。

从图 9 可以看出,波纹管结构式换热器在 1 m 内可实现泥浆温度降低  $0.155 \text{ }^\circ\text{C}$ ,而光管结构的换热器仅降低了  $0.048 \text{ }^\circ\text{C}$ ,由此可以看出波纹管的效率为光管的 3.23 倍,这与理论计算中,在同一换热量下波纹管的管长为光管管长的  $1/3$  基本吻合。

#### 3.3 数据分析

由图 10 可以看出波纹管型与光滑管型换热器

在有效传热长度为1 m时的换热器泥浆出口的温度变化规律,在1 m内,螺旋管结构式换热器能够使泥浆温度降低0.155℃,光滑管型换热器仅能使泥浆温度降低0.048℃。

通过对数值模拟的速度云图、温度云图及泥浆温度随换热长度变化曲线的分析可得出:光管内泥浆轴向和径向速度分布均匀,边界层较厚;而螺旋管的分布不均,边界层薄,湍流强度大,换热系数大。螺旋管的泥浆有沿水平方向的速度,说明有一部分泥浆是沿着槽螺旋运动,增大换热长度,换热系数提高。螺旋管结构式换热器在1 m内可实现泥浆温度降低0.155℃,而光管结构的换热器仅降低了0.048℃,螺旋管的效率为光管的3.23倍,这与理论计算中,在同一换热量下螺旋管的管长为光管管长的1/3基本吻合。

#### 4 结论

(1)通过理论分析,螺旋管式泥浆制冷换热器通过增大换热面积,提高传热系数,进一步增强了制冷效率。

(2)在满足水合物钻探取样要求条件下,螺旋管式换热器的体积和质量较光管可减少50%~60%。

(3)通过数值模拟结果分析,在相同规格条件下,螺旋管式换热器的换热效率约是光管的2~3倍。

#### 参考文献:

- [1] 蒋国盛,王达,汤凤林,等.天然气水合物的勘探与开发[M].湖北武汉:中国地质大学出版社,2002.66-67.
- [2] J. P. RUFFELL, T. R. MUPRHY, C. A. GRAHAM. Planning and Execution of a 500m Corehole Through Offshore Permafrost [A]. PERMAFROST - CANADA Proceedings of the Fifth Canadian Per-

- mafrost Conference [C]. 1990. 271 - 282.
- [3] T. Ohara, S. R. Dallimore, E. Fercho. JAPEX/JNOC/GSC MALLIK 2L - 38 Gas Hydrate Research Well, Mackenzie Delta, N. W. T.: Overview of Field Operations [A]. SPE/CERI Gas Technology Symposium [C]. Calgary, Alberta, Canada; 2000.
- [4] 张金昌.天然气水合物勘探开发:从马利克走向未来——加拿大北极地区天然气水合物勘探开发情况综述[J].地质通报, 2005, 24(7): 4 - 7.
- [5] Ali G. Kadaster, Keith K. Millheim, Tommy W. Thompson. The Planning and Drilling of Hot Ice #1 - Gas Hydrate Exploration Well in the Alaskan Arctic [A]. IADC/SPE Drilling Conference [C]. Amsterdam, Netherlands; 2005.
- [6] Robert B. Hunter, Scott A. Digert, Ray Boswell, et al. Alaska Gas Hydrate Research and Stratigraphic Test Preliminary Results [Z]. 2008.
- [7] 张正端,邵洪福.换热器及计算基础知识[M].北京:化学工业出版社,1980.
- [8] 靳明聪,程尚模,赵永湘.换热器[M].重庆:重庆大学出版社,1990.
- [9] 程林,杨培毅,陆煜.换热器运行导论[M].北京:石油工业出版社,1995.
- [10] B. M. 拉默.换热器[M].刘裕烈,等译.北京:商务印书馆,1956.
- [11] 朱聘冠.换热器原理及计算[M].北京:清华大学出版社,1987.
- [12] 兰州石油机械研究所.换热器(中册)[M].北京:轻加工出版社,1988.
- [13] 兰州石油机械研究所.换热器(下册)[M].北京:轻加工出版社,1990.
- [14] 柯如柏.套管式换热器的强化分析[J].化学工程师,1988: 20 - 23.
- [15] 彭洁.螺旋槽管换热过程的三维数值模拟[D].河北秦皇岛:燕山大学,2006.
- [16] 王涛,程林.内管纵向敷肋时套管式换热器传热研究[J].水动力学研究与进展,1996, 11(6): 707 - 711.
- [17] 朱道义,孙红,吴洪特.套管换热器的强化效果试验研究[J].长江大学学报(自然科学版),2010, 7(3): 197 - 200.
- [18] 杨世铭,陶文栓.传热学(第三版)[M].北京:高等教育出版社,1998.

## 汶川地震科学钻探二号孔钻探、测井、录井施工通过验收

中国地质调查局网站消息(2013-01-30) 2013年1月23日,汶川地震断裂带科学钻探项目二号孔(WFSD-2)钻探、测井、录井施工验收会在中国地质科学院探矿工艺研究所召开。

按照会议议程安排,相关施工单位进行了工作汇报;与会专家听取汇报后,通过审查资料、讨论、质询等形式对项目进行了细致、认真的审查,一致认为:在钻探施工方面,WFSD-2孔钻探取心工艺先进,为地学研究提供了优质的实物资料和测试条件,技术指标和工程质量满足设计要求;测井施工主要原始资料齐全,质量可靠,按时提交了测井解释报告,取得了较好的解释成果,测井监督管理工作严格、到位,完成了合同规定的各项测井任务;录井施工采用先进设备,原始资料齐全、质量可靠,按时提交了录井日报、周报、月报等,及时提交了异常预报,完成了录井施工服务任务,同意通过验收。

二号孔是“科学钻探与科学测井”课题内容之一,由中国

地质科学院探矿工艺研究所承担。二号孔位于都江堰市虹口乡,目标层为映秀-北川断裂,该孔上部0~897.66 m由北京市地质工程设计研究院承包钻探施工,下部孔段由陕西省煤田地质局一八五队承担钻探劳务工作。该孔于2009年7月5日开钻,2012年4月5日完钻,2012年4月29日完井,完井周期1028.7天,完钻深度为2283.56 m,取心钻进进尺1905.53 m(含侧钻重复取心进尺9.54 m和侧钻补心进尺105.51 m),岩心长度1735.96 m,岩心采取率91.1%,岩心原状性好,较好地满足了地学研究的需要。

国土资源部科技与国际合作司、中国地质调查局、中国地质大学(北京、武汉)、成都理工大学、中国地质科学院地质研究所、中国地质科学院勘探技术研究所、北京探矿工程研究所、中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所及中国地质科学院探矿工艺研究所等单位的专家30余人出席了会议。