

钻井液类型对南极冰层取心钻进工作的影响

宋佳宇¹, 徐会文¹, 韩丽丽², 刘 宁¹, 张 楠¹, Pavel Talalay¹

(1. 吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130026; 2. 中国地质科学院勘探技术研究所, 河北 廊坊 065000)

摘要: 钻井液的类型与性能对于提高极地冰层取心钻进的效率与保证钻孔稳定性具有重要的影响。在分析铠装电动机械钻具工作原理与钻井液循环方式的基础上, 较为详细地分析了升降钻具的速度与钻井液粘度与密度之间的关系; 分析了现有钻井液类型和所存在的问题; 以二元脂肪酸二醇酯、低分子量饱和脂肪酸酯与甲基硅油的试验测试数据为基础, 确定了可用于极地冰层取心钻进的钻井液类型及其性能要求。

关键词: 极地冰钻; 钻井液; 脂肪酸酯; 甲基硅油; 升降钻具; 孔壁稳定

中图分类号: P634.6 文献标识码: A 文章编号: 1672-7428(2015)09-0013-05

Influence of Drilling Fluid on the Antarctic Ice Core Drilling/SONG Jia-yu¹, XU Hui-wen¹, HAN Li-li², LIU Ning¹, ZHANG Nan¹, Pavel Talalay¹ (1. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China; 2. The Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China)

Abstract: The type and property of drilling fluids play an important role in improving core drilling efficiency in the polar ice and ensuring the stability of borehole. Based on the investigation of the working principles of armored electric machinery drilling tools and the cycle approach of drilling fluids, this paper made a detailed analysis on the relationship between the rising and falling speed of drilling tools and the viscosity and density of drilling fluids. Current types of drilling fluid and their existing problems were also discussed. The type and property of the drilling fluid available to the polar ice core drilling were determined based on the test data of the binary fatty acid glycol ester, low molecular weight saturated fatty acid ester and methyl silicone oil.

Key words: polar ice core drilling; drilling fluid; fatty acid ester; methyl silicone oil; rising and falling of drilling tools; stability of borehole

钻井液技术是南极科学钻探的重要技术之一。它是实现高效钻进、获得高质量冰心样品的重要保证。鉴于南极特殊的地理环境与温度条件, 在要求钻井液具有耐低温性强、流动性好的同时, 还应保证不污染环境。在南极内陆所进行的科学钻探中, 绝大多数都是在冰层中完成的, 为防止钻进过程中对孔壁与冰心样品的溶解, 多以疏水介质作为钻井液的主要类型, 如煤油、硅油以及脂肪酸酯等类物质。为避免冰层因蠕变所造成的钻孔缩径, 还要求钻井液具有与冰层相适应的密度。国内外在南极与格陵兰等地区的冰层钻探实践中, 已经成功应用了航空煤油、硅油、饱和的或不饱和的脂肪酸酯类作为钻井液, 并取得了一定的技术效果。但某些钻井液还存在着低温粘度过大、对环境污染严重及影响工作人员健康等问题。钻井液类型不同, 其结构与组成也

不同, 性能差别很大, 特别是在低温条件下的性能变化也存在着巨大的差异。为进一步提高极地科学钻探的生产效率, 提升钻井液的应用水平, 有必要对钻井液的类型与性能进行深入的分析, 为寻找更适合极地冰层取心钻探用钻井液奠定理论基础。

1 极地冰钻钻具与工作原理简介

在极地进行冰层取心钻进多采用回转钻进的方法。铠装电动机械钻具是一种重要的钻具类型, 许多国家都采用了此种类型的钻具。这种钻具主要由提升的铠装电缆、反扭装置、电动机械回转机构、钻具运动控制单元、钻井液循环泵、取心管及钻头等组成。我国正在南极昆仑站所实施的南极冰层取心钻进也采用了此类型的钻具, 但缺少钻井液循环泵, 采用螺旋钻的排屑形式排除冰屑。在钻进深度比较大

收稿日期: 2015-07-06

基金项目: 国家自然科学基金项目“极地钻探钻井液及其对环境影响的研究”(编号: 41276189)

作者简介: 宋佳宇, 男, 汉族, 1991年生, 吉林大学在读硕士研究生, 地质工程专业, 从事极地钻探方面的研究工作, 吉林省长春市西民主大街938号, songjy13@mails.jlu.edu.cn。

的冰孔时,可能会遇到排屑不畅的问题,此时就应采用钻井液循环泵来排除冰屑。采用设置有钻井液循环泵的钻具,在正常钻进时,钻具在反扭装置的配合下,由电动机驱动钻具回转以切削碎冰,在冰心进入到取心管的同时,破碎下来的冰屑则由钻井液循环泵的抽吸作用下进入取心管的内环空,再经过冰屑室过滤后返回到钻孔的外环空。钻井液的循环过程如图1所示。

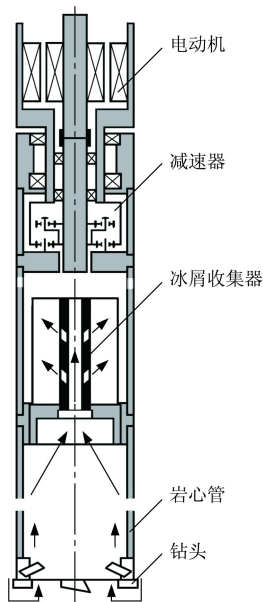


图1 钻进时孔底反循环示意图

2 钻井液在极地冰钻中的主要作用及其性能的要求

在进行冰层取心钻进时,钻井液的主要作用是维护钻孔的稳定、清洗钻孔的底部与排除冰屑的作用。

因此冰层钻进对钻井液的性能要求如下。

(1)要有低的冰点,防止钻井液对冰层与冰心的溶解,多使用疏水型钻井液作为冲洗介质。

(2)由于钻井液在整个钻孔中是不循环的,只在钻具的下部进行局部的反循环,要保证钻孔的稳定,只能依靠钻井液的密度。因此要求钻井液要具有与冰相当或稍大于冰的密度($920 \sim 950 \text{ kg/m}^3$)。钻井液在保证平衡冰层压力的条件下,其密度也不应过大,否则将因钻井液的浮力过大,导致钻压下降,降低钻进效率。同时,也将会引起钻具下放速度的降低,增加钻进辅助时间。

(3)由于采用钻孔底部的局部反循环方式,还

要求钻井液具有低温条件下的低粘度,以保持良好的流动性,保证对钻孔的底部的清洗效果,避免冰屑的重复破碎,提高钻进效率。钻井液的低粘度,也可减小钻井液循环时的阻力,保证钻井液的顺利循环,提高钻井液的流动速度,将冰屑顺利地携带至冰屑室。另外,低的粘度还有利于冰屑的沉积与分离,保证钻井液的清洁性。

3 钻井液对孔内液动压力的影响

在极地冰层取心时,由于采用无钻杆钻具,避免了钻具回转对孔壁的破坏作用。同时因钻井液仅在钻孔的底部进行局部的反循环,在钻具的上部钻井液是不流动的,也避免了钻井液对孔壁的冲刷作用,两者都有利于孔壁的稳定。对孔壁造成破坏作用的是升降钻具所引起的孔内的压力波动问题。

3.1 下降钻具所产生的压力“激动”

在钻具下降时,如果忽略铠装电缆的质量,可以认为整个钻具的质量是恒定的。并且由于钻具的上部是封闭的,可以认为钻具是一个闭口管,下落所引起的钻井液均在钻具与孔壁的环空中流动。因钻具的下降所引起的孔内钻井液的扰动仅限于钻具的长度范围之内,环空中的钻井液的流量等于钻具的横截面积与钻具的下落速度之积。钻具的下降过程分为两个阶段,在经过一个变加速的运动过程后,当钻具的质量与其下降速度所产生的阻力平衡时,即进入匀速下降阶段。变加速的运动时间与匀速度下降的速度取决于钻具的质量、长度和钻具的直径。同时,在孔内温度一定时,也取决于钻井液的密度与粘度。在钻具的参数一定时,钻井液的密度与粘度越大,变减速运动的时间也越短,匀速下降的速度也越小。可以预见的是,因钻具的下降所引起的孔内的压力“激动”是比较小的,不会造成孔壁的破坏,这已经在吉林大学极地研究中心的试验中得到了初步的验证。

3.2 提升钻具所产生的抽吸压力

提升钻具是在绞车回转的作用下,通过缠绕铠式电缆来实现的。钻具的运动特性与下降时基本上是一致的,不同的只是运动方向相反。与下降钻具不同的是,由于岩心管内已经充满了岩心,加上所钻下来的冰屑在内及其内部所含有的钻井液,此时钻具的实际质量要比下降时大得多。以现在南极冰钻所使用的钻具为例,钻具的外径为 132 mm ,岩心管

的内径为 101.6 mm,有效长度为 3900 mm,冰的密度为 915 kg/m^3 ,钻井液的密度为 920 kg/m^3 ,冰屑的孔隙率为 20% 计算,每回次进尺达到理论长度 80% ~ 100%,则钻具的质量增加 42.27 ~ 52.84 kg。如果下降时的钻具质量为 200 kg,提升时整体质量将增加约为 21.14% ~ 26.42%。在钻具的匀速运动时,运动速度与钻具的质量成线性关系,所以在提升钻具时,提升的最大速度应控制在钻具下降速度的 1.25 倍。如果提升钻具的速度大于此值,则孔内钻井液来不及补充,将会对孔壁产生较大的抽吸压力,这对于具有强蠕变性的冰层的稳定来说是非常有害的。

4 钻井液的类型与特点分析

适合于冰层取心钻探用的钻井液类型比较多,性能差异也比较大,但各自都存在一些缺点,难以完全满足南极冰层钻探的具体要求。在现有资料的基础上,对目前已经应用于冰层钻进钻井液类型进行分析,为今后更好地选择钻井液提供一定的理论基础。

4.1 烃类钻井液

烃类钻井液是最早使用的钻井液类型之一。目前可作为冰层取心钻探用烃类钻井液主要有两类,一类是碳氢类的航空煤油;另一类为氟代烃类。

(1) 航空煤油是最早使用的一种冰层钻进钻井液。以 3 号航空煤油为例,其主要成份是 $C_8 \sim C_{18}$ 的饱和烃类,是为高空航行发动机专门研制的燃料,其冰点为 $-55 \sim -60 \text{ }^\circ\text{C}$,具有低温粘度低,流动性好的特点。但这种物质的闪点比较低,约为 $38 \text{ }^\circ\text{C}$ 。当空气中的浓度达到 0.6% ~ 3.7% 时,可能会发生爆炸。同时使用航空煤油可能会对极地的环境造成比较严重的污染和破坏。

(2) 氟代烃也曾冰层取心钻进中进行了应用。氟代烃有多种类型,主要有 HFC、CFC、HCFC F141b 等产品。以 HFC 为例,为无色透明液体,有多种同分异构体。化学性质稳定,低毒,无闪火点,不易燃,沸点高等特点。其分子量比较小,低温条件下粘度低,流动性好,但由于其分子间的作用力比较大,因此其密度比较大,在 $5 \text{ }^\circ\text{C}$ 时为 1300 kg/m^3 。当温度达到 $-30 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,其密度更大,达到了 2800 kg/m^3 。当钻井液的密度过大时,将直接导致钻进时的钻压下降,影响钻进效率,降低钻具的下放速度,增

加钻进的辅助时间。更为重要的是,对于极地这种紫外线强度比较大的环境来说,氟代烃的分解将会严重破坏空气的臭氧层。

4.2 脂肪酸酯类钻井液

脂肪酸酯也是一种疏水的介质,也可以用作冰层取心钻探用钻井液。脂肪酸酯类钻井液有两类,一类是二元脂肪酸二醇酯。另外一类就是低分子量饱和脂肪酸单酯。

4.2.1 二元脂肪酸二醇酯类钻井液

此类型中具有代表性的是 ESTISOL - COASOL 混合物钻井液,它最早曾在格陵兰 NEEM 项目中使用。通过对单组分的试验测试,得出了粘度与密度随温度的变化关系,见图 2、图 3。

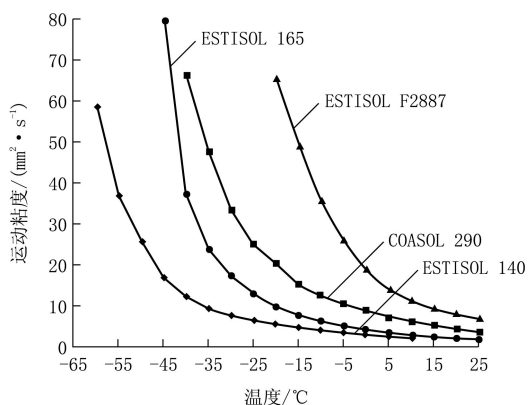


图 2 二元脂肪酸二醇酯的运动粘度随温度变化曲线

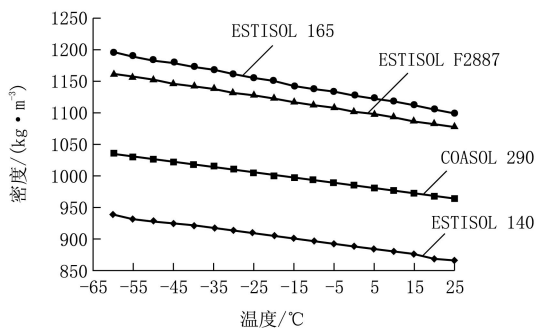


图 3 二元脂肪酸二醇酯的密度随温度变化曲线

由图 2 和图 3 可以看出,由于其分子量比较大,分子间的作用力强,因此表现出在低温条件下迅速稠化的现象,以其中粘度最小的 ESTISOL 140 为例,在 $-60 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,其运动粘度就达到了将近 $60 \text{ mm}^2/\text{s}$,所有的单质的密度都比较大,这将导致钻进速度的下降,排屑困难,同时也将增加升降钻具的时间。另外,ESTISOL 系列物质为椰子油提取物,多属于营养物质,应用于极地钻探可能会导致微生物的环境破

坏。COASOL 也为丁二酸、戊二酸与己二酸二醇酯,与 ESTISOL 系列物的结构相近,也可能会造成同样的环境破坏。

4.2.2 低分子量饱和脂肪酸单酯类钻井液

低分子量饱和脂肪酸单酯类型很多,根据极地冰层取心钻进对于钻井液的技术要求,选取了4种常用于食品添加剂的香料作为钻井液的基础材料,并测试了在不同温度条件下的材料的粘度与密度的变化情况,如图4、图5所示。

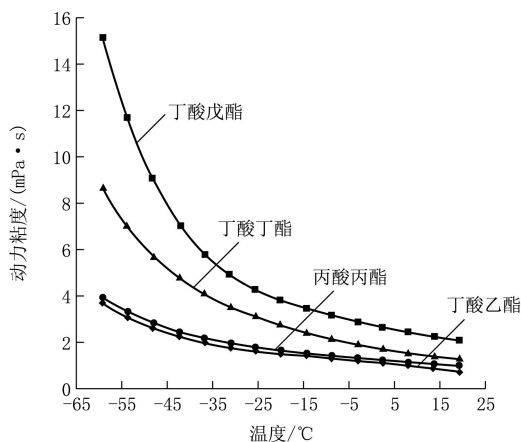


图4 低分子量饱和脂肪酸单酯的动力粘度随温度变化曲线

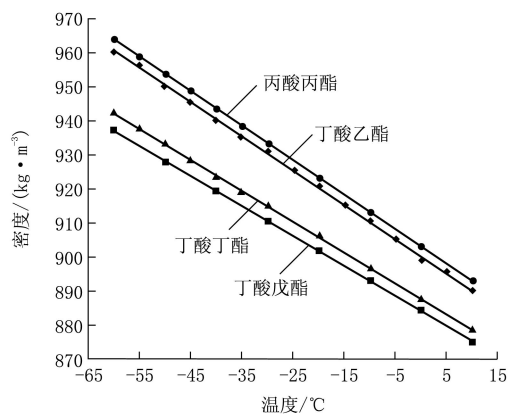


图5 低分子量饱和脂肪酸单酯的密度随温度变化曲线

由图4、图5可以看出,在 $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,丁酸乙酯粘度最低,仅为 $3.7\text{ mPa}\cdot\text{s}$,丁酸戊酯的粘度最高, $15.2\text{ mPa}\cdot\text{s}$ 。在此温度下,丁酸戊酯的密度最低,为 $937\text{ kg}/\text{m}^3$ 。丙酸丙酯的密度最高,为 $964\text{ kg}/\text{m}^3$ 。低分子量饱和脂肪酸单酯具有低的粘度与合适的密度,可以满足极地冰层取心钻进对钻井液的性能要求。在4种单酯中,丁酸丁酯的粘度为 $8.7\text{ mPa}\cdot\text{s}$,密度为 $942.5\text{ kg}/\text{m}^3$,是最为理想的钻井液材料。

4.3 甲基硅油类钻井液

甲基硅油是一种无味、无色、无毒的透明液体,具有粘温系数小、耐高低温、闪点高、抗氧化、绝缘性好、表面张力小、挥发性小、比较高的表面活性、对金属及塑料橡胶等无腐蚀、化学稳定性好、蒸汽压力低、润滑性能好等特点,此外,甲基硅油还具有生理惰性。甲基硅油的粘度与密度受其聚合度的影响比较大,其中具有代表性的是日本生产的KF-96-2.0,常温下其运动粘度为 $2.0\text{ mm}^2/\text{s}$ 。我国生产的硅油的聚合度相对较大,最低的运动粘度为 $5.0\text{ mm}^2/\text{s}$ 。近年来也能够生产出运动粘度为 $2.0\text{ mm}^2/\text{s}$ 的产品,且价格也明显比进口的产品低廉,可用作极地冰层取心钻进钻井液使用。在室内对2种产品进行了试验测试,其测试结果见图6、图7。

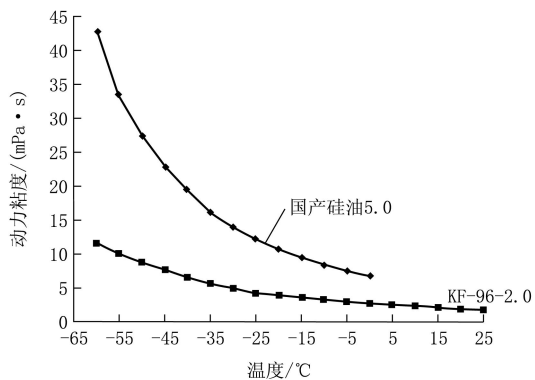


图6 国内外2种甲基硅油的动力粘度随温度变化曲线

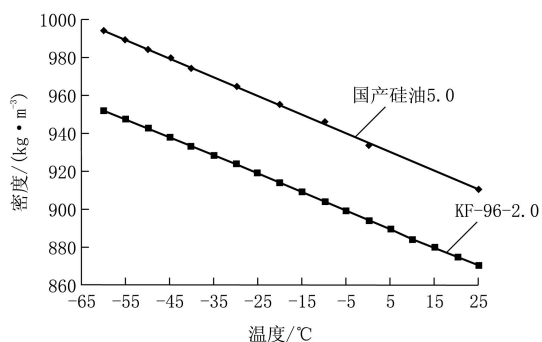


图7 国内外2种甲基硅油的密度随温度变化曲线

由图6、图7可以看出,在 $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,KF-96-2.0的动力粘度为 $11.7\text{ mPa}\cdot\text{s}$,密度为 $952\text{ kg}/\text{m}^3$,运动粘度为 $12.29\text{ mm}^2/\text{s}$ 。国产硅油 $5.0\text{ mm}^2/\text{s}$ 的粘度与密度要大得多,分别达到了 $42.8\text{ mPa}\cdot\text{s}$ 和 $993.9\text{ kg}/\text{m}^3$,运动粘度为 $43.06\text{ mm}^2/\text{s}$ 。因此如果选择硅油作为极地冰钻钻井液,必须要使用低聚合度的硅油,常温下的粘度应控制在 $1.5\sim 2.0\text{ mm}^2/\text{s}$,

才能满足冰层取心钻进对钻井液的性能要求。

5 结论

(1) 低分子量饱和脂肪酸单酯, 在 $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下, 具有低的粘度与合适的密度, 可以用作南极冰层取心钻进用钻井液材料, 其中又以丁酸丁酯最为合适。

(2) 甲基硅油因具有粘温系数小, 无味, 无毒, 绝缘性好及挥发性小等特点, 可以用作极地冰钻钻井液材料, 常温条件下的粘度应控制在 $1.5 \sim 2.0\text{ mm}^2/\text{s}$ 范围之内。

(3) 钻井液的粘度与密度对于钻进效率与孔壁稳定具有重要的影响, 在保证低温低粘(粘度 $< 12\text{ mPa}\cdot\text{s}$), 合适的密度($920 \sim 950\text{ kg}/\text{m}^3$) 钻井液的同时, 应特别注意提升钻具的速度, 提升的速度不应超过钻具下放速度的 1.25 倍, 以保证孔壁的稳定。

参考文献:

[1] P. G. Talalay, N. S. Gundestrup. Hole fluids for deep ice core drilling[J]. National Institute of Polar Research, 2002, 56: 148 -

170.

- [2] 宋佳宇, 徐会文, 韩丽丽, 等. 南极冰层钻进铠装钻具升降运动特性分析与试验[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2014, 41(7): 5 - 12.
- [3] 王莉莉, 徐会文, 赵大军, 等. 南极冰层取心钻探钻井液对雪层影响的模拟研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2013, 40(12): 1 - 4.
- [4] 韩俊杰, 韩丽丽, 徐会文, 等. 极地冰层取心钻进超低温钻井液理论与试验研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2013, 40(6): 23 - 26.
- [5] 王莉莉, 赵大军, 徐会文, 等. 南极冰层取心钻探酯基钻井液抗低温性能试验[J]. 世界地质, 2013, 32(4): 862 - 866.
- [6] Huiwen XU, Lili HAN, Pinlu CAO. Low-molecular-weight, fatty-acid esters as potential low-temperature drilling fluids for ice coring[J]. Annals of Glaciology, 2014, 55(68): 39 - 43.
- [7] 张杰, 鄢泰宁. 小井眼钻具升降产生的孔内波动压力[J]. 煤田地质与勘探, 2009, 37(4).
- [8] 韩俊杰. 极地冰钻升降钻具时孔内水力学特征试验研究[D]. 吉林长春: 吉林大学, 2014.
- [9] 韩丽丽. 南极冰钻超低温钻井液技术研究[D]. 吉林长春: 吉林大学, 2013.
- [10] 徐会文, 韩丽丽, 韩俊杰, 等. 南极冰层取心钻探酯基钻井液的理论与试验[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2013, 40(S1): 279 - 282.
- [11] HAN Lili, XU Huiwen, CAO Pinlu, et al. Viscosity testing method of ultra-low temperature drilling fluids for polar glacier drilling[J]. Global Geology, 2012, (4): 276 - 280.

欢迎订阅《勘察科学技术》

《勘察科学技术》是由中勘冶金勘察设计研究院有限责任公司(原冶金勘察研究总院)主办的学术-技术类双月刊, 是中国科技论文统计源期刊, 中国地质文摘引用期刊, 中国学术期刊(光盘版)、中国期刊网万方数据科技期刊群全文收录期刊, 多次被评为河北省优秀期刊。

《勘察科学技术》主要介绍岩土工程设计与施工、工程地质、环境地质、水文地质及地下水资源评价、工程测量及地理信息系统、工程物探、岩土测试、工程检测及地下管网探测等专业的科研成果、生产经验、工程实录以及新理论、新技术、新方法。

《勘察科学技术》内容丰富, 理论结合实际, 适于从事岩土工程及勘察的广大科研、设计、施工、监理、教学的专业技术人员及高等院校学生阅读、收藏。

《勘察科学技术》国内外公开发行人, 双月刊, 大 16 开本, 双月 20 日出版。每期定价 10.0 元, 全年 60 元。邮发代号 18 - 153。全国各地邮局均可订阅, 也可随时汇款到本编辑部订阅。

本刊兼营广告, 价格适中, 印制精良, 注重实效。

欢迎广大读者投稿、订阅和广告惠顾。

地址: 河北省保定市东风中路 1285 号

《勘察科学技术》编辑部

邮编: 071069

Tel: 0312 - 3020887 3094054

Fax: 0312 - 3034561

E-mail: kckxjs@163.com; kckxjs@126.com