

# 径向井压裂技术携砂液摩阻影响参数研究

肖雯

(中国石化胜利油田分公司石油工程技术研究院, 山东 东营 257000)

**摘要:** 径向井压裂是一种可有效提高油气井产量和采收率的新型复合技术,但目前国内缺乏针对径向井压裂施工参数优化的系统研究。针对此问题,首先评价不同支撑剂参数下的裂缝导流能力,并采用径向井摩阻测试装置量化分析了不同因素对径向井摩阻的影响规律;通过灰色关联分析方法分析了各因素的影响程度并进行了权重排序,最后做出优选。结合实验与理论,分析不同参数对径向井压裂携砂液摩阻的影响,建立经验模型并进行试算。在研究结论的基础上优化径向井压裂技术携砂液的相关参数,为径向井的压裂施工提供参考。

**关键词:** 径向井压裂;携砂液;导流能力;摩阻;支撑剂

中图分类号:TE348

文献标志码:A

## Study on influencing parameters of sand – carrying fluid friction in radial well fracturing

XIAO Wen

(Petroleum Engineering Technology Institute of Shengli Oilfield, Dongying 257000, China)

**Abstract:** The fracturing of radial well is a new composite technology, which can improve the production and recovery rate of oil or gas wells. At present, there is lack of systematic research on optimizing operation parameters of radial well fracturing. According to this problem, it is first carried out evaluations on fracture conductivity under different proppant parameters. And then the influence of different factors on friction of radial well is quantitatively analyzed by using the test device of radial well friction. Finally, the method of gray relational analysis is adopted to analyze the influence degree of the factors, and then an optimization is made based on sorting their weights. Combined with the experiment and theory, it is analyzed the influence of different parameters on the friction of sand – carrying fluid in radial well fracturing. Thus, an empirical model is established and tested. Based on the research conclusion, optimizing parameters of the sand – carrying fluid in radial well fracturing can provide some reference for the fracturing construction of radial wells.

**Key words:** radial well fracturing; sand – carrying fluid; flow conductivity; friction loss; proppants

近年来径向井压裂技术已在多个油田成功应用,该技术主要有如下优点<sup>[1-6]</sup>:①径向井尺寸小、适用于薄互层;②径向井具备引导压裂裂缝定向起裂的功能,同时可降低起裂压力;③压裂裂缝一定条件下可沿径向井定向扩展;④多径向井压裂可形成多条主裂缝,极大地增大泄油面积;⑤相比水平井,径向井施工规模小、时间短、成本低,对油藏造成的伤害小。

本研究通过实验优选出针对径向井压裂施工的一系列工艺参数,并利用灰色关联分析法对各影响因素的关联度进行分析,建立相应的经验模型。

## 1 携砂液摩阻实验研究

支撑剂导流能力显著影响油井压裂改造效果,因此在压裂施工前对支撑剂的参数进行优选利于得

收稿日期:2019-02-26;改回日期:2019-07-25。

作者简介:肖雯(1990—),女,副研究员,现从事采油工程、压裂工艺方面研究。E-mail:xiaow0811@163.com。

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目“径向钻孔引导水力压裂裂缝定向扩展机理研究”(51404288);国家科技重大专项“准格尔盆地碎屑岩层系油气富集规律与勘探评价”(2016ZX05002-002)。

到最佳改造效果。已有研究结论认为<sup>[7-8]</sup>,支撑剂粒径与导流能力的关联度最大,其余依次为铺砂浓度、流体流量、地层闭合压力。其中人为可控因素为支撑剂粒径及铺砂浓度。以提高裂缝导流能力为目的,应首先选取大粒径支撑剂,但是大粒径支撑剂破碎率较高,结合文献分析,在闭合压力较小时选用20/40目支撑剂;在闭合压力较大时选取30/50目支撑剂<sup>[8]</sup>。

受径向井小尺寸的影响,携砂液流动时会产生较大的摩阻损失,而较高的摩阻数值显然不利于压裂施工的进行,因此,对携砂液摩阻问题的研究具有很高的实用价值。应用径向井摩阻测试装置,考虑多因素的影响,对携砂液的摩阻进行测试,得到不同条件下径向井携砂液的沿程摩阻压降值,并对实验数据进行分析、优选。

### 1.1 实验仪器及原理

实验采用的“径向井摩阻测试装置”(见图1)。该装置由混砂罐、螺杆泵、垂直井筒、U型管路等系统组成。U型管路上置有压差计量装置,分别计量两直线段管路压差。

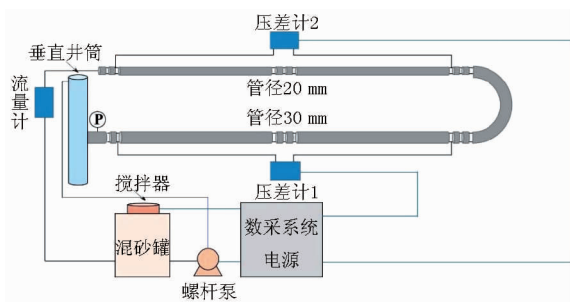


图1 径向井摩阻测试装置

混合均匀的携砂液经泵输送流经U型管路,黏弹性流体性质的压裂液质点及支撑剂颗粒与壁面摩擦碰撞、消耗能量,形成阻力。

量化分析各组的实验结果即得到各因素对摩阻的影响规律,从而优选出适用于径向井压裂的压裂液黏度、支撑剂粒径、施工排量、砂比等参数。

### 1.2 实验结果与分析

实验采用胍胶压裂液进行测定,室温下黏度分别取50 mPa·s、100 mPa·s、150 mPa·s、200 mPa·s。根据支撑剂导流能力评价实验的结果,在不同黏度下使用中密度陶粒进行实验,砂比为5%、10%、15%。不同砂比条件下排量为2~8 m<sup>3</sup>/h。

#### 1.2.1 径向井直径对携砂液摩阻的影响

由于实验数据较多且变化规律相似,此处仅对实验条件为30/50目支撑剂、压裂液黏度50 mPa·s、砂

比15%的实验数据进行展示分析(见图2)。可见,排量一定时,小管径的沿程摩阻压降更大,且小管径上的压降梯度明显更高<sup>[10]</sup>。其原因为相同排量下,管径尺寸越小、流体流速越大,而管路沿程摩阻损失与流速的二次方成正比;此外,管径越小,携砂液的漩涡程度和紊流程度越大,导致流动阻力增大。

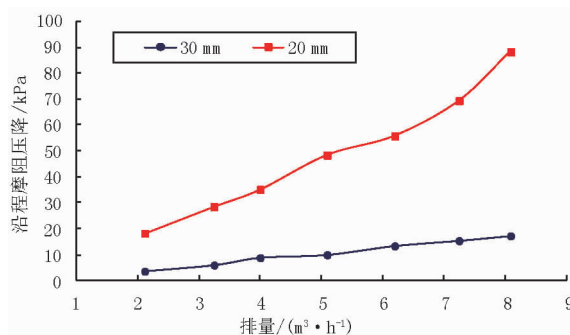


图2 管径与携砂液摩阻压降关系

#### 1.2.2 压裂液黏度对携砂液摩阻的影响

由于实验数据较多且变化规律相似,此处仅对实验条件为砂比5%、20/40目支撑剂、20 mm管径的实验数据进行展示分析(见图3)。可见,沿程摩阻压降随压裂液黏度的增加而减小,排量越大该趋势越明显,与非牛顿流体的紊流减阻现象相符。沿程摩阻压降的降幅随着压裂液黏度的增大而变小,这是因为随压裂液黏度的增大,黏性阻力的影响程度逐渐增大,进而增加了流动阻力,因此压裂液黏度存在最优范围。

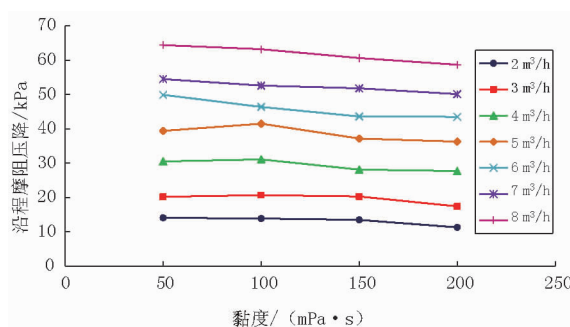


图3 携砂液摩阻压降随黏度的变化规律(20 mm管径)

#### 1.2.3 支撑剂粒径对携砂液摩阻的影响

由于实验数据较多且变化规律相似,此处仅对砂比5%、压裂液黏度50 mPa·s、20 mm管径的实验数据进行展示分析(见图4)。由图4可见,沿程摩阻压降随支撑剂目数的增加而增大,且排量越大该规律越显著。粒径越小颗粒紊动程度越大、能量的耗散越大。相同条件下,粒径越小则其比表面积越大,碰撞、摩擦的频率和程度增大,同样增大了携砂液的流动阻力。

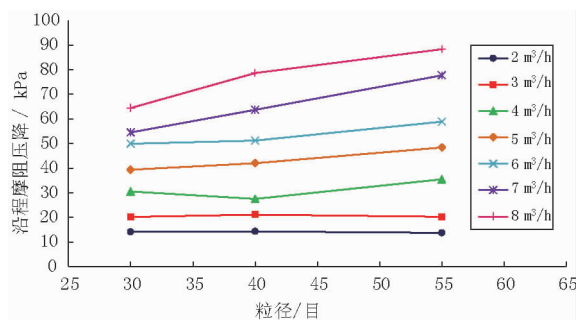


图4 携砂液摩阻压降随支撑剂目数的变化规律  
(20 mm 管径)

#### 1.2.4 排量及砂比对携砂液摩阻的影响

由于实验数据较多且变化规律相似,此处仅对实验条件为压裂液黏度  $50 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 、20 mm 管径的实验数据进行展示分析(见图5)。

由图5可见,相同条件下,沿程摩阻压降会随着排量的增加而增大。20 mm 管径、10 m 管长、5% 砂比条件下,排量为  $2.02 \text{ m}^3/\text{h}$  时摩阻压降值为  $16.2 \text{ kPa}$ ,排量增大至  $8.01 \text{ m}^3/\text{h}$  时摩阻压降值为  $71.9$

$\text{kPa}$ ,摩阻增大  $343.83\%$ 。

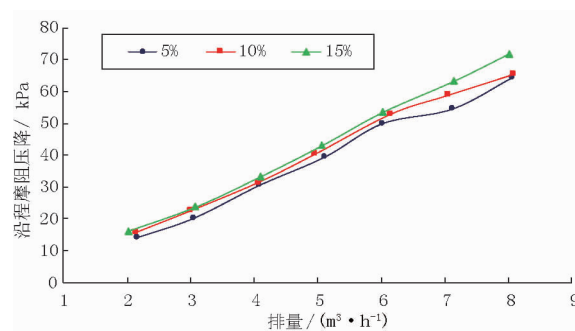


图5 携砂液摩阻压降随排量、砂比的变化规律  
(20mm 管径)

#### (1) 排量的影响。

图6为相同砂比、不同排量下的实验对比图,按照排量依次增大的顺序排列。图中可视模拟直井筒中的颜色由浅到深,这是因为砂比一定时,随着排量的增大,压裂液流速增加使得紊动加强,处于悬移运动的砂粒逐渐增加。

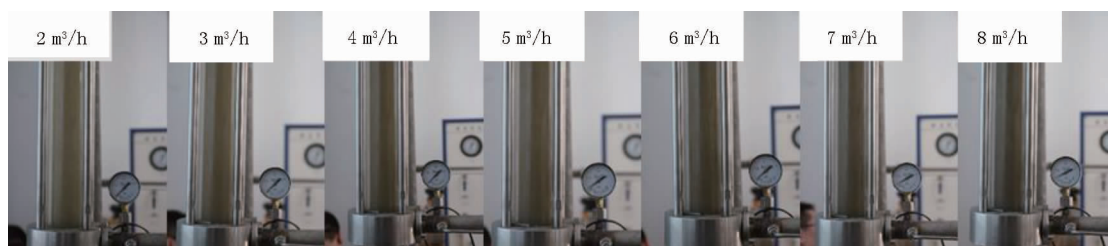


图6 不同排量下的实验结果(5% 砂比)

断面平均流速随排量的降低而减小,同时降低了流体的紊流脉动作用,因此部分支撑剂在重力作用下无法维持悬浮而下沉,下沉以滚动或滑动方式运移,此时支撑剂的运移速度远低于流体流速。此时支撑剂之间、支撑剂与流体之间均会发生碰撞、摩擦从而消耗能量;且沉降的支撑剂增加了管壁的粗糙度,减小了管道截面积,增加了流动阻力<sup>[8]</sup>。而流速的降低又降低了管内沿程水头损失,综合考虑各方面因素,管路摩阻仍随排量的降低而减小。反之,管路的摩阻随排量的升高而增大。

#### (2) 砂比的影响。

图7为可视模拟直井筒在相同排量条件下不同砂比的流动情况对比图,砂比由5%至15%依次增大,模拟井筒颜色由浅至深,排量一定时砂比增大则流体中悬移的支撑剂浓度增大。

支撑剂沉降时,粒间干扰作用会降低颗粒沉降速度。分析其原因为,颗粒沉降时会挤压周围流体向上运动,导致其他颗粒沉降速度被减缓,且砂比越

大该现象越明显;砂比的增加提高了混合流体的比重,增大了颗粒的浮力及沉降阻力,降低了沉降速度。因此更多的支撑剂颗粒进入悬移运移,减小能量损耗。但是,砂比的增大强化了固液两项的相互剪切作用及颗粒间的碰撞摩擦频率,增加了损耗及阻力。因此综合多因素,砂比对摩阻的影响不明显。

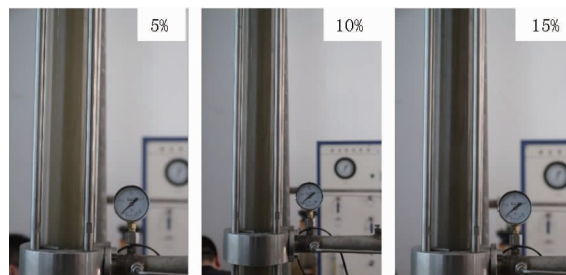


图7 不同砂比条件下的实验结果

## 2 携砂液摩阻预测模型建立

黏弹性胍胶压裂液具有三个特点:①黏弹性的降阻效应;②雷诺数准则无效;③趋向最大降阻渐近

线。因此牛顿流体或幂律流体的摩阻系数计算方法无法适用于黏弹性流体<sup>[11]</sup>。结合理论及实验数据,建立考虑多因素影响的携砂液摩阻经验模型,优化实际施工参数具有重要的意义。

## 2.1 压裂液管流摩阻预测

非牛顿流体内紊流摩阻压降采用 Darcy - Weisbach 公式:

$$\Delta P = \lambda \frac{L}{d} \frac{\rho v^2}{2} = 2f \frac{L \rho v^2}{d} \quad (1)$$

式中:  $\Delta P$  为管内摩阻压降, Pa;  $\lambda$  为 Darcy 摩阻系数;  $L$  为管道长度, m;  $d$  为管道内径, m;  $\rho$  为流体密度, kg/m<sup>3</sup>;  $v$  为管内流体平均速度, m/s;  $f$  为摩阻系数。

上式计算压裂液摩阻的核心问题是如何确定摩阻系数  $f$ 。S. N. Shah 等人通过实验测算认为通用雷诺数  $Re'$  与摩阻系数  $f$  存在如下关系:

$$\begin{cases} f = A + B(Re')^{-c} \\ Re' = \frac{d^n v^{2-n} \rho}{m} \\ m = \frac{K}{8} \left( \frac{6n+2}{n} \right)^n \end{cases} \quad (2)$$

$A$ 、 $B$ 、 $C$  的取值需要利用前文径向孔眼摩阻实验中不同条件下获取的摩阻压降  $\Delta P$  进一步推算出对应的摩阻系数及通用雷诺数,拟合通用雷诺数与摩阻系数的关系曲线明确  $A$ 、 $B$ 、 $C$  的取值。管内平均流速可通过排量比管径截面求得,管径长度为 10 m。

绘制通用雷诺数  $Re'$  及摩阻系数  $f$  的散点图(见图 8),通过添加趋势线拟合曲线方程,进而可知  $f$  和  $Re'$  符合如下关系式:

$$f = 0.0298 Re'^{-0.287} \quad (3)$$

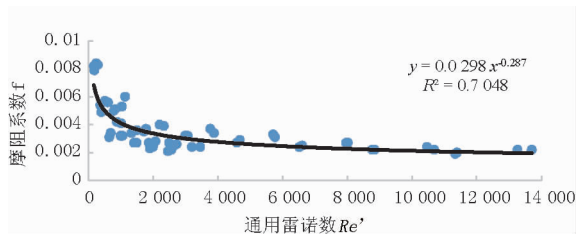


图 8 压裂液摩阻系数随雷诺数的变化规律

该式的决定系数  $R_2 = 0.7048$ , 意味着拟合仍需利用  $A$  项校正, 而  $A$  是压裂液流变指数  $n$  的函数, 拟合  $A$  关于  $n$  的表达式为:

$$A = -0.02n^2 + 0.01n - 0.0015 \quad (4)$$

联立式(3)、(4)得:

$$f = (-0.02n^2 + 0.01n - 0.0015) +$$

$$0.0298(Re')^{-0.287} \quad (5)$$

式(5)即为压裂液(未携砂)在管路中紊流态的摩阻系数经验公式。

## 2.2 携砂液管流摩阻预测

因混入支撑剂,携砂液摩阻更大。Hannah 等人认为,摩阻系数  $f$  乘以系数  $M$  即为携砂液的摩阻系数  $f_s$ , 即:

$$\begin{cases} f_s = fM \\ M = \mu_r^{0.2} \rho_r^{0.8} \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $\mu_r$  为相对黏度(无量纲),携砂液黏度比压裂液黏度;  $\rho_r$  为相对密度(无量纲),其定义为:

$$\rho_r = \frac{1 + (C_f/\rho_f)}{1 + (C_p/\rho_p)} \quad (7)$$

式中:  $\rho_f$  为压裂液密度, kg/m<sup>3</sup>;  $\rho_p$  为支撑剂密度, kg/m<sup>3</sup>;  $C_f$ 、 $C_p$  分别为压裂液与支撑剂的浓度(无因次)。

Keck 通过室内实验考虑各种有关因素,改进了 Eilers 公式:

$$\mu_r = \left[ 1 + 1.25 \frac{\varphi}{1 - \varphi/\varphi_{\max}} f(n, \gamma) \right] \quad (8)$$

式中:  $f(n, \gamma)$  为压裂液(未携砂)流变指数  $n$  与  $\gamma$  的函数;  $\varphi$  为颗粒的体积分数;  $\varphi_{\max}$  为支撑剂颗粒紧密排列时的体积分数。

至此存在三种情况:

(1) 当  $n \rightarrow 1$  时,  $f \rightarrow$  牛顿液体;

(2) 当  $n \rightarrow 0$  时,  $f \rightarrow 0$ ;

(3) 当  $\gamma \rightarrow \infty$  时,  $f \rightarrow 0$  可得:

$$\begin{cases} f(n, \gamma) = 0.75(e^{1.5n-1} - 1)e^{(n-1)\gamma/1000} \\ \gamma = 8v/d \end{cases} \quad (9)$$

联立式(6)~(9)即可获取携砂液的摩阻系数,代入式(1)即求得摩阻压降。在利用式(1)计算的过程中,其流体密度仍使用未加砂时的压裂液密度,断面平均流速也是未加砂的流体平均流速。至此建立携砂液的摩阻经验模型。

## 2.3 径向井摩阻试算

取现场常规压裂数据进行试算,取压裂液密度 1 500 kg/m<sup>3</sup>, 径向孔眼长度 100 m, 孔径 0.05 m, 排量 4.5 m<sup>3</sup>/min, 折算孔眼内平均流速为 9.55 m/s, 支撑剂选取实验所用 20/40 目陶粒, 携砂压裂液摩阻系数由式(6)~(9)计算为 0.016, 则此时由式(1)可得(单位 MPa):

$$\Delta P = 2f \frac{L \rho v^2}{d} = 8.75$$

由上式结果可见, 100 m 长径向孔眼压裂时摩



阻约为 8.75 MPa,且摩阻与孔眼长度呈线性关系,因此孔眼各处摩阻均可由此求得。固定井底压力条件下可以推算出径向孔眼达到最小起裂压力的位置,同时也可根据孔眼长度反推所需的井底压力。

3 灰色关联分析

受限于实验数据量,各影响因素之间的关联程度、影响原理无法量化,只能依靠结合推断和逻辑思维。灰色关联分析法即是分析该类问题的方法,可判断各因素对研究对象的影响程度或权重,为径向孔眼辅助水力压裂工艺优化提供参考。其计算方法详见文献<sup>[12]</sup>。

应用灰色关联方法计算出不同因素对携砂液摩阻影响的关联度,见表 1。

表 1 关联度结果数据

因子	支撑剂粒径	压裂液黏度	携砂液排量	径向井径
关联系数	0.682	0.681	0.741	0.564

由表 1 可见,与摩阻损失关联度最大的是携砂液排量,之后依次为支撑剂粒径、压裂液黏度、径向井径。因此为减小径向井的摩阻损失,应首先考虑减小携砂液排量,但小排量不利于有效携砂,因此排量的确定应根据现场情况进一步优化,之后考虑支撑剂粒径、压裂液黏度的取值;最后在径向钻孔时尽量增大径向井径。

4 结论

(1)综合考虑导流能力和摩阻损失,重点在于支撑剂的优选。减小支撑剂粒径会使支撑剂导流能力降低、摩阻损失增大。因此,压裂施工时应选择较大粒径支撑剂。

压裂液存在最优化黏度,可同时满足携砂和降低非牛顿液-固两相流动阻力的要求,综合考虑以黏度 150~200 mPa·s 为最优选择;摩阻随排量的增加呈线性增大,尽管大排量利于支撑剂于地层深处铺置,但显著增大了非牛顿液-固两相的流动速度,不利于控制摩阻,因而实际施工中应综合考虑优选合理的排量取值范围;提高砂比会引起摩阻增大,但增幅小,因而现场施工时可尽量提高砂比以提高

造缝成功率;增大径向孔眼孔径会显著降低摩阻。

(2)通过灰色关联分析法明确了各因素对径向井压裂携砂液摩阻的影响程度,其影响程度由大到小依次为:携砂液排量、支撑剂粒径、压裂液黏度、径向井径。

(3)通过实验统计径向孔眼管流摩阻压降与通用雷诺数,并拟合其关系曲线,得到压裂液于径向井内的管路紊流摩阻系数经验公式,在此基础上获取携砂液摩阻系数,建立了携砂液摩阻经验模型。利用此经验模型代入实际现场参数进行试算,求得该条件下 100 m 径向孔眼处摩阻约为 8.75 MPa,通过提高井底压力依然具备远端起裂的能力。

参考文献:

[1] 李小龙. 基于扩展有限元的单径向井压裂裂缝扩展规律[J]. 科学技术与工程,2019,19(7):78-86.

[2] 李小龙,李建雄,王涛,等. 基于数值模拟的径向井压裂裂缝形态[J]. 大庆石油地质与开发,2018,37(03):90-95.

[3] 曲占庆,李小龙,李建雄,等. 基于扩展有限元法的多径向井压裂裂缝形态[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2018,42(01):73-81.

[4] 李小龙,李建雄,周丽萍,等. 径向井压裂定向起裂机理研究[J]. 西安石油大学学报(自然科学版),2017,32(02):46-52.

[5] 李小龙,肖雯,李建雄,等. 径向孔眼辅助压裂裂缝形态[J]. 大庆石油地质与开发,2017,36(02):78-84.

[6] Tian Y, Qu Z, Guo T, et al. Theoretical research on radial wells orientating hydraulically created fracture directional extended[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42(29):18358-18363.

[7] 曲占庆,王冰,杨阳,等. 基于灰色关联的粒径组合支撑剂导流能力实验[J]. 大庆石油地质与开发,2014,33(02):92-96.

[8] 王冰. 低渗透油藏径向井压裂工艺参数优化[D]. 中国石油大学(华东),2014.

[9] 李勇明,赵金洲,毛虎,等. 水平井压裂携砂液摩阻定量计算模型研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版),2011,33(06):80-84.

[10] 袁海平,陶长州,高燕,等. 提高胍胶压裂液摩阻计算精度的方法[J]. 石油钻探技术,2017,45(05):108-112.

[11] 李小龙,王冰,郭天魁,等. 基于灰色关联的径向井摩阻实验[J]. 大庆石油地质与开发,2015,34(06):77-82.

(编辑 韩 枫)