

◀ 钻井与完井 ▶

损伤对爆生气体作用下孔壁岩石开裂规律的影响

林英松¹ 孙丰成¹ 丁雁生² 付英军³ 蒋金宝¹ 王 莉¹

(1. 中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东 东营 257061; 2. 中国科学院力学研究所, 北京 100081; 3. 中海石油研究中心, 北京 100027)

摘 要:在准静态假设条件下,应用有限元计算软件 ANSYS9.0 对爆生气体作用于水泥试样中心孔的冲击开裂现象进行了数值模拟研究。根据数值模拟计算结果,分析了初始损伤(宏观微裂纹)的存在对爆生气体作用下孔壁岩石开裂规律的影响,总结出了在爆生气体作用下柱孔孔壁上周向应力分布及裂纹生成扩展的基本规律。在简化模型基础上进行的计算,可以解释柱孔开裂实验中不可能出现一条裂纹的现象。计算结果与实验结果对比分析说明,所建立的计算模型是合理的,基于断裂理论的裂纹面附加拉应力的假设能够反映实际现象。

关键词:爆炸压裂;裂纹;数值模拟;应力分析

中图分类号:TE 21 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0890(2007)04-0025-03

目前,低渗透油气田开发中主要采用水力压裂和酸化技术改造油层岩石物性^[1]。但在渗透率很低的油气藏,只有在水力压裂形成的主裂纹邻域的油气可以通过岩石中原有微小孔隙流入主裂纹产出,而离主裂纹较远的油气仍难采出。为提高低渗透油气田采收率,人们利用爆燃技术来改善地层岩石物性。爆炸载荷对岩石作用的包括冲击波的动态作用和爆生气体的准静态作用^[2],笔者在此只研究爆生气体对孔壁岩石的作用。根据爆燃开裂实验的初步研究,孔壁岩石产生裂纹条数的多少主要取决于压力峰值和压力上升速率,另外还与试样的动态基本参数、初始损伤紧密相关^[3]。同时,爆燃开裂实验结果证明,通过实验研究手段很难清楚地认识到初始损伤对试样开裂规律的影响,因此笔者在实验研究的基础上,采用数值模拟的方法,探讨爆生气体作用下损伤对孔壁岩石开裂规律的影响。

1 力学模型的建立

平面线形裂缝扩展模型如图 1 所示。

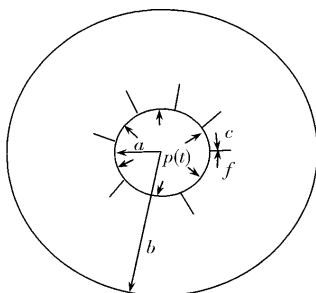


图 1 平面线形裂缝扩展模型

图中, a 为试样中心孔半径, b 为试样半径, c 为试样内壁上的裂缝长, $p(t)$ 为内壁压力。

1.1 基本假设

1) 试样为各向同性的弹脆性体,且为无孔隙和不渗透的密实体;拉应力达到抗拉强度发生拉伸断

裂,产生新裂纹;裂尖应力强度因子达到断裂韧性裂纹就会扩展,且该扩展为瞬间完成,即裂纹扩展速度无穷大^[4]。

2) 爆生气体的作用为准静态过程,气体压力 $p(t)$ 作用于圆孔内壁,岩石的惯性可以忽略,所以可以不考虑动态效应。

3) 线形裂纹径向分布且沿径向扩展^[3,5]。

4) 只考虑宏观损伤,以微裂纹表示。

1.2 基本方程

平衡方程为:

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau}{\partial \theta} + \frac{\tau}{r} - f_r = 0 \\ \frac{\partial \tau}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} + \frac{2\tau}{r} - f_\theta = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中,惯性力 $f_r = \frac{\partial^2 u_r}{\partial t^2}$, $f_\theta = \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial t^2}$, 因准静态假设而被忽略。本构关系为:

$$\begin{cases} \sigma_r = \frac{1}{E} (\sigma_r - \mu \sigma_\theta) \\ \sigma_\theta = \frac{1}{E} (\sigma_\theta - \mu \sigma_r) \\ \tau = \frac{2(1+\mu)}{E} \tau \\ \dot{E} = \frac{E}{1-\mu^2} \\ \mu = \frac{\mu}{1-\mu} \end{cases} \quad (2)$$

收稿日期:2006-12-14;改回日期:2007-03-07

基金项目:中国石油化工股份有限公司科研项目“水力裂缝线内爆炸提高采收率技术基础研究”(编号:P03051)部分研究成果

作者简介:林英松(1964—),女,1987年毕业于华东石油学院油气井工程专业,1993年获硕士学位,中国科学院力学研究所在读博士研究生,副教授,主要从事岩石力学在石油工程应用方面的研究。

联系电话:(0546)8399080

式中, r_r 、 r_θ 为径向应力、应变; σ_θ 、 ϵ_θ 为周向应力、应变; τ_r 、 γ_r 为剪应力、剪应变; E 为平面应变的等效模量; μ 为平面应变的等效泊松比。

几何方程为:

$$\begin{cases} r_r = \frac{\partial u_r}{\partial r} \\ \sigma_\theta = \frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \frac{u_r}{r} \\ r_\theta = \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} + \frac{\partial u_\theta}{\partial r} - \frac{u_\theta}{r} \end{cases} \quad (3)$$

式中, u_r 、 u_θ 表示径向位移、周向位移。

边界条件为:

$$\begin{cases} r |_{r=a} = -p(t) \\ r |_{r=b} = 0 \\ |_{a+r c_i+a_i} = (r-a) \end{cases} \quad (4)$$

式中, λ 表示阻尼系数。

2 对裂纹面的处理

笔者所建模型采用线弹性模型处理裂纹起裂扩展问题, 裂纹的扩展需要消耗一定的能量, 而线弹性模型本身没有裂纹表面能这一项, 这样会使裂纹极易扩展。笔者通过等效能耗的方法来完善该模型。

线弹性断裂力学考虑一个含长度 c 裂纹的物体, 物体每单位厚度的弹性总势能为 $U(c)^{[6]}$ 。当裂纹长度增加时, 总势能减少。定义总势能随裂纹扩展的减小率为裂纹扩展力或应变能释放率, 记作 $G = -\frac{\partial U}{\partial c}$ 。裂纹扩展, 必然要增加裂纹面表面能 S , 相当于给裂纹扩展增加阻力。因此, 可用表面能随裂纹扩展的变化率, 衡量裂纹扩展阻力 $R = \frac{\partial S}{\partial c}$ 。根据裂纹扩展的能量准则, 裂纹扩展力 G 等于裂纹扩展阻力 R 。设裂纹在扩展过程中单位长度的能量损耗为常量, 而在垂直于裂纹面方向上的位移从裂尖到裂口的分布可以近似认为是线性的, 那么, 可以在裂纹面上施加一个从裂口到裂尖线性分布的周向阻尼 $|_{a+r c_i+a_i} = (r-a)$, 把线性阻尼所做的功近似认为是裂纹扩展引起的能耗。计算结果表明, 采用该方法处理是可行的, 适当选取 $1.5/c_i$, 计算结果与实验现象趋势吻合。

线弹性断裂力学考虑一个含长度 c 裂纹的物体, 物体每单位厚度的弹性总势能为 $U(c)^{[6]}$ 。当裂纹长度增加时, 总势能减少。定义总势能随裂纹扩展的减小率为裂纹扩展力或应变能释放率, 记作 $G = -\frac{\partial U}{\partial c}$ 。裂纹扩展, 必然要增加裂纹面表面能 S , 相当于给裂纹扩展增加阻力。因此, 可用表面能随裂纹扩展的变化率, 衡量裂纹扩展阻力 $R = \frac{\partial S}{\partial c}$ 。根据裂纹扩展的能量准则, 裂纹扩展力 G 等于裂纹扩展阻力 R 。设裂纹在扩展过程中单位长度的能量损耗为常量, 而在垂直于裂纹面方向上的位移从裂尖到裂口的分布可以近似认为是线性的, 那么, 可以在裂纹面上施加一个从裂口到裂尖线性分布的周向阻尼 $|_{a+r c_i+a_i} = (r-a)$, 把线性阻尼所做的功近似认为是裂纹扩展引起的能耗。计算结果表明, 采用该方法处理是可行的, 适当选取 $1.5/c_i$, 计算结果与实验现象趋势吻合。

线弹性断裂力学考虑一个含长度 c 裂纹的物体, 物体每单位厚度的弹性总势能为 $U(c)^{[6]}$ 。当裂纹长度增加时, 总势能减少。定义总势能随裂纹扩展的减小率为裂纹扩展力或应变能释放率, 记作 $G = -\frac{\partial U}{\partial c}$ 。裂纹扩展, 必然要增加裂纹面表面能 S , 相当于给裂纹扩展增加阻力。因此, 可用表面能随裂纹扩展的变化率, 衡量裂纹扩展阻力 $R = \frac{\partial S}{\partial c}$ 。根据裂纹扩展的能量准则, 裂纹扩展力 G 等于裂纹扩展阻力 R 。设裂纹在扩展过程中单位长度的能量损耗为常量, 而在垂直于裂纹面方向上的位移从裂尖到裂口的分布可以近似认为是线性的, 那么, 可以在裂纹面上施加一个从裂口到裂尖线性分布的周向阻尼 $|_{a+r c_i+a_i} = (r-a)$, 把线性阻尼所做的功近似认为是裂纹扩展引起的能耗。计算结果表明, 采用该方法处理是可行的, 适当选取 $1.5/c_i$, 计算结果与实验现象趋势吻合。

线弹性断裂力学考虑一个含长度 c 裂纹的物体, 物体每单位厚度的弹性总势能为 $U(c)^{[6]}$ 。当裂纹长度增加时, 总势能减少。定义总势能随裂纹扩展的减小率为裂纹扩展力或应变能释放率, 记作 $G = -\frac{\partial U}{\partial c}$ 。裂纹扩展, 必然要增加裂纹面表面能 S , 相当于给裂纹扩展增加阻力。因此, 可用表面能随裂纹扩展的变化率, 衡量裂纹扩展阻力 $R = \frac{\partial S}{\partial c}$ 。根据裂纹扩展的能量准则, 裂纹扩展力 G 等于裂纹扩展阻力 R 。设裂纹在扩展过程中单位长度的能量损耗为常量, 而在垂直于裂纹面方向上的位移从裂尖到裂口的分布可以近似认为是线性的, 那么, 可以在裂纹面上施加一个从裂口到裂尖线性分布的周向阻尼 $|_{a+r c_i+a_i} = (r-a)$, 把线性阻尼所做的功近似认为是裂纹扩展引起的能耗。计算结果表明, 采用该方法处理是可行的, 适当选取 $1.5/c_i$, 计算结果与实验现象趋势吻合。

线弹性断裂力学考虑一个含长度 c 裂纹的物体, 物体每单位厚度的弹性总势能为 $U(c)^{[6]}$ 。当裂纹长度增加时, 总势能减少。定义总势能随裂纹扩展的减小率为裂纹扩展力或应变能释放率, 记作 $G = -\frac{\partial U}{\partial c}$ 。裂纹扩展, 必然要增加裂纹面表面能 S , 相当于给裂纹扩展增加阻力。因此, 可用表面能随裂纹扩展的变化率, 衡量裂纹扩展阻力 $R = \frac{\partial S}{\partial c}$ 。根据裂纹扩展的能量准则, 裂纹扩展力 G 等于裂纹扩展阻力 R 。设裂纹在扩展过程中单位长度的能量损耗为常量, 而在垂直于裂纹面方向上的位移从裂尖到裂口的分布可以近似认为是线性的, 那么, 可以在裂纹面上施加一个从裂口到裂尖线性分布的周向阻尼 $|_{a+r c_i+a_i} = (r-a)$, 把线性阻尼所做的功近似认为是裂纹扩展引起的能耗。计算结果表明, 采用该方法处理是可行的, 适当选取 $1.5/c_i$, 计算结果与实验现象趋势吻合。

线弹性断裂力学考虑一个含长度 c 裂纹的物体, 物体每单位厚度的弹性总势能为 $U(c)^{[6]}$ 。当裂纹长度增加时, 总势能减少。定义总势能随裂纹扩展的减小率为裂纹扩展力或应变能释放率, 记作 $G = -\frac{\partial U}{\partial c}$ 。裂纹扩展, 必然要增加裂纹面表面能 S , 相当于给裂纹扩展增加阻力。因此, 可用表面能随裂纹扩展的变化率, 衡量裂纹扩展阻力 $R = \frac{\partial S}{\partial c}$ 。根据裂纹扩展的能量准则, 裂纹扩展力 G 等于裂纹扩展阻力 R 。设裂纹在扩展过程中单位长度的能量损耗为常量, 而在垂直于裂纹面方向上的位移从裂尖到裂口的分布可以近似认为是线性的, 那么, 可以在裂纹面上施加一个从裂口到裂尖线性分布的周向阻尼 $|_{a+r c_i+a_i} = (r-a)$, 把线性阻尼所做的功近似认为是裂纹扩展引起的能耗。计算结果表明, 采用该方法处理是可行的, 适当选取 $1.5/c_i$, 计算结果与实验现象趋势吻合。

线弹性断裂力学考虑一个含长度 c 裂纹的物体, 物体每单位厚度的弹性总势能为 $U(c)^{[6]}$ 。当裂纹长度增加时, 总势能减少。定义总势能随裂纹扩展的减小率为裂纹扩展力或应变能释放率, 记作 $G = -\frac{\partial U}{\partial c}$ 。裂纹扩展, 必然要增加裂纹面表面能 S , 相当于给裂纹扩展增加阻力。因此, 可用表面能随裂纹扩展的变化率, 衡量裂纹扩展阻力 $R = \frac{\partial S}{\partial c}$ 。根据裂纹扩展的能量准则, 裂纹扩展力 G 等于裂纹扩展阻力 R 。设裂纹在扩展过程中单位长度的能量损耗为常量, 而在垂直于裂纹面方向上的位移从裂尖到裂口的分布可以近似认为是线性的, 那么, 可以在裂纹面上施加一个从裂口到裂尖线性分布的周向阻尼 $|_{a+r c_i+a_i} = (r-a)$, 把线性阻尼所做的功近似认为是裂纹扩展引起的能耗。计算结果表明, 采用该方法处理是可行的, 适当选取 $1.5/c_i$, 计算结果与实验现象趋势吻合。

线弹性断裂力学考虑一个含长度 c 裂纹的物体, 物体每单位厚度的弹性总势能为 $U(c)^{[6]}$ 。当裂纹长度增加时, 总势能减少。定义总势能随裂纹扩展的减小率为裂纹扩展力或应变能释放率, 记作 $G = -\frac{\partial U}{\partial c}$ 。裂纹扩展, 必然要增加裂纹面表面能 S , 相当于给裂纹扩展增加阻力。因此, 可用表面能随裂纹扩展的变化率, 衡量裂纹扩展阻力 $R = \frac{\partial S}{\partial c}$ 。根据裂纹扩展的能量准则, 裂纹扩展力 G 等于裂纹扩展阻力 R 。设裂纹在扩展过程中单位长度的能量损耗为常量, 而在垂直于裂纹面方向上的位移从裂尖到裂口的分布可以近似认为是线性的, 那么, 可以在裂纹面上施加一个从裂口到裂尖线性分布的周向阻尼 $|_{a+r c_i+a_i} = (r-a)$, 把线性阻尼所做的功近似认为是裂纹扩展引起的能耗。计算结果表明, 采用该方法处理是可行的, 适当选取 $1.5/c_i$, 计算结果与实验现象趋势吻合。

线弹性断裂力学考虑一个含长度 c 裂纹的物体, 物体每单位厚度的弹性总势能为 $U(c)^{[6]}$ 。当裂纹长度增加时, 总势能减少。定义总势能随裂纹扩展的减小率为裂纹扩展力或应变能释放率, 记作 $G = -\frac{\partial U}{\partial c}$ 。裂纹扩展, 必然要增加裂纹面表面能 S , 相当于给裂纹扩展增加阻力。因此, 可用表面能随裂纹扩展的变化率, 衡量裂纹扩展阻力 $R = \frac{\partial S}{\partial c}$ 。根据裂纹扩展的能量准则, 裂纹扩展力 G 等于裂纹扩展阻力 R 。设裂纹在扩展过程中单位长度的能量损耗为常量, 而在垂直于裂纹面方向上的位移从裂尖到裂口的分布可以近似认为是线性的, 那么, 可以在裂纹面上施加一个从裂口到裂尖线性分布的周向阻尼 $|_{a+r c_i+a_i} = (r-a)$, 把线性阻尼所做的功近似认为是裂纹扩展引起的能耗。计算结果表明, 采用该方法处理是可行的, 适当选取 $1.5/c_i$, 计算结果与实验现象趋势吻合。

线弹性断裂力学考虑一个含长度 c 裂纹的物体, 物体每单位厚度的弹性总势能为 $U(c)^{[6]}$ 。当裂纹长度增加时, 总势能减少。定义总势能随裂纹扩展的减小率为裂纹扩展力或应变能释放率, 记作 $G = -\frac{\partial U}{\partial c}$ 。裂纹扩展, 必然要增加裂纹面表面能 S , 相当于给裂纹扩展增加阻力。因此, 可用表面能随裂纹扩展的变化率, 衡量裂纹扩展阻力 $R = \frac{\partial S}{\partial c}$ 。根据裂纹扩展的能量准则, 裂纹扩展力 G 等于裂纹扩展阻力 R 。设裂纹在扩展过程中单位长度的能量损耗为常量, 而在垂直于裂纹面方向上的位移从裂尖到裂口的分布可以近似认为是线性的, 那么, 可以在裂纹面上施加一个从裂口到裂尖线性分布的周向阻尼 $|_{a+r c_i+a_i} = (r-a)$, 把线性阻尼所做的功近似认为是裂纹扩展引起的能耗。计算结果表明, 采用该方法处理是可行的, 适当选取 $1.5/c_i$, 计算结果与实验现象趋势吻合。

线弹性断裂力学考虑一个含长度 c 裂纹的物体, 物体每单位厚度的弹性总势能为 $U(c)^{[6]}$ 。当裂纹长度增加时, 总势能减少。定义总势能随裂纹扩展的减小率为裂纹扩展力或应变能释放率, 记作 $G = -\frac{\partial U}{\partial c}$ 。裂纹扩展, 必然要增加裂纹面表面能 S , 相当于给裂纹扩展增加阻力。因此, 可用表面能随裂纹扩展的变化率, 衡量裂纹扩展阻力 $R = \frac{\partial S}{\partial c}$ 。根据裂纹扩展的能量准则, 裂纹扩展力 G 等于裂纹扩展阻力 R 。设裂纹在扩展过程中单位长度的能量损耗为常量, 而在垂直于裂纹面方向上的位移从裂尖到裂口的分布可以近似认为是线性的, 那么, 可以在裂纹面上施加一个从裂口到裂尖线性分布的周向阻尼 $|_{a+r c_i+a_i} = (r-a)$, 把线性阻尼所做的功近似认为是裂纹扩展引起的能耗。计算结果表明, 采用该方法处理是可行的, 适当选取 $1.5/c_i$, 计算结果与实验现象趋势吻合。

线弹性断裂力学考虑一个含长度 c 裂纹的物体, 物体每单位厚度的弹性总势能为 $U(c)^{[6]}$ 。当裂纹长度增加时, 总势能减少。定义总势能随裂纹扩展的减小率为裂纹扩展力或应变能释放率, 记作 $G = -\frac{\partial U}{\partial c}$ 。裂纹扩展, 必然要增加裂纹面表面能 S , 相当于给裂纹扩展增加阻力。因此, 可用表面能随裂纹扩展的变化率, 衡量裂纹扩展阻力 $R = \frac{\partial S}{\partial c}$ 。根据裂纹扩展的能量准则, 裂纹扩展力 G 等于裂纹扩展阻力 R 。设裂纹在扩展过程中单位长度的能量损耗为常量, 而在垂直于裂纹面方向上的位移从裂尖到裂口的分布可以近似认为是线性的, 那么, 可以在裂纹面上施加一个从裂口到裂尖线性分布的周向阻尼 $|_{a+r c_i+a_i} = (r-a)$, 把线性阻尼所做的功近似认为是裂纹扩展引起的能耗。计算结果表明, 采用该方法处理是可行的, 适当选取 $1.5/c_i$, 计算结果与实验现象趋势吻合。

线弹性断裂力学考虑一个含长度 c 裂纹的物体, 物体每单位厚度的弹性总势能为 $U(c)^{[6]}$ 。当裂纹长度增加时, 总势能减少。定义总势能随裂纹扩展的减小率为裂纹扩展力或应变能释放率, 记作 $G = -\frac{\partial U}{\partial c}$ 。裂纹扩展, 必然要增加裂纹面表面能 S , 相当于给裂纹扩展增加阻力。因此, 可用表面能随裂纹扩展的变化率, 衡量裂纹扩展阻力 $R = \frac{\partial S}{\partial c}$ 。根据裂纹扩展的能量准则, 裂纹扩展力 G 等于裂纹扩展阻力 R 。设裂纹在扩展过程中单位长度的能量损耗为常量, 而在垂直于裂纹面方向上的位移从裂尖到裂口的分布可以近似认为是线性的, 那么, 可以在裂纹面上施加一个从裂口到裂尖线性分布的周向阻尼 $|_{a+r c_i+a_i} = (r-a)$, 把线性阻尼所做的功近似认为是裂纹扩展引起的能耗。计算结果表明, 采用该方法处理是可行的, 适当选取 $1.5/c_i$, 计算结果与实验现象趋势吻合。

干裂纹。在分析裂纹条数时, 最关心孔壁周向应力 $(r_\theta, t) |_{r=a} = a(\sigma_\theta, p, c_i)$ 。由于计算中参数 E 、 μ 、 λ 均不变, 所以可以省略; 水泥试样的尺寸 (内外半径) 不变; 由于是准静态计算, t 用变化的 p 来代替。当第 i 条裂纹扩展前, $a(\sigma_\theta, p, c_i)$ 中的孔压 p 逐渐增加而裂纹长度 c_i 不变, 裂尖应力强度因子逐渐增加; 当第 i 条裂纹扩展时, $a(\sigma_\theta, p, c_i)$ 中的孔压 p 不变而裂纹长度 c_i 瞬间增加。当孔压 p 达到某一值, 在内壁某处将达到抗拉强度, 此时认为材料发生拉伸断裂, 出现新的裂纹。孔壁压力继续上升, 裂尖强度因子再次逐渐增大, 裂纹继续扩展, 长度增加。

3.1 孔壁上的应力分布规律

设孔壁上有一条长 0.5 m 预制裂纹位于内孔壁 0 处, 计算出的孔壁周向应力如图 2 所示。图 2 中横坐标为从裂纹面对面沿内孔壁逆时针转过的角度, 纵坐标表示内壁所受周向应力; 纵坐标为 4.69 MPa 的水平线表示岩石的抗拉强度, 曲线表示在孔压 $p = 4.006$ MPa 作用下, 裂纹长度从 0.5 mm 扩展到 7.0 mm 过程中圆孔内壁上的拉应力分布。当裂纹长度为 0.5 mm 时, 在裂纹 180 处 (为了表述方便将裂缝位置顺时针转动 180° 两侧附近 30° 范围内, 曲线陡峭, 孔壁周向拉应力下降明显, 表明其显著卸载范围约为 $\pm 30^\circ$ (与裂纹长度及内径比值有关), 而 120 到 150° 和 210 到 240° 之间区域变化缓慢, 表明有影响的范围是 $\pm 60^\circ$ (与图 2 中交点所在值比较)。随着裂纹的不断扩展, 应力卸载区逐渐增大, 而应力也不断向裂纹对面 0° (360°) 处集中, 这是导致初始裂纹对面拉伸断裂的直接原因。当裂纹长度扩展到 7.0 mm 时, 0° (360°) 处的周向拉应力达到岩石的抗拉强度, 从而发生拉伸断裂, 出现新裂纹。此后, 孔压不断增加, 初始长裂纹首先扩展而后新生短裂纹扩展, 最后初始及新生两裂纹交替扩展, 最终贯穿形成两条长裂纹。

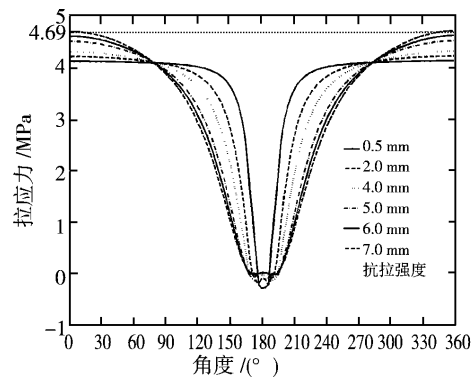


图 2 一条裂纹影响下孔壁拉应力分布

图 3 中水平线代表岩石抗拉强度, 曲线 1 到曲线 5 表示裂纹扩展过程中内壁上的拉应力分布。从拉应力/拉应力峰值逐渐减小可以看出, 当裂纹扩展

时,它排斥了其它地方出现拉伸断裂裂纹的机会。在进行爆燃开裂实验的 44 块实验试样中,有 10 块产生两条裂纹。另外可看到,在图 2 中所有曲线交于两点,它不随裂纹长度改变,只是压力跟圆孔内外半径的函数,笔者称之为驻点。驻点所在角度分别为 81 和 279°,它把应力分为高应力区、低应力区。驻点处的周向应力值恰好就是没有裂纹的厚壁筒的解析值。计算发现:处在高应力区的微裂纹容易扩展,这与裂纹的应力卸载区密切相关。

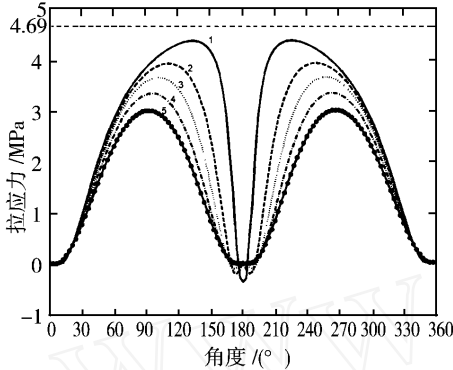


图 3 新生裂纹后孔壁上拉应力分布

3.2 缝长对裂纹起裂扩展规律的影响

图 4 为计算出缝长对裂纹裂扩展的影响的曲线,横坐标表示无因次缝长(缝长与内半径之比),纵坐标是无因次拉应力(拉应力与抗拉强度之比),不同曲线代表不同影响角度,反映不同缝长的影响范围。从图 4 可以看到初始裂纹长度对微裂纹起裂扩展有着重要的影响:缝越长,影响范围越大,应力越集中,裂纹越易扩展;反之亦然。

4 结论及建议

- 1) 孔壁周围的应力分布计算,证明了实验中不可能出现一条裂纹的现象。
- 2) 裂纹邻域有应力卸载区,卸载区附近不会产

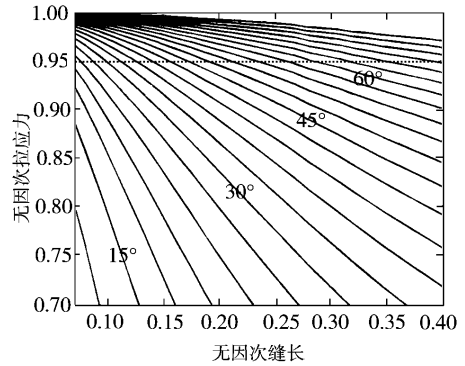


图 4 缝长与拉应力无因次图版

生新的裂纹,裂纹更不会扩展。

3) 初始裂纹的对面会受到应力集中的影响,容易诱导产生新裂纹并促进其扩展。

4) 裂纹长度对裂纹扩展有着重要影响,裂纹越长其越容易最先起裂和扩展。

5) 计算发现,裂纹的起裂扩展还受原始裂纹条数及分布位置的影响,有必要对多条初始裂纹分布的情况进行数值模拟研究,以便更加深入地研究爆生气体作用下孔壁岩石的开裂规律。

参 考 文 献

- [1] 蒋金宝,林英松,丁雁生,等. 低渗透油藏改造技术的研究及发展[J]. 钻采工艺,2005,28(5):50-53.
- [2] 杨小林,王梦恕. 爆生气体作用下岩石裂纹的扩展机理[J]. 爆炸与冲击,2001,21(2):111-116.
- [3] Kutter H K. On the fracture process in blasting [J]. Int J Rock Mech Min Sci,1971,8(2):181-202.
- [4] Rice J R. New perspectives on crack and fault dynamics[C]// Aref H,Phillips J W. Mechanics for a new millennium:proceedings of the 20th International Congress of Theoretical and Applied Mechanics, Chicago, August 27- September 2, 2000 [C]. Netherlands Dordrecht :Kluwer Academic Publishers,2001:1-23.
- [5] 林英松,蒋金宝,朱天玉,等. 爆炸载荷对水泥试样损伤破坏规律研究[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2006,30(3):55-58.
- [6] 李宁,陈莉静,张平. 爆生气体驱动岩石裂纹动态扩展分析[J]. 岩土工程学报,2006,28(4):460-463.

[审稿 葛洪魁]

Effects of Damages on Gas-Driven Radial Fracture Induced by Blasting within a Cavity

Lin Yingsong¹ Sun Fengcheng¹ Ding Yansheng² Fu Yingjun³ Jiang Jinbao¹ Wang Li¹

(1. College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (Huadong), Dongying, Shandong, 257061, China; 2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100081, China; 3. Research Center, China National Offshore Oil Corporation, Beijing, 100027, China)

Abstract : Based on near static assumption, the finite element software ANSYS9.0 was used to numerically simulate the cracking of cement samples under the blasting gas. Based on the numerical simulation results, the impacts of the existing of initial fracture on cracking of the borehole rock under the blasting gas were analyzed. The basic law of the stress distribution on the borehole and creation and extending of the fracture were summarized. The calculation based on the simplified model can explain the reason why more than one fractures were created in the experimental study. The comparison of the calculation results and the experimental results indicates that the model is reasonable and the assumption of additional tension based on fracturing theory can represent the actual condition.

Key words : explosive fracturing; crack; numerical simulation; stress analysis