



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 105332685 B

(45)授权公告日 2018.05.25

(21)申请号 201510778950.1

(22)申请日 2015.11.13

(65)同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 105332685 A

(43)申请公布日 2016.02.17

(73)专利权人 西南石油大学

地址 610500 四川省成都市新都区新都大道8号

专利权人 中国石油化工股份有限公司华东油气分公司石油工程技术研究院

(72)发明人 郭建春 何颂根 张龙胜 赵志红

熊炜 徐骞 赖建林

(74)专利代理机构 成都金英专利代理事务所

(普通合伙) 51218

代理人 袁英

(51)Int.Cl.

E21B 43/267(2006.01)

(56)对比文件

CN 103133028 A,2013.06.05,

CN 104678432 A,2015.06.03,

CN 104678434 A,2015.06.03,

CN 103995947 A,2014.08.20,

CN 104570128 A,2015.04.29,

US 5424285 A,1995.06.13,

审查员 王飞

权利要求书2页 说明书5页

(54)发明名称

一种提高煤层复杂裂缝支撑效果的支撑剂多级铺置方法

(57)摘要

本发明公开了一种提高煤层复杂裂缝支撑效果的支撑剂多级铺置方法,包括:A、计算脆性组分含量 W 影响的煤层复杂裂缝类型等级评分 M_1 ;B、计算单轴强度比 R 影响的煤层复杂裂缝类型等级评分 M_2 ;C、计算水平应力差异系数 δ 影响的煤层复杂裂缝类型等级评分 M_3 ;D、计算平均割理密度 $\bar{\omega}$ 影响的煤层复杂裂缝类型等级评分 M_4 ;E、计算割理逼近角 β 影响的煤层复杂裂缝类型等级评分 M_5 ;F、计算综合以上五个因素影响的煤层复杂裂缝类型等级评分 M ,从而标定煤层复杂裂缝类型;G、设计针对每种裂缝类型的多粒径支撑剂组合多级铺置。本发明原理可靠,操作简便,能够为煤层气藏水力压裂方案设计中支撑剂优化铺置提供指导,以此获得与储层及水力裂缝系统更加匹配的支撑效果。

1. 一种提高煤层复杂裂缝支撑效果的支撑剂多级铺置方法,依次包括以下步骤:

A、根据煤层的脆性组分含量 W 的高低,计算脆性组分含量 W 影响的煤层复杂裂缝类型等级评分 M_1 ,评分标准如下:

当 $W < 10\%$ 时, $M_1=0$;

当 $10\% \leq W < 20\%$ 时, $M_1=1$;

当 $20\% \leq W < 30\%$ 时, $M_1=2$;

当 $30\% \leq W < 40\%$ 时, $M_1=3$;

当 $W \geq 40\%$ 时, $M_1=4$;

所述脆性组分含量 W 为煤层中惰质组含量和非粘土无机矿物含量的总和;

B、根据煤层的单轴强度比 R 的大小,计算单轴强度比 R 影响的煤层复杂裂缝类型等级评分 M_2 ,评分标准如下:

当 $R < 10$ 时, $M_2=0$;

当 $10 \leq R < 15$ 时, $M_2=1$;

当 $15 \leq R < 20$ 时, $M_2=2$;

当 $20 \leq R < 25$ 时, $M_2=3$;

当 $R \geq 25$ 时, $M_2=4$;

所述单轴强度比 R 为煤层单轴抗压强度 σ_c 与单轴抗拉强度 σ_t 的比值;

C、根据煤层的水平应力差异系数 δ 的大小,计算水平应力差异系数 δ 影响的煤层复杂裂缝类型等级评分 M_3 ,评分标准如下:

当 $\delta \geq 0.48$ 时, $M_3=0$;

当 $0.36 \leq \delta < 0.48$ 时, $M_3=1$;

当 $0.24 \leq \delta < 0.36$ 时, $M_3=2$;

当 $0.12 \leq \delta < 0.24$ 时, $M_3=3$;

当 $\delta < 0.12$ 时, $M_3=4$;

所述水平应力差异系数 δ 为煤层的最大水平主应力 σ_H 与最小水平主应力 σ_h 的差值除以最小水平主应力 σ_h 的所得值;

D、根据煤层的平均割理密度 $\bar{\rho}$,计算平均割理密度 $\bar{\rho}$ 影响的煤层复杂裂缝类型等级评分 M_4 ,评分标准如下:

当 $\bar{\rho} < 25$ 时, $M_4=0$;

当 $25 \leq \bar{\rho} < 50$ 时, $M_4=1$;

当 $50 \leq \bar{\rho} < 75$ 时, $M_4=2$;

当 $75 \leq \bar{\rho} < 100$ 时, $M_4=3$;

当 $\bar{\rho} \geq 100$ 时, $M_4=4$;

所述煤层的平均割理密度 $\bar{\rho}$ 为端割理密度 ρ_e 和面割理密度 ρ_f 的平均值;

E、根据煤层的割理逼近角 β ,计算割理逼近角 β 影响的煤层复杂裂缝类型等级评分 M_5 ,评分标准如下:

当 $72^\circ \leq \beta < 90^\circ$ 时, $M_5=0$;

当 $54^\circ \leq \beta < 72^\circ$ 时, $M_5=1$;

当 $36^\circ \leq \beta < 54^\circ$ 时, $M_5=2$;

当 $18^\circ \leq \beta < 36^\circ$ 时, $M_5=3$;

当 $0^\circ \leq \beta < 18^\circ$ 时, $M_5=4$;

所述割理逼近角 β 通过下式计算得到:

$$\beta = |\theta_4 - \theta_5| = |(90 - \theta_4) - \theta_5| = |90 - 2\theta_4|$$

式中: θ_4 为面割理走向与最大水平主应力方向夹角, $^\circ$,

θ_5 为端割理走向与最大水平主应力方向夹角, $^\circ$;

F、采用下式计算综合以上五个因素影响的煤层复杂裂缝类型等级评分 M :

$$M = \frac{\sum_{i=1}^5 (b_i \cdot M_i)}{\sum_{i=1}^5 b_i}$$

式中: b_i 为 M_1 、 M_2 、 M_3 、 M_4 、 M_5 所占权重,分别为0.15、0.15、0.25、0.25、0.2,

从而根据 M 值标定煤层复杂裂缝类型:

当 $0 \leq M \leq 1$ 时,煤层复杂裂缝类型为A型,即双翼缝型;

当 $1 < M \leq 2$ 时,煤层复杂裂缝类型为B型,即多裂缝型;

当 $2 < M \leq 3$ 时,煤层复杂裂缝类型为C型,即树枝型;

当 $3 < M \leq 4$ 时,煤层复杂裂缝类型为D型,即网络型;

G、根据煤层复杂裂缝类型,设计针对每种裂缝类型的多粒径支撑剂组合多级铺置:

针对A型裂缝,设计20/40目、30/50目、40/70目支撑剂体积比例为7: 2: 1;

针对B型裂缝,设计20/40目、30/50目、40/70目支撑剂体积比例为3: 2: 1;

针对C型裂缝,设计20/40目、30/50目、40/70目支撑剂体积比例为4: 3: 2;

针对D型裂缝,设计20/40目、30/50目、40/70目支撑剂体积比例为1: 1: 1。

一种提高煤层复杂裂缝支撑效果的支撑剂多级铺置方法

技术领域

[0001] 本发明涉及石油领域煤层气藏水力压裂设计中的支撑剂优化铺置方法,以保证支撑剂能够有效支撑煤层复杂裂缝,提高压裂增产效果。

背景技术

[0002] 我国煤层气资源十分丰富,埋深2000m以浅的总资源量达36.8万亿方。我国煤层产量目前保持良好的增产态势,但总产量仍然不高,2014年钻井开采产量仅36亿方。综合来看,我国煤层气开发潜力巨大,仍急需技术攻关提高开发效果。

[0003] 煤层气的赋存状态包含吸附态、游离态和溶解态,其中75-90%以吸附态赋存于煤层中。同时煤层中高度含水,煤层气的采出需经过排水、解吸、扩散、渗流、产出几个过程。因此如何最大化改善地层渗流条件,促进排水降压解吸是煤层气开发设计的核心。除此之外,我国煤层气储层具有低含气饱和度、低渗透率、低压力的“三低”特征。

[0004] 针对煤层气以上的储层特征,水力压裂通过将高压液体注入煤层,在储层中形成人工裂缝及沟通延伸煤层割理;随之向动态裂缝中注入携带支撑剂的液体,经返排后支撑剂停留于复杂裂缝中,形成煤层具有一定导流能力的高速渗流通道;最终扩大渗流及降压面积,从而促进排水、降压、解吸、扩散、渗流整个过程,使得煤层气快速产出。由此,水力压裂成为煤层气能够经济有效开发的关键技术之一。

[0005] 支撑剂的铺置方式是煤层气水力压裂设计的重要方面,借鉴于常规储层水力压裂造一条高导流能力长裂缝的设计思路,目前煤层气储层水力压裂仍以单一粒径加砂为主,以实现主裂缝的单级有效支撑。

[0006] 受控于煤层组分及胶结结构,煤层力学性质较脆,从而导致煤岩易碎;相对于常规储层更浅的埋深,煤层地应力相对更低,有利于裂缝延伸;同时煤层发育大量割理(由端割理和面割理组合而成的正交裂缝系统);而目前煤层压裂工艺以成本较低的清水压裂为主;在低粘压裂液(清水)作用下,割理易被沟通并延伸形成裂缝系统。因此,煤层实际水力裂缝形态较为复杂。煤层中复杂裂缝有开度较大的主干裂缝,也有开度较小的次裂缝及开度微小的微裂缝。由此,单一粒径单级均匀铺置难以对复杂裂缝进行有效支撑,需要根据多种粒径,基于煤层裂缝复杂类型,合理设计多粒径多级组合铺置,使得复杂裂缝中主-次-微裂缝均具有足够导流能力且有效组合匹配。

发明内容

[0007] 本发明的目的在于提供一种提高煤层复杂裂缝支撑效果的支撑剂多级铺置方法,该方法原理可靠,操作简便,能够为煤层气藏水力压裂方案设计中支撑剂优化铺置提供指导。

[0008] 为达到以上技术目的,本发明提供以下技术方案。

[0009] 本发明根据煤层脆性组分含量、单轴强度比、水平地应力差异系数、平均割理密度及割理逼近角,将煤层复杂裂缝类型分为四种小类,针对不同的煤层复杂裂缝类型,分别设

计不同的支撑剂组合多级支撑,以此获得与储层及水力裂缝系统更加匹配的支撑效果。

[0010] 一种提高煤层复杂裂缝支撑效果的支撑剂多级铺置方法,依次包括以下步骤:

[0011] A、根据煤层的脆性组分含量 W 的高低,计算脆性组分含量 W 影响的煤层复杂裂缝类型等级评分 M_1 ,评分标准如下:

[0012] 当 $W < 10\%$ 时, $M_1 = 0$;

[0013] 当 $10\% \leq W < 20\%$ 时, $M_1 = 1$;

[0014] 当 $20\% \leq W < 30\%$ 时, $M_1 = 2$;

[0015] 当 $30\% \leq W < 40\%$ 时, $M_1 = 3$;

[0016] 当 $W \geq 40\%$ 时, $M_1 = 4$;

[0017] B、根据煤层的单轴强度比 R 的大小,计算单轴强度比 R 影响的煤层复杂裂缝类型等级评分 M_2 ,评分标准如下:

[0018] 当 $R < 10$ 时, $M_2 = 0$;

[0019] 当 $10 \leq R < 15$ 时, $M_2 = 1$;

[0020] 当 $15 \leq R < 20$ 时, $M_2 = 2$;

[0021] 当 $20 \leq R < 25$ 时, $M_2 = 3$;

[0022] 当 $R \geq 25$ 时, $M_2 = 4$;

[0023] C、根据煤层的水平应力差异系数 δ 的大小,计算水平应力差异系数 δ 影响的煤层复杂裂缝类型等级评分 M_3 ,评分标准如下:

[0024] 当 $\delta \geq 0.48$ 时, $M_3 = 0$;

[0025] 当 $0.36 \leq \delta < 0.48$ 时, $M_3 = 1$;

[0026] 当 $0.24 \leq \delta < 0.36$ 时, $M_3 = 2$;

[0027] 当 $0.12 \leq \delta < 0.24$ 时, $M_3 = 3$;

[0028] 当 $\delta < 0.12$ 时, $M_3 = 4$;

[0029] D、根据煤层的平均割理密度 $\bar{\omega}$,计算平均割理密度 $\bar{\omega}$ 影响的煤层复杂裂缝类型等级评分 M_4 ,评分标准如下:

[0030] 当 $\bar{\omega} < 25$ 时, $M_4 = 0$;

[0031] 当 $25 \leq \bar{\omega} < 50$ 时, $M_4 = 1$;

[0032] 当 $50 \leq \bar{\omega} < 75$ 时, $M_4 = 2$;

[0033] 当 $75 \leq \bar{\omega} < 100$ 时, $M_4 = 3$;

[0034] 当 $\bar{\omega} \geq 100$ 时, $M_4 = 4$;

[0035] E、根据煤层的割理逼近角 β ,计算割理逼近角 β 影响的煤层复杂裂缝类型等级评分 M_5 ,评分标准如下:

[0036] 当 $72^\circ \leq \beta < 90^\circ$ 时, $M_5 = 0$;

[0037] 当 $54^\circ \leq \beta < 72^\circ$ 时, $M_5 = 1$;

[0038] 当 $36^\circ \leq \beta < 54^\circ$ 时, $M_5 = 2$;

[0039] 当 $18^\circ \leq \beta < 36^\circ$ 时, $M_5 = 3$;

[0040] 当 $0^\circ \leq \beta < 18^\circ$ 时, $M_5 = 4$;

[0041] F、根据步骤A~E中分别计算的各个因素影响的煤层复杂裂缝类型等级评分 M_1 、 M_2 、 M_3 、 M_4 、 M_5 ，采用下式计算综合以上五个因素影响的煤层复杂裂缝类型等级评分 M ：

$$[0042] \quad M = \frac{\sum_{i=1}^5 (b_i \cdot M_i)}{\sum_{i=1}^5 b_i}$$

[0043] 式中： M_i 分别指 M_1 、 M_2 、 M_3 、 M_4 、 M_5 ； b_i 为 M_1 、 M_2 、 M_3 、 M_4 、 M_5 所占权重，分别为0.15、0.15、0.25、0.25、0.2。

[0044] 采用以下标准，根据 M 值标定煤层复杂裂缝类型：

[0045] 当 $0 \leq M \leq 1$ 时，煤层复杂裂缝类型为A型（双翼缝型）；

[0046] 当 $1 < M \leq 2$ 时，煤层复杂裂缝类型为B型（多裂缝型）；

[0047] 当 $2 < M \leq 3$ 时，煤层复杂裂缝类型为C型（树枝型）；

[0048] 当 $3 < M \leq 4$ 时，煤层复杂裂缝类型为D型（网络型）；

[0049] G、根据步骤F中标定的煤层复杂裂缝类型，设计针对每种裂缝类型的多粒径支撑剂组合多级铺置：

[0050] ①针对A型（双翼缝型）裂缝，设计20/40目、30/50目、40/70目支撑剂体积比例为7：2：1；

[0051] ②针对B（多裂缝型）型裂缝，设计20/40目、30/50目、40/70目支撑剂体积比例为3：2：1；

[0052] ③针对C型（树枝型）裂缝，设计20/40目、30/50目、40/70目支撑剂体积比例为4：3：2；

[0053] ④针对D型（网络型）裂缝，设计20/40目、30/50目、40/70目支撑剂体积比例为1：1：1。

[0054] 以上①~④情况压裂过程中泵注顺序均为先泵注40/70目支撑剂，再泵注30/50目支撑剂，最后泵注20/40目支撑剂。

[0055] 本发明中，所述步骤A中，脆性组分含量 W 为煤层中惰质组含量和非粘土无机矿物含量的总和（%）。煤层中脆性组分含量是决定煤岩力学特征的内在因素，从而也影响煤层裂缝复杂特征。脆性组分含量越高，煤层裂缝越复杂， M_1 越高。

[0056] 所述步骤B中，单轴强度比 R 为煤层单轴抗压强度 σ_c 与单轴抗拉强度 σ_t 的比值（无因次）。煤岩单轴压强度 σ_c 与抗拉强度 σ_t 的差异反映煤岩的力学脆性，差异越大，脆性越强，煤岩更容易碎裂，煤层裂缝越复杂， M_2 越高。

[0057] 所述步骤C中，水平应力差异系数 δ 为煤层的最大水平主应力 σ_H 与最小水平主应力 σ_h 的差值除以最小水平主应力 σ_h 的所得值（无因次）。煤层在地层条件下的水平地应力差异越小，即水平应力差异系数 δ 越小，裂缝遭遇煤层割理越容易转向及延割理延伸，因而煤层裂缝越复杂， M_3 越高。

[0058] 所述步骤D中，煤层的平均割理密度 $\bar{\omega}$ 为端割理密度 ω_s 和面割理密度 ω_f 的平均值。割理密度为单位长度下的割理发育条数（条/m），煤层割理分为走向相互正交的端割理和面割理，煤层割理越发育，割理密度越高，水力裂缝越容易沟通割理系统，煤层裂缝越复杂， M_4 越高。

[0059] 所述步骤E中，割理逼近角 β 通过下式计算得到：

[0060] $\beta = |\theta_f - \theta_s| = |(90 - \theta_s) - \theta_s| = |90 - 2\theta_s|$

[0061] 式中： θ_f 为面割理走向与最大水平主应力方向夹角，°，

[0062] θ_s 为端割理走向与最大水平主应力方向夹角，°。

[0063] 当主裂缝延伸方向（水平最大主应力方向）与割理（端割理和面割理）走向的夹角接近0°时延割理延伸；当主裂缝延伸方向与割理走向垂直成90°时直接穿过割理延伸；当主裂缝延伸方向与割理走向在45°左右，最容易主裂缝和割理同时延伸形成裂缝网络，煤层裂缝形态最复杂。由于端割理和面割理的走向相互正交，因此割理逼近角 β 越小，主裂缝延伸方向与割理走向越接近45°，煤层裂缝越复杂， M_5 越高。

[0064] 所述步骤G中，A型（双翼缝型）裂缝，裂缝以单一主裂缝为主，次-微裂缝少，因而以20/40目支撑剂铺置为主，30/50目、40/70目支撑剂使用较少。从A型~D型裂缝，裂缝形态逐渐变复杂，开度较大的主干裂缝所占比例逐渐降低，而开度较小的次裂缝和开度微小的微裂缝所占比例逐渐增加，因而30/50目、40/70目使用比例逐渐增加。最终使得支撑剂的组合多级铺置匹配复杂裂缝中主裂缝、次裂缝、微裂缝的多级有效支撑，从而提高支撑有效率，进而提高压裂效果。

[0065] 与现有单级铺置方法相比，本发明具有以下有益效果：现有单级铺置方法仅能有效支撑A型（双翼缝型）裂缝，对于裂缝形态较为复杂的B型（多裂缝型）、C型（树枝型）、D型（网络型）裂缝，支撑有效率不高。本发明能够根据煤层复杂裂缝类型的不同，设计不同的多级铺置方式，从而满足不同类型煤层裂缝的有效支撑，使得压裂方案中的支撑剂铺置设计更有针对性，满足不同地质特征下煤层的压裂需求。

具体实施方式

[0066] 下面结合实施例详细描述本发明的实施方式。以延川南煤层气田某煤层气井YX井为例，该井垂直深度1420m，储层厚度为4.6m。

[0067] A、根据岩心测试得到煤层的脆性组分含量 W 为30.8%（惰质组含量23.6%、非粘土无机矿物含量7.2%），计算脆性组分含量 W 影响的煤层复杂裂缝类型等级评分 $M_1=3$ ；

[0068] B、根据岩心测试得到煤层单轴抗压强度 σ_c 为17.5MPa，单轴抗拉强度 σ_t 为0.93MPa，计算单轴强度比 R 为18.8，计算单轴强度比 R 影响的煤层复杂裂缝类型等级评分 $M_2=2$ ；

[0069] C、储层最大水平地应力 σ_H 为28.4MPa，最小水平主应力 σ_h 为21.3MPa，计算水平应力差异系数 δ 为0.33，计算水平应力差异系数 δ 影响的煤层复杂裂缝类型等级评分 $M_3=2$ ；

[0070] D、通过岩心统计得到煤层端割理密度 ω_s 为70条/m，面割理密度 ω_f 120条/m，计算平均割理密度 $\bar{\omega}$ 为95条/m，计算平均割理密度 $\bar{\omega}$ 影响的煤层复杂裂缝类型等级评分 $M_4=3$ ；

[0071] E、本地区水平最大主应力方位为NE95°，端割理走向NE62°，面割理走向NE152°， θ_f 为57°， θ_s 为33°。利用公式(1)计算割理逼近角 β 为24°，计算割理逼近角 β 影响的煤层复杂裂缝类型等级评分 $M_5=3$ ；

[0072] F、根据计算的 M_1 、 M_2 、 M_3 、 M_4 、 M_5 ，采用公式(2)，计算综合以上五个因素影响的煤层复杂裂缝类型等级评分 $M=2.6$ ($2 < M \leq 3$)，标定煤层复杂裂缝类型为C型（树枝型）；

[0073] G、根据煤层复杂裂缝类型标定结果为C型裂缝（树枝型），选择20/40目、30/50目、40/70目支撑剂比例为4:3:2进行多级支撑，压裂过程中泵注顺序为先泵注40/70目支撑剂，再泵注30/50目支撑剂，最后泵注20/40目支撑剂。

[0074] 目前该方法已在延川南煤层气田展开了30余井次的现场实施应用,取得了良好效果。与区块相邻未采用该方法的煤层气井相比,采用本方法后初期平均日产气量增加 $185.3\text{m}^3/\text{d}$,见气时间平均提前108d。