

页岩气井双层管柱的设计与开发

张旭, 张哲平, 吴永超, 吴亮亮, 周家祥, 黄勇智

(天津钢管制造有限公司, 天津 300301)

摘要: 针对页岩气水平井生产套管变形率高的问题, 提出一种双层管柱设计方案。研究发现双层管柱可采用两次下入、分次固井实现; 内层管柱采用悬挂方式挂于造斜点附近, 两层套管间的间隙满足固井需要。内层套管的居中度显著影响双层套管抗挤毁强度, 固井质量显著影响双层管柱抗挤毁强度。特别指出, 在均载且固井质量好的条件下, 双层管柱可承受的抗挤毁强度远大于内外层套管抗挤毁强度之和; 可采用理论公式近似计算双层管柱的抗挤毁强度。该研究成果可为井深结构设计及双层管柱抗挤毁强度值计算提供参考。

关键词: 套管; 页岩气; 井深结构; 双层管柱; 抗挤毁值; 固井质量

DOI:10.19938/j.steelpipe.1001-2311.2021.4.46.50

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Design and Development of Dual-layer String for Service in Shale Gas Well

ZHANG Xu, ZHANG Zheping, WU Yongchao, WU Liangliang, ZHOU Jiexiang, HUANG Yongzhi

(Tianjin Pipe Corporation, Tianjin 300301, China)

Abstract: In view of the high casing deformation rate as occurring during the operation of the shale gas horizontal well, a dual-layer string design is proposed. It is identified via relevant study that the dual-layer string service can be realized by means of running twice and staged cementing; the inner casing string is hanged near the A point, and the clearance between the two casing layers meets the need of cementing; the centrality of the inner casing affects obviously the collapse strength of the two-layer casing, while the cementing quality affects remarkably the collapse strength of the two-layer string; and it is emphasized that in case of uniform load and good cementing quality, the collapse strength value of the two-layer string is far beyond the sum of the collapse strength values of both the inner and outer casings; and the approximate collapse strength value of the two-layer string can be calculated by relevant theoretical formula. The above mentioned research achievement is worth using as the reference for the design of well depth structure, and the calculation of collapse resistance value of the two-layer string.

Key words: casing; shale gas; well depth structure; two-layer string; collapse resistance value; cementing quality

页岩气开发成为非常规油气开发的重要领域, 目前页岩气开发主要采用水平井和大规模体积压裂技术实现页岩气的工业开采, 随之而来的问题是生产套管产生不同程度的变形, 套管变形阻碍压裂作业工具通过, 被迫采用小直径射孔枪及桥塞工具, 严重的甚至导致生产管柱丢失压裂段, 进而影响地层体积压裂改造效果和单井产气量。国内专家学者

对套管的变形形态和机制做了大量研究, 认为套管变形主要是地层滑移导致的套管被挤扁^[1-6], 致使无法进行后续压裂作业。部分研究成果认为控制压裂规模和使用更高强度的套管可抑制套管变形^[7-11], 但会降低产气量, 增加生产成本。20世纪90年代初, 中原油田和华北油田曾使用过双层套管, 但当时采用的是工厂预制模式或井下装注水泥阀方式^[12-14], 取得良好的封堵盐膏层效果, 但在页岩气工况下缺乏该方面的研究, 基于此, 设计一种双层管柱以提高抗外载能力。

张旭(1984-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事油井管研发工作。

1 双层管柱设计方案

井深结构：从井深为 0 开始钻进，称为第一次开钻(简称一开)；表层套管固井后再次开钻，称为第二次开钻(简称二开)；技术套管固井后再次开钻，称为第三次开钻(简称三开)；若三开完钻后不能达到目的层深度，需要下入技术套管固井后再次开钻，称为第四次开钻(简称四开)，四开次若可钻至目的层深度即可下入生产套管。

常规页岩气井深结构主要为一开 $\Phi 339.72$ mm/二开 $\Phi 244.48$ mm/三开 $\Phi 139.70$ mm，生产套管一般为 TP125SG $\Phi 139.70$ mm \times 12.70 mm TP-G2 HC，生产管柱为全井段应用，造斜点以下与地层采用水泥胶结方式固井完成，如图 1 所示。该井深结构特点是成熟稳定、配套工具齐全，但在压裂过程中经常发生套管变形。

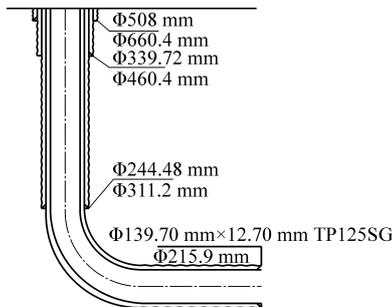


图 1 四川某井井深结构示意图

以往使用的双层管柱主要采用工厂预制成型模式，如中原油田卫 281 井，预制 200 m 长的 $\Phi 193.68$ mm \times 12.70 mm 与 $\Phi 139.70$ mm \times 10.54 mm P110 双层管柱，下入深度为 2 630~2 830 m^[12-14]。 $\Phi 168.28/114.3$ mm 双层管柱结构设计为一开 $\Phi 339.72$ mm/二开 $\Phi 244.48$ mm/三开 $\Phi 168.28$ mm/四开 $\Phi 114.3$ mm，该结构相对常规结构增加一层套管，即二开 $\Phi 244.48$ mm 表层套管固井后，全井下入 $\Phi 168.28$ mm 套管，并在垂直段和水平段采用两种不同壁厚套管，以达到降重量和降成本的目的，由于三开技术套管为 $\Phi 168.28$ mm \times 13.40/10.59 mm 套管，四开生产套管采用 $\Phi 114.3$ mm \times 9.65 mm 规格套管，四开生产套管挂于造斜点以上 300 m 处，双层管柱井深结构如图 2 所示。

2 双层管柱抗挤毁试验研究

2.1 居中度对双层管柱抗挤毁性能的影响

双层管柱由内层套管、外层套管及中间水泥环

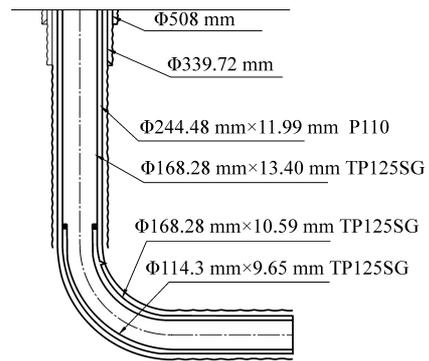


图 2 $\Phi 168.28/114.3$ mm 双层管柱井深结构示意图

组成。为模拟实际工况，试验制备居中和偏心两种双层管柱，研究不同居中度对抗挤毁性能的影响。试验过程中，按照设备最大能力施加外压载荷，居中双层管柱的外挤试验值达到 221 MPa，远大于内层和外层套管挤毁值之和，试验后样管完好，未发生变形，如图 3~4 所示。而偏心管柱的挤毁值为 138 MPa，样管在偏心处水泥环薄弱处发生挤毁，如图 5~6 所示。试验表明，内外层套管的居中度对双层管柱的挤毁值有显著影响。而有关报道认为内层套管偏心对双层套管抗挤毁性能无影响^[15]，显然，通过本试验结果，证明了这种说法是错误的。



图 3 居中双层管柱试验中

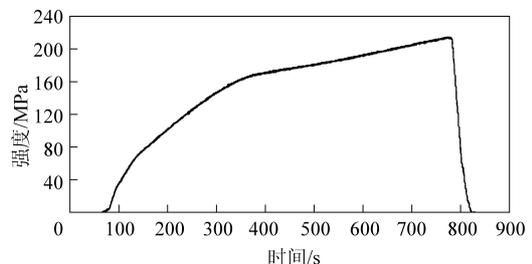


图 4 居中管柱试验加载曲线

2.2 固井质量对双层管柱抗挤毁性能的影响

由于实际固井质量不可能像实验室这么理想，因此，考虑到窜槽等因素，以样管环空填入长方形



图5 偏心管柱挤毁形貌

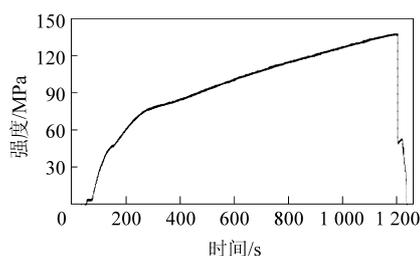


图6 偏心管柱试验加载曲线

泡沫来模拟该工况。试验过程中将设备打到最大能力，当压力达到 83.8 MPa，样管发生挤毁，挤毁值大于内外层套管挤毁值之和，挤毁位置位于缺欠处(即泡沫填充部位)，可见，固井质量对双层管柱

挤毁值带来显著影响。

3 分析与讨论

3.1 双层管柱管串结构设计的可行性

这里的双层管柱结构不同于事先预制好的双层管柱，地面预制好双层管柱由于存在下入困难等情况，本案双层管柱的实现方式为分开次下入，分开次固井。主要是二开套管固井后，三开完钻后下入 $\Phi 168.28$ mm 技术套管。在造斜点上方悬挂 $\Phi 114.3$ mm 技术套管，生产管柱垂直段为 $\Phi 168.28$ mm \times 13.40 mm 单层套管，生产管柱水平段为双层管柱 $\Phi 168.28/114.3$ mm。

3.2 安全系数校核及环空间隙

三开及四开套管的使用性能参数见表 1，内层、外层套管复合后的双层套管使用性能见表 2，根据前面的研究结果，双层套管的抗挤毁性能至少为内外层套管挤毁值之和，即取二者之和。由于 $\Phi 114.3$ mm \times 9.65 mm 生产套管为小接箍套管，接头内压效率低，考虑到内压和外压只是受力方向的不同，由外压试验结果可知双层管柱的抗内压能力也应为内外层套管内压之和，设计值取外层套管抗内压值。

表1 $\Phi 168.28/114.3$ mm 双层管柱用套管规格及使用性能

| 开次 | 套管类型 | 直径/mm | 壁厚/mm | 钢级 | 扣型 | 接箍直径/mm | 抗挤毁强度/MPa | | 连接强度/kN |
|----|------|--------|-------|---------|-------|---------|---------------|-----|--------------------|
| | | | | | | | 内压 | 外压 | |
| 三开 | 技术套管 | 168.28 | 13.40 | TP125SG | TP-G2 | 190 | 120 | 131 | 5 619 |
| 三开 | 技术套管 | 168.28 | 10.59 | TP125SG | TP-G2 | 185 | 95 | 90 | 4 521 |
| 四开 | 生产套管 | 114.3 | 9.65 | TP125SG | TP-NF | 120 | 管体 127, 接头 90 | 145 | 管体 2 734, 接头 1 777 |

表2 $\Phi 168.28/114.3$ mm 双层管柱使用井段及使用性能

| 管串套管下入位置 | 类型 | 直径/mm | | 壁厚/mm | | 抗挤毁强度/MPa | | 连接强度/kN | 抗外挤安全系数 |
|----------|------|--------|-------|-------|------|------------|------------|--------------|---------|
| | | 外层 | 内层 | 外层 | 内层 | 内压 | 外压 | | |
| 直井段 | 单层套管 | 168.28 | - | 13.40 | - | 120 | 131 | 5 619 | 2.08 |
| 弯曲段、水平段 | 双层套管 | 168.28 | 114.3 | 10.59 | 9.65 | ≥ 127 | ≥ 230 | $\geq 5 000$ | 3.65 |

水平段垂直深度 3 500 m，地层压力系数取 2.0，全掏空条件下地层压力为 69 MPa；垂直段垂直深度 3 200 m，地层压力系数取 2.0，全掏空条件下地层压力为 63 MPa。套管安全系数计算见表 2，最大安全系数为 3.65，该数值为保守计算最小数值，在固井质量好的条件下，安全系数更大，对于目前地层滑移量在 25 mm 以内的情况下，双层管柱设计可以降低套管变形量及变形几率。

各开次套管间的环空间隙见表 3，二开套管与三开套管接箍处的最小环空间隙为 31 mm，管体处为 52 mm；三开套管与四开套管接箍处的最小环空间隙为 22 mm，管体处为 28 mm；根据中原油田卫 281 井下井效果，最佳环空间隙为 13~26 mm^[13]，因此设计环空间隙满足固井质量要求。

3.3 双层管柱的抗外挤性能

双层管柱的抗外挤毁性能试验研究结果见表

表3 $\Phi 244.48/168.28/114.3$ mm 双层管柱各开次套管间的环空间隙

| 开次 | 直径/mm | 壁厚/mm | 钢级 | 扣型 | 接箍外径/mm | 接箍与上一开间隙/mm | 管体与上一开间隙/mm |
|----------|--------|-------|---------|-------|---------|-------------|-------------|
| 二开 | 244.48 | 11.99 | P110 | TP-CQ | 269.9 | - | - |
| 三开垂直段 | 168.28 | 13.40 | TP125SG | TP-G2 | 190.0 | 31 | 52 |
| 三开造斜及水平段 | 168.28 | 10.59 | TP125SG | TP-G2 | 185.0 | 36 | 52 |
| 四开垂直段 | 114.3 | 9.65 | TP125SG | TP-NF | 120.0 | 22 | 28 |
| 四开水平段 | 114.3 | 9.65 | TP125SG | TP-NF | 120.0 | 27 | 33 |

4。从表4可以看出：外层和内层套管的抗挤毁强度值分别为 33.5 MPa 和 49.5 MPa，居中和偏心及预制缺欠后的双层管柱抗挤毁强度分别为 221 MPa

和 138 MPa 及 84 MPa。试验结果表明：取极端固井质量不好情况，双层套管的抗挤毁强度值可取内外层套管之和。

表4 双层管柱的抗外挤毁性能试验结果

| 序号 | 钢级 | 直径/mm | | 壁厚/mm | | 抗挤毁强度实测值/MPa | | | | 挤毁状态 | 复合状态(填充物) |
|----|-----|-------|-------|-------|------|--------------|------|------|------|------|-----------|
| | | 外层 | 内层 | 外层 | 内层 | 外层 | 内层 | 内外和 | 双层管柱 | | |
| 1 | J55 | 177.8 | 114.3 | 8.05 | 6.35 | | | 138 | | 挤毁 | 偏心(水泥) |
| 2 | J55 | 177.8 | 114.3 | 8.05 | 6.35 | 33.5 | 49.5 | 83.0 | 221 | 未挤毁 | 居中(水泥) |
| 3 | J55 | 177.8 | 114.3 | 8.05 | 6.35 | | | | 84 | 挤毁 | 居中(泡沫) |

3.3.1 双层管柱抗外挤性能计算

假设材料是各向同性材料，采用弹性力学理论推导套管内外表面及套管与水泥环界面的压力，详细推导过程^[16]不再赘述。

采用双层管柱的目的在于保证管柱完整性，尤其是内层套管不发生损坏，保证钻头工具可以顺利入井。为此，研究重点放在双层管柱内层套管的内表面抗挤毁强度计算方面。

内层套管内表面上的抗挤毁强度 P_{c0} 为：

$$P_{c0} = \frac{2\sigma_y}{K} \left(\frac{D}{t} - 1 \right) \left(\frac{t}{D} \right)^2 \quad (1)$$

$$K = \frac{f_2 f_6}{(f_0 + f_1)(f_4 + f_5) - f_2 t_3}$$

$$f_0 = \frac{1 + \mu_s}{E_s} \cdot \frac{r_2^2 + (1 - 2\mu_s)t_1^2 r_2}{(t_2^2 - 1)}$$

$$f_1 = \frac{1 + \mu_c}{E_c} \cdot \frac{r_3^2 + (1 - 2\mu_c)r_2^2}{(t_2^2 - 1)r_2}$$

$$f_2 = \frac{1 + \mu_c}{E_c} \cdot \frac{r_3^2 + (1 - 2\mu_c)r_2^2 t_2^2}{(t_2^2 - 1)r_2}$$

$$f_3 = \frac{1 + \mu_c}{E_c} \cdot \frac{r_3 + (1 - 2\mu_c)r_3}{t_2^2 - 1}$$

$$f_4 = \frac{1 + \mu_c}{E_c} \cdot \frac{r_3 + (1 - 2\mu_c)r_3 t_2^2}{t_2^2 - 1}$$

$$f_5 = \frac{1 + \mu_s}{E_s} \cdot \frac{(1 - 2\mu_s)r_3^2 + r_4^2}{(t_3^2 - 1)r_3}$$

$$f_6 = \frac{1 + \mu_s}{E_s} \cdot \frac{(1 - 2\mu_s)r_3^2 t_3^2 + r_4^2}{(t_3^2 - 1)r_3}$$

$$t_1 = r_2 / r_1$$

$$t_2 = r_3 / r_2$$

$$t_3 = r_4 / r_3$$

式中 K —— 压力传递系数；

D, t —— 内层套管直径、壁厚，mm；

σ_y —— 内层套管屈服强度，MPa；

f —— 与弹性模量、泊松比、壁厚有关的量；

μ_c —— 套管泊松比；

E_c —— 套管弹性模量，MPa；

μ_s —— 地层泊松比；

E_s —— 地层弹性模量，MPa；

r_1, r_2 —— 内层套管内、外半径，mm；

r_3, r_4 —— 外层套管内、外半径，mm。

采用公式(1)计算双层管柱的抗挤毁强度，计算值为 76 MPa，理论计算值与内、外层套管抗挤毁强度值之和相当，说明采用理论计算双层套管抗挤毁强度值是可行的，与此同时也应该注意到计算值与试验值相差甚大，这与文献[17]报道不一致，文献[17]介绍的双层管柱外层套管 $\Phi 193.68$ mm \times 12.70 mm，内层套管 $\Phi 139.7$ mm \times 10.54 mm P110 钢级，抗挤毁强度计算值为 206 MPa，显然理论公式计算欠准确。若改为 J55 钢级，计算值为 103

MPa, 该结果与206 MPa 这一计算结果相差较大。这是因为计算公式参数主要与内层套管的钢级和规格有关, 当内层套管钢级低、规格小, 计算结果明显偏低。可见, 公式(1)具有一定局限性, 使用过程中应该注意内层套管的钢级及规格。

总之, 双层套管柱试验值证明了在居中且固井质量良好的情况下, 双层管柱实际抗挤毁强度值远大于内外层套管抗挤毁强度值之和。尽管理论计算公式计算结果与实际试验值相差较大, 但可采用理论计算公式保守计算双层管柱抗挤毁强度值。

3.3.2 等效壁厚的单层套管抗外挤性能

等效壁厚是指将水泥环看成套管本体, 形成单层套管。采用公式(2)计算 $\Phi 177.80 \text{ mm} \times 31.80 \text{ mm}$ J55 单层套管的抗挤毁强度值为 127.7 MPa。目前国内尚无该型号套管应用案例, 工厂尚无该型号套管试验数据, 所以抗挤毁强度值仅以计算值为参考。该计算值与表 4 中的试样 1 结果相当, 大于试样 3 结果, 但与试样 2 结果相差较大, 因此, 仅可作为对比分析, 工程设计可适度参考。由于公式(2)假定了物质是均匀的, 即由同一种材料组成, 但双层管柱涉及到了水泥环, 不满足这一条件。总之, 公式(2)的计算值偏于保守, 可以作为工程设计参考。

$$P_c = 2\sigma_y \left(\frac{D}{t} - 1 \right) \left(\frac{t}{D} \right)^2 \quad (2)$$

4 结 语

(1) 设计一种四开(一开 $\Phi 339.72 \text{ mm}$ /二开 $\Phi 244.48 \text{ mm}$ /三开 $\Phi 168.28 \text{ mm}$ /四开 $\Phi 114.3 \text{ mm}$)管串结构, 在造斜点以下实现双层套管, 达到降低套管变形率的目的。

(2) 居中和固井质量影响双层管柱的抗挤毁性能, 随着居中和固井质量下降, 套管抗挤毁性能显著降低。

(3) 内层套管居中且固井质量好的情况下, 双层管柱抗挤毁性能远大于内外层套管抗挤毁性能之和。在现有设备能力条件下, 实测值提高 2.7 倍, 且套管不发生挤毁或变形。

(4) 可采用理论计算公式近似估算双层管柱的抗挤毁性能, 但公式(1)随内外层套管规格和钢级的降低, 计算结果显著小于试验值; 内外层套管规格相差不大且钢级适当时, 计算结果较准确。可将双层管柱简化为单层管柱, 使用公式(2)进行计算分析, 其计算值与偏心双层管柱试验值相当。

5 参考文献

- [1] 李军, 丁士东, 韩礼红, 等. 页岩气多级压裂井筒完整性失效机理及控制方法研究进展[J]. 石油管材与仪器, 2020, 6(4): 10-15.
- [2] 史彬, 陈敏, 饶晓东, 等. 页岩气井套管损坏原因分析及认识[J]. 钢管, 2018, 47(3): 66-71.
- [3] 陈朝伟, 宋毅, 青春, 等. 四川长宁页岩气水平井压裂套管变形实例分析[J]. 地下空间与工程力学, 2019, 15(2): 513-524.
- [4] 路千里, 刘壮, 郭建春, 等. 水力压裂致套管剪切变形机理及套变量计算模型[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(2): 394-401.
- [5] 付盼, 廖明豪, 田中兰, 等. 页岩气水平井压裂中地层滑移数值模拟研究[J]. 石油机械, 2019, 47(4): 73-79.
- [6] 张平, 何昀宾, 刘子平, 等. 页岩气水平井套管的剪切变形试验与套变预防实践[J]. 天然气工业, 2021, 41(5): 84-91.
- [7] 聂荣国, 蔡明杰, 毛良杰, 等. 压裂工况对页岩气套管应力分布的影响[J]. 石油机械, 2019, 47(12): 139-146.
- [8] 杨尚谕, 韩礼红, 王建军, 等. 页岩气井用套管承载特性试验研究[J]. 石油管材与仪器, 2020, 6(4): 69-72.
- [9] 刘奎, 王宴斌, 高德利, 等. 页岩气水平井压裂对井筒完整性的影响[J]. 石油学报, 2016, 37(3): 406-414.
- [10] 张旭, 陈玉朋, 周家祥, 等. 页岩气开采用套管抗外压挤毁性能试验研究[J]. 钢管, 2020, 49(6): 18-21.
- [11] 童亨茂, 刘子平, 张宏祥, 等. 暂堵大裂缝防治页岩气水平井套管变形的理论与方法[J]. 天然气工业, 2021, 41(5): 92-100.
- [12] 王益山, 韩振强, 刘群英, 等. 盐膏层局部双层组合套管固井技术[J]. 石油钻探技术, 1995, 23(3): 37-40, 61.
- [13] 栗广科, 姜应勇. 双层组合套管在定向井盐层段的应用[J]. 断块油气田, 1998, 5(2): 55-57.
- [14] 李学忠, 刘积松, 董事尔. 高压异常地层局部双层组合套管的设计与应用[J]. 断块油气田, 1997, 4(5): 42-46.
- [15] 张效羽. 双层组合套管抵抗非均匀载荷能力分析[J]. 工程力学, 2001(S): 456-259.
- [16] 董事尔, 张文卫, 张先普. 超高压地层组合套管的优化设计[J]. 西南石油学院学报, 1994, 16(3): 55-64.
- [17] 练章华, 张先普, 王钢, 等. 双层组合套管受均匀或非均匀载荷作用的强度分析[J]. 石油钻采工艺, 1994, 16(4): 11-22.

(收稿日期: 2021-05-13)