

Research and Application of Layered Fracturing Sand Blower

Zhizhong Chen, Jinfeng Li, Xiaofang Wu

Downhole Technical Service Company, Bohai Drilling and Exploration Company, Tianjin

Email: xljifeng@petrochina.com.cn

Received: Aug. 1st, 2014; revised: Aug. 28th, 2014; accepted: Sep. 6th, 2014

Copyright © 2014 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

Sand blower is the core tool of layered fracturing pipe string. The roles of sand blower in layered fracturing pipe string are as follows: 1) throttling function of the nozzle is used for hydraulic packer setting; 2) fracturing fluid flow channel is established to implement stratified fracturing of every designed layer. Stratified fracturing sand blower takes use of pitch pressure-out sliding sleeve structure to control the nozzle's closing and opening. Multi-level sand blowers in fracturing pipe string are set up, cooperating with multiple packers. Multi-level sand blowers are set up from the bottom to the top in the fracturing string, working with packers which seal the annular and create separate channels to the layers, through which the fracturing fluids are pumped into the layers. The annulus between separated layers establishes respective channel, which connects fracturing fluid and target layer under construction for layered fracturing. The instantaneous area at the time of sand coming out from the sand blower is set based on parameter setting of the construction emission and fluid's properties. Built-in tube structure is adopted in this new designed sand blower nozzle and ceramics are selected for the nozzle material which could improve the wearing resistance of the nozzle and the stability of throttling performance. Field application has proved that sandblasting equipment has very stable performance.

Keywords

Fracturing of Separate Layers, Sand Blower, Nozzle Diameter, Choke Pressure, 99 Alumina Ceramics

分层压裂喷砂器研制与应用

陈志忠, 李金凤, 吴晓芳

渤海钻探工程公司井下技术服务分公司，天津
Email: xljifeng@petrochina.com.cn

收稿日期：2014年8月1日；修回日期：2014年8月28日；录用日期：2014年9月6日

摘要

喷砂器是分层压裂管串中的一个核心工具。喷砂器在分层压裂管串中的作用为：1) 利用喷嘴的节流功能，坐封液压封隔器。2) 建立压裂液液流通道，实现各个设计层位的分层压裂。分层压裂喷砂器，利用投球憋压打滑套结构，实现喷嘴的封闭与打开。在压裂管串中，设置多级喷砂器，与多个封隔器配合，喷砂器自下而上依次连通施工层位封堵下层，分隔层间环空，即可分别建立压裂液与施工目层通道，实施分层压裂施工。喷砂器喷嘴过流面积，依据施工排量及液性等参数设定。现研发的喷砂器喷嘴采用内置式筒体结构，优选陶瓷为喷嘴材料，提高了喷嘴的耐磨性及节流性能的稳定性。现场应用证实喷砂器具备较稳定的使用性能。

关键词

分层压裂，喷砂器，喷嘴直径，节流压差，99刚玉陶瓷

1. 引言

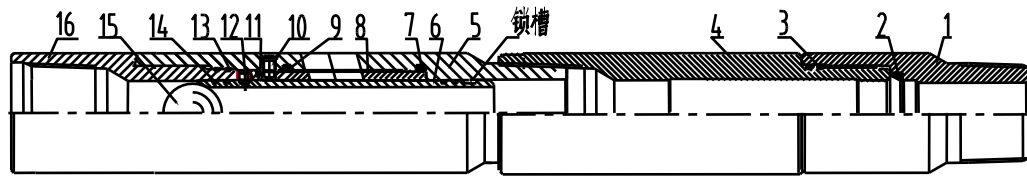
分层压裂是一种较先进的压裂增产措施工艺，该工艺可对同井不同性质油气层进行分层施工，提升了压裂施工的工艺技术水平及经济效益。构成分层压裂管串工具包括：水力锚、液压封隔器、喷砂器。水力锚结构上为内防砂型，用于锚定施工管串；液压封隔器为液压坐封，泄压解封，如 KY344、Y344 等。喷砂器用于建立管串与施工层液流通道，同时利用喷嘴产生节流压差，坐封封隔器。在分层压裂施工中，喷砂器是实现分层作业的灵魂，它既是分层作业的执行者，又是启动封隔器坐封的指挥者。喷砂器的性能优劣及应用是否合理，决定着分层压裂能否实施分层，是否达到真正意义上的分层，以及压裂施工的效果。

目前，针对压裂施工中，喷砂器存在性能不稳定，喷嘴冲蚀扩径，甚至冲损喷砂器本体的技术问题，石油人进行了大量的技术探索，理论上分析降低喷嘴受损机理，设计不同结构的喷砂器，并进行了大量的室内试验及现场应用检验，但终未找到满意技术方案。本文介绍分层压裂喷砂器，配伍于液压坐封封隔器构成压裂管串，喷砂器的设计研发，重点解决两个方面的技术问题。首先利用流体力学原理，确定喷砂器喷嘴直径值，并通过实际应用验证其应用效果，摸索出喷嘴设计直径和施工磨损增径量与封隔器坐封压差的关系，解决了确保封隔器重复坐封的技术问题；其二分析喷砂器在应用中受损机理，利用整体喷嘴保护喷砂器主体结构。优选 99 陶瓷材料制作喷嘴，极大地提高了喷嘴耐冲蚀性能，保证了喷嘴应用性能的稳定性。分层压裂喷砂器经现场应用证明，其结构合理，性能稳定，能够满足分层压裂施工，施工成功率高，具备一定的应用和推广价值。

2. 技术分析

2.1. 结构

喷砂器结构由上下两部分构成如图 1。上端由上接头、滑套、剪钉、喷砂器主体、陶瓷套喷嘴及密封圈构成喷砂器喷嘴部分；下端由接球座主体、锁环、下接头等构成滑套座部分。



1——下接头；2——开口锁环；3、7、9、11、13、14——密封圈；4——球座主体；5——喷砂器主体；6——滑套；8——陶瓷套喷嘴；10——定位销钉；12——剪钉；15——钢球；16——上接头

Figure 1. Structural diagram of sand blower
图 1. 喷砂器结构示意图

2.2. 工作原理

当喷砂器下部层段进行压裂施工时，喷砂器滑套靠剪钉定位，并借助密封件封堵喷砂器喷嘴。对喷砂器控制层位进行压裂施工时，投球于滑套顶部球座上，憋压至一定压差，剪断剪钉，球及滑套下行，座于滑套座内，锁环实施对滑套的逆向锁定，实施管内环空与下部层段的封堵。压裂液经喷嘴进入环空及目的地层，同时喷嘴产生的节流压差完成封隔器的坐封及环空分隔。

2.3. 结构特点

- 1) 喷砂器分为喷嘴和滑套座两部分，喷嘴与滑套座之间可串接油管调整距离。
- 2) 喷嘴采用陶瓷材料，结构为筒形，筒壁设有喷孔。筒形结构能够有效保护喷砂器主体，免遭携砂液的冲蚀。陶瓷具有较高的耐磨性，可延缓喷孔的磨损速度，确保封隔器坐封。
- 3) 滑套座开口锁环结构，能够实施滑套的逆向锁定，利于压裂施工后洗井及返排作业。该结构已申报专利。
- 4) 一级、二级、三级喷砂器与水力锚和封隔器配合可构成三层分层压裂管串。

3. 关键技术

3.1. 喷砂器喷嘴的选材及结构优化

3.1.1. 喷嘴材料优选

在压裂施工中，大量含砂压裂液高速通过喷砂器喷嘴，大量砂粒以 $1/2 \text{ mv}^2$ 的动能冲蚀喷嘴，致使喷嘴的过流面积扩大，压裂液流速降低，节流压差减小，造成封隔器无法多次重复坐封。

99 刚玉陶瓷是在 1700 °C 高温烧制的陶瓷材料，硬度 $\text{HRC} \geq 80$ ，仅次于金刚石。具有密度大，韧性及抗冲击性能好，耐磨性优良的特点。

99 刚玉陶瓷物性实验[1]

1) 磨料磨损对比试验

磨料为 4070 目石英砂，磨轮材料为氯化丁基橡胶邵尔 A62，轮缘线速为 400 m/min，摩擦行程 700 m，载荷 130 N，磨料供给速率 300 g/min，试验结果如表 1。

由表 1 可以看出，以重量磨损量为准，65 Mn 钢是 95 耐磨陶瓷的 35.7 倍，是 99 耐磨陶瓷的 62.8 倍。换算成体积比磨损量，则分别是 16 倍和 32.7 倍。

2) 冲刷磨损对比试验

利用风机及射吸冲刷试验台，磨料以一定角度冲刷不同材料和工艺制作的试片，冲刷角取 30° ，磨料采用 46# 棕刚玉，风机压力为 0.5 MPa，冲刷距离为 50 mm，喷射时间为 3 min。试验结果如表 2。

由表 2 可以看出，以重量磨损量为准，16 Mn 钢是 95 陶瓷的 8.98 倍，是 99 陶瓷的 14.92 倍，是铁

Table 1. The test data of abrasive wear

表 1. 磨料磨损试验数据

试件名称	磨损量(g)		
65 Mn	1.6456	1.7041	1.6985
95 陶瓷片	0.0461	0.0527	0.0503
99 陶瓷片	0.0262	0.0247	0.0224

Table 2. The test data of abrasive erosion wear

表 2. 磨料冲刷磨损试验数据

试件名称	冲刷角度	冲刷距离 mm	压力 MPa	冲蚀率 mg/g	磨料规格
16 Mn 钢	30°	50	0.5	0.458	46#棕刚玉
95 陶瓷	30°	50	0.5	0.051	46#棕刚玉
99 陶瓷	30°	50	0.5	0.0307	46#棕刚玉
铁 0502	30°	50	0.5	0.0718	46#棕刚玉
铁 0504	30°	50	0.5	0.0706	46#棕刚玉
镍基碳化钨	30°	50	0.5	0.0735	46#棕刚玉
耐磨焊条	30°	50	0.5	0.0722	46#棕刚玉

0502 的 6.38 倍，是铁 0504 的 6.49 倍，是镍基碳化钨的 6.23 倍。

由表 1 和表 2 两种试验结果，不难看出 99 陶瓷的耐磨性优于其他材料。同时陶瓷的加工难易程度与硬质合金材料相似，但价格仅为后者的 1/10。故此，99 陶瓷是喷嘴材料的最佳选择。

3.1.2. 喷嘴结构优化

现研发的喷砂器喷嘴采用周向对称双喷孔结构如图 1，陶瓷套喷嘴与喷砂器本体喷孔，利用定位销钉周向定位，使喷嘴孔与本体喷孔一一相对。陶瓷套喷嘴与喷砂器本体轴向定位方式为，下端采用台阶定位方式，上端利用上接头推挤橡胶环压迫的软固定方式，该结构既能实施陶瓷套喷嘴的可靠定位，又能防止压碎陶瓷套喷嘴。

陶瓷套喷嘴采用内置式筒形结构如图 2，结构设计上考虑保护喷砂器本体，增加了喷嘴筒体高度，利用陶瓷的耐磨性能，减轻了压裂液进入喷嘴前形成的涡流而造成对喷砂器本体的冲蚀，与外置喷嘴结构相比，具有一定的优越性。外置喷嘴结构如图 3。

喷砂器陶瓷套喷嘴与喷砂器主体间采用三道“O”型橡胶圈软扶正结构，实现了喷砂器主体与陶瓷套喷嘴合理组装，保护了脆性陶瓷套喷嘴。

3.1.3. 滑套结构

滑套为筒形结构，外部设有“O”型圈槽和剪钉槽，内孔为过液孔，上端设有锥形球座。结构设计上采用滑套下行开启方式，滑套采用剪钉定位，控制滑套的开启动作。剪钉控制方式结构简单，剪切压差易于控制。

滑套材料采用合金结构钢，选择合理的热处理方式，提高了滑套的机械性能，在结构设计上，既能确保承压能力又可以增大径向尺寸空间，为喷砂器多级设计打下了良好的基础。

3.2. 分层压裂三级喷砂器动作设计

在分层压裂施工中，三级喷砂器构成的压裂管串，可实施三层分层压裂。一级喷砂器为直喷喷砂器，



Figure 2. Structural diagram of ceramic nozzle
图 2. 陶瓷喷嘴结构图

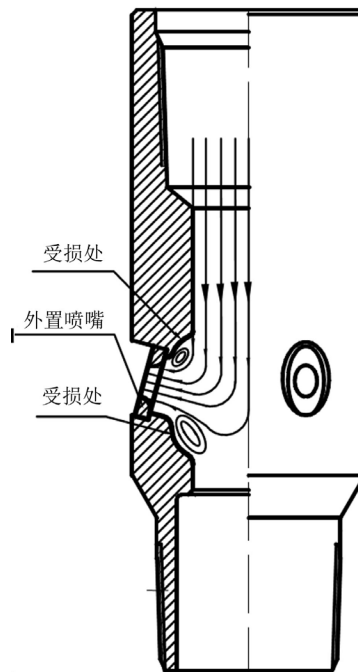


Figure 3. Structural diagram of outer nozzle sand blower
图 3. 外置喷嘴喷砂器结构图

一级喷砂器可直接实施第一层压裂施工，此时二、三级喷砂器喷砂孔为关闭状态；第二层压裂施工时，利用投球憋压，打掉二级喷砂器滑套，建立第二层液流通道，同时堵塞一级喷嘴；第三层压裂施工时，利用投球憋压，打掉三级喷砂器滑套，建立第三层液流通道，同时堵塞二级喷嘴。

3.3. 喷砂器喷嘴过流面积设计[2]

$$\Delta P = P_1 - P_2 = \frac{\gamma}{2g} \left[(1 + \varepsilon) \left(\frac{4Q}{2\pi d_2^2} \right)^2 - \left(\frac{4Q}{\pi d_1^2} \right)^2 \right] \quad (1)$$

式中： ε ：局部阻力系数； γ ：液体重度，取 9800， g 取 10； Q ：流量 m^3/S ； d_1 管柱内径 m ； d_2 喷嘴内径

m ; ΔP 喷嘴节流压差 Pa。

由公式(1)可以看出, 喷嘴内径 d_2 值的确定与压裂液的液性、封隔器所需的坐封压差 ΔP 、施工排量 Q 及施工管柱等参数有关。

由公式(1)可以得出如下结论, 当排量 Q 、喷嘴内径 d_2 相同时, 前置液于喷嘴处形成压差小于携砂液形成压差。故喷嘴内径 d_2 值的确定, 可通过前置液进行计算。

如已知封隔器的初坐封压差及携砂比利用公式(1)可以计算出, 任意施工排量时, 喷砂器喷嘴的直径, 过流面积值。设计出两个对称等过流面积的喷嘴。并使两个喷嘴的过流面积之和等于公式(1)换算的过流面积。喷嘴设计外形如图 4。设计时 a 、 b 的取值为 $a = (2 - 2.5)$ 。

4. 现场应用情况

到目前为止, 喷砂器已现场成功应用 4 井次, 施工相关资料如表 3。

从四口井喷砂器喷嘴的受损情况可以看出, 喷嘴受损情况与施工加砂量及排量直接相关, 加砂量大排量则喷嘴受损大, 反之则小。实际情况是除岐 85-1 轻微受损外, 其余三口井喷嘴受损较为严重, 喷嘴过流面积扩大。但均能完成压裂施工。

5. 结论

1) 分层压裂喷砂器结构设计及喷嘴选材合理, 喷嘴节流性能较为稳定, 与其他结构的喷砂器相比具有一定先进性。

2) 喷嘴直径与压裂施工的排量有关, 喷嘴直径小, 可确保封隔器获得足够节流压差, 但会增加液流速度, 提升喷嘴被冲蚀速度, 加大对套管的冲蚀磨损。故此, 施工排量与喷砂器喷嘴直径的合理配比, 是喷砂器在分层压裂施工中合理应用的关键。合理的配比值需要在应用中进一步摸索。

3) 喷砂器滑套是喷砂器重要组成部分, 滑套座与钢球间必须确保硬密封, 进入滑套座后才能封堵下部层位。而滑套锥形球座, 在携砂液的冲蚀下, 锥面存在微量受损, 用后滑套座与钢球间不能确保密封。

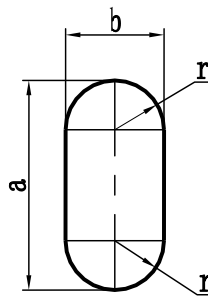


Figure 4. Figure of nozzle hole shape
图 4. 喷嘴孔外形图

Table 3. Field application case of sand blower
表 3. 喷砂器现场应用情况

施工井号	节流面积 mm ²	单层加砂量 m ³	施工排量 m ³ /min	施工后喷嘴节流面积 mm ²	封隔器坐封最大节流面积 mm ²
岐 85-1	1248	18.81	4.5	1380	1661
港 95-3	1248	45.85	5.2	1750	1847
叶 23	1248	25.8	5.5	1820	1943
自 38-34	1248	20.3	5	1731	1809

建议使用塑料高强度复合球，可通过球自身塑变弥补球座的磨损，实现层间彻底封堵。

参考文献 (References)

- [1] 陈华辉, 邢建东, 李卫 (2006) 耐磨材料应用手册. 机械工业出版社, 北京.
- [2] 袁恩熙 (1986) 工程流体力学. 石油工业出版社, 北京.