

巴西桑托斯盆地盐下漏失原因分析

——以A井为例

任康绪^{1,2}, 赵俊峰¹, 郝强升¹

¹中油国际(巴西)公司, 里约热内卢

²中国石油勘探开发研究院, 北京

Email: renkangxu@163.com

收稿日期: 2020年9月30日; 录用日期: 2020年10月13日; 发布日期: 2020年10月20日

摘要

巴西桑托斯盆地盐下碳酸盐岩目的层中常发生井漏, 但对于漏失原因认识还存在争议。本文以典型漏失的A井为例, 基于录井、取芯、常规测井、成像测井等资料的综合分析, 揭示了漏失层段储层控制因素及其形成机制。研究表明, A井盐下碳酸盐岩漏失主要发生在断裂或裂缝发育的层段, 深部热液沿破碎带运移, 对原生孔洞以及次生裂缝发生溶蚀、沉积, 形成复杂的热液溶蚀储层, 成为发生严重漏失的主要原因。桑托斯盆地盐下碳酸盐岩主要包括介壳灰岩、球粒灰岩、叠层石灰岩等多种类型, 沉积时间仅13 Ma±、沉积物厚达数百米, 不具备长期抬升暴露遭受淋滤形成典型喀斯特储层的必要条件。

关键词

泥浆漏失, 盐下, 碳酸盐岩, 裂缝, 桑托斯盆地

Causes of Pre-Salt Losses in the Santos Basin, Brazil

—Taking A Well as an Example

Kangxu Ren^{1,2}, Junfeng Zhao¹, Qiangsheng Hao¹

¹CNODC Brasil Petróleo e Gás Ltda., Rio de Janeiro

²Petro China Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing

Email: renkangxu@163.com

Received: Sep. 30th, 2020; accepted: Oct. 13th, 2020; published: Oct. 20th, 2020

Abstract

Mud losses often occur in pre-salt carbonate layers in the Santos Basin of Brazil, but the understanding of the controlling causes has not been clear. Taking the typical A well as an example,

based on integrated analysis of muddy logging, coring, conventional logging and image logging, the reservoir controlling factors and mechanism for losses are revealed. The study shows that the loss of pre-salt carbonate layers in the A well mainly occurs in the intervals where faults or fractures are developed. Deep hydrothermal fluids migrate along the fracture zone, dissolving primary pores and secondary fractures and depositing, forming a complex hydrothermal dissolution reservoir which is responsible for the severe losses. The pre-salt carbonate sediments of Santos Basin mainly include coquinas, spherulites and stromatolites, *et al.* They form in a short geological time of 13 Ma± and the sedimentary thickness reaches several hundred meters, and do not have long-term uplift exposure and leaching, which are necessary conditions for typical karst development.

Keywords

Mud Loss, Pre-Salt, Carbonate Rock, Fracture, Santos Basin

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

巴西桑托斯盆地深海-超深海盐下领域是近年来油气勘探的热点,但在钻井过程中常常在盐下碳酸盐岩目的层中发生井漏事故。但是,关于该盆地盐下储层漏失研究公开发表的资料非常罕见,现场对于漏失原因的认识也存在很多争议。本文以桑托斯盆地东北部一口典型漏失井为例,结合测录井和取芯等资料,系统分析漏失部位碳酸盐岩储层的典型特征,揭示井漏层段储层控制因素,为今后钻井中预防和控制泥浆漏失提供参考依据。

2. 地质概况

桑托斯盆地位于巴西东南海域,盆地东北部以卡布弗里奥低凸起的外延线与坎波斯盆地为界,西南部以弗洛里亚诺波利斯隆起与佩罗塔斯盆地相邻,东南部大致以圣保罗台地西北缘为界,西北-北部与陆地接壤。盆地总面积约 $35.2 \times 10^4 \text{ km}^2$, 是巴西海域面积最大的盆地[1][2]。

桑托斯盆地沉积巨厚,从构造演化上划分,先后经历了早白垩世早期(135~124.5 Ma)的裂陷阶段、早白垩世晚期的过渡阶段(124.5~112 Ma)和晚白垩世以来的裂后阶段(112 Ma 至今)[3]。平面上,盆地具有三坳两隆一斜坡的构造格局,从西向东依次为:西部斜坡带、西部坳陷带、西部隆起带、中央坳陷带、东部隆起带和东部坳陷带。A井位于桑托斯盆地东部隆起带东北部(图1(a))。垂向上,由于过渡期膏盐层分隔,盆地沉积地层呈现断坳双层结构(图1(b))。

3. A井盐下泥浆漏失特征

A井位于L油田南端,该井在5382 m (TVD,下同)进入盐下地层,完钻深度为5878 m,钻揭盐下 Barra Velha 组微生物灰岩368 m、Itapema 组介壳灰岩128 m。

根据泥浆操作记录,该井盐下漏失非常严重,主要发生在 Barra Velha 组中下部5482~5742 m段,漏失层段跨度达260 m(表1)。其中5482~5532.75 m段为取芯过程中发生的漏失,其他部位为正常钻进过程中发生漏失。从不同深度段的漏速和累计漏失量可见,不同位置漏失情况差异非常大:例如,录井综合图记录5482~5519 m段取芯过程中动态漏速约50 bbl/h、在5547 m处正常钻进中动态漏速250 bbl/h、

在 5641 m 正常钻进中动态漏速高达 650 bbl/h；此外，泥浆操作记录也显示不同层段初期漏速差异巨大；另一方面，不同层段的累计漏失量差异也比较大，漏失量较大位置分别发生在 5519 m、5552 m 和 5742 m 处，累计漏失量分别为 3578 bbl、5718 bbl 和 6807 bbl。

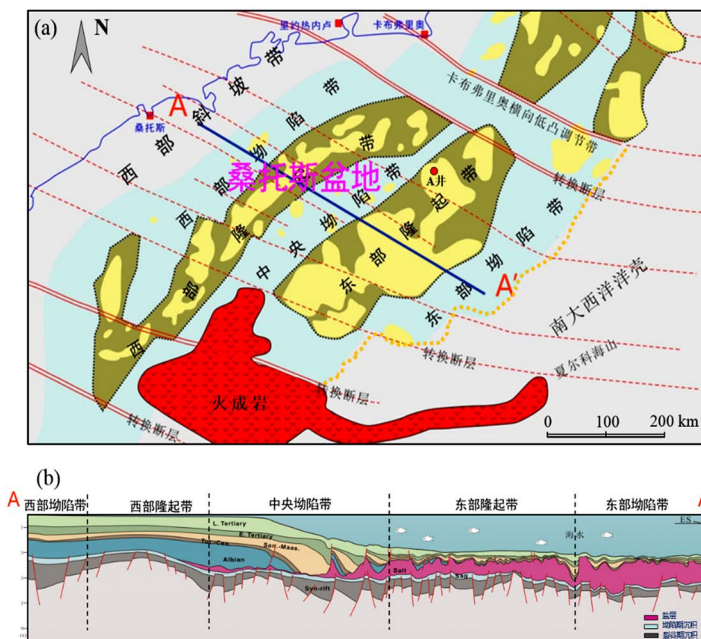


Figure 1. Structural outline map of the Santos Basin (a) and the geological section of the basin (b)
图 1. 桑托斯盆地构造纲要图(a)和过盆地地质剖面图(b)

Table 1. Table of mud operation loss in the pre-salt target layers of A-Well
表 1. A 井盐下目的层泥浆操作漏失情况统计表

地层	深度/m	持续时间/h	初期漏速/bbl·h ⁻¹	漏失量/bbl
Barra Velha	5482~5492	24.00		330
Barra Velha	5492~5519	52.00		1266
Barra Velha	5519	384.00	140.0	3578
Barra Velha	5519~5532	24.00	10.3	30
Barra Velha	5550	18.00	5.0	1675
Barra Velha	5552	48.00	98.0~146.2	5718
Barra Velha	5552~5572	24.00	92.0	952
Barra Velha	5572~5578	24.00	73.8	1771
Barra Velha	5578~5597	24.00	11.7	284
Barra Velha	5597~5643	24.00	7.1~88.1	2285
Barra Velha	5643~5683	24.00	25.3	607
Barra Velha	5683~5731	24.00	22.9	550
Barra Velha	5731	24.00	40.1	981
Barra Velha	5742	600.00	25.9~51.0	6807

钻进过程中在漏速较快的部位也采取了一些措施：例如在 5552 m 深度附近钻进中采取投入 LCM 药剂、降低泥浆密度(从 9.96 ppg 降低到 9.70 ppg)等措施，虽然漏速得到控制(从 250 bbl/h 降低到 120 bbl/h)，但随即也观察到气测值的迅速上升，不得已只能提高泥浆比重(提升至 9.90 ppg)，但漏速也随之加大(230

bbl/h), 表明漏失段容纳空间具有随泥浆比重动态变化的特征; 在 5641 m 处观察到动态漏速高达 650 bbl/h 时, 及时泵入 Baralock/Barablend 堵漏材料, 漏速降低到 100 bbl/h, 进一步采用碳酸钙/石墨堵漏材料, 漏失降低至 25 bbl/h。

A 井盐下目的层钻进中在 Barra Velha 组中下部不仅漏失频发, 而且泥浆累计漏失量也高达 26834 bbl, 物资和经济损失非常巨大, 严重影响工程作业。例如在 5742 m 处因漏失过于严重不能继续钻进, 不得已采取增加井身结构、下套管封堵漏失段的方式才继续实施了下部地层钻进。

4. 讨论

4.1. 泥浆漏失段储层特点

根据不同深度储层的测井 GR、钻时曲线特征、双井径变化特征、成像测井综合解释、漏失特征统计, 编制了 A 井盐下漏失的储层因素分析综合柱状图(图 2), 揭示漏失段储层具有如下特点:

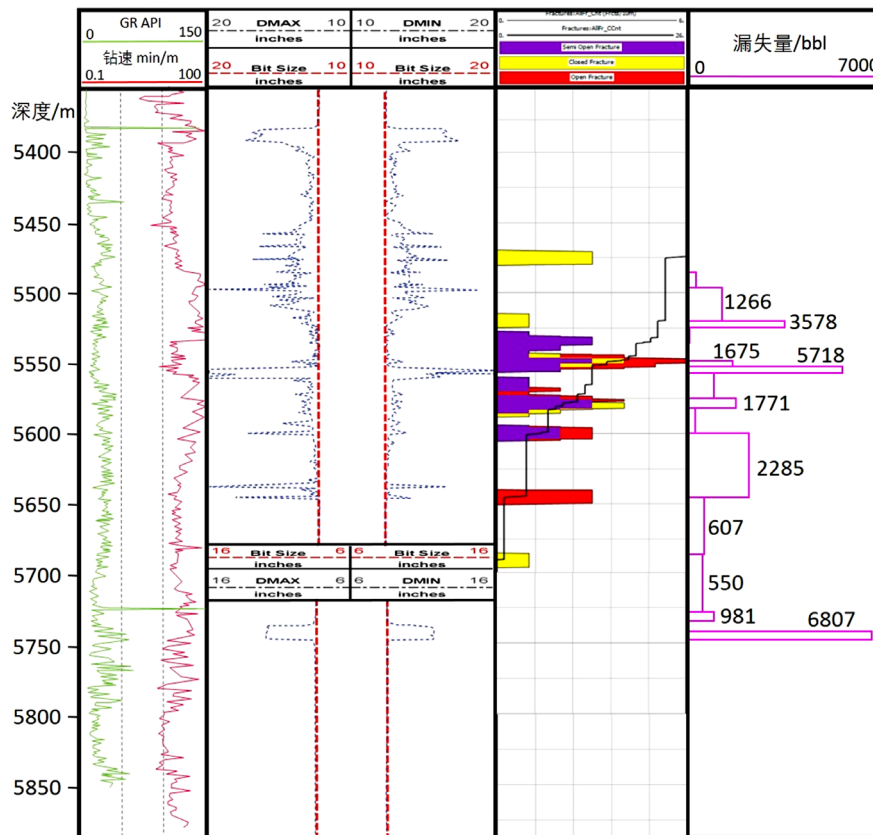


Figure 2. Comprehensive analysis histogram of the pre-salt layer losses in A-Well (The 1st track in the figure is the drilling time, the 2nd track is the double caliper, the 3rd track is the comprehensive interpretation of fractures based on imaging logs, and the 4th track is the loss volume)

图 2. A 井盐下漏失情况分析柱状图(图中第一道为钻时曲线, 第二道为双井径曲线, 第三道为成像质量裂缝综合解释, 第四道为漏失量)

1) 从钻时曲线可知, 目的层钻进过程中未发生放空现象, 表明漏失段不是大洞穴控制; 钻时曲线起伏变化较大, 反映地层可钻性差异大。录井资料表明, 对桑托斯盆地盐下石灰岩地层来说, 孔洞发育层段可钻性较好。但是, 本井除在 5550 m 附近的严重漏失段能对应低钻时外, 多数漏失层段与低钻时不对应, 可见大多数漏失不是由于碳酸盐岩储层中孔隙发育导致。

2) 从扩径发育部位可见, 大段连续扩径主要发育于 Barra Velha 组碳酸盐岩中上部段, 尤其上部连续扩径段跨度还比较大, 但钻进中未发生井漏; 中部多处扩径部位具有扩径严重、扩径不对称、扩径段短、常发生严重漏失; 可见, 盐下碳酸盐岩发生扩径与漏失没有严格对应性, 但漏失段通常具有扩径。

3) 根据取芯、声波成像测井、电阻率成像测井等资料的综合解释成果, Barra Velha 组中未解释出规模洞穴, 在中部段解释裂缝比较发育, 集中在 5525.0~5607.0 m, 绝大部分为开启缝或半开充填缝, 这与盐下发生漏失情况总体吻合, 可见, 漏失总体上受裂缝发育段控制。其中, 5552 m 和 5742 m 的严重漏失还可能还与附近发育断裂有关: 5552 m 附近开启裂缝发育, 紧邻的 5554~5560.5 m 段严重扩径且不对称, 而且溶蚀小洞穴发育, 判断为断裂穿越部位; 5742 m 漏失也处于严重扩径段内, 不仅网状裂缝发育, 而且紧邻的下部 5746~5747 m 发育一个具有示底构造的洞穴充填体, 5748 m 井壁取芯显示云化胶结严重, 推测井眼附近可能有大规模断裂发育, 一方面沟通深部富镁热液导致热液溶蚀、沉积, 另外也为巨量漏失提供了储集空间。

4.2. 盐下储层漏失段与喀斯特关系

桑托斯盆地盐下碳酸盐岩储层中漏失原因, 有观点认为与喀斯特作用有关。文献检索表明, 公开提出这种观点的是巴西国油科研人员在第 16 届巴西地球物理学会国际大会上的一篇宣讲论文[4], 该论文以卢拉油田为例, 根据地震几何属性特征(负曲率值)预测油田东缘盐下目的层中发育有坍塌(Collapses), 将其直接与喀斯特化(Karstified features)联系, 没有从成岩演化等方面开展必要的论证! 目前, 在巴西国油部分内部分析测试报告和内部技术交流会中, 也见到用喀斯特来解释盐下储层的漏失。

桑托斯盆地盐下主要勘探目的层(Barra Velha Fm., Itapema Fm.)是否具备发育常规喀斯特储层条件? 钻遇的漏失究竟是受断裂破碎带、裂缝发育带或热液溶蚀等因素控制还是喀斯特控制? 本文尝试从储层地质的角度进行分析:

1) 喀斯特是由于水的溶解作用和伴随的机械作用等, 在可溶性岩石(如石灰岩、白云岩、石膏等)分布区形成喀斯特地形作用的总称[5]。喀斯特是一种成岩相, 当碳酸盐岩暴露在大气水环境中, 由含 CO_2 的地表水、地下水对其溶解、淋滤、侵蚀、搬运和沉积, 形成常规碳酸盐喀斯特地貌[6] [7]。可见, 抬升暴露遭受大气水淋滤是碳酸盐岩喀斯特发育的重要条件。一般认为, 抬升暴露时间越长、气候越湿润, 形成的喀斯特地貌也越复杂。

从桑托斯盆地发育史来看, 伴随冈瓦纳超大陆裂解, 在裂陷期沉积 Camboriú 组玄武岩、Piçarras 组砂泥岩基础上, 后裂谷期从 Neobarremian 到 Eoaptian 阶沉积了 Itapema 组(K38)高能相介壳灰岩, 继而 Aptian 阶又沉积了 Barra Velha 组球粒灰岩(K44)和叠层石灰岩/微生物灰岩(K46-48), Aptian 阶之后进入过渡阶段, 沉积了 Ariri 组(K50)巨厚盐岩层。该盆地盐下沉积的巨厚石灰岩厚度达数百米, 易溶岩石比较发育, 但其时间跨度只有 13 Ma \pm , 甚至更短[8], 目前认为 K38 层序与 K44 层序之间存在 DPA 不整合界面、K44 层序与 K46-48 层序之间存在 DIA 不整合界面[1] [2], 由于对应的沉积成岩经历时间非常短, 而且还要满足沉积巨厚的碳酸盐岩, 可见上述层间不整合发育的时间和空间条件均不具备大规模抬升和长期暴露, 不利于常规喀斯特发育。

2) 从桑托斯盆地盐下已钻井录井资料和漏失深度位置的统计来看(内部资料), 盐下石灰岩地层中没有一口井钻遇放空层段, 即没有钻遇规模洞穴, 在地震资料上也不能解释出沿上述 DPA、DIA 界面附近发育有典型洞穴, 这与常规石灰岩喀斯特储层中落水洞、水平洞穴比较发育情况非常不吻合。以本文 A 井为例, DIA 界面在 5560 m, 但发生大量漏失位置要么在该界面之上, 要么在界面之下非常深的部位(表 1), 均不在最可能发育喀斯特的位置。漏失段基本没有观察到 GR 值显著升高, 即没有地表物质充填。此外, 在 DPA 界面之下的 Itapema 组高能相介壳灰岩中未发生漏失。可见该井盐下漏失不是常规喀斯特所致。

3) 取芯和成像测井、元素测井等反映盐下碳酸盐岩储层中硅化、云化较发育,与裂缝发育段、小洞穴发育段共存,包裹体综合研究表明为热液活动产物(内部报告)。岩芯上可见硅化主要沿裂缝破碎带呈带状发育(图 3(a)),或充填于粒间孔隙中(图 3(b))。另一方面,在岩石破碎带常常观察到半充填裂缝、裂缝扩溶、溶蚀孔、溶蚀小洞穴等,而且溶蚀孔洞常常沿层理发育,推测与原生孔洞[8]和后期来源与深部的热液流体溶蚀[9]均有关系。

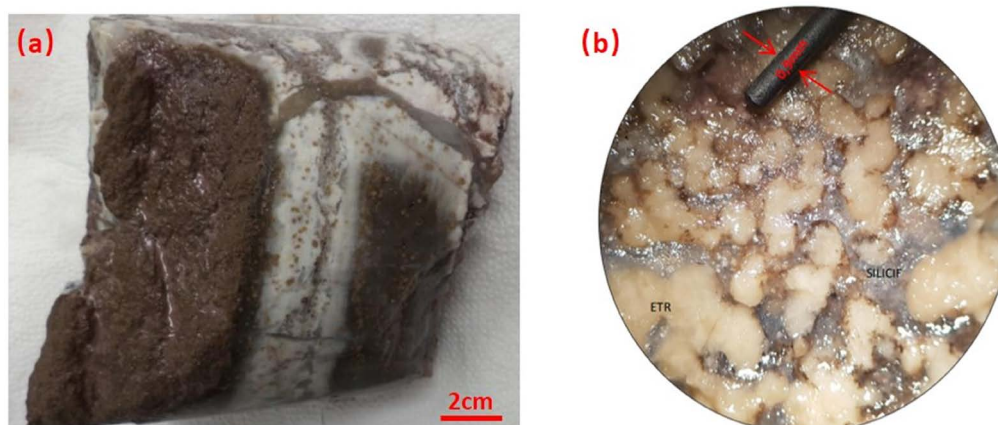


Figure 3. Core silicification of A-Well: (a) 5522.5 m, fracture band-like silicification; (b) 5532.0 m, inter-particle silicification
图 3. A 井岩芯硅化特征: (a) 5522.5 m, 沿裂缝条带状硅化; (b) 5532.0 m, 球粒间硅化

5. 结论

本文对桑托斯盆地 A 井漏失特征及成岩进行综合分析,得到如下几点认识:

1) A 井盐下目的层中漏失频发,漏失段主要分布在 Barra Velha 组中下部,不同漏失段初始漏速、累计漏失量差异较大。

2) 地层钻时曲线的起伏、井眼明显扩径与发生漏失没有必然关系,但漏失段常常具有不对称的严重扩径、扩径段较短等特征。通过取芯、成像测井等综合解释,揭示严重漏失段主要与储层断裂破碎、开启裂缝比较、热液溶蚀有关。

3) 桑托斯盆地盐下碳酸盐岩缺乏典型喀斯特发育的长期抬升暴露条件,主要漏失段与 DIA、DPA 等层序界面无明显关系。

参考文献

- [1] Moreira J.L.P., Madeira, C.V., Gil, J.A., *et al.* (2007) Bacia de Santos. *B. Geoci. Petrobras, Rio de Janeiro*, Vol. 15, 531-549.
- [2] Carlotto, M.A., Silva, R.C.B., Yamato, A.A., *et al.* (2017) Libra: A New Giant in the Brazilian Presalt Province. In: Merrill, R.K. and Sternbach, C.A., Eds., *Giang Fields of the Decade 2000-2010: AAPG Memoir 113*, American Association of Petroleum Geologists, United States-SIR Ranking of United States, 165-176. <https://doi.org/10.1306/13572006M1133685>
- [3] 万广峰. 巴西深水油气勘探开发实践[M]. 北京: 石油工业出版社, 2020: 19-46.
- [4] Oliveira, T.A.S., Cruz, N.M.M., Cruz, J.M.N., *et al.* (2019) Faults, Fractures and Karst Zones Characterization in a Pre-Salt Reservoir Using Geometric Attributes. *Sixteenth International Congress of the Brazilian Geophysical Society*, Rio de Janeiro, 19-22 August 2019, 1-5. <https://doi.org/10.22564/16cisbgf2019.139>
- [5] 石油地质分册编写组. 英汉石油大词典[M]. 北京: 石油工业出版社, 1998.
- [6] 陈学时, 易万霞, 卢文忠. 中国油气田古岩溶与油气储层[J]. 沉积学报, 2004, 22(2): 244-253.
- [7] 刘善华, 代宗仰, 吴长江. 油气储层岩溶研究[J]. 中国石油勘探, 2005, 10(6): 24-28.

- [8] Boyd, A., Souza, A., Carneiro, G., *et al.* (2015) Presalt Carbonate Evaluation for Santos Basin, Offshore Brazil. *Petrophysics*, **56**, 577-591.
- [9] 张立生. 滇东北地区层控 Pb-Zn-(F-Ba)矿床的热液喀斯特成因[J]. 地球学报, 1997, 18(1): 41-52.