

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2020.01.010

碳酸盐岩储层射孔穿深的影响规律^{*}

罗 伟^{①②} 林永茂^② 李海涛^③

①南充职业技术学院(四川南充,637131)

②中国石化西南油气分公司(四川德阳,618000)

③西南石油大学(四川成都,610500)

[摘 要] 为寻求射孔弹在碳酸盐岩中的穿透规律以及岩石性质对射孔穿深的影响,开展了不同抗压强度碳酸盐岩射孔弹地面打靶试验和不同围压下碳酸盐岩、砂岩射孔弹高温高压打靶试验。试验结果表明:对于碳酸盐岩储层,岩石抗压强度、围压以及温度对射孔穿深的影响规律与砂岩储层一致;抗压强度越大,围压越大,射孔穿深越小,在射孔弹耐温指标范围内,温度对射孔穿深的影响非常有限;在相同抗压强度和相同围压的条件下,射孔弹在碳酸盐岩的射孔穿深低于在砂岩储层中的射孔穿深;岩石抗压强度、围压以及岩石性质是影响射孔弹地下实际穿深的3个最重要因素。

[关键词] 碳酸盐岩储层;射孔穿深;影响规律;测试试验;岩石性质

[分类号] TJ410

Dependence of Perforating Penetration Depth on Properties of Carbonate Reservoir

LUO Wei^{①②}, LIN Yongmao^②, LI Haitao^③

① Nanchong Vocational and Technical College (Sichuan Nanchong, 637131)

② Southwest Branch Company, Sinopec (Sichuan Deyang, 618000)

③ Southwest Petroleum University (Sichuan Chengdu, 610500)

[ABSTRACT] In order to understand the dependence of perforating penetration depth on the properties of carbonate reservoir, especially the rock properties, charge testing was carried out on carbonate rocks with different compressive strengths and under various levels of applied effective stress, and on sandstone rocks at high temperature and high pressure. Experimental results show that the influence of rock compressive strength, effective stress and temperature on the penetration depth in carbonate reservoir and sandstone is consistent. The greater the compressive strength and the effective stress were, the smaller the perforating penetration depth would be. The influence of temperature on perforating penetration depth is very limited within the scope of temperature resistance index of perforating charge. The perforating penetration depth in carbonate reservoir is lower than that in sandstone reservoir when their compressive strengths and effective stresses are same. Rock compressive strength, effective stress and rock nature are the three most important factors guarding the underground penetration depth of shaped charges.

[KEYWORDS] carbonate reservoir; perforating penetration depth; influence law; testing experiment; rock properties

引言

射孔作业是油气勘探开发过程中一个不可缺少的环节,掌握其在真实储层中的穿透规律是进行射孔参数优化的前提条件^[1-2]。目前,国内不少学

者^[3-7]针对砂岩储层开展了高温高压条件下的射孔穿透试验,获得了岩石抗压强度、温度以及围压等参数对射孔穿深的影响规律,但针对碳酸盐岩储层的射孔穿透研究甚少^[8]。国外,Harvey等^[9-10]通过数千组的射孔打靶测试试验发现,在相同岩石抗压强度和围压条件下,射孔弹在碳酸盐岩中的穿透深度

^{*} 收稿日期:2019-07-19
基金项目:南充市科技计划项目(19YFZJ0026),南充职业技术学院博士科研启动项目(NZYBZ2001)
第一作者:罗伟(1986-),男,副教授,主要从事油气井完井优化与井筒控制方面的研究工作。E-mail:lwswpw@163.com

要小于在砂岩中的穿透深度,说明岩石性质对射孔穿深是有影响的。我国存在大量碳酸盐岩油气藏,主要分布在四川盆地、塔里木盆地、鄂尔多斯盆地及渤海盆地,碳酸盐岩储层油气产量约占油气总产量的 60%^[11]。因此,开展碳酸盐岩储层射孔穿透试验,掌握射孔弹在该类储层中的穿透规律,了解岩石性质对射孔穿深的影响,可为今后碳酸盐岩储层射孔弹的选择与参数优化提供参考依据。

1 试验装置及方案

1.1 试验装置

1.1.1 地面打靶试验

地面打靶试验装置如图 1 所示。采用模拟装枪方式,模拟枪内炸高 12 mm、枪身 5 mm、外炸高 18 mm,模拟套管壁厚 10 mm,保证射孔弹的中心线与岩石靶的中心线重合。岩芯直径 152 mm、高度 700 mm、外部钢板靶套直径 350 mm,岩芯与靶套之间用水泥固化。

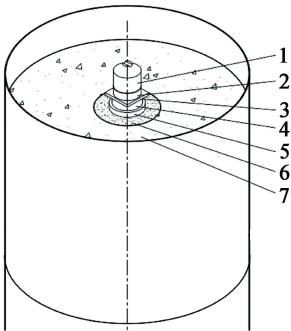


图 1 地面打靶试验装置

Fig. 1 Experiment facility of the ground target

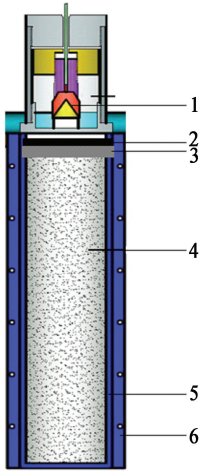
1.1.2 高温高压打靶试验

高温高压打靶试验装置如图 2 和图 3 所示,与地面打靶试验装置类似,区别有 3 点:

- 1) 试验岩芯直接用 3 mm 胶皮包裹装入直径 156 mm 的钢板靶套内固定;
- 2) 模拟套管和岩芯之间装入 30 mm 左右的水泥环;
- 3) 将组装好的试验装置放入高温高压釜中,模拟相应的试验温度及试验围压。

1.2 射孔弹及岩芯选择

1) 射孔弹:采用 89 型超高温射孔弹,耐温 220℃,100 h。炸药采用 LLM-105 高爆速超高温炸药,装药量为 28 g,其中药型罩材料为铜-钨粉末冶金,



1 - 射孔弹(单发弹的枪);2 - 套管(钢板);3 - 水泥;4 - 砂岩靶;5 - 裹在砂靶外的胶皮;6 - 最外层带孔眼的管子。

图 2 高温高压打靶试验装置

Fig. 2 Experiment facility of the target at high temperature and high pressure



(a) 高温高压釜 (b) 试验靶

图 3 高温高压打靶实物装配图

Fig. 3 Actual facility of the target at high temperature and high pressure

壁厚 1.0 mm,直径 40 mm。该射孔弹通过 API 19B 认证,混凝土靶的穿孔深度为 947 mm,入孔孔径为 9.2 mm。

2) 试验岩芯:选用四川的 3 种碳酸盐岩岩芯和 1 种砂岩岩芯,其中碳酸盐岩岩芯 3# 与砂岩岩芯的抗压强度基本相同,几种岩芯具体的物理性质参数如表 1 所示。

表 1 试验岩芯的物理性质参数

Tab. 1 Physical parameters of test cores

岩体类型	孔隙度/%	渗透率/ mD	密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	平均抗压 强度/MPa
碳酸盐岩 1 [#]	5.27	0.09	2.45	74.5
碳酸盐岩 2 [#]	5.12	0.11	2.43	73.8
碳酸盐岩 3 [#]	5.43	0.07	2.51	113.6
砂岩	6.56	0.14	2.41	113.0

1.3 试验方案

为研究碳酸盐岩储层中岩石抗压强度、围压对射孔穿深的影响规律以及岩石性质对射孔穿深的影响,结合试验装置的技术条件,制定试验方案为:

- 1)选取 3 种碳酸盐岩岩芯,开展地面打靶试验,每种岩芯打两发射孔弹,求取平均值,分析岩石抗压强度对射孔穿深的影响规律;
- 2)选取碳酸盐岩 3#岩芯和砂岩岩芯,开展高温高压打靶试验;测试射孔弹在不同温度(80 ℃/10 h,160℃/10h)和不同围压(0、15、30、45、60 MPa)下的穿深,每个围压下打两发射孔弹,求取平均值,分析围压和温度对射孔穿深的影响规律;并将砂岩与碳酸盐岩岩芯的试验结果进行对比,分析岩石性质对射孔穿深的影响。

2 试验结果与影响规律分析

根据试验方案,开展了射孔弹在选用的碳酸盐岩岩芯以及砂岩岩芯中的打靶测试,试验结束后,测量了岩芯中的射孔穿深。部分试验结果如图 4 和图 5 所示。

2.1 岩石抗压强度对射孔穿深的影响

表2为碳酸盐岩地面打靶试验结果。表2显

示,常温下,碳酸盐岩 1#岩芯(抗压强度为 74.5 MPa)对应的射孔穿深为 375 mm,碳酸盐岩 2#岩芯(抗压强度为 73.8 MPa)对应的射孔穿深为 390 mm,说明抗压强度相当的岩石对应的射孔穿深基本一致,而碳酸盐岩 3#岩芯(抗压强度为 113.6 MPa)对应的射孔穿深为 280 mm,反映出岩石抗压强度与射孔穿深的负相关性,即岩石抗压强度越大,射孔穿深越小^[12-14]。

两种类型储层呈现出相同的影响规律,分析其原因主要是无论何种储层,岩石抗压强度都是岩石骨架颗粒、胶结程度以及岩石内部结构的综合反映,岩石抗压强度越大,说明岩石越致密、胶结越紧、岩石内部结构越牢固,对应的岩石就越不容易被破坏,导致射孔弹在其内部的射孔穿深就越小。

表 2 地面打靶试验结果

Tab.2 Ground target test results

岩体类型	温度/ ℃	围压应力/ MPa	射孔穿深/ mm	平均射孔 穿深/mm
碳酸盐岩 1#	常温	0	360	375
			390	
碳酸盐岩 2#	常温	0	380	390
			400	
碳酸盐岩 3#	常温	0	295	280
			265	



图 4 碳酸盐岩地面打靶试验结果
Fig.4 Ground target test results of carbonate rock

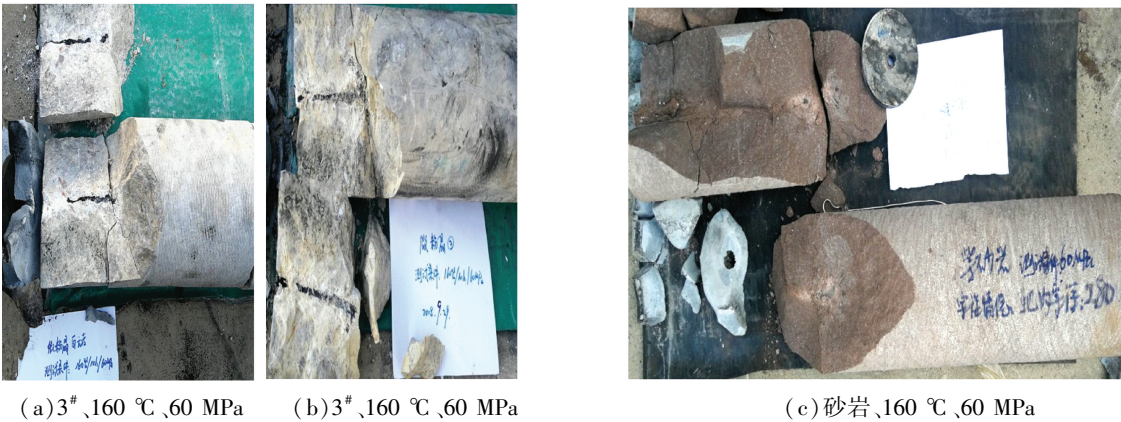


图 5 高温高压打靶试验结果
Fig.5 Target test results at high temperature and high pressure

2.2 围压对射孔穿深的影响

不同围压下对应的射孔穿深如表 3 所示。对于碳酸盐岩储层,随着围压的增加,射孔穿深逐渐降低,当围压增加到 60 MPa 时,射孔穿深相对于无围压时下降了 33.4%,但是射孔穿深降低的幅度随围压的增加而逐渐减小,最后射孔穿深趋于一稳定值,这与砂岩储层围压对射孔穿深的影响规律也一致^[15-16]。出现这种规律的原因主要是随着围压的增加,靶体岩芯受压,导致岩石内部结构改变,岩石孔隙度更低,胶结更紧密,对应的岩石抗压强度越大,导致射孔穿深降低。但是,岩石内部的紧密程度以及抗压强度并不会随围压的增加而无限增加,有一个对应的极限围压值(所用岩石对应的值大约为 60 MPa);当高于极限围压值,岩石内部紧密程度和抗压强度不会进一步增加。

表 3 高温高压打靶试验结果

Tab.3 Target test results at high temperature and high pressure

岩体类型	温度/ ℃	围压应力/ MPa	射孔穿深/ mm	平均射孔 穿深/mm
碳酸盐岩 3 [#]	80	0	278	276
			274	
	160	0	276	272
			268	
	160	15	221	220
			199	
	160	30	205	200
			195	
	160	45	193	192
			191	
	160	60	182	181
			180	
砂岩	160	0	420	420
			311 *	
	160	15	368	363
			358	
	160	30	344	337
			330	
	160	45	355	351
			347	
	160	60	322	305
			289	

* 数据异常,舍去。

2.3 温度对射孔穿深的影响

对于碳酸盐岩储层,设定了 3 个温度环境,常温、80 ℃ 以及 160 ℃。从试验结果(表 2、表 3)可以看出,在所选取射孔弹的耐温范围(220 ℃)内,随着

环境温度的增加,射孔穿深有下降趋势,但下降的幅度很小。这主要是由于随着环境温度的增加,射孔弹内炸药将逐步发生热分解作用,进而使射孔弹体积膨胀,引起射孔弹装药密度降低,导致射孔弹起爆后的爆速和爆压降低,最终引起射孔穿深降低。但是当环境温度低于射孔弹的耐温指标时,炸药的这种热分解作用发生程度很低,装药密度降低以及爆速爆压衰减很小,因此对射孔穿深的影响非常有限;一旦环境温度高于射孔弹的耐温指标时,炸药的热分解作用将会显著增加,热分解会产生大量的气体,并引起体积膨胀,导致射孔穿深急剧降低,更有甚者将会引起射孔弹起爆失败^[3]。

2.4 岩石性质对射孔穿深的影响

为验证 Harvey 等^[9-10]的研究结论,选取了抗压强度基本相同的碳酸盐岩岩芯和砂岩岩芯,分别开展了不同围压下的射孔弹高温打靶试验。表 3 中,在岩石抗压强度和围压相同的条件下,同种射孔弹在碳酸盐岩岩芯中的穿透深度要低于在砂岩岩芯中的穿透深度,低 100 mm 左右。主要是由于碳酸盐岩储层相对于砂岩储层非均质性更强,更容易发育有裂缝,因此在相同抗压强度的前提下,碳酸盐岩中基质的孔隙度相对于砂岩更低,基质的致密程度以及胶结强度相对于砂岩更大,进而导致射孔弹在碳酸盐岩岩芯中的穿透深度低于在相同抗压强度砂岩岩芯中的穿透深度。

3 结论

- 1)对于碳酸盐岩储层,岩石抗压强度越大、围压越大,射孔穿深越小,这与砂岩储层岩石抗压强度和围压对射孔穿深的影响规律一致;当环境温度在所选射孔弹耐温指标范围内,环境温度对射孔穿深的影响很小。
- 2)在相同岩石抗压强度和相同围压的条件下,射孔弹在碳酸盐岩储层中的射孔穿深低于在砂岩储层中的射孔穿深。因此,相对于致密砂岩储层,致密碳酸盐岩储层更适合选用超深穿透射孔弹。
- 3)岩石抗压强度、围压以及岩石性质是影响射孔弹地下实际穿深的主要因素,在进行射孔弹选择以及射孔参数优化时,应重点关注实际储层的这 3 个影响参数。

参 考 文 献

[1] 罗伟,李海涛,栗超,等. 考虑爆燃气体滤失和多裂缝

- 的复合射孔裂缝扩展动态模拟[J]. 油气地质与采收率, 2013, 20(4): 102-104, 110.
- LUO W, LI H T, SU C, et al. Modeling of fracture propagation by compound perforation considering deflagration gas filtration and multi-fracture[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2013, 20(4): 102-104, 110.
- [2] 李海涛, 罗伟, 姜雨省, 等. 复合射孔爆燃气体压裂裂缝起裂扩展研究[J]. 爆炸与冲击, 2014, 34(3): 307-314.
- LI H T, LUO W, JIANG Y S, et al. Initiation and extension of gas-driven fracture during compound perforation[J]. Explosion and Shock Waves, 2014, 34(3): 307-314.
- [3] 董经利, 陈序三, 邵在平, 等. 高温高压条件下射孔效能试验研究[J]. 测井技术, 2008, 32(2): 100-104, 127.
- DONG J L, CHEN X S, SHAO Z P, et al. Experimental study on perforation effects under conditions with high temperature & high pressure[J]. Well Logging Technology, 2008, 32(2): 100-104, 127.
- [4] 李军, 毕胜宇, 柳贡慧, 等. 射孔弹地层穿透深度试验研究[J]. 测井技术, 2010, 34(6): 613-617.
- LI J, BI S Y, LIU G H, et al. Study on the formation penetration test of shaped charges[J]. Well Logging Technology, 2010, 34(6): 613-617.
- [5] 李云, 吴焕龙, 付代轩, 等. 超高温射孔弹高温高压条件下穿深性能试验研究[J]. 测井技术, 2017, 41(1): 123-126.
- LI Y, WU H L, FU D X, et al. Influence of the size distribution of tungsten powder on the penetrability of the jet[J]. Well Logging Technology, 2017, 41(1): 123-126.
- [6] 王喜, 李尚杰, 马英文, 等. 不同强度致密砂岩对射孔弹穿深的影响[J]. 测井技术, 2018, 42(5): 602-606.
- WANG X, LI S J, MA Y W, et al. Influence of tight sandstone with different strength on the performance depth of perforating bullet[J]. Well Logging Technology, 2018, 42(5): 602-606.
- [7] 孙新波, 梁纯, 王宝兴, 等. 影响射孔侵入深度的混凝土靶材物性因素分析[J]. 爆破器材, 2006, 35(5): 31-33.
- SUN X B, LIANG C, WANG B X, et al. Analysis on physical factors of concrete target materials affecting perforation penetration[J]. Explosive Materials, 2006, 35(5): 31-33.
- [8] 李东传, 孙新波, 郭金荣, 等. 聚能射孔弹在不同砂岩上的射孔效果研究[J]. 断块油气田, 2007, 14(1): 64-66.
- [9] HARVEY J, GROVE B, ZHAN L, et al. New predictive model of penetration depth for oilwell perforating shaped charges[C]// SPE International Symposium and Exhibition on Formation Damage Control. Lafayette, Louisiana, USA; Society of Petroleum Engineers, 2010.
- [10] HARVEY J, GROVE B, ZHAN L, et al. Stressed rock penetration depth correlation[C]// SPE International Symposium and Exhibition on Formation Damage Control. Lafayette, Louisiana, USA; Society of Petroleum Engineers, 2012.
- [11] 倪新锋, 沈安江, 韦东晓, 等. 碳酸盐岩沉积学研究热点与进展: AAPG 百年纪念暨 2017 年会及展览综述[J]. 天然气地球科学, 2018, 29(5): 729-742.
- NI X F, SHEN A J, WEI D X, et al. Current hot topics and advances of carbonate sedimentology: AAPG 100 anniversary and 2017 annual meeting and exhibition[J]. Natural Gas Geoscience, 2018, 29(5): 729-742.
- [12] HARVEY J, GROVE B, ZHAN L. Shaped charge penetration into stressed rock: penetration depth experiments and modeling[C]// 44th U. S. Rock Mechanics Symposium and 5th U. S. -Canada Rock Mechanics Symposium. Salt Lake City, Utah, USA; Society of Petroleum Engineers, 2010.
- [13] GROVE B, MANNING D. Shaped charge perforation depth at full downhole conditions: new understandings[C]// SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Dallas, Texas, USA; Society of Petroleum Engineers, 2018.
- [14] SATTI R, BETANCOURT D, HARVEY W, et al. Beginning with the end in mind: shaped charges designed for reservoir conditions[C]// SPE Middle East Oil & Gas Show and Conference. Manama, Kingdom of Bahrain; Society of Petroleum Engineers, 2017.
- [15] HAGGERTY D, CRADDOCK G, MCGREGOR J. Effects of high pore pressure on perforation tunnels in both high and moderate compressive strength rocks[C]// SPE International Conference and Exhibition on Formation Damage Control. Lafayette, Louisiana, USA; Society of Petroleum Engineers, 2016.
- [16] GROVE B, MCGREGOR J, DENNIS H, et al. Operators optimize high-pressure/high-temperature and ultrahigh-pressure perforation strategies using laboratory testing[C]// Offshore Technology Conference. Houston, Texas, USA, 2019.