

大通径桥塞压裂用可溶解球研制及性能评价

魏 辽, 马兰荣, 朱敏涛, 吴晋霞, 朱玉杰, 韩 峰

(中国石化石油工程技术研究院, 北京 100101)

摘 要:为解决国内可溶解憋压球无法满足大通径桥塞压裂要求的问题,采用网络结构设计了以镁铝合金为基体并添加 Zn、Cu 等材料而形成的多元材料,以抗压强度、屈服强度、溶解速率为目标优化了材料中 Zn、Cu 的加量,研制了与大通径桥塞压裂配套用的大直径、高强度、可溶解合金材料及憋压球。经测试合金材料的抗压强度与屈服强度分别超过了 430 和 330 MPa,直径 89.027 mm 憋压球承压超过 70 MPa,且喷涂防护膜后球体稳定承压达到 6 h;93 ℃条件下在 3% KCl 溶液中球体溶解 90% 体积所需时间约为 92 h;在胍胶压裂液中的溶解速率虽然比在 1% KCl 溶液慢,但 200 h 也能溶解球体 90% 的体积。这表明,大直径可溶解憋压球能满足大通径桥塞压裂所需的高强度、快速溶解的性能要求。

关键词:桥塞;可溶解合金;憋压球;分段压裂

中图分类号:TE934⁺.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-0890(2016)01-0090-05

Development and Performance Evaluation of Dissolvable Balls for Large Borehole Bridge Plug Fracturing

WEI Liao, MA Lanrong, ZHU Mintao, WU Jinxia, ZHU Yujie, HAN Feng

(Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing, 100101, China)

Abstract: In China, conventional dissolvable balls are not adaptable to large borehole bridge plug fracturing. To solve this problem, a large diameter and high strength dissolvable ball was developed. It is a multi-component system with magnesium alloy as matrix as well as Zn, Cu and other elements in a net structure. The Zn and Cu content was optimized to improve the system's compressive strength, yield strength and dissolution rate. Some tests showed that the compressive strength and yield strength of the system were over 430 MPa and 330 MPa, respectively. Pressure resistance capacity was over 70 MPa for the 89.027 mm diameter dissolvable ball made with the system. After coating the ball, pressures were stable for 6 hours, and 90% of the ball dissolved in a 3% KCl solution at 93℃ in about 92 hours. In gel, the ball would dissolve more slowly than in 1% KCl solution, and 90% of the ball was dissolved within 200 hours. We have concluded that the large diameter dissolvable ball can meet the requirement of high strength and rapid dissolution in large borehole bridge plug fracturing.

Key words: bridge plug; dissolvable alloy; fracturing ball; staged fracturing

大通径桥塞分段压裂技术具有桥塞无需钻磨掉即可排液生产,桥塞球座处通径能达到 80~90 mm,与桥塞配套的大直径可溶解金属憋压球在井内液体环境下能迅速溶解、不需返排即可建立大通径排液生产通道等优点^[1-2],现已广泛应用于中国长宁、涪陵等页岩气田的分段压裂作业中^[3-5],并取得了较好的应用效果。目前国内多家研究机构开展了可溶解憋压球的研制工作,但主要是与多级滑套进行配套应用,其直径大都小于 70 mm,材料的承压、溶解性

能无法满足大通径桥塞配套憋压球直径 85 mm 以上、耐压 70 MPa、在 200 h 内溶解 90% 球体体积的

收稿日期:2015-07-30;**改回日期:**2015-12-30。

作者简介:魏辽(1984—),男,湖南湘乡人,2007年毕业于中国石油大学(华东)机械设计制造及其自动化专业,2010年获北京化工大学机械设计及理论专业硕士学位,工程师,主要从事钻完井井下工具研发工作。E-mail: weiliao.sripe@sinopec.com。

基金项目:中国石化科技攻关项目“拖动式无限级滑套分段压裂工具研制”(编号:P15006)部分研究内容。

要求。为此,笔者采用网络结构设计了一种以镁合金为基体,以 Al、Zn、Cu 等为添加材料的多元材料,通过调控材料成分组成比例和优化制备工艺,研制出承压和溶解性能满足大通径桥塞压裂用的金属憋压球。

1 研制思路

大通径桥塞分段压裂要求憋压球直径大、强度高、能快速溶解,而现有材料的强度和溶解速度达不到要求,为此,首先研制作憋压球的材料。通过添加 Al、Zn、Cu 等材料,形成包含 Mg、Al、Zn 等元素的 α -Mg 相核体材料;在核体材料外包覆含 T 相 (AlZnMgCu) 的 β -MgAl 相系壳层材料,调控 β 相、T 相与 α 相的成分与分布,达到调控憋压球材料的晶界与晶内电位差,从而形成以镁合金的 α 相为核体与 β 相为壳层的网络结构材料,同时添加 Ti、B 等材料作为晶粒细化剂,以提高材料的综合强度,其结构设计如图 1 所示。

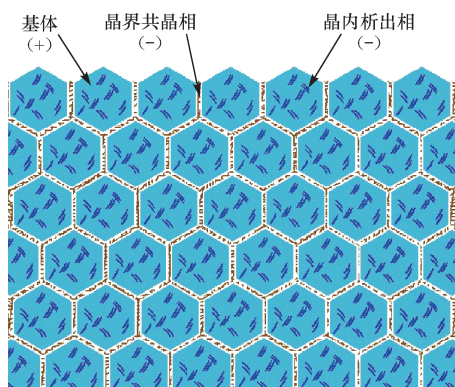


图 1 憋压球材料的结构设计示意

Fig. 1 Diagram of material design for fracturing ball

在上述材料结构设计的基础上,选择基体 Mg 并添加 Al、Zn、Cu、Ti 和 B 等材料,通过铸锭冶金方法,获得坯体材料,然后对坯体材料进行热处理,以调控材料的晶界共晶相与晶内析出相,从而获得制造憋压球的坯体材料。

2 材料配方优选

2.1 Zn 加量优选

在 Mg-Al 合金基础上^[6-8]添加不同量的 Zn,形成 Mg-Al-Zn 合金。表 1 为不同 Zn 加量的 Mg-Al 合金在室温下的压缩试验结果。由表 1 可以看出,添加

Zn 后 Mg-Al 合金的抗压强度均超过了 400 MPa,而且屈服强度超过了 300 MPa。

表 1 不同 Zn 加量镁铝合金压缩试验结果

Table 1 Compression test results of magnesium alloys with different Zn contents

合金编号	Zn 加量, %	抗压强度/MPa	屈服强度/MPa
Alloy 3	0	395	327
Alloy 5	1.5	408	322
Alloy 6	5.0	428	342
Alloy 7	10.0	455	351

图 2 为 93 °C 条件下,不同 Zn 加量的 Mg-Al 合金在 3% KCl 溶液中的溶解速率。由图 2 可以看出,当 Zn 加量超过 5.0% 时, Mg-Al 合金的溶解速率超过了 30 mg/(h · cm²),但 Zn 加量为 10.0% 时的溶解速率低于 Zn 加量为 5.0% 时的溶解速率。

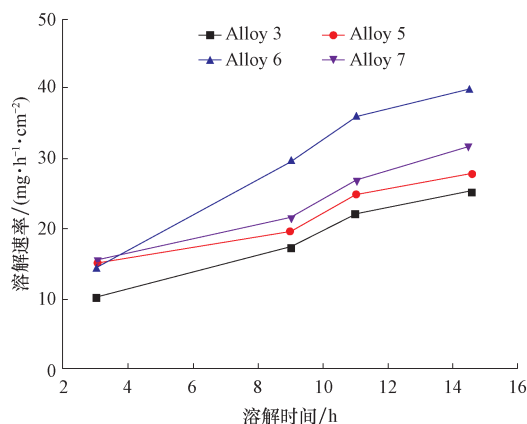


图 2 93 °C 条件下不同 Zn 加量的镁铝合金在 3% KCl 溶液中的溶解速率

Fig. 2 Dissolution rate of magnesium alloys with different Zn contents in 3% KCl solution at 93 °C

图 3 为不同 Zn 加量的 Mg-Al 合金显微结构。由图 3 可以看出:未加入 Zn 时 Mg-Al 合金 (Alloy 3) 的壳层 β 相和核体 α 基体相均较为粗大;当加入 1.5% Zn 时, Mg-Al 合金 (Alloy 5) 的 β 相变得细密, α 基体相也被分割成较小的块体,网络结构更为均匀细密,并且在 α 基体相内部出现很多圆形小块状; Zn 加量增至 5.0% 时, Mg-Al 合金 (Alloy 6) 的网络结构更为细密,且 α 基体相的分支现象大大减少;当 Zn 加量达到 10.0% 时, Mg-Al 合金 (Alloy 7) 的 α 基体相被分割的极为细密, β 相变得疏散不紧密,且在 β 相间隙出现新生相,同时也导致其溶解速率较 Zn 加量为 5.0% 时低 (见图 2)。因此,兼顾材料力学性能及溶解性能, Mg-Al 合金中 Zn 的最优加量为 5.0%。

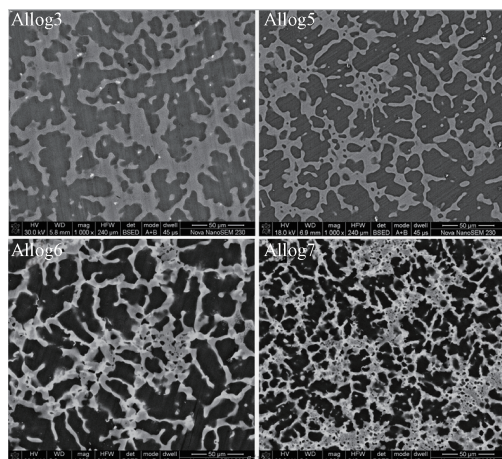


图3 不同 Zn 加量的镁铝合金显微结构
Fig. 3 Microstructure of magnesium alloys with different Zn contents

2.2 Cu 加量优选

在 Mg-Al-Zn 合金中添加不同量的 Cu, 形成 Mg-Al-Zn-Cu 合金, 并对其进行了压缩和屈服测试, 结果见表 2。由表 2 可以看出, Mg-Al-Zn 合金加入 Cu 后的抗压强度和屈服强度分别高于 430 和 330 MPa, Cu 的加量为 1.0%~5.0% 时合金的抗压强度与屈服强度分别在 440 和 340 MPa 以上, 均高于不加 Cu 时的强度。

表 2 不同 Cu 加量的 Mg-Al-Zn 合金压缩试验结果

Table 2 Compression test results of Mg-Al-Zn alloys with different Cu contents

试样编号	Cu 加量, %	抗压强度/MPa	屈服强度/MPa
Alloy 6	0	428	342
Alloy 8	1.0	444	343
Alloy 9	2.0	440	334
Alloy 10	3.0	452	358
Alloy 11	5.0	462	361
Alloy 12	7.0	439	332

Mg-Al-Zn 合金加入不同量 Cu 后在 3.0% KCl 溶液中的溶解测试结果(见图 4)表明: 当 Cu 的加量不超过 5.0% 时, 提高 Cu 的加量, 有助于提高 Mg-Al-Zn-Cu 合金的溶解速率; 当 Cu 的加量超过 5.0% 时, 随 Cu 加量增大, Mg-Al-Zn-Cu 合金的溶解速率降低。

Mg-Al-Zn-Cu 合金微观结构(见图 5)显示, 添加 Cu 后, 除了壳层 β 相与基体 α 相外, 还在壳层中出现了 T 相, T 相在溶解过程中并不溶解, 因此当 Cu 加量超过 5.0% 时, 其溶解性能反而降低。因此, 兼顾材料力学性能及溶解性能, Mg-Al-Zn-Cu

合金中 Cu 的最优加量为 5.0%。

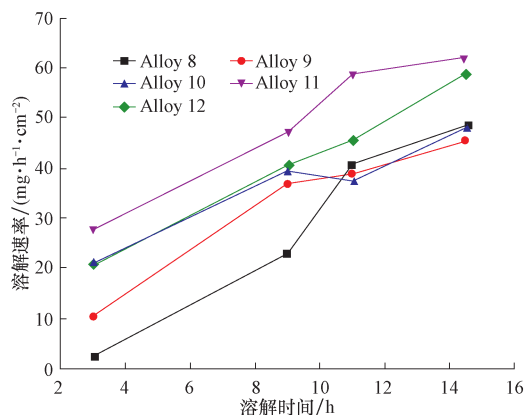


图4 93 °C 条件下不同 Cu 加量的 Mg-Al-Zn 合金在 3.0% KCl 溶液中的溶解速率

Fig. 4 Dissolution rate of Mg-Al-Zn alloys with different Cu contents in 3% KCl solution at 93 °C

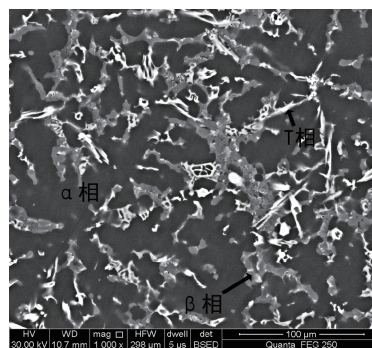


图5 Mg-Al-Zn-Cu 合金的微观结构
Fig. 5 Microstructure of Mg-Al-Zn-Cu alloy

3 憋压球性能评价

3.1 承压性能

镁铝合金添加 5.0% Zn 和 5.0% Cu, 形成 Mg-Al-Zn-Cu 合金, 其密度为 2.0 g/cm³, 抗压强度为 462 MPa, 屈服强度为 361 MPa, 93 °C 下在 3.0% KCl 溶液中的溶解速率为 51 mg/(h·cm²)。将 Mg-Al-Zn-Cu 合金加工成与大通径桥塞配套的 $\phi 89.027$ mm 憋压球, 以清水为介质, 利用图 6 所示试验装置对憋压球进行承压试验^[9-10], 其中球座内孔直径为 75 mm, 等于大通径桥塞球座直径。在室温条件下, 加压至 70 MPa 憋压 15 min, 压力未下降, 憋压球保持完好, 没有发生开裂, 达到现场应用要求。

此外, 根据大通径桥塞憋压球使用工况, 要求在球体入井及压裂施工共约 6 h 的时间内球体有稳定的承压能力, 不会因球体与溶液接触而发生溶解导

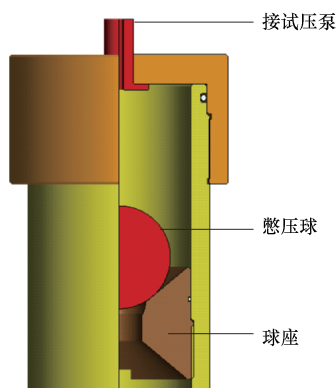


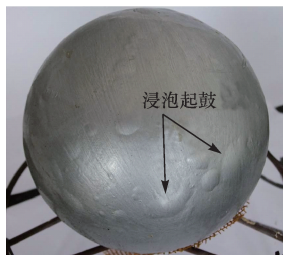
图6 憋压球承压试验装置

Fig. 6 Pressure test equipment of fracturing ball

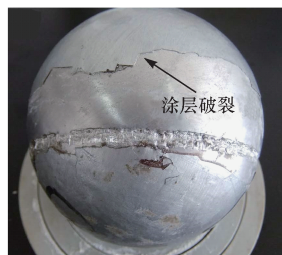
致承压失效。因此,在憋压球表面喷涂一种防护膜,使憋压球承压稳定时间超过6 h。测试表明,当有涂防护膜的憋压球在水溶液中浸泡6 h后,防护膜会起鼓自行脱落;憋压球承压后,表面产生变形,防护膜也会自行脱落(见图7)。



(a) 喷涂防护膜



(b) 浸泡6 h后



(c) 承压后

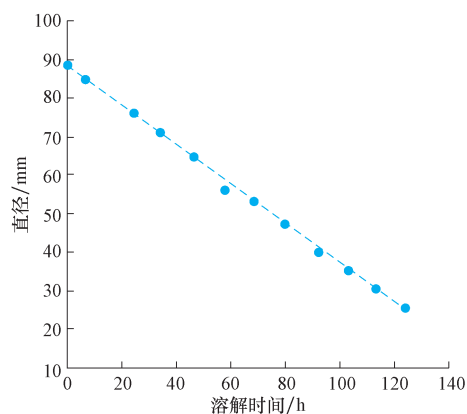
图7 憋压球喷涂防护膜后浸泡和承压测试

Fig. 7 Immersion and pressure test of fracturing ball with coating

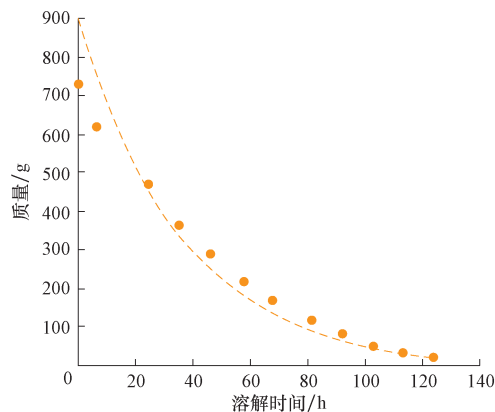
3.2 溶解性能

将 $\phi 89.027$ mm 憋压球置于 $93\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的 3.0% KCl 溶液中,每隔6 h 测试一次憋压球的直径和质量,并绘制成直径、质量与溶解时间的关系曲线(见图8)。由图8可以看出:憋压球直径与溶解时间呈线性减小关系,憋压球质量与溶解时间呈指数减小关系,这是因为,随着溶解时间增长,憋压球直径变小,憋压球与液体接触面积变小,导致溶解速率降低。此外,从图8还可以看出,溶解球体90%体积所需时间约

为92 h,满足现场对于大通径桥塞压后200 h 内投产的要求。



(a) 憋压球直径与溶解时间的关系



(b) 憋压球质量与溶解时间的关系

图8 Mg-Al-Zn-Cu 合金憋压球的溶解性能

Fig. 8 Dissolution performance of fracturing ball made of Mg-Al-Zn-Cu alloy

为了进一步了解憋压球在不同液体环境下的溶解性能,将 $\phi 89.027$ mm 憋压球分别置于 1.0% 、 3.0% 和 5.0% KCl 溶液以及胍胶压裂液中,进行溶解试验,其直径和质量与溶解时间的关系如图9所示。从图9可以看出:随着KCl 质量分数增大,球体溶解速率加快;在压裂液中球体溶解速率虽然低于 1.0% KCl 溶液中的溶解速率,但在200 h 内也能溶解球体90%体积。

4 结 论

1) 采用网络结构设计,以镁铝合金为基体,以Zn、Cu 等为添加材料,形成了Mg-Al-Zn-Cu 合金,Mg-Al-Zn-Cu 合金的抗压强度与屈服强度分别超过了430 和330 MPa,且在 3.0% KCl 溶液中的最大溶解速率超过了 $50\text{ mg}/(\text{h}\cdot\text{cm}^2)$ 。

2) 将Mg-Al-Zn-Cu 合金坯料加工成与大通径桥

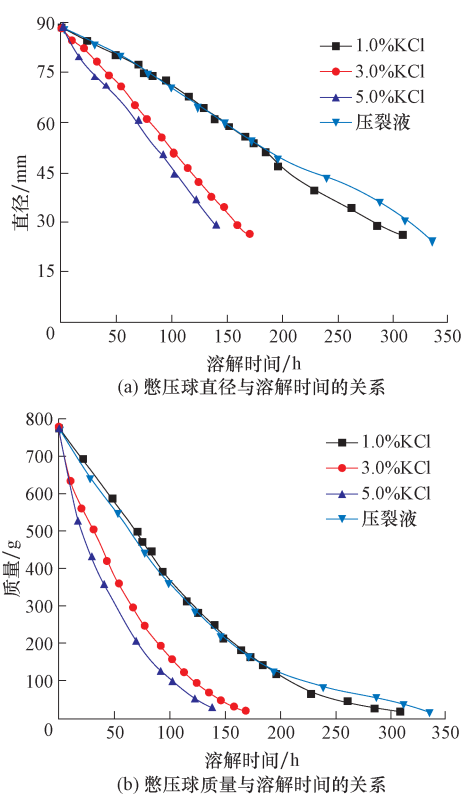


图9 $\phi 89.027$ mm 憋压球在不同液体环境下的溶解性能
Fig. 9 Dissolution performance of $\phi 89.027$ mm fracturing ball in different liquids

塞配套的 $\phi 89.027$ mm 憋压球,其承压达到 70 MPa,稳定承压时间达到 6 h,且在 93 °C 条件下 3.0% KCl 溶液中浸泡 92 h 即可溶解球体 90% 体积,承压能力和溶解性能均达到了现场要求。

3) 为提高憋压球的可靠性和安全性,应进行憋压球不同温度下的压裂液环境中以及不同质量分数 KCl 溶液中的溶解试验,并进一步深入开展憋压球表面保护膜技术研究和溶解速率控制技术研究,以适应不同工况条件对憋压球溶解性能的要求。

参考文献

References

- [1] SIMONDS R, SWAN T. Development of a large-bore mono-bore completion system for gas production[R]. OTC 11880, 2000.
- [2] 曾雨辰,杨保军,王凌冰. 涪页 HF-1 井泵送易钻桥塞分段大型压裂技术[J]. 石油钻采工艺, 2012, 34(5): 75-79.
ZENG Yuchen, YANG Baojun, WANG Lingbing. Large-scale

staged fracturing technology with pump-down drillable bridge plug for Well Fuye HF-1[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2012, 34(5): 75-79.

- [3] 路保平. 中国石化页岩气工程技术进步及展望[J]. 石油钻探技术, 2013, 41(5): 1-8.
LU Baoping. Sinopec engineering technical advance and its developing tendency in shale gas[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2013, 41(5): 1-8.
- [4] 贾长贵,路保平,蒋廷学,等. DY2HF 深层页岩气水平井分段压裂技术[J]. 石油钻探技术, 2014, 42(2): 85-90.
JIA Changgui, LU Baoping, JIANG Tingxue, et al. Multi-stage horizontal well fracturing technology in deep shale gas Well DY2HF[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014, 42(2): 85-90.
- [5] 莫里斯·杜索尔特,约翰·麦克力兰,蒋恕. 大规模多级水力压裂技术在页岩油气藏开发中的应用[J]. 石油钻探技术, 2011, 39(3): 6-16.
DUSSEAUULT M, MCLENNAN J, JIANG Shu. Massive multi-stage hydraulic fracturing for oil and gas recovery from low mobility reservoirs in China [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2011, 39(3): 6-16.
- [6] AGRAWAL G, SALINAS B J, XU Z. Coated metallic powder and method of making the same: 2011/0135953A1 [P]. 2011-06-09.
- [7] XU Z, AGRAWAL G, SALINAS B J. Smart nanostructured materials deliver high reliability completion tools for gas shale fracturing[R]. SPE 146586, 2011.
- [8] 魏辽,肖代红,朱敏涛,等. 高强快速分解 Mg-xAl 合金的组织与性能[J]. 材料热处理学报, 2015, 36(3): 101-104.
WEI Liao, XIAO Daihong, ZHU Mintao, et al. Microstructure and properties of high strength and rapidly decomposed Mg-xAl alloys[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2015, 36(3): 101-104.
- [9] 秦金立,吴姬昊,崔晓杰,等. 裸眼分段压裂投球式滑套球座关键技术研究[J]. 石油钻探技术, 2014, 42(5): 52-56.
QIN Jinli, WU Jihao, CUI Xiaojie, et al. Key technology on ball-activated sleeve for open hole staged fracturing[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014, 42(5): 52-56.
- [10] 戴文潮,秦金立,薛占峰,等. 一球多簇分段压裂滑套工具技术研究[J]. 石油机械, 2014, 42(8): 103-106.
DAI Wenchao, QIN Jinli, XUE Zhanfeng, et al. Research on one ball-activated multiple sleeves per stage for multistage fracturing[J]. China Petroleum Machinery, 2014, 42(8): 103-106.

[编辑 刘文臣]