

**“特深井安全高效钻探技术与装备专题”编者按：**地球深部探测是新世纪我国重大战略性科技计划，对解决资源、能源、环境问题具有十分重要的意义。特深井科学钻探作为地球深部研究的重要方法，面临着高温、高压、高地应力等极端复杂工况，对地面装备、井下工具，以及钻探材料等带来了巨大挑战。为此，编辑部组织了“特深井安全高效钻探技术与装备专题”，由王瑜教授、王志乔教授和张毅高级工程师等担任客座主编。本专题遴选11篇论文发表，内容涵盖特深井自动化装备、耐高温井下钻具及测控技术、抗高温耐蚀钻探材料等方面近年的研究成果。该专题的出版，有利于促进我国特深井科学钻探技术的发展。

## 万米井用超高强高韧套管的研制及组织表征

高展<sup>1,2,3</sup>，董晓明<sup>1,3\*</sup>，张忠铎<sup>1,3</sup>

(1. 宝山钢铁股份有限公司中央研究院, 上海 201900; 2. 上海交通大学材料科学与工程学院, 上海 200240;  
3. 油气钻采输送装备全国重点实验室, 上海 201900)

**摘要：**根据万米特深井超高温超高压工况需求，开展超高强高韧套管合金化技术和制造工艺研究，开发出具有良好韧性、高温强度、抗挤毁和抗延迟断裂性能的BG155V超高强高韧套管，批量试制的性能检测结果表明屈服强度达到1100 MPa以上，0℃横向夏比冲击功平均值达到名义屈服强度的10%。对套管不同服役温度下强度、低温韧性以及微观组织进行了分析，发现采用热轧后控制冷却工艺的管体晶粒度达到11级，通过细小的晶粒保证材料良好韧性和抗延迟断裂性能，提升了万米特深井油气资源开发用套管安全服役的可靠性。

**关键词：**套管；高温强度；高韧性；晶粒度；抗延迟断裂；万米井；特深井

**中图分类号：**TE921;P634.4 **文献标识码：**A **文章编号：**2096-9686(2024)04-0001-06

## Development and structure characterization of ultra-high strength and toughness casing for myriametric well

GAO Zhan<sup>1,2,3</sup>，DONG Xiaoming<sup>1,3\*</sup>，ZHANG Zhonghua<sup>1,3</sup>

(1. Baosteel Research Institute, Baoshan Iron and Steel Co., Ltd., Shanghai 201900, China;  
2. School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;  
3. State Key Laboratory of Oil and Gas Equipment, Shanghai 201900, China)

**Abstract:** According to the construction requirements of myriametric extra-deep well, the BG155V casing with good toughness, high-temperature strength, collapse resistance and delayed fracture resistance is developed on the basis of alloying technology and manufacture process optimization. The test results of batch production showed that the yield strength reaches over 1100 MPa, and the transverse Charpy impact energy at 0 °C reached 10% of the nominal yield strength, and the strength and low temperature toughness and microstructure of casing under different service temperatures were analyzed. It was found that the grain size level of the casing with controlled cooling process after hot rolling reaches up to 11. The fine grains ensure good toughness and delayed fracture resistance of the material, which improves the reliability of the casing in the myriametric extra-deep wells for the development of oil and gas resource.

**收稿日期：**2024-05-22；**修回日期：**2024-07-02 **DOI:**10.12143/j.ztgc.2024.04.001

**基金项目：**国家重点研发计划“深地油气资源勘探用高强韧钢管材及应用技术研究”(编号:2023YFB3711700,2023YFB3711702)

**第一作者：**高展，男，汉族，1982年生，高级工程师，材料学专业，博士研究生，从事高等级油井管等方面的研究工作，上海市宝山区富锦路889号，gaozhan@baosteel.com。

**通信作者：**董晓明，男，汉族，1980年生，高级工程师，材料学专业，博士，从事高强耐蚀无缝管材料开发和工艺研究工作，上海市宝山区富锦路889号，dongxiaoming@baosteel.com。

**引用格式：**高展，董晓明，张忠铎. 万米井用超高强高韧套管的研制及组织表征[J]. 钻探工程，2024,51(4):1-6.

GAO Zhan, DONG Xiaoming, ZHANG Zhonghua. Development and structure characterization of ultra-high strength and toughness casing for myriametric well[J]. Drilling Engineering, 2024,51(4):1-6.

**Key words:** casing; high-temperature strength; high toughness; grain size; resistance to delayed fracture; myriametric well; extra-deep well

## 0 引言

我国经济和社会发展“十四五”规划要求加快深层油气资源利用,推动油气增储上产。目前国内8000 m以深的超深井数量逐步增多,部分油田正在开始建设万米深井油气资源开发,已经成功实施了多口超深井和特深井<sup>[1-2]</sup>,但是超深井地质条件复杂,钻井施工难度大<sup>[3-5]</sup>。塔里木油田分公司实施了我国首口万米井——塔科1井<sup>[6]</sup>,预测井底温度近220℃、压力133 MPa,属于超高温、超高压极端工况,存在6套压力系统,且含高压盐水层,存在3个必封点和一个风险点,存在溢流、漏失风险,超高温高压、复杂地应力等多因素耦合对管柱井身结构以及套管的可靠性、安全系数提出了苛刻的要求。

为解决万米井复杂地质条件所带来的套管失效风险,需要采用非标管柱设计以及超高强度套管,提升套管的强度和韧性,改善抗内压、抗挤毁、连接强度等实体性能,降低高温下套管性能的衰减,实现超深井、特深井管柱轻量化,提高管柱安全系数。为此,国内外各套管厂家和科研院所开发出150~155 ksi(1 ksi=6.89 MPa,下同)钢级高强度套管,通过对关键工艺的控制,实现150~155 ksi钢级套管的批量生产,可以满足超深油气井及地质复杂油气田的需要<sup>[7-8]</sup>。但是,155 ksi钢级套管的强度与塑性和韧性呈倒置关系,在超高温高压、复杂地应力等多因素耦合以及后续作业过程中套管可能产生脆性开裂,弱酸性环境下也可能存在延迟断裂的问题,给管柱的井下安全使用带来隐患。为此宝钢开发出适用于万米井的全新BG155V超高强高韧套管,本文主要介绍该超高强高韧套管的设计方法,阐述其强韧化机理,并对其适用性进行评价。

## 1 超高强高韧套管生产及检测

### 1.1 化学成分

BG155V超高强高韧套管的化学成分最大值见表1。

### 1.2 生产工艺流程

(1)炼钢:钢质的纯净度、夹杂物级别以及成分偏析的控制水平直接决定了材料的韧性和塑性。通过优化LF炉外精炼工序工艺参数、VD(真空脱

表1 BG155V超高强高韧套管的化学成分  
(最大值,质量分数%)

Table 1 Chemical component of BG155V ultra-high strength and toughness casing (max, wt%)

化学成分	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V+ Nb+Ti
质量分数/%	0.35	0.4	1.8	0.002	0.012	1.6	1.2	0.3

气)分段吹氩搅拌工艺参数,实现钢中熔炼S含量平均值6.8 ppm(1 ppm=1/100万,下同),P含量平均值68 ppm,N含量平均值44 ppm,O含量平均值15 ppm,A、C夹杂物平均级别控制在0.5级以内,B、D类夹杂物控制在1.0级以内,通过高纯净度保证良好的韧性。

(2)连铸:高强度钢的合金含量较多,硬度较高,容易产生管坯缺陷,因此采用结晶器电磁搅拌工艺和凝固末端电磁搅拌工艺,减轻管坯枝晶偏析,同时投入6 mm管坯轻压下工艺以改善管坯枝晶偏析,有利于改善管体不同位置的合金元素分布以及韧性各项异性。

(3)轧管:采用穿孔-连轧-控制冷却-定径工艺,采用独有的热轧无缝套管在线组织性能调控装备平台对热轧管进行在线组织细化调控,抑制粗大晶粒组织的形成,改善材料的强韧性。同时针对高强钢合金高易导致管体内壁缺陷问题,结合材料高温塑性和变形抗力曲线对穿孔、连轧和定径工艺参数进行优化,防止套管内轧疤或内麻面的产生,管体尺寸精度提升,不圆度 $\leq 0.4\%$ ,壁厚不均度 $\leq 10\%$ ,保证套管具有较高的压溃强度。

(4)热处理:采用淬火+高温回火热处理工艺,淬火工序在宝钢第二代水淬装备平台上进行,该装备可以根据不同规格采用差异化的流量密度控制,并根据淬火效果实现管体全长分段淬火调控,消除局部淬火不均的问题。淬火后马氏体含量在95%以上,确保热处理后的管体全长和周向力学性能的稳定,尤其是降低冲击韧性的波动范围。

(5)螺纹加工:采用高精度数控专用螺纹机床加工宝钢的BGT2C高气密封螺纹,并通过了ISO

13679 CAL IV 试验评价。

### 1.3 检测方法

金相试样取样沿套管直径方向, 截取尺寸为  $20\text{ mm} \times 20\text{ mm}$  的管体纵截面试样, 进行机械研磨并抛光后, 采用 4% 硝酸酒精溶液进行腐蚀。通过 LEICA DM 6000M 型光学显微镜(OM)观察金相组织。采用电解抛光去除表面的应变层, 抛光用电解液为 10% 高氯酸酒精溶液, 抛光电压为 35 V, 温度为 5 °C。拉伸性能测试在 MTS 810-15 型试验机上进行, 冲击性能采用 JBN-300B 型设备, 根据《钢制品力学性能试验方法和定义》(ASTM A 370—2014)标准测试材料的夏比 V 形缺口冲击功, 试样尺寸为  $10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 55\text{ mm}$ 。

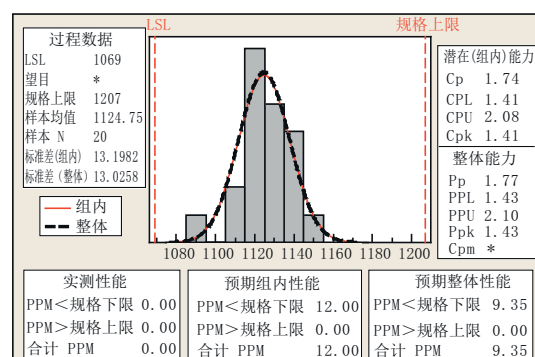
## 2 超高强度高韧套管性能分析

### 2.1 拉伸强度和冲击韧性

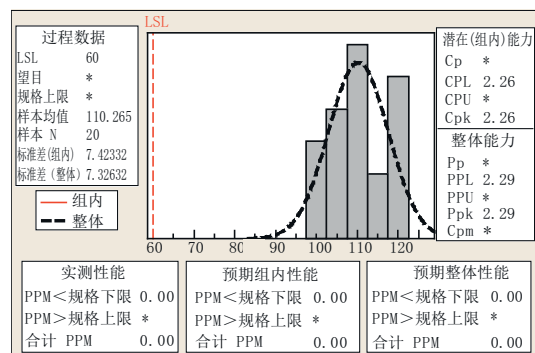
对工业性生产的 BG155V 超高强度高韧套管的力学性能进行分析, 从图 1 中可以看出, 调质热处理后 BG155V 套管的屈服强度平均值达到 1125 MPa (155 ksi 屈服强度  $\leq 1069\text{ MPa}$ ), 屈服强度波动范围 60 MPa, 屈服强度均匀性的改善可以提升管体全长和周向力学性能的稳定性; 0 °C 横向夏比冲击功平均值达到 110 J, 实现了强韧性的同步提升, 避免套管在超高温高压、复杂地应力条件下脆性开裂的问题; 高强度材料的硬度较高, 在实际使用过程中易发生环境开裂或延迟开裂, 为改善 BG155V 服役安全性, 采用低硬度设计, 硬度控制在 40 HRC 以下, 平均硬度为 37.7 HRC。

### 2.2 高温强度

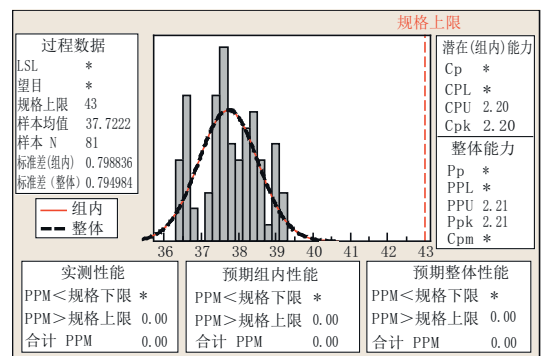
万米井的井底温度较高, 可达到 220 °C 甚至更高, 套管材料在高温下会发生强度衰减, 进而降低套管的抗挤毁和抗内压等实体力学性能, 导致套管安全系数不足, 存在失效的风险。为此对超高强度高韧套管 BG155V 的高温强度进行研究, 不同的温度条件下 BG155V 超高强度高韧套管的高温强度结果见图 2。从图 2 中可以看出, 随着温度的提高, BG155V 的屈服强度和抗拉强度均随之降低, 在 180 °C 和 220 °C 屈服强度分别降低 6.4% 和 11%, 相比屈服强度, 高温下的抗拉强度减低幅度相对小一些, 在 180 °C 和 220 °C 屈服强度分别衰减 4.4% 和 6.5%, 这主要是 BG155V 加入了能够提高材料高温性能的 Cr、Mo、V、Nb 等合金元素, 从而保证材料在



(a) 屈服强度的过程能力



(b) 横向冲击的过程能力



(c) 硬度的过程能力

图 1 BG155V 力学性能统计分布

Fig.1 Statistical distribution of mechanical properties of BG155V casing

环境温度较高的工况下有良好的高温力学性能。

### 2.3 低温韧性

图 3 为 BG155V 套管韧脆转变温度曲线, 从图中可以看出 BG155V 套管的横向冲击韧性在 0、-20 °C 时无显著差异, -20 °C 以下韧性降低, 其韧脆转变温度为 -45 °C, 在 -40 °C 时套管的横向冲击韧性  $\geq 80\text{ J}$ , 说明该套管材料具有良好的低温韧性, 抑制套管在低温下发生脆性开裂。图 4 分别为 BG155V 套管正在 0、-40 和 -80 °C 冲击断口的微观照片, 0 °C 时冲击断口的形貌为韧窝, 温度降低到



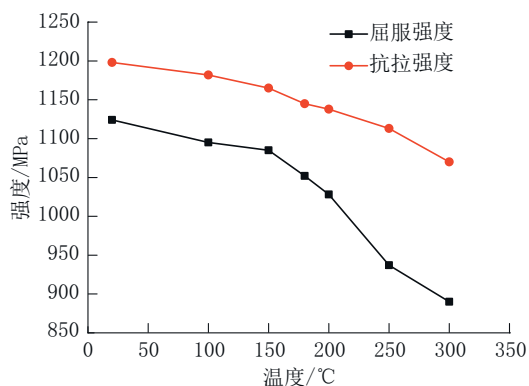


图2 BG155V套管高温强度曲线

Fig.2 High temperature strength curve of BG155V casing

—40℃时断口形貌为准解理和韧窝的断口特征,在—80℃冲击断口的形貌主要为准解理,部分位置发现有韧窝。

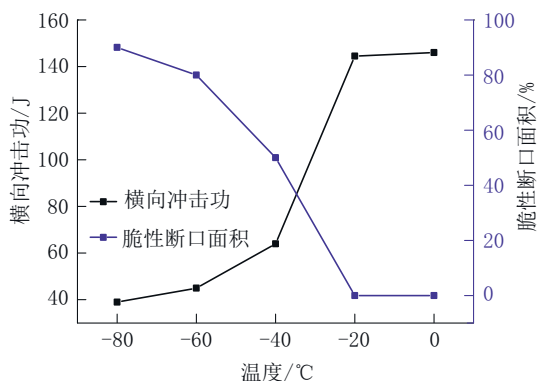


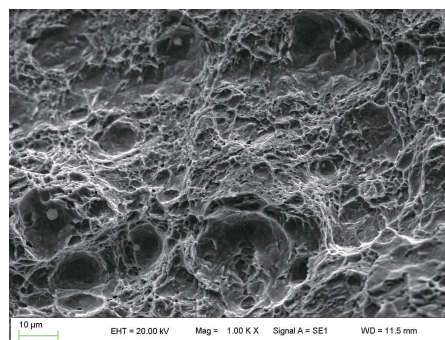
图3 BG155V套管韧脆转变温度曲线

Fig.3 Tough-brittle transition temperature curve of BG155V casing

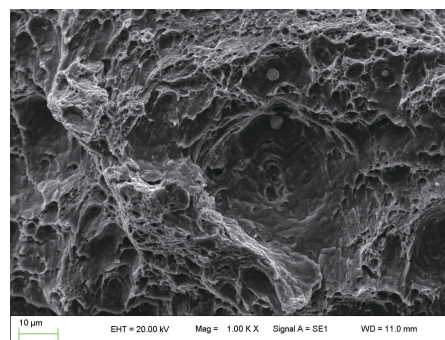
155 ksi钢级套管的屈服强度允许范围为1069~1206 MPa,强度控制范围较宽,套管不同位置的强度范围波动会直接影响套管的抗挤毁强度和抗内压强度等实体力学性能,因此为改善套管实体性能的稳定性,采用差异化的流量密度控制的分段淬火热处理工艺,实现管体全长分段淬火调控,提高全长力学性能稳定性。图5为BG155V套管全长屈服强度剖析图,从中可以看出,套管全长的屈服强度波动值控制在50 MPa以内,实现了强度的窄幅控制,可有效改善套管全长抗挤毁、抗内压和抗拉等实体力学性能的稳定性,提升套管管柱完整性。

## 2.4 微观组织表征

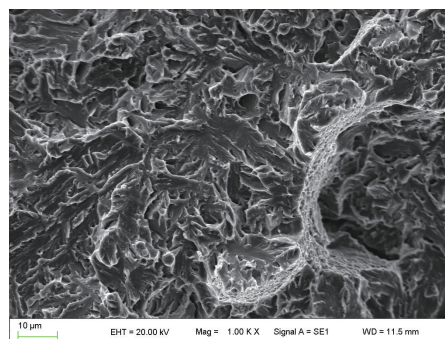
钢铁材料强化机制中细晶强化是唯一能够同步提高强度和韧性的强化机制。冲击韧性是表征



(a) 0℃



(b) -40℃



(c) -80℃

图4 BG155V套管在不同温度下的断口SEM形貌

Fig.4 Fracture SEM morphology of BG155V casing at different temperature

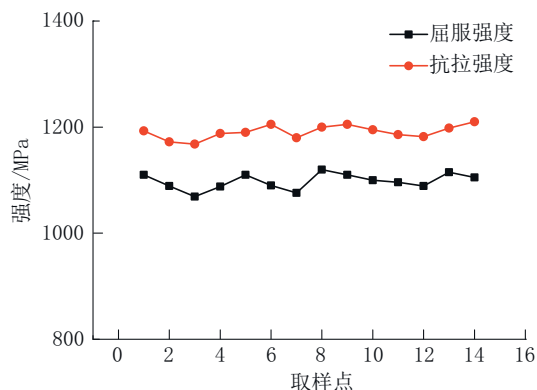


图5 BG155V套管全长屈服强度分析

Fig.5 Full length yield strength analysis of BG155V casing

套管材料裂纹萌生和拓展难易程度的有效方法, 钢中的奥氏体晶粒细化后, 晶界数量显著增加, 管体中缺陷或者裂纹因晶粒取向角的差异拓展方向发生变化, 抑制了沿晶开裂, 降低了裂纹扩展速率, 从而提高了材料的韧性。为了细化材料的奥氏体晶粒, BG155V 套管采用独有的热轧无缝套管在线组织性能调控装备平台对热轧管进行在线组织细化调控, 通过将热轧后的套管快速冷却到贝氏体相变区后空冷, 增加相变过冷度, 避免粗大的上贝氏体产生, 细化轧态组织, 从而使套管在重新加热调质后仍然具备较细的晶粒, 从而提升材料的韧性。

图 6 显示, 未经过在线控冷的套管晶粒较粗大, 晶粒度评级为 9~10 级; 而经过在线控冷的 BG155V 套管晶粒截距为 5~10  $\mu\text{m}$ , 晶粒度评级为 10.5~11.5 级, 因此经在线控冷的 BG155V 套管材料的晶粒较未经过在线控冷的套管明显细化, 在细晶强化机制的作用下可以同时提高强度和韧性。

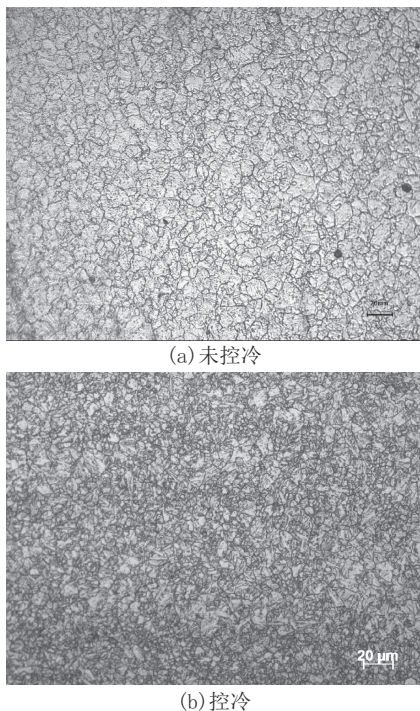


图 6 BG155V 套管晶粒度

Fig.6 Grain size photograph of BG155V casing

## 2.5 抗挤毁性能

采用立式挤毁试验机对 BG155V 超高强度高韧套管的抗挤毁性能进行检测, 该设备可以进行试样两段无约束条件下的抗挤毁性能检测, 检测结果较

常用的卧式挤毁试验机更接近于套管实际抗挤性能。 $\varnothing 206.38 \text{ mm} \times 17.25 \text{ mm}$  规格 BG155V 超高强度高韧套管的压溃强度均值达到 172 MPa, 满足塔科 1 井对五开套管抗挤毁性能的要求 (见表 2)。

表 2 BG155V 套管的抗挤毁性能

Table 2 The anti-collapse property of BG155V casing

钢级	规格/mm	压溃强度/MPa		
		最大值	最小值	平均值
BG155V	$\varnothing 139.7 \times 12.09$	175.2	165.6	172

## 2.6 抗延迟断裂性能

延迟断裂现象的产生是由于钢在环境中产生的氢向应力集中的部位扩散聚集, 而这些应力集中的部位往往缺陷较多, 氢扩散产生局部压力, 与残余应力以及外加应力形成合力, 当合力超过材料屈服强度时, 就会产生断裂<sup>[9]</sup>。氢致延迟断裂最初在高强螺栓用钢上比较突出, 环境氢从表面侵入晶界并扩散, 在应力作用下, 氢原子富集达到或超过临界值, 产生氢致沿晶开裂。一般认为, 材料强度增大, 韧性降低, 脆性增大, 当材料强度  $> 1000 \text{ MPa}$  时, 延迟断裂敏感性较高<sup>[10]</sup>。

延迟断裂行为是材料、环境、应力共同作用的结果, 因此与材料的成分、组织、性能、加工, 服役环境以及应力状态密切相关。合金元素中 C 的增加能够提高钢的延迟断裂敏感性; Si 能够改善碳化物析出, 降低裂纹扩散速度; Mn 和 S 生成夹杂物易萌生裂纹; C、P、S、Si、Mn 等元素的偏析会增大断裂敏感性; V、Ti、Mo、Cu 可形成不可逆氢陷阱, 降低可扩散氢浓度; Ni、Nb 等元素可以细化晶粒, 提高韧性, 减少偏析, 从而降低断裂敏感性<sup>[11]</sup>。

常见的氢致延迟断裂试验评价方法包括: 恒载荷/恒应变/恒位移试验, 慢应变速率拉伸试验, 冲杯试验, 断裂力学试验, 氢浓度测试。目前石油行业对延迟开裂性能的研究尚未有统一的标准, 用的比较多的是恒载荷试验方法, 所采用的试样可加工缺口或预制疲劳裂纹模拟存在宏观缺陷的构件, 也有采用光滑试样模拟良好构件。试验环境多种多样, 如室温水、饱和水蒸气、NaCl 水溶液、HCl 水溶液等。

超高强度高韧套管作业过程复杂, 存在延迟开裂的风险, 因此为保证实际服役的安全性, 本文采用

NACE TM0177 标准 A 法恒载荷试验研究弱酸性环境下 BG155V 套管的抗延迟断裂性能,性能检验结果如表 3 所示,BG155V 套管在的 NACE TM 0177 A 溶液(pH 值 2.7)和 B 溶液(pH 值 3.5)下加载

名义屈服强度 85% 的载荷经过 720 h 未发生断裂,试样表面未发现裂纹,可以认为 BG155V 超高强度高套管具备在弱酸性环境下安全服役的能力。

表 3 BG155V 套管的抗延迟断裂性能  
Table 3 The delayed fracture resistance of BG155V casing

钢级	溶 液	气体	pH 值	载荷/MPa	时间/h	温度/℃	断裂情况
BG155V	NACE TM 0177 A 溶液	100% N <sub>2</sub>	2.7	1069×85%	720	24	未断裂
BG155V	NACE TM 0177 A 溶液	100% N <sub>2</sub>	3.5	1069×85%	720	24	未断裂

3 结 论

(1)针对 10000 米深井超高温超高压工况开发的 BG155V 超高强度高套管具备了优良的室温强度和韧性、低硬度、低温冲击韧性、高温拉伸强度、抗挤压性能以及抗延迟断裂性能,满足 10000 米深井油气资源对超高强套管的性能需求,有效提升了套管的安全系数。

(2)通过采用全新的超高强套管热轧后控制冷工艺,实现了 BG155V 超高强度高套管晶粒明显细化,晶粒度达到 10.5~11.5 级;BG155V 套管的晶粒细化和低硬度控制显著提升了强韧性和抗延迟断裂性能,有利于提升 10000 米井苛刻工况下套管长期服役的安全性。

参考文献(References):

[1] 韩烈祥.川渝地区超深井钻完井技术新进展[J].石油钻采工艺,2019,41(5):555-561.  
HAN Liexiang. New progress of drilling and completion technologies for ultra-deep wells in the Sichuan-Chongqing area[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2019,41(5):555-561.

[2] 邹灵战,毛蕴才,刘文忠,等.盐下复杂压力系统超深井的非常规井身结构设计——以四川盆地五探1井为例[J].天然气工业,2018,38(7):73-79.  
ZOU Lingzhan, MAO Yuncai, LIU Wenzhong, et al. Unconventional casing programs for subsalt ultra-deep wells with a complex pressure system: A case study on Well Wutan 1 in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2018,38(7):73-79.

[3] 刘洪涛,刘举,刘会锋,等.塔里木盆地超深层油气藏试油与储层改造技术进展及发展方向[J].天然气工业,2020,40(11):76-78.  
LIU Hongtao, LIU Ju, LIU Huifeng, et al. Progress and development direction of production test and reservoir stimulation technologies for ultra-deep oil and gas reservoirs in Tarim Basin [J]. Natural Gas Industry, 2020,40(11):76-78.

[4] 雷群,胥云,杨战伟,等.超深油气储集层改造技术进展与发展方向[J].石油勘探与开发,2021,48(1):193-201.  
LEI Qun, XU Yun, YANG Zhanwei, et al. Progress and devel-

opment directions of stimulation techniques for ultra-deep oil and gas reservoirs [J]. Petroleum Exploration and Development, 2021,48(1):193-201.

[5] 尹浩,梁健,李宽,等.10000 米科学钻探关键机具优化措施研究[J].钻探工程,2023,50(4):16-24.  
YIN Hao, LIANG Jian, LI Kuan, et al. Research on optimization measures of key instrument for myriametric scientific drilling [J]. Drilling Engineering, 2023,50(4):16-24.

[6] 孙金声,刘伟,王庆,等.10000 米超深层油气钻完井关键技术面临挑战与发展展望[J].钻采工艺,2024,47(2):1-9.  
SUN Jinsheng, LIU Wei, WANG Qing, et al. Challenges and development prospects of oil and gas drilling and completion in myriametric deep formation in China[J]. Drilling & Production Technology, 2024,47(2):1-9.

[7] 严泽生,张传友,王青峰,等.超深井用高强度高韧油井管材料及产品开发[J].中国冶金,2014,24(4):54.  
YAN Zesheng, ZHANG Chuanyou, WANG Qingfeng, et al. Development of high-strength and high-toughness oil well pipe materials and products for ultra-deep wells[J]. China Metallurgy, 2014,24(4):54.

[8] 陈坤,曾理,黄英,等.155 ksi 钢级高强度韧性套管钢、套管及其制备方法:CN201510260763.4[P].2017.07.28.  
CHEN Kun, ZENG Li, HUANG Yin, et al. 155ksi steel grade high strength toughness casing steel, casing and preparation method thereof: CN201510260763.4[P]. 2017.07.28.

[9] 黄发,周庆军.高强度钢的氢致延迟断裂行为研究进展[J].宝钢技术,2015(3):11-16.  
HUANG Fa, ZHOU Qingjun. Progress and perspectives of hydrogen induced delayed fracture of high strength steels[J]. Bao-steel Technology, 2015(3):11-16.

[10] Yamasaki S, Kubota M. Evaluation method for delayed fracture susceptibility of steels and development of high tensile strength steels with high delayed fracture resistance[J]. Nippon Steel Technical Report, 1999(80):50-55.

[11] 司宇,唐远寿,周新,等.高强度马氏体钢中微合金元素对氢致延迟开裂的研究进展[J].汽车工艺与材料,2022(6):16-26.  
SI Yu, TANG Yuanshou, ZHOU Xin, et al. Research progress of microalloy elements on hydrogen-induced delayed cracking in high strength martensitic steels[J]. Automobile Technology & Material, 2022(6):16-26.

(编辑 王文)