

## 稠油热采井用 110SH-1 钢级热采套管的开发

唐科<sup>1,3</sup> 王秀敏<sup>2</sup> 彭俊<sup>1,3</sup> 杨煌光<sup>1,3</sup> 张银桥<sup>1,3</sup>

(1 大冶特殊钢有限公司,黄石 435001;2 黄石市产品质量监督检验所,黄石 435000;  
3 高品质特殊钢湖北省重点实验室,黄石 435001)

**摘要** 根据 SY/T 6952.2-2013 标准要求及稠油热采井工况环境,为减少贵重合金的使用,降低生产成本,大冶特殊钢有限公司采用 0.9~1.2Cr-0.3~0.6Mo 基低合金 + Nb-Ti-V 分别为 0.01~0.05 微合金成分设计,按照“70 t 电弧炉冶炼→LF + VD→连铸 Φ230 mm 圆坯→CPE 顶管机组成管→调质热处理”工艺流程生产 Φ177.8 mm × 9.19 mm 无缝钢管,根据试验结果确定了 920 °C 淬火,水冷,660 °C 回火,空冷的热处理工艺,成功开发出一种高强韧性的 110SH-1 钢级热采套管。测试结果表明,该钢级的热采套管常规性能、高温蠕变性能、全尺寸爆破、全尺寸挤毁等完全满足 SY/T 6952.2-2013 行业标准要求。

**关键词** 110SH-1 钢级 热采套管 稠油 高温蠕变

## Development of Grade 110SH-1 Thermal Recovery Casing for Heavy Oil Thermal Recovery well

Tang Ke<sup>1,3</sup>, Wang Xiumin<sup>2</sup>, Peng Jun<sup>1,3</sup>, Yang Huangguang<sup>1,3</sup> and Zhang Yinqiao<sup>1,3</sup>

(1 Daye Special Steel Co Ltd, Huangshi 435001; 2 Huang Shi Institute of Product Quality Supervision and Inspection, Huangshi 435000; 3 Hubei province Key Laboratory for High Quality Special Steel; Huangshi 435001)

**Abstract** According to the requirements of SY/T 6952.2-2013 standard and working conditions of heavy oil thermal recovery wells, Daye Special Steel Co Ltd successfully produces a kind of grade 110SH-1 thermal recovery casing with high strength and toughness by using 0.9~1.2Cr-0.3~0.6Mo-based low alloy + Nb-Ti-V respectively 0.01~0.05 composition design of microalloy to reduce the use of precious alloy and production cost. The Φ177.8 mm × 9.19 mm seamless steel pipe is produced by process of “70 t EAF→LF + VD→CCM Φ230 mm bloom →CPE mill rolling→quenching and tempering heat treatment”, according to the test results it is defined that the quenching temperature 920 °C, water cooling, tempering temperature 660 °C, air cooling process. The results show that the conventional performance, high-temperature anti-creep performance, full-size blasting, full-size crushing and other test results of the steel grade thermal recovery casing fully meet the requirements of SY/T 6952.2-2013 industry standard.

**Material Index** Grade 110SH-1, Thermal Recovery Casing, Heavy Oil, High-Temperature Creep

目前全球已探明的稠油资源储量超过 3 000 × 10<sup>8</sup> t,而可供开采的稀油资源仅剩 1 700 × 10<sup>8</sup> t<sup>[1]</sup>。20 世纪 80 年代初,我国开始工业性开发稠油资源,至 2002 年,稠油产量已占全国原油产量的 8%<sup>[2]</sup>。在稠油开采技术中,注蒸汽开采的产量约占 98%,火烧油层法占 2.2%<sup>[3]</sup>。

稠油井注蒸汽开采时,需要向井中注入温度在 300~350 °C 的热蒸汽,此时套管由于受到约束而无法膨胀,从而受到较大的压应力作用,而在停注采油的过程中,由于金属材料的松弛和蠕变作用,套管又受到较大的拉应力作用。套管周期性承受如此高的拉-压应力作用,会造成套管断裂(或螺纹连接滑脱)、变形,这是热采井套管损坏的主要原因<sup>[4]</sup>。

目前行业认可的热采套管最高钢级为 110SH<sup>[5]</sup>,国内能够批量生产的企业主要采用含 Cr-Mo-W 系低合金钢生产<sup>[6]</sup>。为节省贵重合金的使用,降低生产成

本,大冶特殊钢有限公司采用 Cr-Mo 基低合金 + 微合金成分设计,配合先进的热处理技术,开发的 110SH-1 钢级热采套管常规力学性能、蠕变、内压爆破极限抗力等指标完全满足石油天然气行业标准 SY/T 6952.2-2013 的要求,产品具有广阔的市场前景。

### 1 110SH-1 钢级热采套管的性能要求

根据 SY/T 6952.2-2013 标准,110SH-1 钢级热采套管的力学性能、化学成分要求分别见表 1、表 2。特别是室温拉伸应力-应变曲线应光滑,无明显屈服平

表 1 110SH-1 钢级热采套管力学性能要求

Table 1 Mechanical properties requirements of grade 110SH-1 thermal recovery casing

屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	均匀伸长率/ %	硬度值/ HRC	室温下冲击 韧性/J
758~896	862~965	≥5	≤28	≥110

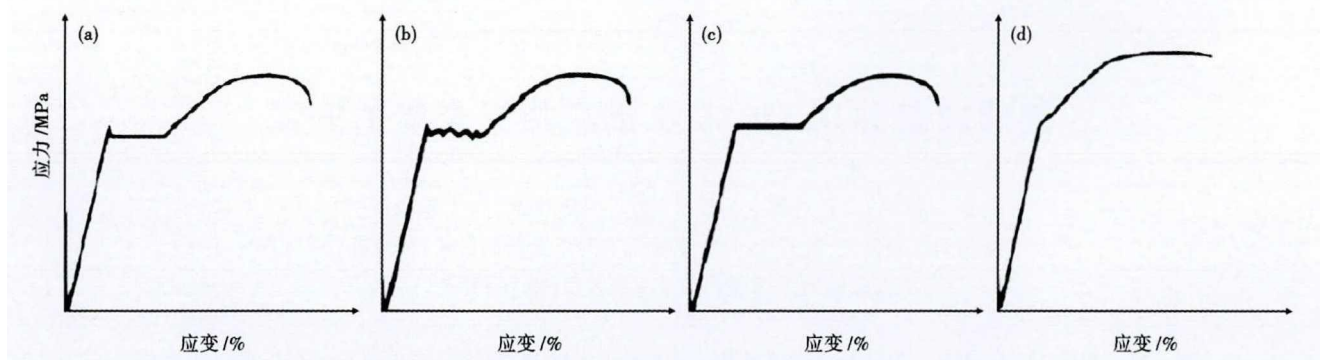


图 1 套管材料拉伸曲线特征示意图:(a)、(b)和(c)不合格样品;(d)合格样品

Fig.1 Schematic diagram of tensile curve characteristics of thermal recovery casing: (a), (b) and (c) off-qualified specimen, and (d) qualified specimen

表 2 热采套管 110SH-1 钢级化学成分 / %

Table 2 Chemical composition of grade 110SH-1 for thermal recovery casing / %

项目	C	Si	Mn	S	P	Cr	Mo	Nb	Ti	V	N	H	O
标准要求	≤0.30	-	≥0.40	≤0.010	≤0.020	≥0.60	≥0.10	总和≥0.03			总和≤0.012		
成分设计	0.23 ~ 0.28	0.15 ~ 0.35	0.40 ~ 0.60	≤0.010	≤0.015	0.90 ~ 1.20	0.30 ~ 0.60	0.01 ~ 0.05	0.01 ~ 0.05	0.01 ~ 0.05	≤0.008	≤0.000 2	≤0.002

台,如图 1 所示<sup>[5]</sup>。

## 2 化学成分设计

研究表明,温度对金属材料线膨胀系数、钢材弹性模量等性能参数都有较大的影响<sup>[6]</sup>。为确保热采套管在 350 °C 高温环境下的强度稳定性要求,材料需要具有低的膨胀系数和高熔点等特点,成分设计主要以低碳的 Cr-Mo 基为主,0.23% ~ 0.28% 的 C 含量可确保较高的回火温度下获得高强高韧的回火索氏体组织,如 C 含量过高,随着二次碳化物的大量析出,会降低钢材的韧性,添加一定量的 Cr、Mo 元素能显著提高钢材的高温强度性能,Mo 能以细小碳化物的形式产生弥散强化,从而提高钢材的蠕变强度,添加微合金能对奥氏体晶粒进行细化,提高钢材的热强性<sup>[7]</sup>。除以上主元素外,还需要尽量降低钢中 P、S 等有害元素含量。

按以上思路设计的热采套管 110SH-1 钢级的化学成分见表 2。

## 3 生产流程

(1)管坯:70 t 电弧炉→二次精炼(LF)→真空脱气(VD)→连铸 Φ230 mm 圆坯→管坯检查。

(2)成管:管坯加热→穿孔→顶管→松棒→再加热→减径→冷却→锯切→矫直。

(3)套管加工:钢管调质处理→热矫直→检验→无损探伤→水压试验→精整质检→测长称重→包装入库。

采用超高功率电弧炉冶炼,并通过 LF、VD 等纯净钢生产工艺,尽可能降低钢中的夹杂物及气体,同时利用电磁搅拌技术,进一步改善材料的偏析。

通过安德鲁斯公式计算,110SH-1 钢级的  $Ac_1$  为 742 °C,  $Ac_3$  为 815 °C,  $M_s$  为 388 °C,根据实际热处理经验将 110SH-1 钢级热采套管的淬火温度设定为 920 °C,并通过试验室模拟,得出回火温度-强度、回火温度-冲击的关系图,如图 2(a, b)所示,根据试验数据选择了 920 °C 作为最终的淬火温度,660 °C 作为最终的回火温度。

## 4 实物评价试验

按上述流程和工艺生产的 Φ177.8 mm × 9.19 mm 热采套管随机抽样委托国内知名钢管检测机构进行材料性能评价,检测结果表明,生产套管钢组织为回火索氏体(图 3),晶粒度 8 级,各项性能指标达到设计要求,满足油田实际使用需要。

### 4.1 常规性能

常规性能检验结果见表 3,高温拉伸性能见表 4,室温、高温拉伸应力-应变曲线如图 4、图 5 所示。可见,室温和高温 350 °C 条件下 110SH-1 钢级热采套管拉伸曲线表现为连续光滑的应变强化特征,高温 350 °C 条件下强度下降比例为 6.8%,性能满足石油行业标准 SY/T 6952.2-2013 的要求。

### 4.2 金相组织

在 110SH-1 钢级热采套管取样,检测组织、晶粒

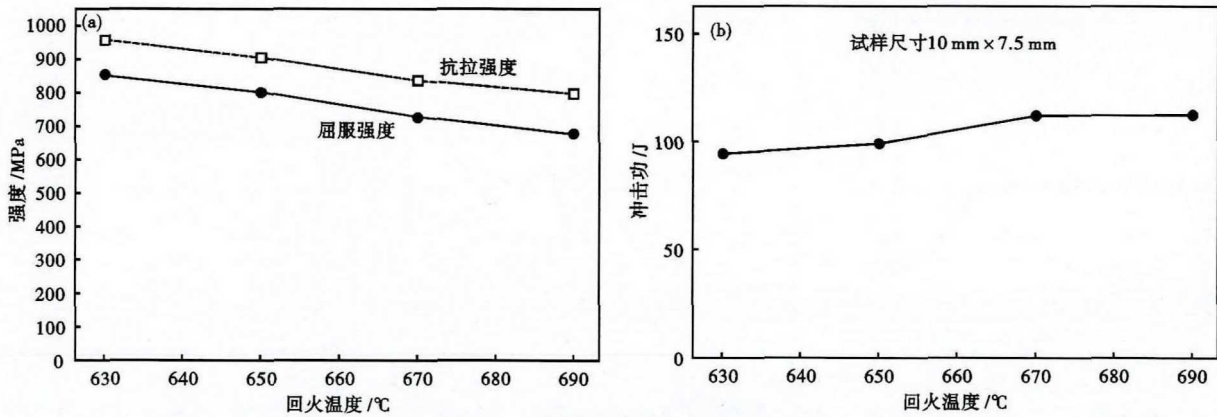


图2 920 °C淬火时回火温度对110SH-1钢级热采套管强度(a)和冲击功(b)的影响

Fig.2 Effect of tempering temperature on strength (a) and impact energy (b) of grade 110SH-1 thermal recovery casing quenched at 920 °C

表3 110SH-1钢级常规性能检验结果

Table 3 Results of routine performance tests of grade 110SH-1

项目	屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	均匀 延伸率/%	20 °C 冲击韧性/J		
标准要求	758 ~ 896	862 ~ 965	≥5.0	≥110		
室温	835	954	7.3	130	130	126

注:冲击韧性为10 mm × 7.5 mm × 55 mm 尺寸试样换算的数值。

表4 110SH-1钢级350 °C拉伸性能检验结果

Table 4 Tensile test results of grade 110SH-1 at 350 °C

项目	屈服强度/ MPa	强度下降 比例/%	抗拉强度/ MPa	强度下降 比例/%
标准要求	≥644	-	≥733	-
高温350 °C	778	6.8	896	6.0

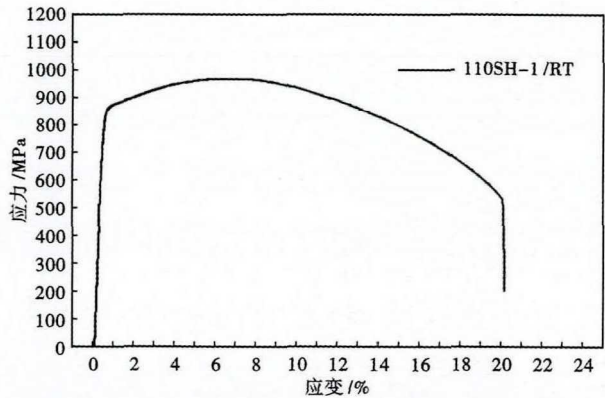


图4 110SH-1钢级室温拉伸应力-应变关系曲线

Fig.4 Tensile stress-strain curve of grade 110SH-1 at room temperature

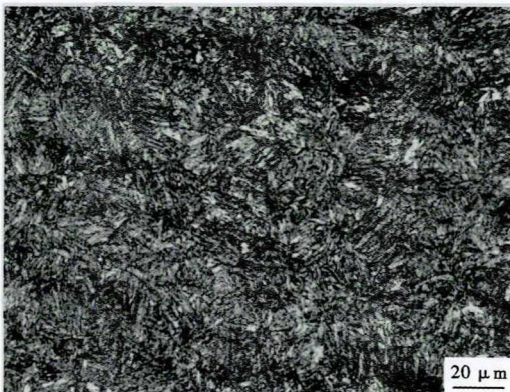


图3 110SH-1钢级热采套管的组织形貌

Fig.3 Morpholog of structure of grade 110SH-1 thermal recovery casing

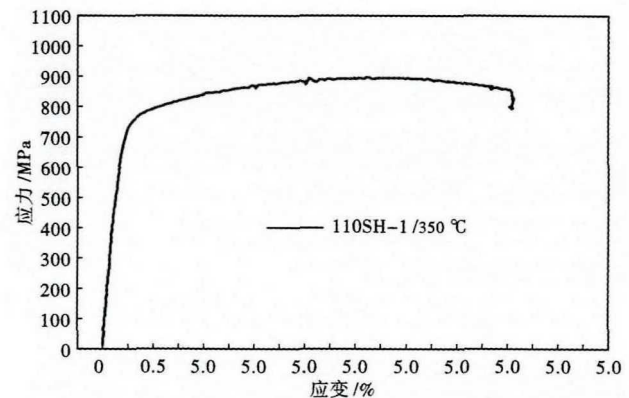


图5 110SH-1钢级350 °C拉伸应力-应变曲线

Fig.5 Tensile stress-strain curve of grade 110SH-1 at 350 °C

度,结果图3所示。可见,110SH-1钢级热采套管的金相显微组织为回火索氏体,晶粒度8级,均满足SY/T 6952.2-2013 行业标准要求。

#### 4.3 高温蠕变性能

从110SH-1钢级热采套管管体上取样,加工成高温蠕变试样。试样规格为Φ5 mm × 25 mm。高温蠕变试验在Instron-8862型高精度电子蠕变疲劳试验机上进行,蠕变试验条件高温350 °C下保持施加载荷20 h,采用高温引伸计、Bull-Hill软件组成的系

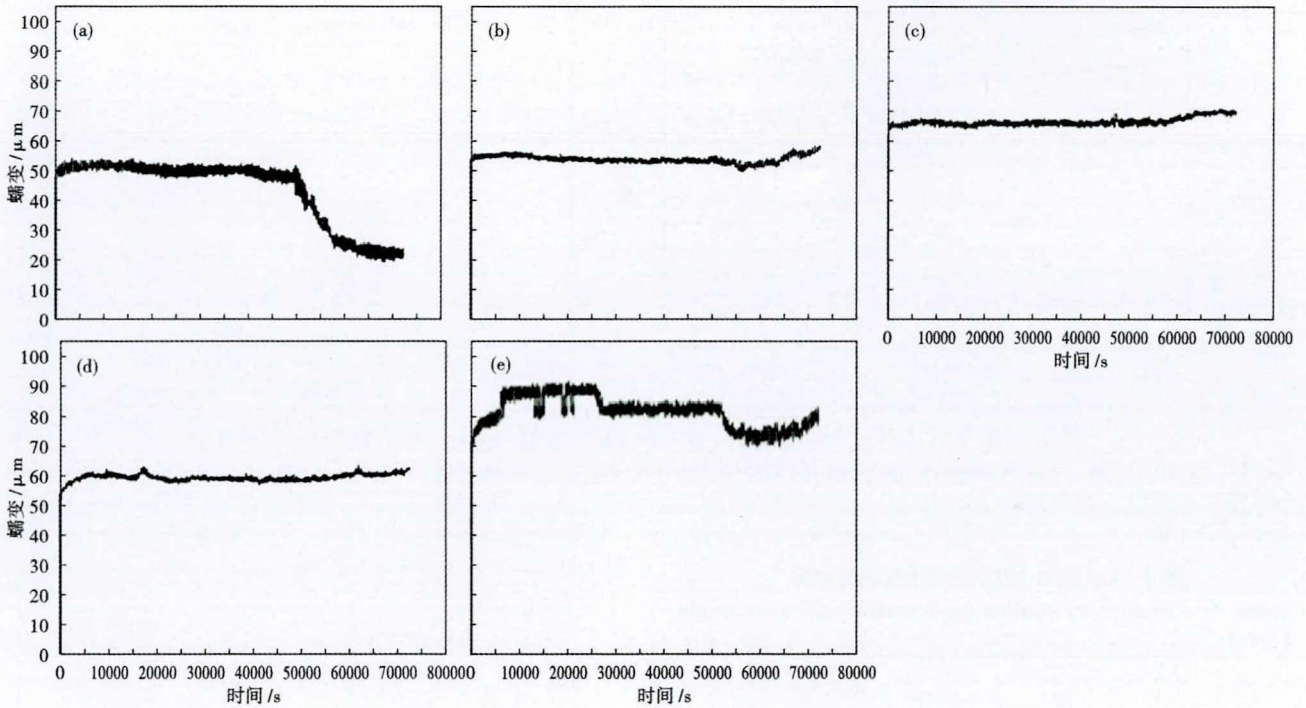


图 6 600 MPa (a), 620 MPa (b), 640 MPa (c), 680 MPa (d) 和 700 MPa (e) 在 350 °C 下加载 20 h 110SH-1 钢级热采套管管体蠕变-时间关系曲线

Fig. 6 Creep-time relationship curve of grade 110SH-1 thermal recovery casing load at 350 °C for 20 h with 600 MPa ( a ), 620 MPa ( b ), 640 MPa ( c ), 680 MPa ( d ) and 700 MPa ( e )

统采集变形量。材料施加拉应力 600、620、640、680、700 MPa, 试样蠕变-时间关系曲线如图 6 所示。110SH-1 钢级热采套管的蠕变试验表明, 随施加载荷增加, 材料的蠕变速率呈增加趋势。不同拉伸应力下材料的蠕变速率-载荷关系非线性拟合后得到蠕变速率本构曲线, 将材料的蠕变本构曲线与 SY/T 6592.3-2013 行业标准要求的蠕变速率本构曲线进行比较, 110SH-1 钢级热采套管的曲线均位于标准要求的临界曲线之下, 即其蠕变速率小于临界蠕变速率, 满足标准要求。350 °C 下 110SH-1 钢级热采套管的蠕变本构方程汇总如表 5 所示。

4.4 管体拉伸至失效

在 2 500 kN 复合加载试验机上将 110SH-1 钢级热采套管管体的拉伸至失效, 管体拉伸至失效曲线如图 7 所示, 断裂载荷为 4 292.3 kN, 满足 SY/T 6592.3-2013、API TR 5C3 标准要求。结果如表 6 所示。

表 5 350 °C 110SH-1 钢级热采套管管体的蠕变本构方程  
Table 5 Creep constitutive equations of grade 110SH-1 thermal recovery casing at 350 °C

试样	蠕变本构方程
110SH-1 钢级热采套管体	$\dot{\epsilon}_c = 2.73 \times 10^{-8} \times e^{\frac{\sigma}{109.7}} - 1.82 \times 10^{-6}$
SY/T6592.3-2013 标准要求	$\dot{\epsilon}_c = 7.40 \times 10^{-9} \times e^{\frac{\sigma}{97.80}} - 1.95 \times 10^{-6}$

4.5 管体挤毁

在复合挤毁试验机上测试 110SH-1 钢级热采套管抗挤毁性能得出, 挤毁试验的加载曲线-时间

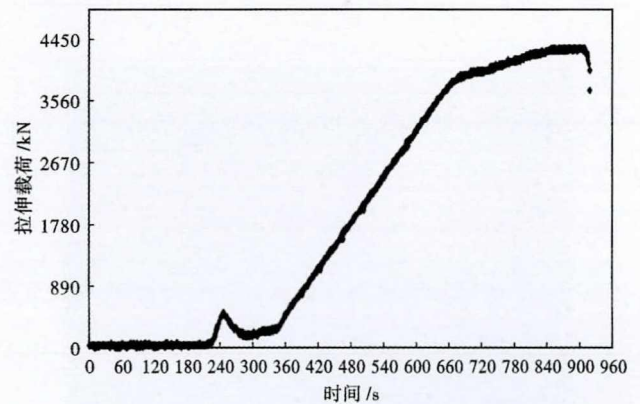


图 7 110SH-1 钢级热采套管实物拉伸至失效载荷-时间关系曲线

Fig. 7 Relationship curve of grade 110SH-1 thermal recovery casing failure load-time

表 6 110SH-1 钢级热采套管拉伸至失效结果汇总  
Table 6 Summary of grade 110SH-1 hot recovery casing tensile test to failure results

规格/mm × mm	抗拉载荷/kN	
	断裂值	标准要求值
Φ177.8 × 9.19	4 292.3	≥3 695

表7 110SH-1钢级热采套管挤毁试验结果

Table 7 Results of grade 110SH-1 thermal recovery casing extrusion test

规格/mm × mm	挤毁强度/MPa	
	极限试验值	标准要求值
Φ177.8 × 9.19	47.7	≥42.9

表8 110SH-1钢级热采套管内压爆破试验结果

Table 8 Inner pressure blasting test results of grade 110SH-1 thermal recovery casing

规格/mm × mm	内压爆破/MPa	
	极限试验值	标准要求值
Φ177.8 × 9.19	103.1	≥68.6

关系,挤毁的极限载荷为47.7 MPa,满足SY/T6952.3-2013、API TR 5C3标准要求。结果如表7所示。

#### 4.6 管体内压爆破

110SH-1钢级热采套管管体内压在实物爆破系统上完成,爆破后断口具有撕裂特征,得出施加内压-时间关系,结果表明,抗内压极限载荷为103.1 MPa,满足SY/T 6952.3-2013、API TR 5C3标准要求。结果如表8所示。

#### 5 结论

根据热采套管的工况环境,从材料的低膨胀系

数、化学成分设计、热处理工艺研究等出发,研制了一种高强度高韧性的110SH-1钢级热采套管。通过国内知名钢管检测机构对材料的常规性能、高温蠕变性能、全尺寸爆破、全尺寸挤毁等项目的测试结果表明,110SH-1钢级热采套管完全满足SY/T 6952.2-2013行业标准要求。

#### 参考文献

- [1] 张锐.稠油热采技术[M].北京:石油工业出版社,1999:1-3.
- [2] 刘文章.中国稠油热采技术现状及发展前景[J].世界石油工业,1998,14(5):15-18.
- [3] 吴奇,张义堂,任芳祥,等.国际稠油开采论文集[C].北京:石油工业出版社,2002:36-44.
- [4] 张峰.稠油热采并套管损坏研究进展[J].化工技术与开发,2018,47(8):34-35.
- [5] SY/T6952.2-2013.基于应变设计的热采井套管柱第2部分:套管[S].北京:国家能源局2013:3-4.
- [6] 米寿荣,李振坤,张兴光,等.稠油热采并套管YHP110H的开发[J].中国石油和化工标准与质量,2013,34(11):171-172.
- [7] 梁耀能.工程材料及加工工程[M].北京:机械工业出版社,2001:108-109.

唐科(1986-),男,工程师,2009年重庆科技学院(本科)毕业,无缝钢管产品开发。E-mail:tangke@citicsteel.com.

收稿日期:2020-04-01

## 下期要目

- 40 t 钢包底吹特征的水力学模拟研究 ..... 欧修龙等
- 20Cr 钢曲轴锻件翘皮成因分析和工艺改进 ..... 李仕超等
- 100 t 转炉用含钛铁水冶炼高碳钢的留渣 + 单渣操作实践 ..... 翟勇强等
- 中间包双挡渣墙对冷镦钢 Q10B21-C 夹杂物去除工艺实践 ..... 郭健等
- 20 钢管 LF 精炼渣系优化的工艺试验 ..... 朱富强等
- AISI 410SS 钢 Φ200 mm 锻材轴心晶间裂原因分析与工艺改进 ..... 张军等
- 冷轧 0.10C5Mn2Al 钢在应变速率  $10^{-2}/s$  的超塑性研究 ..... 刘思涵等
- 热处理工艺对 40CrMnMo 钢低温冲击韧性的影响 ..... 张越等
- RH 不加钙处理对 SCM435 冷镦钢 D 类和 Ds 类夹杂物的影响 ..... 李永超等