



12Cr1MoVG 厚壁钢管高温正火+回火的组织和性能

张银桥^{1,2}, 孔繁革^{1,2}, 张继宏^{1,2}, 王煜³, 朱志宝^{1,2}, 李勇^{1,2}, 李海松^{1,2}

(1 大冶特殊钢有限公司钢管研究所, 黄石 435001; 2 高品质特殊钢湖北省重点实验室, 黄石 435001;

3 上海锅炉厂有限公司, 上海 200245)

摘要: 通过显微组织观察和室温拉伸试验、室温冲击试验、硬度试验和高温持久性能试验, 研究了 $\Phi 457 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}$ 12Cr1MoVG ($\text{C} : 0.13\%$, $\text{Si} : 0.21\%$, $\text{Mn} : 0.56\%$, $\text{Cr} : 1.07\%$, $\text{Mo} : 0.31\%$, $\text{V} : 0.20\%$, $\text{P} : 0.008\%$, $\text{S} : 0.004\%$, $\text{Ni} : 0.02\%$, $\text{Cu} : 0.004\%$, $\text{Al} : 0.012\%$) 钢管在 $1\ 000\text{ }^\circ\text{C}$ 正火后采用水雾加速冷却和 $740\text{ }^\circ\text{C}$ 回火的组织和性能。结果表明: 显微组织为铁素体+贝氏体, 贝氏体体积约占 65%, 晶粒度 7~5 级; 屈服强度为 416 MPa, 抗拉强度为 575 MPa, 室温冲击功为 206~244 J, 布氏硬度 187HBW; $575\text{ }^\circ\text{C} \times 10^5 \text{ h}$ 持久强度为 86 MPa; $575\text{ }^\circ\text{C} / 100 \text{ MPa}$ 持久 51 480 h 未断; $575\text{ }^\circ\text{C} / 120 \text{ MPa}$ 持久 27 198 h 断裂, 试样开裂起源于晶界蠕变孔洞, 周边贝氏体基体没有发现严重的球化等现象, 组织稳定性优异。

关键词: 12Cr1MoVG 厚壁钢管; 组织与性能控制; 贝氏体; 高温持久强度

DOI: 10. 20057/j. 1003-8620. 2023-00043 **中图分类号:** TG156

Microstructure and Properties of 12Cr1MoVG Thick-wall Steel Pipe with High Temperature Normalizing + Tempering

Zhang Yinqiao^{1,2}, Kong Fange^{1,2}, Zhang Jihong^{1,2}, Wang Yu³, Zhu Zhibao^{1,2}, Li Yong^{1,2}, Li Haisong^{1,2}

(1 Steel Pipe Products Institute, Daye Special steel Co., Ltd., Huangshi 435001, China; 2 Hubei Province Key Laboratory for High Quality Special Steel, Huangshi 435001, China; 3 Shanghai Boiler Works Co., Ltd., Shanghai 200245, China)

Abstract: Microstructure and properties of $\Phi 457 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}$ 12Cr1MoVG steel pipe ($\text{C} : 0.13\%$, $\text{Si} : 0.21\%$, $\text{Mn} : 0.56\%$, $\text{Cr} : 1.07\%$, $\text{Mo} : 0.31\%$, $\text{V} : 0.20\%$, $\text{P} : 0.008\%$, $\text{S} : 0.004\%$, $\text{Ni} : 0.02\%$, $\text{Cu} : 0.004\%$, $\text{Al} : 0.012\%$) after $1\ 000\text{ }^\circ\text{C}$ normalizing plus using water mist accelerated cooling and $740\text{ }^\circ\text{C}$ tempering were studied by means of microstructure observation, tensile test, impact test at room temperature, hardness test and high temperature durability test. The results showed that the microstructure consisted of ferrite and bainite, with the volume of bainite accounting for 65%, and the grain size of 7-5 grade. Yield strength was 416 MPa, tensile strength was 575 MPa, impact energy at room temperature was 206-244 J, brinell hardness was 187HBW. The endurance strength under $575\text{ }^\circ\text{C} \times 10^5 \text{ h}$ was 86 MPa. It lasted 51 480 hours at $575\text{ }^\circ\text{C} / 100 \text{ MPa}$ unbroken. After 27 198 hours, it cracked under $575\text{ }^\circ\text{C} / 120 \text{ MPa}$, and the crack originated from grain boundary creep pores, no serious spheroidization was found in the bainite matrix surrounding. The structure stability was excellent.

Key Words: 12Cr1MoVG Steel Pipe with Thick-wall; Microstructure and Properties Control; Bainite; High Temperature Endurance Strength

12Cr1MoVG 钢是一种广泛应用于火力发电厂高温部件的钢种, 具有较高的持久强度、持久塑性和良好的抗氧化性能, 焊接性能及其冷热成型良好, 其大口径管通常用于蒸汽温度 $\leq 550\text{ }^\circ\text{C}$ 的集箱、蒸汽管道、管件等重要部件^[1-3]。

12Cr1MoVG 钢最初的标准 YB 529-65 (YB6-59) 是等效采用前苏联标准 ГОСТ10802-64 (ГОСТ 4543-59) 标准中的 12Cr1MoV 材料, 时至 GB/T 5310-2017《高压锅炉用无缝钢管》, 材质的性能要求基本没有大的改变。12Cr1MoVG 钢对热处理比较敏感, 其力学性能与热处理规范有很大的关系。随着火力发电机组的参数提升, 管道(管件)外径和壁厚都

随之增加, 尺寸效应凸显, 在成型和热处理方面面临巨大挑战, 诸如钢管的强度不足、硬度不均、冲击功波动、组织不均匀等现象频发, 微合金化和热处理工艺研究改进提升了钢管的强韧性^[4-10]。大容量、高参数发电机组迫切需要组织均匀、稳定、可靠性好的优质大口径厚壁钢管, 以确保其安全可靠运行。

12Cr1MoVG 钢的显微组织允许有多种形式存在, 如铁素体+珠光体、铁素体+粒状贝氏体、铁素体+粒状贝氏体+珠光体、全贝氏体等组织都是允许的。在行业内, 钢管通常的组织形态是铁素体+珠光体+少量的贝氏体, 存在大量的贝氏体组织经常

按异常组织处理,而视为特殊产品。具有大量贝氏体组织的钢管在高温长时运行工况下,其组织稳定性如何,持久性能的表现如何,国内还没有文献报道。本文对采用正火加速冷却工艺的12Cr1MoVG钢大口径厚壁管产品进行常规性能检验和长期高温持久试验,探索此类组织的稳定性,为制造大口径厚壁12Cr1MoVG无缝钢管进行有益探索。

1 试验材料及方法

试验材料生产流程为:120 t转炉冶炼+LF精炼+RH脱气→连铸Φ700 mm圆坯→锻造Φ460 mm圆钢→热轧钢管(Φ457 mm×70 mm)→正火处理→回火处理→无损检测→精整及包装。为使钢具有高纯净度,冶炼过程中,控制转炉终点[C]≤0.06%, [P]≤0.012%, [S]≤0.007%,出钢时加铝脱氧;钢包喂线控制[Al]≤0.018%,并使用FeSi、SiC、Al粒扩散脱氧;RH工序极限真空度≤67 Pa,精炼时间≥15 min;严格控制中间包钢水过热度。锻造工序控制终锻温度≥780 °C,锻后660~680 °C去应力退火;管坯加热温度≤1 260 °C,锥形辊斜轧穿孔+Assel轧管。GB/T5310-2017中允许的正火温度是980~1 020 °C,回火温度是720~760 °C。正火温度选择时,考虑到正火温度升高,钢中碳与合金元素的溶解量增大,珠光体转变的孕育期变长,有利于获得贝氏体组织,但是过高温,会加剧晶粒的长大,故选择正火温度1 000 °C,保温105 min,出炉后采用水雾加速冷却,500 °C以上冷却速度1.25~1.00 °C/s;回火温度740 °C,保温180 min,出炉空冷。钢管的化学成分见表1。

完成热处理,在钢管的1/4壁厚处横向切取试样,加工Φ10 mm圆形拉伸试样,用QUASAR300拉伸试验机进行常温拉伸试验,用RD2-3拉伸试验机进行高温拉伸试验,试验温度575 °C,加载应力分别是150、130、120、110、100 MPa。采用JBW-450C冲击试验机依据GB/T229-2020《金属材料夏比摆锤冲击试验方法》进行冲击试验。采用OLYMPUS BX51M金相显微镜和Quanta400F场发射环境扫描电镜观察试验钢管的晶粒大小和显微

组织,以及观察长期高温时效后的组织变化和应力载荷下产生的组织变化。用Brin200DEL全自动布氏硬度机,测试试验钢的硬度和持久残样夹持端(未变形)、标距应变部位和断口附近的硬度。

2 试验结果与讨论

2.1 钢管的显微组织

试验钢管的光学显微组织如图1所示,SEM显微组织形貌如图2(a)所示。由图1可知,显微组织为贝氏体+铁素体+珠光体,贝氏体组织占比最多。从图2(b)可知,贝氏体组织在形态上有一定的位相关系,层状结构较为致密,铁素体内部及晶界处均未发现明显的析出物,珠光体含量很少。由图1(a)可见,依据GB/T6394-2017《金属平均晶粒度测定方法》评定,晶粒度7~5级。很明显,试验用钢的显微组织与常见的组织存在差异,即含有大量的贝氏体组织,贝氏体量约占65%。

过冷奥氏体连续冷却转变曲线(CCT曲线)是制定热处理工艺的依据,JMatpro软件模拟的12Cr1MoVG钢的CCT曲线如图3所示。由图3可知,奥氏体化后冷却速度不同,获得的组织不同。现场热处理过程中,由于受钢管自身散热、支撑工具温度、水温、水雾效果、钢管弯曲等因素影响,冷却速度控制难度较大。根据图3,试验钢管正火采用水雾加速冷却,冷却速度为1.25~1.00 °C/s,显微组织是贝氏体+铁素体+珠光体,与实际获得的组织吻合。

2.2 钢管的室温力学性能

试验钢管的力学性能结果见表2。其钢材试样的屈服强度为416 MPa,抗拉强度为575 MPa,抗拉强度比标准最低值要求高105 MPa,横向断后伸长率24.5%。同时,钢材横向试样室温冲击功为206~244 J,冲击功远超标准要求,未出现厚壁12Cr1MoVG钢管常发生冲击功波动或不足的问题。钢管的布氏硬度187HBW,接近标准硬度要求的上限。

铁素体组织是12Cr1MoVG钢的基本组织形态,一般以先析和共析方式存在,它可以提升材质韧

表1 12Cr1MoVG钢管的化学成分(质量分数)
Table 1 Chemical composition of 12Cr1MoVG steel pipe

项目	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	P	S	Ni	Cu	Al
GB/T 5310	0.08~0.15	0.17~0.37	0.40~0.70	0.90~1.20	0.25~0.35	0.15~0.30	≤0.025	≤0.010	≤0.30	≤0.20	-
试验钢管	0.13	0.21	0.56	1.07	0.31	0.20	0.008	0.004	0.02	0.004	0.0124

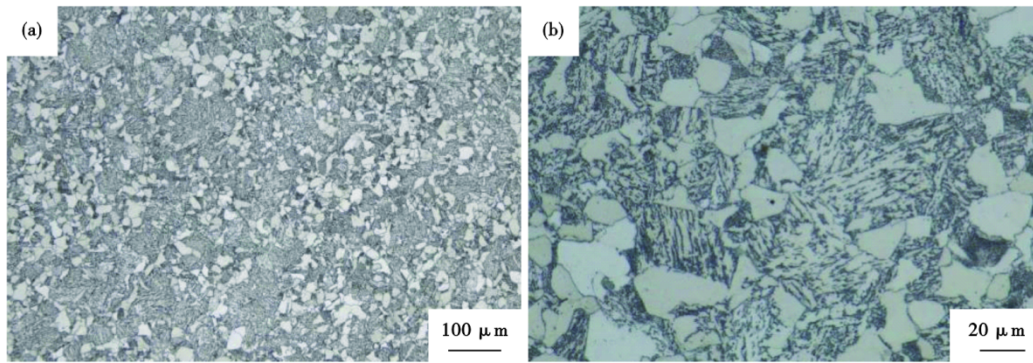


图 1 12Cr1MoVG 试验钢管的组织形貌:(a)OM,(b)OM
Fig. 1 Morphology of microstructure of 12Cr1MoVG test steel pipe:(a)OM, (b)OM

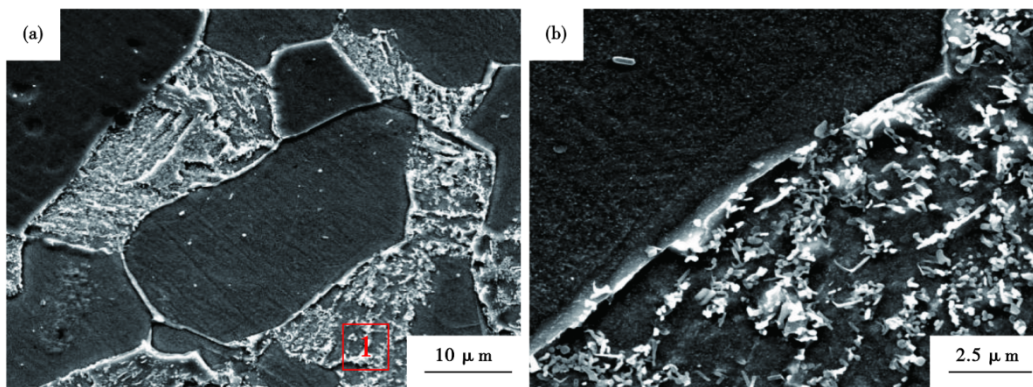


图 2 12Cr1MoVG 试验钢管的显微组织:(a)SEM 图,(b)SEM(1)处局部放大图像
Fig. 2 Microstructure of 12Cr1MoVG test steel pipe:(a) SEM image, (b) SEM (1) partially enlarged image

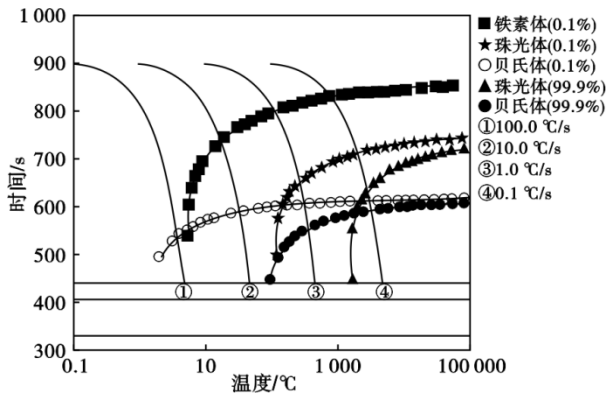


图 3 12Cr1MoVG 试验钢的 CCT 曲线
Fig. 3 CCT curves of 12Cr1MoVG test steel

并有提升整体强度的作用,组织形态依冷却速度和区域的成分差异,以层片状或颗粒状形态存在。贝氏体组织是 12Cr1MoVG 钢的另一种组织存在,一般呈粒状贝氏体形态,由于冷速和区域成分变化等因素,粒状贝氏体形态也呈多样形态,性能也有不同的表现。如果正火冷却速率较慢,会引起钒的碳化物聚集长大,沿晶界的聚集长大会使材料脆化,在铁素体内聚集长大会影响强度及韧性^[11]。12Cr1MoVG 钢厚壁钢管正火空冷或冷却不足,显微组织为常规的铁素体+珠光体,或为铁素体+珠光体+少量贝氏体,且容易导致强度偏低或不足,且伴随冲击功波动或不合格。试验钢管正火采用水雾加速冷却,能抑制 V(C,N)碳化物在先析铁素体和沿晶界析出及长大,组织中出現较多的贝氏体,强

性,晶界上的先析铁素体也有一定的净化晶界的作用。珠光体组织一般在共析时产生,组织相对稳定

表 2 12Cr1MoVG 试验钢管的力学性能
Table 2 Mechanical properties of 12Cr1MoVG test steel pipe

项目	抗拉强度 Rm/MPa	屈服强度 Rel/MPa	断后伸长率 A/%	冲击功 KV ₂ /J	硬度(HBW)
标准	470 ~ 640	≥255	≥19	≥27	145 ~ 195
试验钢管	575	416	24.5	244/240/206	187

度、延伸率和冲击功富余量大,说明了贝氏体组织有益韧性和强度提升。

2.3 钢管的高温持久性能

高温持久试验由上海锅炉厂有限公司测试,测试结果见表3。从测试结果看,最长测试时间已经达51 480 h。利用双对数法外推 10^5 h持久强度,持久应力与加载时间的关系式: $\lg\sigma = 3.146 - 0.242 3 \lg T$ 。经推算, $575\text{ }^\circ\text{C} \times 10^5$ h持久强度为86 MPa,满足国标 10^5 h外推持久强度 ≥ 80 MPa的要求(通过插值法获得)。从测试数据的试验应力与加载时间来看,直至最长51 480 h未断(试验中),曲线没有明显的折线点,有较好的线性关系,关系曲线如图4所示。贝氏体含量可以影响12Cr1MoVG钢的持久强度,提高正火温度或正火冷却速度可获得较多的贝氏体,抑制了碳化物在晶界析出和粗化,增加了晶界强度,从而提高钢的持久强度^[12]。

表3 12Cr1MoVG试验钢管575 °C持久试验结果

Table 3 Results of 575 °C durability test of 12Cr1MoVG test steel pipe

应力/MPa	持续时间/h	样品状态
150	9 038	断裂
130	24 078	断裂
120	27 198	断裂
110	31 732	断裂
100	>51 480	未断

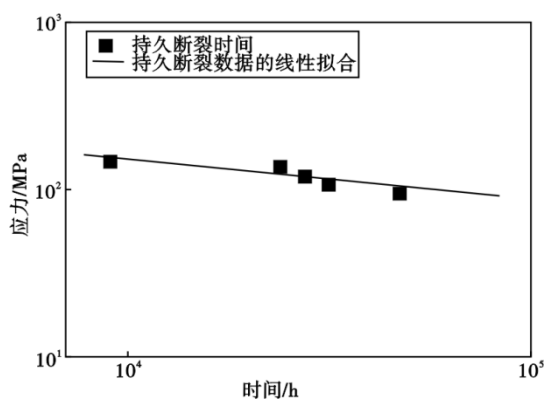


图4 12Cr1MoVG试验钢管持久应力与加载时间的关系

Fig. 4 Relationship between lasting stress and loading time of 12Cr1MoVG test steel pipe

2.4 长时高温时效后的组织和硬度

对575 °C/120 MPa持久27 198 h断裂试样进行了纵向线切割,并截断成夹持端(1#)、近夹持端(2#)、近断口(3#)和断口段(4#),如图5所示。从试样夹持端向断口端依次进行布氏硬度测试,夹持端

和远离断口的部位硬度变化不大,1#、2#部位硬度为177~175HBW,较未进行高温持久试验前的硬度187HBW降低了10HBW。随之靠近断口,硬度降低幅度越大,如图5中3#、4#部位硬度依次为174、161、157、154HBW。

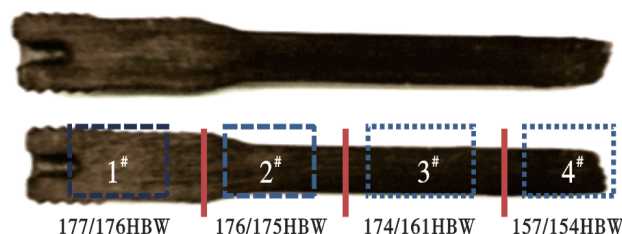


图5 持久试验纵向剖开及截断示意图

Fig. 5 Schematic diagram of longitudinal incision and truncation for durable specimen

试样夹持端光学显微组织如图6(a)所示,金相组织稳定,SEM下观察如图6(b)所示,铁素体区域有弥散且均匀分布的初期析出物,贝氏体区域碳化物未见有明显长大,晶界有析出物并聚集呈块状或短棒状。近夹持端的显微组织如图7(a),(d)所示,珠光体区域发生明显的球化,层状内的碳化物(Fe_3C)相明显碎化,晶界有大量析出物并长大呈块状;近断口(3#)铁素体区域附近出现 M_7C_3 型碳化物,且出现零星的蠕变孔洞,有链状 M_{23}C_6 型碳化物析出。贝氏体区域的基体没有明显的变化,有一定数量的析出物,但是没有粗化现象。在靠近断口附近,晶界处碳化物明显聚集,三角晶界处萌生蠕变孔洞,如图7(b),(e)所示,并出现逐渐长大、聚合态势,如图7(c),(f)所示。在500 °C以上高温,Cr和Mo发生扩散迁移,由此也引起晶粒长大、珠光体消散,固溶体内合金元素的贫化和碳化物从晶内向晶界的转移及分布^[13]。在温度和应力的作用下,可能会促进元素的迁移,从夹持端依次向断口端,铁素体基体中碳化物逐渐减少,晶界粗化逐渐明显,说明铁素体中的合金元素逐渐贫化并迁移。碳化物相的晶界聚集与粗化,导致蠕变孔洞形核,降低基体的强化作用,使得断裂强度降低^[14]。越靠近断口,晶粒变形拉长,碳化物析出及粗化越明显,并出现零星的蠕变孔洞,这也说明了从夹持端到断口端,硬度有逐渐降低的趋势。

3 结论

(1) $\Phi 457\text{ mm} \times 70\text{ mm}$ 厚壁12Cr1MoVG试验钢管经1 000 °C正火采用水雾加速冷却,500 °C以上冷

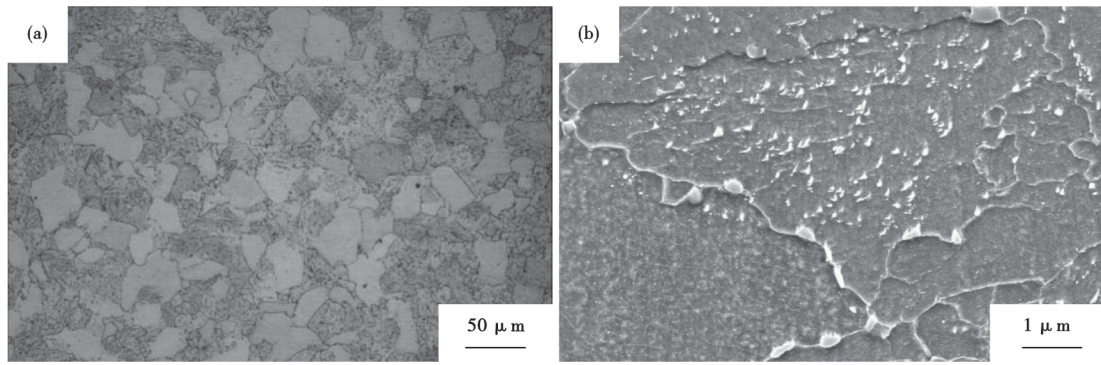


图6 12Cr1MoVG 1#试验钢管 575 °C时效的显微组织形貌:(a)OM,(b)SEM
Fig. 6 Microstructure morphology of 12Cr1MoVG 1# steel tube aged at 575 °C : (a) OM , (b) SEM

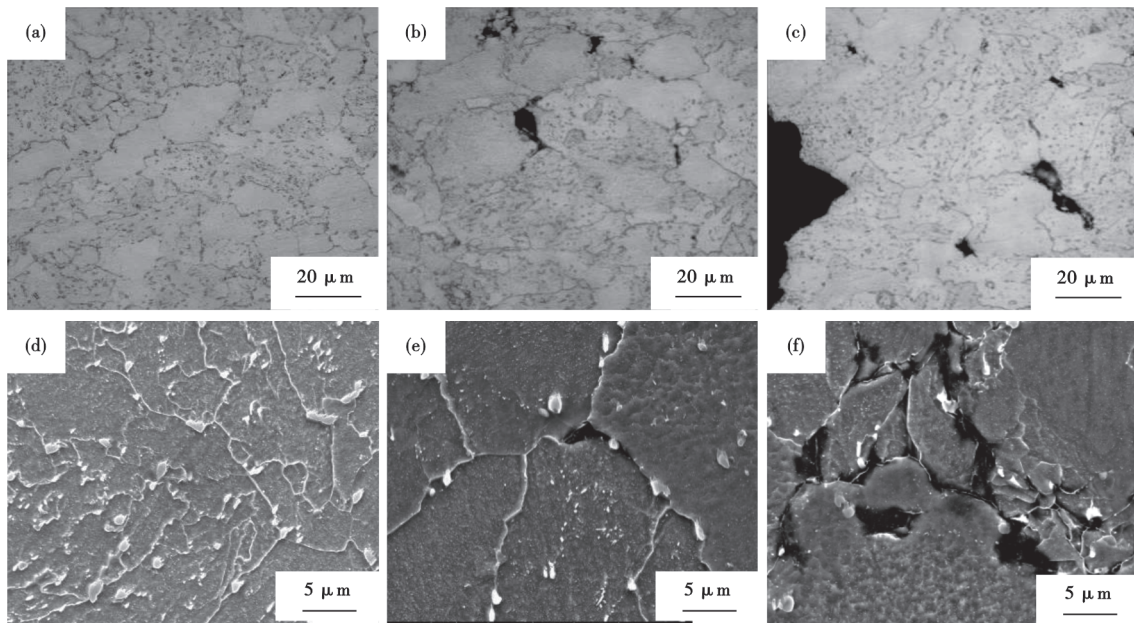


图7 575 °C/120 MPa 载荷应力下的组织演变:(a)(d)2#承受应力的部分,(b)(e)3#近断口区萌生蠕变孔洞,(c)(f)4#蠕变孔洞在断口处萌生,蠕变孔洞在断口处长大、汇聚

Fig. 7 Microstructure evolution under 575 °C/120 MPa load stress: (a) (d) 2# part under stress , (b) (e) 3# area near the fracture area , (c) (f) 4# creep hole initiation at the fracture area, the creep hole grows large and converges at the fracture

却速度 1.25 ~ 1.00 °C/s,加 740 °C回火处理。显微组织为铁素体+贝氏体,且贝氏体量约占 65%。试验钢管屈服强度为 416 MPa,抗拉强度为 575 MPa,室温冲击功为 206 ~ 244 J,布氏硬度 187HBW。性能满足 GB/T5310-2017 要求,且强度和室温冲击功富余量大。

(2) 试验钢管的 575 °C 高温持久性能优异,

575 °C×10⁵h 持久强度为 86 MPa,符合国标要求。575 °C/100 MPa 持久直至最长 51 480 h 未断(试验中),曲线没有明显的折线点,有较好的线性关系。

(3) 具有大量粒状贝氏体组织的 12Cr1MoVG 材质,575 °C/120 MPa 持久 27 198 h 断裂,试样开裂起源于晶界蠕变孔洞,周边贝氏体基体没有发现严重的球化等现象,组织稳定性优异。

参考文献

[1] 林肇杰,钟倩霞,程世长,等. 我国火电锅炉和电站用钢管的现状与发展[J]. 钢管,1996,25(1):1-3.
 [2] 杨华春,屠 勇. 超(超)临界机组锅炉钢管选材与国产化可行性[J]. 发电设备,2005,19(1):37-42.
 [3] 杨秀琴. 我国油井管、电站锅炉管国产化的发展历程--纪念《钢管》杂志创刊50周年[J]. 钢管,2014,43(3):1-5.
 [4] 周 波,崔润炯,郭元蓉,等. 12Cr1MoVG 钢大直径厚壁锅炉钢管的热处理工艺优化[J]. 钢管,2001,30(1):34-38

- [5] 罗能,郭元蓉,胡铂,等. 12Cr1MoVG无缝钢管步进炉热处理工艺研究[J]. 四川冶金, 2016, 38(5): 18-21.
- [6] 肖功业,秦利波,何彪,等. 热处理工艺对12Cr1MoVG厚壁无缝钢管表面硬度的影响[J]. 钢管, 2015, 44(3): 20-24.
- [7] 杨煌光,姚火能,杨玲,等. 亚共析钢中厚壁无缝管水-空循环冷却的正火组织与性能控制[J]. 特殊钢, 2021, 42(3): 47-51.
- [8] 方磊,左秀荣,姜金星,等. 深海Nb-Ti微合金化X65MO管线板管强度和韧性研究[J]. 特殊钢, 2021, 42(1): 86-90.
- [9] 熊刚,夏文斌,李端正,等. X65QO Φ457 mm×25.4 mm大口径深海海底无缝钢管的开发和应用[J]. 特殊钢, 2021, 42(5): 41-45.
- [10] 张行刚,张昭,郭志文,等. 厚壁12Cr1MoVG高压锅炉管热处理工艺优化研究[J]. 钢管, 2019, 48(6): 34-37.
- [11] 宋文强,李尚林. 热处理工艺对12Cr1MoV钢显微组织和力学性能的影响[J]. 理化检验(物理分册), 2017, 53(2): 97-100.
- [12] 彭美珍. 12Cr1MoV钢持久强度的质量控制[J]. 钢铁, 1993, 28(2): 50-55.
- [13] 杨瑞成,傅公维,王晖,等. 12Cr1MoV钢高温时效中组织结构变化的原子扩散分析[J]. 特殊钢, 2004, 25(3): 6-9.
- [14] 王海燕,高雪云,刘宗昌,等. 12CrMoV钢主蒸汽管道的蠕变疲劳失效分析[J]. 特殊钢, 2009, 30(1): 68-69.

投稿须知

本刊面向国内外征稿,主要刊登特殊钢领域的具有创新性、科学性、前沿性、有实践指导意义的论文,涉及综述、试验研究、工艺新材料、工艺技术、组织和性能、应用、动态信息等栏目。来稿应观点明确、论据充分、数据详实、层次分明、文理通顺。

1 投稿要求

- 1.01 来稿内容文责自负,不得涉及国家机密,必须符合国家法律法规;
- 1.02 借鉴参考文献:企业作者应不少于10篇(其中建议英文1~2篇),其他作者引用文章应不少于15篇(其中英文≥5篇),综述类文章参考文献应不少于30篇。参考文献中须三分之二在最近5年以内出版的,保证其引用的时效性和新颖性。见知网-万方网-《特殊钢》出版论文;
- 1.03 论文题目应简洁、准确,不宜使用缩略词;摘要(中文)字数一般在300~500字间,内容应包括论文的研究目的、方法及研究结果等;英文摘要字数在400~600个单词左右(鼓励英文长摘要,对中文摘要内容进行拓展,便于国际化传播),简要介绍研究背景、研究内容、研究成果。关键词的个数为3~8个;
- 1.04 论文电子版为彩色出版,纸质期刊原则上为灰度印刷,请确保图片在灰度模式下也能够清晰可辨,不接受截屏图片;
- 1.05 投稿前需按照本刊下载中心“杂志投稿模板及要求”进行修改。不尽之处可参考近期出版的《特殊钢》论文;
- 1.06 若研究成果获得过奖励或属国家、省、部级有关基金资助项目,在文末注明项目名称和编号;
- 1.07 网络投稿时,必须准确、完整地填写所有署名作者的信息;无高级职称在读硕士研究生的文章需注明:导师姓名、通讯地址、职务(称)、邮编等作者单位(包括二级单位)应写全称;
- 1.08 请填写中图分类号TF或TG类,中国图书馆分类法链接:<http://www.ztflh.com/>,通常在“工业技术”中的“TF—冶金工业”或“TG—金属学与金属工艺”栏目;
- 1.09 修改稿请注明稿件编号,同时说明进行了哪些修改。每次修改的说明和修改稿都应留备份,以防丢失。修改稿需待编辑部讨论后,方能确定是否刊用。编辑部对来稿可作文字和编辑技术上的修改;
- 1.10 原稿必须是未在中外文正式刊物上发表的论文。本刊严禁一稿多投、重复内容多次投稿、不同文种重复投稿。一旦发现上述情况,稿件将按退稿处理,并将通知作者单位及材料冶金领域有关期刊。作者本人的稿件今后将不被录用;
- 1.11 稿件审查结果在2个月内通知作者,在此其间,作者不得将稿件投往他处。个别稿件可能送审时间较长,如果作者决定改投他刊或退稿,请通知编辑部后,再进行处理。编辑部决定录用稿件后,会及时通知作者;
- 1.12 退修稿件的修改时限为10日,编辑部将以作者返回修改稿日期作为投稿日期。如果需延期请事先联系编辑部,否则,超过30日,编辑部有权对稿件做出退稿处理;
- 1.13 文责自负,编辑部有权对稿件做技术性、文字性修改,在征得作者同意后可以进行实质内容的修改;
- 1.14 作者需交纳版面费,编辑部赠寄当期《特殊钢》杂志1~3册。
- (1)版面费1600元/篇(含专家审稿费);(2)不向作者收取审稿费用,相应费用由编辑部代付;(3)稿酬300元/篇。

2 著作权约定

论文被《特殊钢》编辑部录用后,论文所有作者需签署“著作权转让协议”后才能正式出版发行。“著作权转让协议”可从本刊官网下载中心下载。

《特殊钢》编辑部