

海洋平台用钢 EH420 耐火性能的研究

刘智良 董瑞峰

(内蒙古工业大学材料科学与工程学院, 呼和浩特 010051)

摘要 试验用 EH420 钢(/% : 0. 20C, 0. 38Si, 1. 63Mn, 0. 007P, 0. 001S, 0. 062V, 0. 017Nb, 0. 009Ti, 0. 021Al, 0. 38Ni, 0. 015Cu) 20 mm 板的生产流程为 210 t BOF-LF-RH-230 mm 坯连铸-热轧。分别在室温、450、480、500、600 °C 对 EH420 钢进行了拉伸试验, 并通过扫描电镜观察了拉伸试样断裂形貌和分析了断裂机理。结果表明, 该钢室温屈服强度为 443 MPa, 480 °C 屈服强度 270 MPa, 基本为室温屈服强度 2/3, 因此 EH420 钢在 480 °C 以下具有耐火性。

关键词 海洋平台用钢 EH420 耐火性 组织 拉伸断口

A Study on Fire-Resistant Performance of Steel EH420 for Off-Shore Drilling Platform

Liu Zhiliang and Dong Ruifeng

(School of Materials and Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Huhehaote 010051)

Abstract The production flowsheet of 20 mm plate of tested steel EH420 (/% : 0. 20C, 0. 38Si, 1. 63Mn, 0. 007P, 0. 001S, 0. 062V, 0. 017Nb, 0. 009Ti, 0. 021Al, 0. 38Ni, 0. 015Cu) is 210 t BOF-LF-RH-230 mm slab casing-rolling. The tensile test of steel EH420 is carried out at ambient temperature, 450 °C, 480 °C, 500 °C and 600 °C, the morphology of fracture of steel tensile specimen is observed by scanning electron microscope and the fracture mechanism of steel is analyzed. Results show that the yield strength of steel at ambient temperature is 443 MPa and the yield strength of the steel at 480 °C is 270 MPa which is basically equal to two-thirds of the yield strength of steel at ambient temperature, therefore the steel EH420 has fire resistance at less than 480 °C.

Material Index Steel EH420 for Offshore Drilling Platform, Fire Resistance, Structure, Tensile Fracture

舰船和海洋平台用钢的主要发展趋势为高强度、高韧性、良好的焊接性、耐腐蚀性能, 以及超长、超厚方向发展^[1]。EH420 为高强度船体结构用钢, 由于具有高强度、良好的塑、韧性和优良的加工性能、焊接性能和耐腐蚀等特性, 是一种重要的船体结构件的材料^[2]。舰船和海洋平台意外火灾或高温作业, 在高温下造成结构用 EH420 钢屈服强度、抗拉强度大幅降低。

参照耐火钢要求在遇到火灾的较短时间内的条件下能够保持较高的屈服强度。即钢的屈服点仍然能保持其屈服强度的 2/3 此值以上。

1 试验材料与方法

试验材料为 EH420 钢, 符合 GB 712-2011 标准, 化学成分见表 1。沿轧制方向取拉伸试样, 工作直径 10 mm, 标距 50 mm。金相试样取自夹头部位。

试验用钢的主要冶金生产工艺流程为: 210 t 顶底复吹转炉-LF + RH 精炼-连铸坯 230 mm × 1 800 mm; 热轧成品规格为 20 mm × 2 200 mm。

所有拉伸均在 WDW-200 型万能材料试验机上进行, 引伸计准确度为 1 级。室温对比试样根据 GB/T 228. 1-2010《金属材料室温拉伸试验方法》在室温以应变速率 $\dot{\epsilon}_t = 0. 402 \text{ min}^{-1}$ 进行拉伸。根据 GB/T 228. 2-2015《金属材料高温拉伸试验方法》, 高温拉伸试样放入电阻炉内以 10 °C/s 的速度分别加热至 450、480、500、600 °C, 加热炉采用上、中、下 3 个热电偶测温, 3 个热电偶温度值一致需要 (30 ± 5) min, 匀温后保温 60 min, 以 $\dot{\epsilon}_t = 0. 015 \text{ min}^{-1}$ 的应

表 1 EH420 钢的化学成分 / %
Table 1 Chemical composition of steel EH420 / %

C	Si	Mn	P	S	V	Nb	Ti	Al	Ni	Cu
0. 20	0. 38	1. 63	0. 007	0. 001	0. 062	0. 017	0. 009	0. 021	0. 38	0. 015

通讯作者: 董瑞峰, 教授, 内蒙古工业大学材料科学与工程学院, 呼和浩特 010051
E-mail: drfcsp@163.com



图 1 EH420 钢室温 (A_0), 450 °C (A_1), 480 °C (A_2), 500 °C (A_3), 600 °C (A_4) 拉伸试样断裂形貌

Fig. 1 Fracture morphology of tensile specimen of steel EH420 at ambient temperature (A_0), 450 °C (A_1), 480 °C (A_2), 500 °C (A_3) and 600 °C (A_4)

变速率拉伸, 拉断后空冷至室温。拉断试样如图 1。用 Axio Imager 蔡司光学显微镜和 JCM-6000 扫描电镜进行组织和断口分析。

2 试验结果和讨论

2.1 高温力学性能

金属弹性变形阶段的微观过程符合双原子模型, 常态下, 晶格中的离子能保持在各自平衡位置作微小的热振动, 由于受离子之间的引力和斥力相互作用力控制的结果。当作用外力时, 离子的位置亦随之作相应的调整, 即产生位移, 离子位移的总和在宏观上就表现为材料的变形。当外力去除后, 离子依靠彼此间的作用力又回到原来的平衡位置, 宏观的变形也随之消逝, 从而表现了弹性变形的可逆性。但当温度升高时, 原子振动加剧, 体积膨胀, 原子间距增大, 结合力减弱^[3]。

用碳素钢的经验公式计算该 EH420 钢的液相线温度^[4], 该式的计算精度为 4 °C。

$$T_m = 1536 - \{78[C] + 7.6[Si] + 4.9[Mn] + 34.4[P] + 33[S] + 4.7[Cu] + 3.1[Ni] + 1.3[Cr] + 3.6[Al]\} \quad (1)$$

当在较大的冷变形条件下, 金属再结晶的开始温度 (T_k) 与熔点 (T_m) 存在着经验公式^[5]。

$$T_k \approx (0.35 \sim 0.40) T_m \quad (2)$$

由公式(1)与公式(2)计算得再结晶温度在 527.77 ~ 603.170 °C。且随着压下率提高, 再结晶温度逐步降低, 压下率每增加 5%, 再结晶温度将降低 10 °C 上下^[6], 所以图 2 表明, 随拉伸温度的升高,

弹性变形范围逐渐变小, 抗拉强度降低。当超过抗拉强度时, 发生均匀的塑性变形, 由塑性变形阶段的曲线斜率和计算的再结晶温度范围可知, 在 400 ~ 500 °C 高温拉伸时, 主要为动态回复软化, 主要以铁素体的动态回复对引起应力软化^[7], 600 °C 高温拉伸时, 以再结晶的形式软化, 动态再结晶的软化效应大于加工硬化效应。且不仅动态再结晶分数增大, 宏观表现为随变形温度提高, 动态再结晶临界应力或应变值随之降低^[8-9]。而且在低的拉伸速率下, 再结晶完成的更充分, 更容易使再结晶晶粒长大, 提高软化效率^[10]。由图 2 可知, 从 450 °C 至 600 °C 塑性变化趋势基本一致。

室温拉伸取 EH420 钢的屈服上限, 高温拉伸由于没屈服平台, 根据 GB/T 228.1-2010 作比例伸长部分平行线方法, 近似 EH420 钢的屈服强度。图 3 (a, b) 为 EH420 钢的屈服强度、抗拉强度、断后收缩率和伸长率随温度变化的非线性拟合。比较图 3 (a, b) 可以得出随温度升高, 屈服强度和抗拉强度近似抛物线式下降, 断后收缩率呈指数上升, 伸长率呈直线上升。在 480 °C 时的屈服强度达到室温屈服强度的 2/3, 所以 480 °C 为其耐火性的参考标准。图 3(a) 在 600 °C 时, EH420 钢的屈服强度和抗拉强度相差很小, EH420 钢强度和抗拉强度值随温度升高呈降低的趋势, 以断面收缩率高于 60% 作为钢的高延性区, 由图 2 可知, EH420 钢在 600 °C 达到高塑性^[11-12]。图 3 高温力学性能的机理为, 高温下给原子和空位提供了热激活能, 位错可以克服某些障碍运动, 位错的滑移和攀移更容易进行^[3]。间隙固溶体的间隙原子在高温下可以进行长程扩散, 减少了由位错运动形成柯氏气团, 既减小小溶质原子对位错

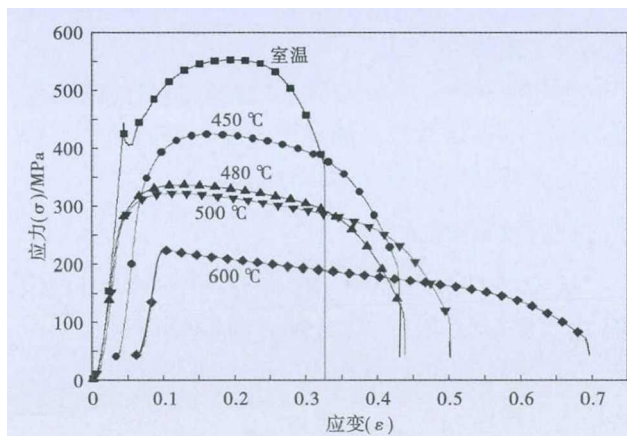


图 2 EH420 钢室温, 450, 480, 500, 600 °C 拉伸曲线

Fig. 2 Tensile curves of steel EH420 at ambient temperature, 450 °C, 480 °C, 500 °C and 600 °C

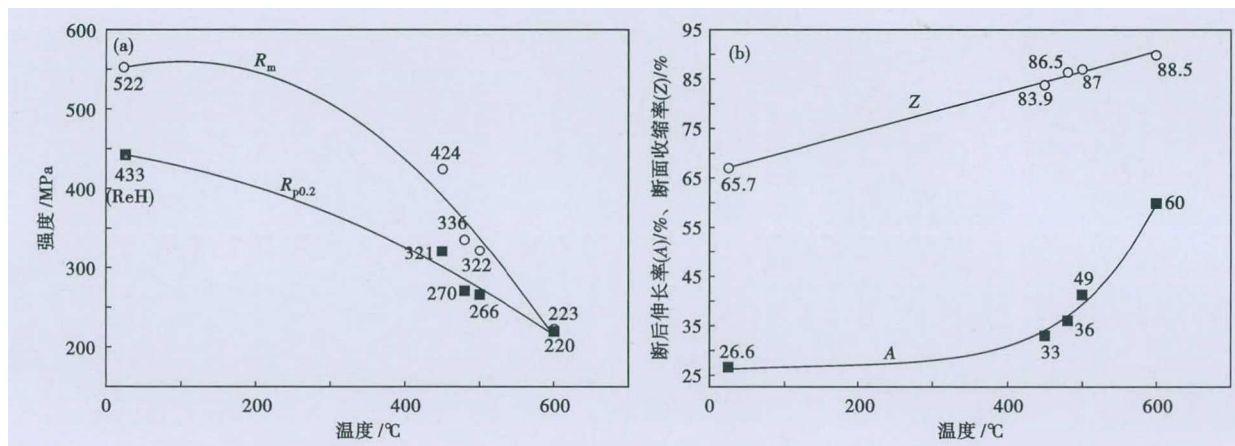


图 3 温度对 EH420 钢(a)抗拉强度(R_m)、屈服强度($R_{p0.2}$)和(b)断面收缩率(Z)、伸长率(A)的影响

Fig. 3 Effect of temperature on (a) tensile strength (R_m) and yield strength ($R_{p0.2}$), and (b) reduction of area (Z) and elongation (A) of steel EH420

运动的作用力。位错运动能力提高,合金中的位错密度随之减小,从而高温力学性能发生变化^[13]。

2.2 金相组织

图 4(a, b, c, d, e)分别为室温、450, 480, 500, 600 °C 的金相组织。该钢室温金相组织为铁素体 + 珠光体,带状珠光体组织,由扫描电镜观察片间距大约 6 μm ,为细的珠光体。由从室温升温到 450, 480, 500, 600 °C 的时间,及经过保温时间及拉伸时间,该钢的平均晶粒尺寸无明显粗化的趋势,带状渗碳体组织聚集粗化。由于加入了多种微量细化晶粒的合金元素钒、钛、铌,可以形成的高熔点化合物,促进非均匀形核,细化晶粒;提高钢液的过冷度,形成较多的等轴晶。在高温塑性加工过程中,铌、钒、钛的碳化物能有效抑制奥氏体再结晶,达到细化奥氏体晶粒的作用^[14-16]。本试验钢中形成细小的合金碳化物,作为第二相钉扎在晶界处。参照热力学计算,碳化钒、碳化钛、碳化铌在 600 °C 性能稳定,起到有效阻止钢晶粒长大粗化的作用。

2.3 断口形貌

图 5(a₁ ~ e₁)为室温、450, 480, 500, 600 °C 时的

宏观断口形貌,中、低碳钢一般由纤维区、放射区、剪切唇 3 个区域组成,剪切唇表面光滑,与拉伸轴呈 45°,从图 5(a₁ ~ e₁)的宏观断口可以看出,拉伸试样断口的环形剪切唇逐渐变窄,纤维区比例增大,断口表面由较光滑过渡到粗糙,且凹凸不平。本质为拉伸时滑移的结果。图 5(a₂ ~ e₂)微观形貌可以发现韧窝由小变大,由浅变深。随着拉伸温度升高在韧窝的边缘观察到较光滑的链波状蛇形花样,大塑性变形后,由于交叉滑移,沿滑移面分离,形成形貌起伏弯曲的条纹^[17]。随着拉伸温度的升高,断口韧窝存在微小的孔洞变多,有的韧窝区的孔洞变得又大又深。孔洞是微量元素铌、钒、钛化合物以及硫化物的析出位置,析出相较基体组织硬,在应力作用下出现孔洞,析出相尺寸的大小和数量,能导致伸长率的降低^[18]。

刚开始变形时,试样在弹性应变阶段受单向拉应力作用而产生均匀变形。塑性变形时试样产生颈缩,应力状态变由单向拉应力变为三向拉应力,且在各个方向上的受力比较一致,因此塑形形状为近圆形^[13,19]。在拉伸运动过程中,存在着塑形形成和长

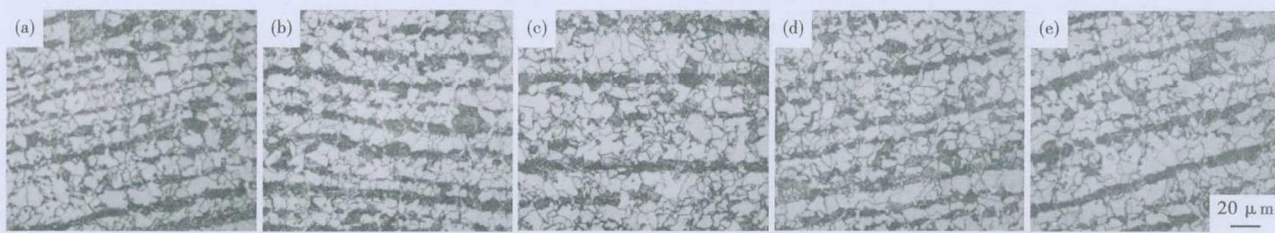


图 4 试验 EH420 钢室温(a), 450 °C(b), 480 °C(c), 500 °C(d)和 600 °C(e)的组织形貌

Fig. 4 Morphology of structure of tested steel EH420 at ambient temperature (a), 450 °C (b), 480 °C (c), 500 °C (d), and 600 °C (e)

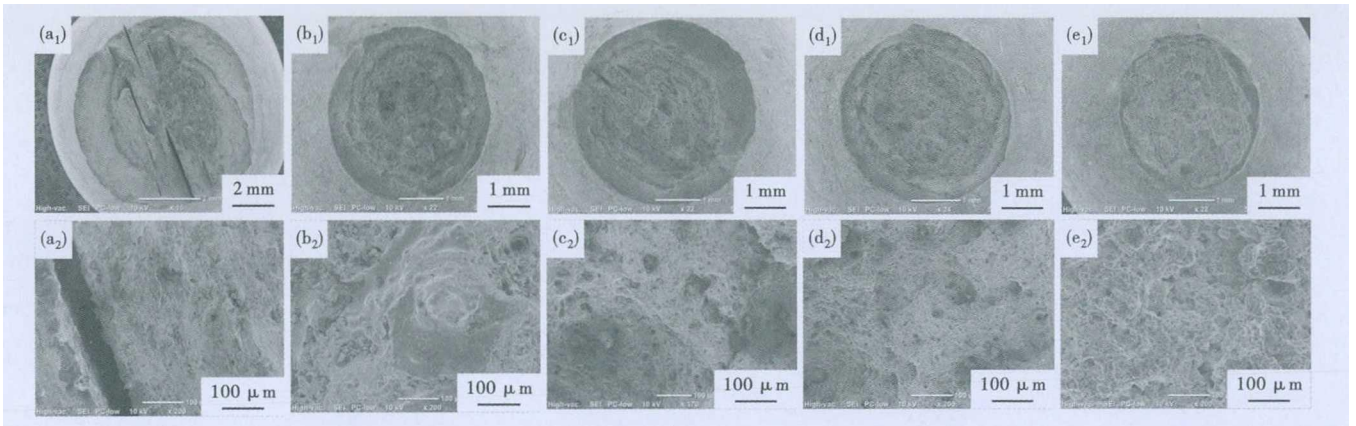


图 5 EH420 钢室温(a_1)(a_2), 450 °C(b_1)(b_2), 480 °C(c_1)(c_2), 500 °C(d_1)(d_2) 和 600 °C(e_1)(e_2) 拉力试样断口和对应组织形貌

Fig. 5 Morphology of tensile specimen fracture and corresponding structure of steel EH420 at ambient temperature (a_1)(a_2), 450 °C (b_1)(b_2), 480 °C (c_1)(c_2), 500 °C (d_1)(d_2), and 600 °C (e_1)(e_2)

大, 微塑孔不断发生聚合, 形成较大较深的塑孔, 进而形成微裂纹。微观机理为由于位错连续运动, 产生不同的滑移, 形成等轴韧窝; 韧窝中的第二相成为环形位错源, 位错环快速移动形成微塑孔。所以在高温断口为大的等轴韧窝且分布着微塑孔。

3 结论

(1) EH420 钢在 450, 480, 500 °C 拉伸时, 以温度的升高, 原子间距增大, 结合力减弱和回复进行软

化。600 °C 拉伸时达到再结晶温度, 以动态再结晶的方式软化。480 °C 时屈服强度达到室温屈服强度的 2/3, 即在 480 °C 以下具有耐火性。

(2) 平均晶粒尺寸从室温到 600 °C 无明显粗化的趋势, 带状渗碳体组织粗化。随拉伸温度升高, 拉伸试样断口韧窝变大变深, 微塑孔变多, 韧窝的边缘形成蛇形花样。

内蒙古工业大学基金资助项目(ZD201510)

参考文献

- [1] 邵 军. 舰船用钢研究现状与发展[J]. 鞍钢技术, 2013(4): 183-185.
- [2] 崔 崑. 钢的成分、组织与性能(上册)[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 445-448.
- [3] 王从曾. 材料性能学[M]. 北京: 北京工业大学出版社, 2001: 3-7, 126.
- [4] 武拥军, 姜周华, 梁连科, 等. 钢的液相线温度的计算[J]. 钢铁研究学报, 2002, 14(6): 6-9.
- [5] 张 聪. 碳锰钢再结晶行为研究[D]. 武汉科技大学, 2011: 11.
- [6] 王 川, 康永林, 朱 帅, 等. 超低碳铝镇静钢冷轧薄板再结晶温度及性能研究[J]. 热加工工艺, 2011, 40(6): 36-39.
- [7] 李龙飞, 杨王明, 孙祖庆. 低碳钢在 A_{c1} 点以下温度变形时的铁素体动态再结晶[J]. 金属学报, 2003, 39(4): 419-425.
- [8] 蔺永诚, 陈明松, 钟 掘. 形变温度对 42CrMo 钢塑性成形与动态再结晶的影响[J]. 材料热处理学报, 2009, 30(1): 70-74.
- [9] 郝庆乐, 韩静涛, 徐海峰. 高强硼钢高温软化机制及动态再结晶临界条件[J]. 材料热处理学报, 2016, 37(1): 230-236.
- [10] Abedi H R, Zarei Hanzalci A and Liu z, et al. Continuous Dynamic Recrystallization in Low Density Steel[J]. Materials and Design, 2017(114): 55-64.
- [11] 张 星, 陈登福, 董志华, 等. P510L 钢连铸坯高温力学性能[J]. 中国科技论文, 2013, 8(2): 120-123.
- [12] Suzuki H G, Nishimura S and Yamaguchi S. Characteristics of the Embrittlement of Steels Above 600 °C [J]. Testu-to-Agane, 1979, 65(14): 2038-2046.
- [13] 李明关, 宋月清, 崔 舜, 等. V5Cr5Ti 合金的高温拉伸性能及其断口特征[J]. 稀有金属, 2007, 31(4): 420-423.
- [14] 韩孝永. 铌、钒、钛在微合金钢中的作用[J]. 宽厚板, 2006, 12(1): 39-41.
- [15] 衣海龙, 杜林秀, 王国栋, 等. 铌钒钛与含钛高强钢的高温变形行为[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2007, 28(10): 1369-1373.
- [16] 陈 祥, 李言祥. 稀土、钒、钛变质处理对高硅铸钢晶粒细化的影响[J]. 材料热处理学报, 2006, 27(3): 75-80.
- [17] 刘正义. 机械装备失效分析图谱[M]. 广东: 广东科技出版社, 1990: 168.
- [18] 魏文澜, 王建国, 冯耀荣, 等. 10Cr3Mo 钢与 N80 钢的高温力学行为[C]. 太原: 第十一次全国热处理大会论文集, 2015: 936-940.
- [19] 段兴旺, 刘建生. 316LN 钢高温塑性及其断口特征[J]. 吉林大学学报(工学版), 2015, 45(2): 494-500.

刘智良(1981-), 男, 硕士研究生, 2008 年内蒙古科技大学(本科)毕业, 高强度钢性能研究。

E-mail: 2369200788@qq.com

收稿日期: 2017-08-03