

钼对 N80 级 ERW 石油套管用钢相变规律的影响

白雅琼¹, 杨维宇², 张晓磊³

- (1. 内蒙古包钢钢联股份有限公司技术中心, 内蒙古 包头 014010;
2. 内蒙古包钢钢联股份有限公司稀土钢板材厂, 内蒙古 包头 014010;
3. 内蒙古包钢钢联股份有限公司组织人事部, 内蒙古 包头 014010)

摘 要: 采用 Formaster - F 型全自动相变仪测定了含 Mo 和不含 Mo 的 N80 级 ERW 石油套管用钢的静态 CCT 曲线, 通过光学显微镜观察两种钢不同冷却速度下的显微组织, 结果表明, N80 级 ERW 石油套管试验钢的临界点 Ac_1 、 Ac_3 基本不受 Mo 元素的影响, 试验钢 1 和试验钢 2 开始生成马氏体组织的临界冷速均为 $8\text{ }^\circ\text{C/s}$ 。由于 Mo 元素的加入, 扩大了 N80 级 ERW 石油套管试验钢贝氏体相变的冷速区间范围, 并且使该试验钢的组织得到了细化。

关键词: N80 级 ERW 石油套管用钢; 相变; 显微组织

中图分类号: TQ026.9

文献标识码: B

文章编号: 1009 - 5438(2022)06 - 0037 - 04

Effects of Molybdenum on Phase Transformation Laws of N80 Grade Steel for ERW Oil Casing

Bai Ya - qiong¹, Yang Wei - yu², Zhang Xiao - lei³

- (1. Technical Center of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou 014010, Inner Mongolia Autonomous Region, China;
2. Rare Earth Steel Plate Plant of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou 014010, Inner Mongolia Autonomous Region, China;
3. Organizational and Personnel Dept. of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou 014010, Inner Mongolia Autonomous Region, China)

Abstract: The static continuous cooling transformation (CCT) curves of N80 grade steel for ERW oil casing with and without Mo are determined by Formaster - F full automatic phase transformation meter as well as the microstructures of the two types of steel at different cooling rates are observed with optical microscope. The results showed that the critical points of test steels of N80 grade steel for ERW oil casing, Ac_1 and Ac_3 were basically not affected by Mo element as well as the critical cooling rate for test steel 1 and 2 to start generating martensitic structure was $8\text{ }^\circ\text{C/s}$. The interval range of cooling rate for bainite transformation of the test steels is expanded due to addition of Mo element and their microstructures are refined.

Key words: N80 grade steel for ERW oil casing; phase transformation; microstructure

在石油天然气开采开发过程中,油井管是重要的基础材料,在石油管材中的使用比例约为 40%。过去油井管基本都是采用无缝钢管。目前,高频直缝电阻焊(简称 ERW)油气井套管以成本优势和在“无缝化”技术上的不断完善,在油井工程中的应用已日益广泛^[1]。Mo 在钢中可以形成固溶体,多数形成 M_2C 碳化物,发挥固溶强化作用,同时 Mo 元素可以通过抑制 S、P 元素在晶界的偏聚来净化晶界,发挥其提高冲击韧性的作用,所以,在 N80 级 ERW 石油套管中加入一定量的 Mo 元素来提高试验钢的综合性能^[2]。本文通过测定含 Mo 和不含 Mo 的 N80 级 ERW 石油套管用钢的静态过冷奥氏体连续冷却转变曲线(CCT)^[3],并结合显微组织分析,研究了 Mo 含量 0.02% 对 N80 级 ERW 石油套管试验用钢的不同冷速下连续冷却相变规律的影响,为 N80 级 ERW 石油套管用钢生产工艺的制定和生产控制提供一定的理论参考^[2]。

1 试验材料及方法

采用 25 kg 真空感应炉冶炼两炉试验钢,试验钢的化学成分如表 1 所示。其中试验钢 1 不含 Mo 元素,试验钢 2 含有 Mo 元素,采用化学法对试验

钢 2 的 Mo 元素含量进行测定,其 Mo 元素的质量分数为 0.02%。钢锭经 1 200 °C 高温均质化 2 h 处理后,轧制成 10 mm 厚的钢板。

表 1 试验钢化学成分(质量分数)

表 1 试验钢化学成分(质量分数)					%
C	Si	Mn	P	S	
0.17 ~ 0.21	0.15 ~ 0.30	1.30 ~ 1.60	≤0.015	≤0.004	

从 10 mm 厚的试验钢板上制取若干 $\Phi 3$ mm \times 10 mm 的试样^[4],并在一端开一个 $\Phi 2$ mm \times 2 mm 的盲孔。采用 Formastor - F 全自动相变仪,依据标准 YB/T 5128—2018《钢的连续冷却转变曲线图的测量方法(膨胀法)》^[5],首先测定试验钢升温过程相变临界点温度 Ac_1 和 Ac_3 ,升温速度为 200 °C/h;每一个 CCT 曲线的试样分别以 10 °C/s 的速度加热到奥氏体化温度(900 °C),保温 10 min,然后以不同的冷却速度连续冷却至室温^[3],用切线法对每条冷却曲线进行数据分析,记录下每个冷却速度下的相变开始温度和相变结束温度,利用蔡司 Axio observer A1M 型光学显微镜对每个冷速下的组织形貌进行观察^[4],以时间为横坐标、温度为纵坐标,绘制出试验钢的 CCT 曲线,具体冷却工艺见表 2。

表 2 试验钢的连续冷却工艺

试验样品	升温速度/(°C · s ⁻¹)	保温时间/min	冷却速度/(°C · s ⁻¹)								
试验钢 1	10	10	80	60	30	10	8	5	1	0.5	
试验钢 2	10	10	120	80	60	30	10	8	5	1	0.5

2 试验结果与分析

2.1 Mo 元素对试验钢连续冷却转变曲线的影响

根据测定的不同冷速下的相变开始温度和终止温度,并结合不同冷速下试样的显微组织形貌、类型和数量,绘制试验钢的静态连续冷却转变曲线(CCT 曲线),如图 1 所示。表 3 为升温过程中测得的试验钢临界相变点温度,加入 0.02% 的 Mo 元素对试验钢的 Ac_1 、 Ac_3 临界相变点温度基本没有影响。

表 3 试验钢的临界点温度

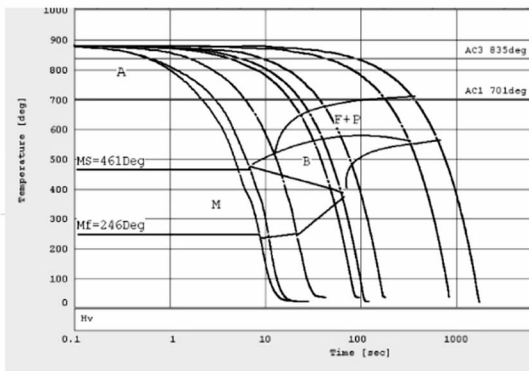
试验样品	Ac_1	Ac_3
试验钢 1	701	835
试验钢 2	700	835

由图 1 可见,Mo 元素的加入,使试验钢 1 和试验钢 2 的 CCT 曲线位置和相变区形状发生了明显的变化。当冷却速度为 0.5 °C/s 时,试验钢 1 中的过冷奥氏体全部转变为铁素体和珠光体,试验钢 2 中的过冷奥氏体首先发生铁素体和珠光体相变,随后剩余未转变的过冷奥氏体发生贝氏体相变,所以试验钢 2 在冷速为 0.5 °C/s 时,试验钢 2 的室温组织为铁素体 + 珠光体 + 少量贝氏体。当冷却速度达到 8 °C/s 时,试验钢 1 和试验钢 2 在连续冷却过程中均开始发生马氏体转变,且试验钢 1 和试验钢 2 的铁素体的相变开始温度随冷却速度的加快,明显呈降低的趋势,这是由于冷却速度加快,减慢了原子的扩散速度,增强了奥氏体的稳定性,使相变发生了推迟,降低相变温度^[4],直到冷却速度达到 30 °C/s,两个试验钢的过冷奥氏体不再发生铁素体和珠光体

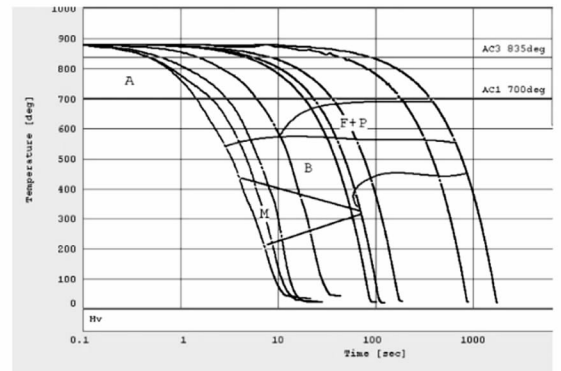
相变,冷却曲线最先与 B_s 、 B_f 线相交,得到了贝氏体,之后与 M_s 线相交,生成马氏体,室温组织为贝氏体 + 马氏体混合组织,且随着冷却速度的进一步增加,生成马氏体的数量也逐渐增加。试验钢 1 在冷却速度为 $60\text{ }^\circ\text{C/s}$ 时,可以得到完全马氏体;而试验钢 2 在冷却速度为 $60\text{ }^\circ\text{C/s}$ 时,除了发生马氏体相变,还发生了贝氏体相变,而且由图 1(b) 中可以看出,试验钢 2 随着冷却速度增加,直到 $120\text{ }^\circ\text{C/s}$,贝氏体相变区仍未封闭,还有贝氏体相变发生。

比较图 1 中试验钢 1 和试验钢 2 静态连续冷却转变曲线,可以看出,在冷速为 $0.5\sim 30\text{ }^\circ\text{C/s}$ 范围

内,两种试验钢均发生铁素体和珠光体相变,同时开始发生马氏体相变的临界冷速均为 $8\text{ }^\circ\text{C/s}$,可见在 N80 级 ERW 石油套管用钢中加入 0.02% 的 Mo 元素对其铁素体 + 珠光体相变、马氏体相变没有影响。但试验钢 1 的贝氏体转变冷却速度范围为 $1\sim 60\text{ }^\circ\text{C/s}$,试验钢 2 的贝氏体转变冷却速度范围为 $0.5\sim 120\text{ }^\circ\text{C/s}$,在整个试验冷速范围均发生了贝氏体相变,含有 Mo 元素的试验钢 2 比不含 Mo 元素的试验钢 1 发生贝氏体相变的冷速范围更宽,Mo 元素扩大了试验钢的贝氏体相变区间。



(a) 试验钢1



(b) 试验钢2

图 1 N80 级 ERW 石油套管试验钢的连续冷却转变曲线

2.2 试验钢连续冷却过程中的组织分析

图 2 和图 3 分别为试验钢 1 和试验钢 2 在不同冷却速度下连续冷却后获得的室温组织形貌照片。在连续冷却过程中,试验钢 1 和试验钢 2 均先后发生了铁素体的析出、珠光体相变、贝氏体相变及马氏体相变^[4]。比较图 2 和图 3 可以看出,在相同的冷却速度下,试验钢 2 的晶粒更细,这是因为 Mo 元素的加入,可以使钢的晶粒得到细化。当冷却速度为 $0.5\text{ }^\circ\text{C/s}$ 时,试验钢 1 的显微组织为多边形铁素体 + 珠光体,试验钢 2 由于加入了 Mo 元素,发生了贝氏体相变,显微组织为多边形铁素体 + 珠光体 + 少量的贝氏体,冷却速度达到 $8\text{ }^\circ\text{C/s}$ 时,钢中出现

了少量马氏体组织,此时试验钢 1 和 2 中的显微组织组成为铁素体 + 贝氏体 + 马氏体 + 少量珠光体,随着冷却速度的增加,珠光体、铁素体及贝氏体含量减少,马氏体含量逐渐增多^[6],如图 2(f) 和图 3(f),当冷却速度达到 $30\text{ }^\circ\text{C/s}$ 时,试验钢 1 和 2 显微组织中的铁素体全部消失,此时试验钢 1 和 2 中的显微组织组成为马氏体 + 贝氏体,当冷却速度达到 $60\text{ }^\circ\text{C/s}$ 后,试验钢 1 中的贝氏体消失,显微组织全部转变为板条状马氏体^[4],如图 2(g),试验钢 2 仍有少量的贝氏体存在,显微组织组成为马氏体 + 贝氏体,如图 2(g)、(h)。

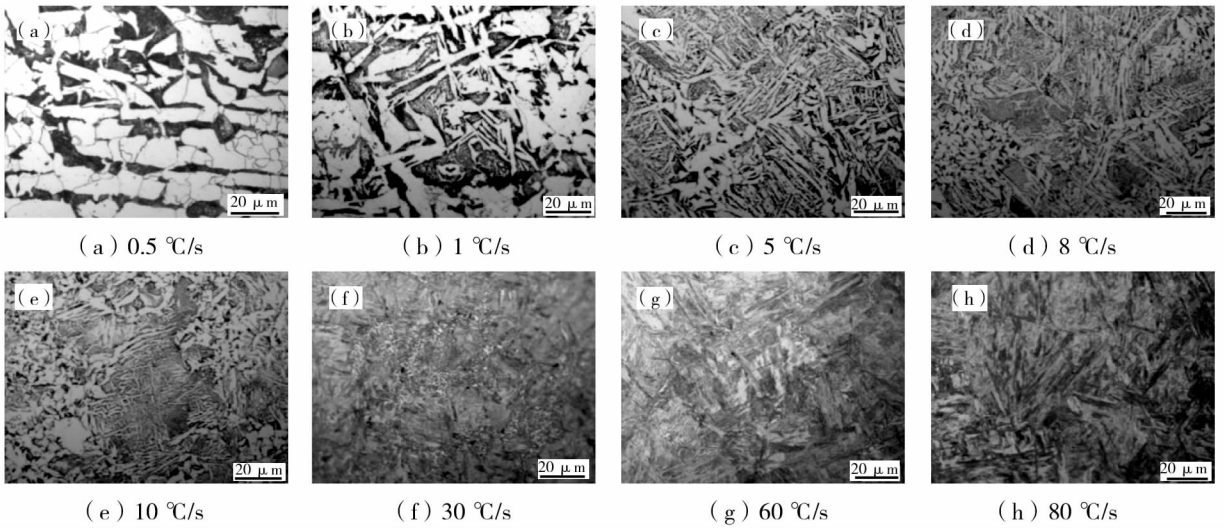


图 2 试验钢 1 连续冷却转变后的显微组织

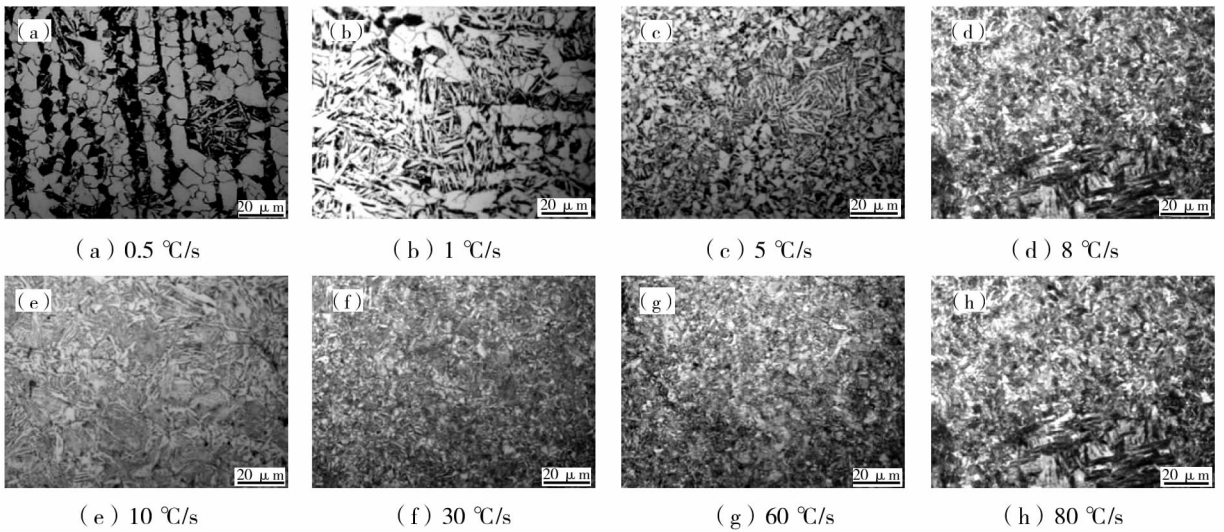


图 3 试验钢 2 连续冷却转变后的显微组织

3 结论

(1) 在 C-Si-Mn 系 N80 级 ERW 石油套管试验用钢中添加 0.02% 的 Mo 元素, 试验钢临界点 Ac_1 为 700 °C 左右, Ac_3 为 835 °C, Mo 元素对试验钢临界点 Ac_1 、 Ac_3 影响不大。

(2) 通过对比两个试验钢的连续冷却相变曲线可知, 在冷速为 0.5 ~ 30 °C/s 范围内, 两种试验钢均发生铁素体和珠光体相变, 开始生成马氏体组织的冷速均为 8 °C/s, 但试验钢的贝氏体转变温度范围从 1 ~ 60 °C/s 扩大到 0.5 ~ 120 °C/s, 添加 0.02% Mo 元素对试验钢的铁素体和珠光体相变及

马氏体相变没有影响, 但扩大了贝氏体相变区间。

(3) 在试验钢中加入 0.02% 的 Mo 元素可以使 N80 级 ERW 石油套管试验钢的组织得到了细化。

参 考 文 献

- [1] 李睿鑫, 王青峰, 陈辉, 等. N80 级 ERW 石油套管用钢连续冷却转变行为的研究[J]. 上海金属, 2011, 33(4): 6-9.
- [2] 张晓磊, 刘妍, 袁晓鸣, 等. N80 级 ERW 石油套管用钢的组织转变及性能[J]. 包钢科技, 2021, 47(4): 50-53.

(下转第 89 页)

根据最小割集,从表1通过计数可以得到踏破彩钢板坠落事故树基本事件的结构重要度排序为:

$$I_{\Phi(1)} = 1/8, I_{\Phi(2)} = 3/16, I_{\Phi(3)} = 0, I_{\Phi(4)} = 1/32, I_{\Phi(5)} = 3/16, I_{\Phi(6)} = 9/16。$$

即为:

$$I_{\Phi(6)} > I_{\Phi(5)} = I_{\Phi(2)} > I_{\Phi(1)} > I_{\Phi(4)} > I_{\Phi(3)}$$

根据以上分析可以看出,物的不安全因素(房高2.2 m,地面有托辊)对顶上事件发生的影响程度最大,人的不安全因素(身体失去平衡)对顶上事件发生的影响程度次之^[4]。因此,对物的不安全因素的安全防护设施进行有效的安全管理是预防高空坠落事故最有效的措施,其次应加强对人的管理。

4 结论

(1)通过对踏破彩钢板坠落伤亡事故树的分析可知,顶上事件发生的途径有6种,而预防事故发生的途径有3种,可见该事故易于发生而难于预防,需要格外注意。

(2)由结构重要度分析可以得出,分值较大的

是物的不安全因素和人不安全因素,因此要做好高处坠落事故预防措施。物的不安全因素的安全防护以及个人安全防护用品是极其重要的。加强危险作业的安全管理,现场督察人员要密切关注高空作业人员安全带的使用情况。

参 考 文 献

- [1] 赵耀江. 安全评价理论及方法[M]. 北京:煤炭工业出版社,2008.
 - [2] 孙兰会,成锋,陆愈实. 关于事故树的结构重要度分析[J]. 科技通报,2015,(4):248-250.
 - [3] 李艳霞,孙建华,魏春荣,等. 事故树结构重要度求解方法研究探讨[J]. 中国安全生产科学技术,2012,8(5):107-110.
 - [4] 贾晓珊,董羽,张宇,等. 基于FTA和AHP建筑施工高处坠落事故分析[J]. 建筑安全,2017,32(10):37-40.
-
- (上接第40页)
- [3] 白雅琼,张娜,杨维宇. 硼对Q690D钢CCT曲线的影响[J]. 包钢科技,2017,43(1):40-43.
 - [4] 白雅琼,马爱清,杨维宇. 稀土元素镧对BT100H钢连续冷却转变曲线的影响[J]. 上海金属,2017,39(3):20-23.
 - [5] YB/T 5128—2018,钢的连续冷却转变曲线图的测量方法(膨胀法)[S].
 - [6] 潘红波,汪杨,阎军,等. Nb含量及工艺对HRB600钢筋组织与性能的影响[J]. 建筑材料学报,2017,20(3):392-398.