

## 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

杨煌光<sup>1,3</sup> 姚火能<sup>1,3</sup> 杨玲<sup>2</sup> 杜坤<sup>1,3</sup> 张洋波<sup>1,3</sup>

(1 大冶特殊钢有限公司,黄石 435001; 2 湖北省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** 研究亚共析钢中厚壁(壁厚 $\geq 30$  mm)无缝钢管正火冷却速度和同一截面的冷却均匀性,将水-空循环冷却模型用于中碳和低碳 Mn 钢中厚壁无缝钢管正火组织及性能控制过程。通过分析风冷、水雾强制冷却和水-空循环冷却的钢管正火组织和性能,采用“钢管部分浸入水面+高速旋转”的水-空循环冷却方式,即通过控制浸入深度、钢管旋转速度、冷却总时间,最终获得在铁素体+珠光体稳定组织的基础上,中厚壁钢管屈服强度 $\geq 500$  MPa、 $-20$  °C V型冲击功 $\geq 100$  J的性能。

**关键词** 正火 冷却速度 水-空循环 中、低碳 Mn 钢无缝管

### A Water-Air Circulation Cooling Process Used for Normalizing Structure and Performance Control of Hypoeutectoid Steel Medium- and Thick-Walled Seamless Steel Pipes

Yang Huangguang<sup>1,3</sup>, Yao Huoneng<sup>1,3</sup>, Yang Ling<sup>2</sup>, Du Kun<sup>1,3</sup> and Zhang Yangbo<sup>1,3</sup>

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

**Abstract** In order to study the normalizing cooling rate and the cooling uniformity of hypoeutectoid steel medium- and thick-walled seamless steel tube with wall thickness  $\geq 30$  mm, the water-air circulation cooling model is used for the normalizing structure and performance control of medium- and low-carbon Mn steel medium- and thick-walled seamless tube. Based on analysis on structure and properties of normalized steel tube with fan cooling, water fog forced cooling and water-air circulation cooling, the water-air circulation cooling process-immersing part of the steel pipe body in water and high speed rotating meanwhile, and controlling the depth of immersion, the rotation speed of steel tube and the total cooling time, of medium- and thick-walled pipe, the performance of yield strength  $\geq 500$  MPa,  $-20$  °C V-type impact energy  $\geq 100$  J based on the stable structure of ferrite + pearlite are obtained.

**Material Index** Normalizing, Cooling Rate, Water-Air Circulation, Medium- and Low-Carbon Mn Steel Seamless Pipe

随着工程机械行业向大型船舶、桥梁、电站设备、中高压锅炉高压容器、起重机械等大型重器发展,中厚壁无缝钢管材料对高强度、高韧性和优良焊接性能提出更高要求<sup>[1-2]</sup>。对于中厚壁钢管,采用传统的正火冷却方式(空冷或风冷),或者采用常规的水雾控冷方式,其强度及冲击功很难以满足要求(屈服强度 $\geq 500$  MPa、 $-20$  °C V型冲击功 $\geq 100$  J),虽然采用传统的调质工艺强度及韧性能满足要求,但是调质态钢管经过焊接后,热影响区性能显著下降,并且差异很大<sup>[3]</sup>。因此如何通过正火冷却控制,使其在铁素体+珠光体稳定组织的基础上满足高强度、高韧性的性能要求,是中低碳钢中厚壁无缝钢管正火冷却控制研究的新课题。

#### 1 水-空循环冷却方法

##### 1.1 水-空循环冷却原理及控制方法

亚共析钢正火的典型组织为铁素体+珠光体,根据冷却速度(空冷、风冷、喷雾、喷水等)和珠光体转变温度不同,其片间距(珠光体团中相邻两片渗碳体或者铁素体中心之间的长度)距离各不相同,从粗到细依次呈现为珠光体、索氏体、屈氏体不同组织形态(如图 1a),要得到高强度、高韧性的正火性能,在一定比例的铁素体含量基础上,通过细化晶粒尺寸、细化珠光体片层间距和团尺寸,是重要的控制手段。

为了细化晶粒尺寸、细化珠光体片层间距和团尺寸,常见的方法是在钢管表面喷水或喷雾,实现钢管由外表到内表逐渐快速冷却,这种方法对于中厚壁钢管,必然存在外表面、壁厚 $1/2$ 、内表面 3 个代表位置冷却速度和过冷温度的差别(如图 1b),使整个钢管截面珠光体片间距和珠光体团尺寸不一致,导

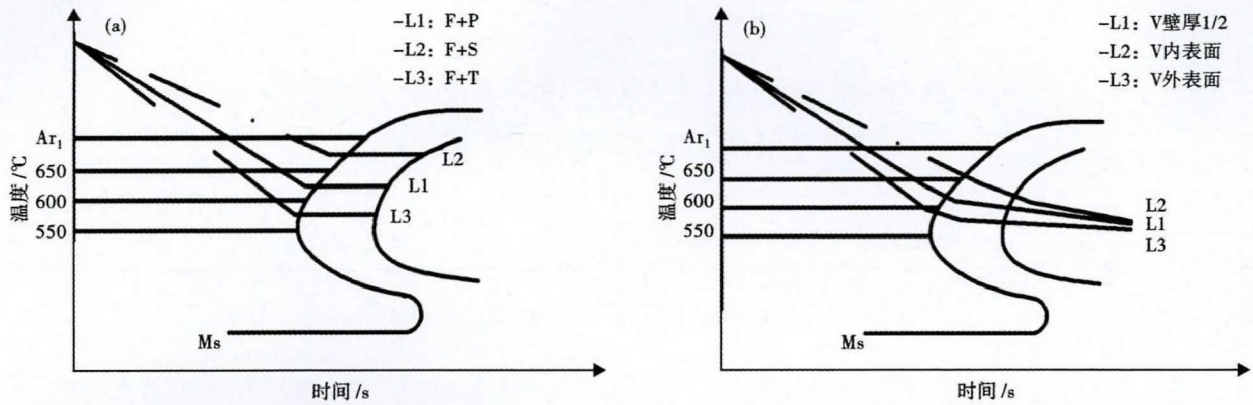


图 1 亚共析钢的正火冷却曲线的典型组织图 (a); 中厚壁钢管水雾冷却的典型曲线 (b)

Fig. 1 Typical structure of normalizing cooling curves (a); typical curves of water mist cooling of medium- and thick-walled seamless steel pipes (b) of hypoeutectoid steel

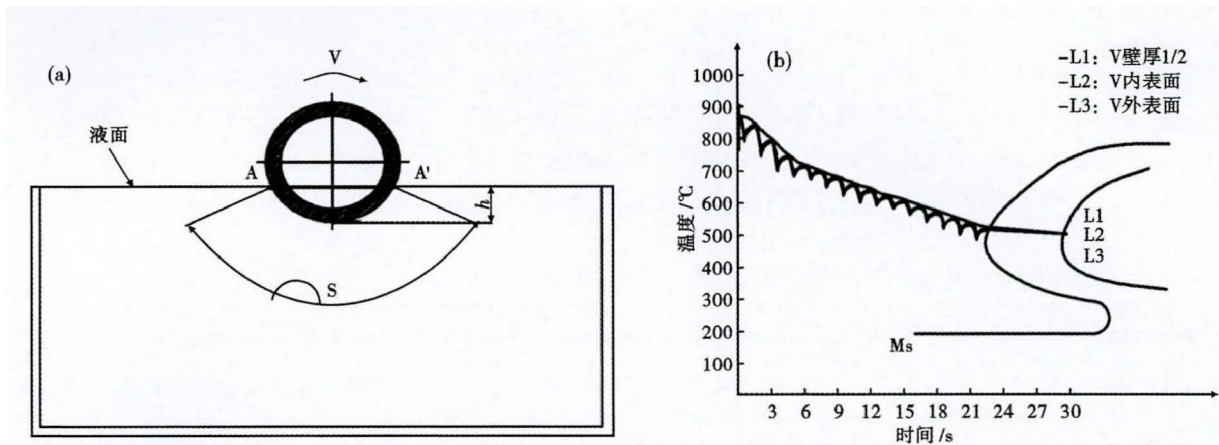


图 2 钢管水-空循环冷却模型图 (a) 和冷却曲线 (b)

Fig. 2 Cooling model (a) and cooling curves (b) of steel tube water-air circulation cooling

致同一截面性能不均匀。为此解决中厚壁管同一截面的均匀冷却和保持较快的冷却速度问题,设计一种在水-空循环冷却方法,从理论上控制冷却速度和过冷温度介于水和空气之间,实现钢管内外表向壁厚中心冷却。中厚壁钢管部分浸入淬水槽中,浸入深度  $h$  可调,钢管旋转速度  $V$  可调,冷却总时间  $t$  可调,通过这些参数,实现均匀控制整个中厚壁钢管截面冷却速度和过冷温度,得到均匀的组织 and 性能,如图 2 水-空冷却模型与理想的钢管壁厚不同位置冷却曲线。

### 1.2 水-空循环冷却特点

该冷却系统由位于水槽正上方旋转装置、控制旋转拖轮下降距离的液压比例阀和位移传感器控、水槽及水槽冷却水内循环系统和相关传钢辅助设施构成,水-空循环冷却技术已经申报发明国家专利,其特点及实现过程如下:

(1) 本系统有别于传统通过工件或者液面升降距离控制水空循环冷却的方式<sup>[4]</sup>,采用更为灵活的

“钢管部分浸入水面 + 高速旋转”循环冷却控制方式,实现高效、精准、均匀的控制冷却过程速度和冷却强度,冷却水槽与外部冷却系统连接,槽内有温度监控设备,确保整个冷却过程中水温不高于 38 ℃。

(2) 浸入深度  $h$  主要决定中厚壁钢管冷却速度。根据牛顿冷却定律,工件表面热流密度(单位面积  $F$  和单位时间  $t$  内传出的热量  $Q$ )。

$$q = \frac{dQ}{dF \times dt} = h_1(T_s - T_1) = h\Delta T \quad (1)$$

式中: $h_1$ - 热传递系数,其大小与工件表面温度密切相关; $T_s$  和  $T_1$ - 工件表面和介质温度,其差值为  $\Delta T$ 。

冷却控制工件表面温度 > 400 ℃,温度区间冷却处于膜沸腾期,其传热系数为 200 ~ 400 W/(m<sup>2</sup> · K),空气换热系数为 22 ~ 30 W/(m<sup>2</sup> · K)<sup>[5]</sup>,可见浸入水里的冷却速度远大于在空气中的冷却速度,也可以将在空气中的时间理解成从水冷出来的工件回温时间,即为工件内外表面温度与壁厚中间温度趋于一致的过程。浸入深度  $h$  直接影响水-空

循环单次水里冷却时间  $t_w$  与空气回温时间  $t_A$  时间占比,直接影响中厚壁钢管平均冷却速度。

(3) 钢管旋转速度  $V$  主要决定中厚壁钢管冷却均匀性。钢管旋转速度  $V$  主要控制单次水-空循环冷却时间  $t_w$  和  $t_A$  的具体值,如钢管旋转速度  $V$  足够快,即经过短暂的浸水快速冷却的部位钢管 A 点,马上旋转到 A1 位置在空气中回温,经过无数周期旋转过程的水-空循环冷却和回温,如果钢管旋转速度  $V$  足够快,可以理解为连续的均匀冷却过程,经过冷却时间  $t$  后,得到钢管整个截面准匀速冷却到某一温度  $T_1$ 。

(4) 冷却总时间  $t$  直接影响工艺要求的冷却强度。冷却总时间  $t$  的长短,由最终要求冷却到的某一温度  $T$  的高低有关,再置于空气中空冷到室温。

## 2 生产工艺及检验方法

### 2.1 生产工艺

采用大冶特钢生产的中碳 Mn 钢 AISI1340、 $\Phi 180 \text{ mm} \times 35 \text{ mm}$  (外径  $\times$  壁厚) 和低碳 Mn 钢 20MnV6、 $\Phi 365 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$  两种典型中厚壁无缝钢管为实验材料,其主要成分如表 1。分别将 AISI1340 经过  $850 \sim 880 \text{ }^\circ\text{C}$  (20MnV6 经过  $920 \sim 950 \text{ }^\circ\text{C}$ ) 完全奥氏体化,再采用风冷、水雾强制冷却、水-空循环冷

表 1 实验钢种主要化学成分 / %

Table 1 Main chemical component of experimental steel grade / %

钢种	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	V
AISI 1340	0.40	1.69	0.26	0.009	0.004	0.13	0.05	0.03	0.03
20MnV6	0.21	1.48	0.26	0.011	0.007	0.22	0.06	0.02	0.11

却 3 种不同冷却方式,完成整个正火冷却过程,其冷却参数如表 2。

### 2.2 生产工艺

用金属材料拉伸试验机和夏比摆锤冲击试验机按 ASTM A370-2017 标准测试室温下强度和  $-20 \text{ }^\circ\text{C}$  V 型冲击功,用布氏硬度计按 ASTM E10-2018 标准测试同一截面的四象限硬度。最后对取 3 种方式冷却后的钢管试样,经过机械研磨、抛光、腐蚀后,采用 OLMPUS BX41M 光学显微镜和 FEI Quanta 400F 型扫描电镜对进行显微组织形貌观察。

## 3 实验结果分析与讨论

### 3.1 力学性能分析与讨论

AISI1340 和 20MnV6 钢管分别实验 3 种不同冷却方式后,屈服强度和冲击韧性结果分布情况见图 3 和图 4。从图 3 和 4 可以看出,采用水-空循环工艺控制的中厚壁无缝钢管 AISI1340 和 20MnV6,

表 2 实验钢种的主要冷却参数

Table 2 Main cooling parameters of experimental steel grade

钢种	外径 $\times$ 壁厚 / (mm $\times$ mm)	支数	冷却方式	浸入深度 (h) / mm	旋转速度 (V) / (mm $\cdot$ s $^{-1}$ )	冷却总时间 (t) / s	停止冷却温度点 (T) / $^\circ\text{C}$
20MnV6	$\Phi 180 \times 35$	10	风冷	无	无	3 600	100 ~ 200
	$\Phi 180 \times 35$	10	水雾强制冷却	无	无	480	500 ~ 550
	$\Phi 180 \times 35$	10	水-空循环冷却	45	377	23	500 ~ 550
AISI 1340	$\Phi 365 \times 50$	10	风冷	无	无	7 200	100 ~ 200
	$\Phi 365 \times 50$	10	水雾强制冷却	无	无	900	500 ~ 550
	$\Phi 365 \times 50$	10	水-空循环冷却	92	764	55	500 ~ 550

注:1、浸入深度 h 是钢管横截面浸入的深度;2、停止冷却温度是实测钢管外表面温度。

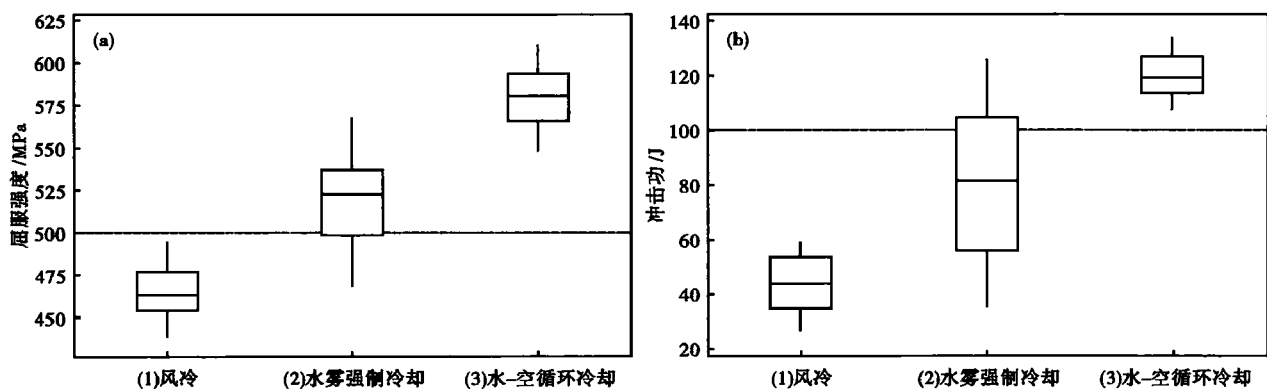


图 3 AISI 1340 钢管(1)风冷、(2)水雾强制冷却和(3)水-空循环冷却的屈服强度(a)和冲击功(b)

Fig. 3 Yield strength (a) and impact energy (b) of AISI 1340 steel pipe with (1) fan cooling, (2) water fog forced cooling and (3) water-air circulation cooling

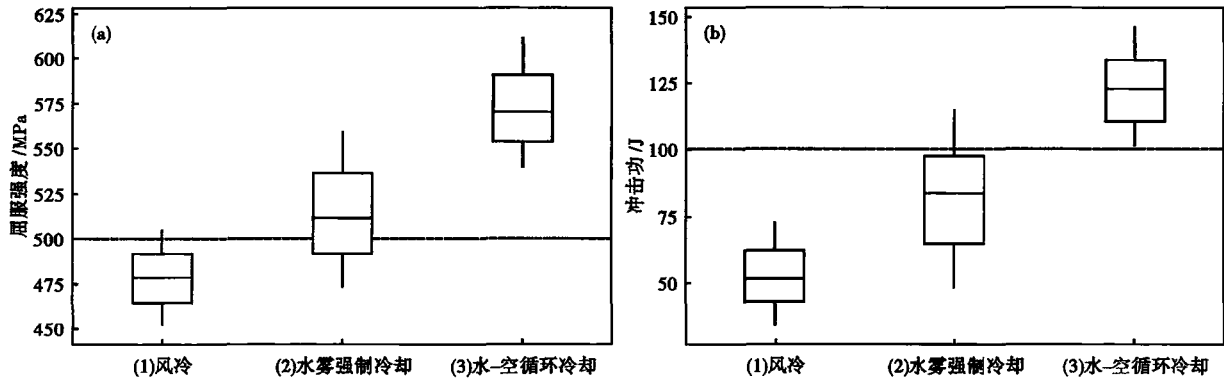


图 4 20MnV6 钢管(1)风冷、(2)水雾强制冷却和(3)水-空循环冷却的屈服强度(a)和冲击功(b)

Fig.4 Yield strength (a) and impact energy (b) of 20MnV6 steel pipe with (1) fan cooling, (2) water fog forced cooling and (3) water-air circulation cooling

均能满足屈服强度 > 500 MPa, -20 °C V 型冲击功 > 100 J 的性能要求, 风冷工艺控制强度和冲击功明显不足, 水雾冷却强制冷却工艺控制, 强度和冲击功离散度很大, 性能均匀性控制难度很大。相比之下, 水-空循环冷却工艺控制正火冷却的性能明显优于两种传统的方式, 这是由于较快的冷却速度与较大过冷温度, 可以通过过冷奥氏体动态相变, 提高了等温转变驱动力, 相变过程珠光体形核率提高<sup>[6]</sup>, 从而提高强度和韧性指标。

### 3.2 布氏硬度分析与讨论

为了进一步验证性能的均匀性, 对规格(外径×壁厚)Φ365 mm×50 mm 的 AISI 1340 钢经过 3 种不同冷却方式控制的钢管, 在同一钢管截面进行四象限布氏硬度检验, 如表 3 所示, 从截面硬度值可以看出, 水-空循环冷却和风冷控制方式的硬度值和极差值相当, 而水雾强制冷却控制方式极差很大, 尤其是外表面硬度明显高于其他位置的硬度, 这是由水-空循环冷却能实现均匀控制整个中厚壁钢管截面冷却速度和过冷温度, 得到均匀的组织 and 力学性能。

### 3.3 显微组织分析与讨论

3 种冷却工艺显微组织均为带条状铁素体 + 珠光体, 从左到右, 显微组织中的条带宽度逐渐变窄, 经过放大 500 倍后, 水-空循环冷却工艺控制钢管组

织明显比其他两种均匀, 如图 5(a,b,c)。为了进一步说明问题, 再通过扫描电镜观察 3 种状态的组织形貌, 如图 5(d,e,f), 水-空循环冷却工艺控制的钢管试样显微组织中其珠光体片层间距 80 ~ 105 μm, 明显细于风冷的片层间距 320 μm 和水雾强制冷却的片层间距 140 ~ 180 μm, 且整个试样可见珠光体片层间距均匀。这是由于采用水-空循环冷却后, 形成细小且稳定的珠光体片层间距。

## 4 结论

(1) 低碳 Mn 钢 20MnV6, 规格 Φ180 mm × 35 mm, 经充分奥氏体化后, 采用水-空循环冷却方式, 在工艺浸入水深度 *h* 为 45 mm、高速旋转线速度 *V* 为 377 mm/s 和冷却总时间 *t* 为 23 s 的参数控制下, 得到铁素体 + 珠光体稳定组织, 同时达到屈服强度 ≥ 500 MPa、-20 °C V 型冲击功 ≥ 100 J 的高强度、高韧性要求。

(2) 中碳 Mn 钢 AISI 1340, 规格 Φ365 mm × 50 mm, 经充分奥氏体化后, 采用水-空循环冷却方式, 在工艺浸入水深度 *h* 为 92 mm、高速旋转线速度 *V* 为 764 mm/s 和冷却总时间 *t* 为 55 s 的参数控制下, 得到铁素体 + 珠光体稳定组织, 同时达到屈服强度 ≥ 500 MPa、-20 °C V 型冲击功 ≥ 100 J 的高强度、高韧性要求。

表 3 Φ365 mm × 50 mm AISI 1340 钢管 3 种冷却方式硬度对比

Table 3 Hardness comparison between three cooling methods for Φ365 mm × 50 mm AISI 1340 steel pipe

冷却方式	一象限 HBW 值			二象限 HBW 值			三象限 HBW 值			四象限 HBW 值			HBW 平均值	极差
	外	中	内	外	中	内	外	中	内	外	中	内		
水-空循环冷却	235	242	240	231	241	235	235	241	243	243	235	241	239	11
水雾强制冷却	278	237	245	265	241	235	275	252	246	260	245	252	252	37
风冷	235	241	241	230	231	241	229	235	241	235	231	241	236	12

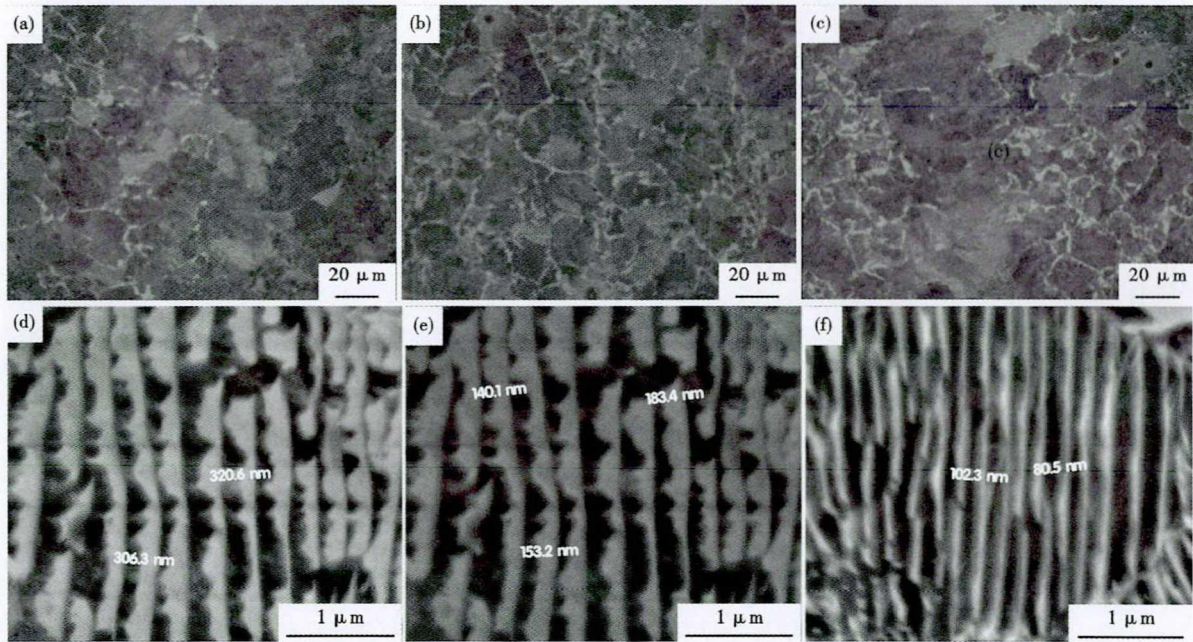


图5  $\Phi 365\text{ mm} \times 50\text{ mm}$  AISI 1340 钢管风冷(a)(d),水雾强制冷却(b)(e)和水-空循环冷却(c)(f)后的组织,光学(a)(b)(c)和珠光体片层间距,SEM(d)(e)(f)

Fig.5 Structure, optical (a)(b)(c) and pearlite lammellar spacing, SEM (d)(e)(f), of  $\Phi 365\text{ mm} \times 50\text{ mm}$  AISI 1340 steel pipe with fan cooling (a)(d), water fog forced cooling (b)(e) and water-air ciculation cooling (c)(f)

(3)在低碳和中碳 Mn 钢中厚壁无缝钢管的正火性能控制中,水-空循环冷却技术模型在性能均匀性和高强度、高韧性控制上,明显优于传统的风冷和水雾强制冷却方式。

(4)通过均匀控制整个中厚壁钢管截面冷却速度和过冷温度,得到细小而均匀的珠光体片层间距组织,是水-空循环冷却模型能显著提高正火强度及韧性的原因。

参考文献

[1] 杨才福,苏航.高性能船舶及海洋工程用钢的开发[J].钢铁,2013,47(12):1-8.  
 [2] El-Bitar T, Gamil M and Mousa I, et al. Development of Carbon-Low Alloy Steel Grades for 10w Temperature Applications[J]. Ma-

terials Science and Engineering: A,2011,528(18):6039-6044.  
 [3] 田青超,刘子利. S460NL 欧标结构管强韧性机理初探[C].浙江:钢管学会六届五次年会·论文集—工艺技术研究,2015:103.  
 [4] 左训伟.水-空交替时淬火冷却设备的研究与应用[C].上海:上海交通大学博士学位论文,2010:26-40.  
 [5] 陈春怀,朱祖昌.钢的冷却介质的冷却机制[J].热处理,2011,26(4):72-73.  
 [6] 李静.珠光体相变过程控制对其微观组织尺寸及力学性能的影响规律研究[C].贵州大学硕士学位论文,2017:6-12,42.

杨煌光(1986-),男,主任工程师,北京科技大学(本科)毕业,钢铁热处理研究。E-mail:yanghuangguang@citisteel.com

收稿日期:2020-10-26

