冷却速度对无缝钢管热处理组织及性能的影响

丰小冬,张行刚,余泽金

(内蒙古包钢钢联股份有限公司技术中心,内蒙古 包头 014010)

摘 要: 文章通过对出热处理炉后的钢管采用空冷和水冷的对比试验,研究了冷却速度对钢管组织结构及力学性能的影响。试验结果表明,加快钢管的冷却速度能够增加相变时的形核率、抑制析出相的聚集和长大,从而达到细化晶粒、改善组织、提高力学性能的目的。

关键词: 冷却速度; 无缝钢管; 热处理; 组织; 相变; 性能

中图分类号: TG162.8⁺4 **文献标识码:** B **文章编号:** 1009-5438(2018)03-0047-03

DOI:10.13647/j.cnki.btgkj.2018.03.012

Effect of Cooling Rate on Microstructure and Properties of Heat Treatment for Seamless Steel Tube

Feng Xiao-dong, Zhang Xing-gang, Yu Ze-jin

(*Technical Center of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*)

Abstract: In the paper, the effect of cooling rate on microstructure and mechanical properties of steel tube after heat treatment furnace was studied by comparing the steel tube with air cooling and water cooling. The test results showed that accelerating the cooling rate of steel tube can increase the nucleation rate at the time of phase transformation and restrain the aggregation and growth of precipitation phase so as to achieve the purpose of grain refinement as well as improving microstructure and mechanical properties.

Key words: cooling rate; seamless steel tube; heat treatment; microstructure; phase transformation; property

控轧控冷技术作为一种最经济的强化性能方式,在线棒材和板材的生产中得到广泛应用。受轧制设备和变形工艺等因素的限制,无缝钢管在轧制过程中的可控、可变因素较少。本文基于合理的钢种成分设计,通过增大钢管在热处理后的冷却速度实现细晶强化的功效。

1 工艺试验条件

1.1 钢种化学成分设计

为了保证无缝钢管具有良好的焊接性能,采用低的碳含量设计; Mn能细化铁素体、提高钢的强韧性,但为防止Mn偏析,将w[Mn]含量控制在1.50%之内; 添加适量的合金强化元素Cr; 复合添加微量的合金元素V和Ti,以达到析出强化和细晶强化的功效[1]; 控制较低的P、S含量,并采用有铝脱氧。设计钢种的具体成分要求见表1。

表1 试验钢种的成分设计(质量分数) %

C	Si	Mn	P	S	Cr,V,Ti,Al
≤0.16	≤0.40	≤1.50	≤0.025	≤0.015	适量

收稿日期: 2017-05-22

作者简介: 丰小冬(1975-),男,内蒙古包头市人,高级工程师,现从事无缝钢管产品研发及质量攻关工作。

1.2 无缝钢管生产工艺

钢管生产工艺：转炉冶炼→LF 炉精炼→圆坯连铸→管坯加热→穿孔→MPM 连续轧管→定径→冷床冷却。

连铸坯的规格为 Φ270 mm，无缝钢管的规格为 Φ168.3 mm × Φ9.53 mm。

1.3 钢管热处理工艺方案

试验钢种属于亚共析钢，热处理温度应该在 Ac_3（检测值为 856.7 ℃）以上 30 ~ 50 ℃之间[2]，故加热温度选 900 ℃，在该温度下保温一段时间，使钢的组织全部转变为奥氏体，成分相对均匀。根据公式计算：$t = a \cdot K \cdot D$（t 为加热时间；a 为钢种系数，低碳钢燃气炉取 1.8，其中预热阶段取 1.0，加热阶段取 0.8；K 为装炉系数，密排方式取 1.4；D 为钢件有效厚度，取 19.06 mm[2]），保温时间应控制在 50 min 左右。

为了简化试验并增强对比效果，对热轧后的钢管设计了两组热处理工艺。加热温度和保温时间相同，工艺 1 采用自然空冷的方式对出炉后的钢管进行冷却，工艺 2 采用两组管环喷水冷却的方式对出炉后的钢管进行冷却，具体热处理工艺方案见表 2。分别对热处理后的管体取样，进行力学性能和金相组织的检验。

表 2 钢管的热处理工艺方案

项目	加热温度/℃	保温时间/min	冷却方式
工艺 1	900	50	出炉自然空冷
工艺 2	900	50	出炉喷水冷却

在出热处理炉的运输辊道上间隔布置两组喷水管环，一组管环位于出炉辊道的近端，一组管环位于出炉辊道的远端，管环的内环面沿圆周方向均匀分布有喷水孔，具体工艺布置见图 1。

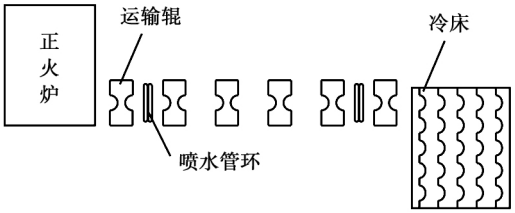


图 1 热处理后的工艺布置图

2 试验结果

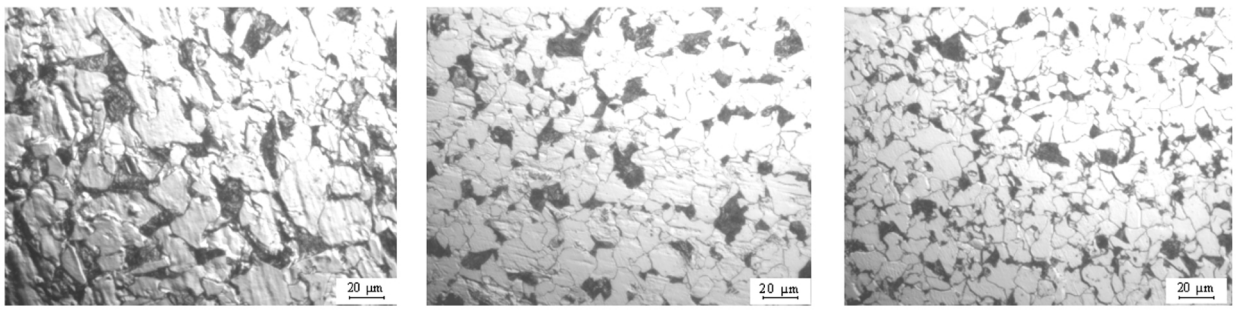
从表 3 力学性能的检测结果可以看出，相对于热轧态的管体，热处理后进行空冷管体的屈服强度、抗拉强度和屈强比均有所降低，延伸率有所提高，但幅度不大，冲击韧性得到大幅度的提高。相对于热处理后进行空冷的管体，喷水冷却的管体除延伸率稍有降低外，管体的屈服强度、抗拉强度、屈强比和冲击韧性均得到明显提高。

从表 3 和图 2 金相组织检测结果可以看出，管体的金相组织均以铁素体为主，并含有少量的珠光体。热轧态的管体晶粒度为 9.0 级，热处理后进行自然空冷的管体晶粒度为 10.0 级，热处理后进行喷水冷却的管体晶粒度为 10.5 级，无明显脱碳层。

表 3 管体热处理后的力学性能及金相组织检测结果

生产工艺	$R_{t0.5}$/MPa	R_m/MPa	A/%	$R_{t0.5}/R_m$	Akv/J	组织	晶粒度/级	脱碳层
热轧	393	527	38	0.75	59	F + P	9.0	无
工艺 1	376	506	40	0.74	105	F + P	10.0	无
工艺 2	403	531	39	0.76	127	F + P	10.5	无

注：冲击试样为横向半尺寸，试验温度为 0 ℃。



（a）热轧态 （b）热处理后进行空冷 （c）热处理后进行喷水冷却

图 2 管体的金相组织

3　分析与讨论

3.1　热轧工艺对组织及性能的影响

V、Ti 均是强碳氮化物形成元素，轧管过程中 V 以 V(C、V)、Ti 以 TiN 的形式弥散析出，对奥氏体晶界钉扎，相变时还可作为异质核心，诱导铁素体在晶内形核，促进铁素体晶粒的数量增加，产生位错亚结构，达到细晶强化的效果[1]。

固溶于奥氏体中的 C、Mn 溶质元素能够降低奥氏体向铁素体的转变温度 A_3，而 Si、Cr、V 等溶质元素能够升高奥氏体向铁素体的转变温度 A_3[3]。枝晶偏析导致连铸坯中的成分不能均匀分布，溶质元素在枝晶内的含量明显高于在枝晶间的含量。

热轧后的钢管从奥氏体区开始冷却，温度降到 A_3 时，在富含 Si、Cr、V 等溶质元素的区域开始析出铁素体，温度降到低于 A_3 时，在富含 C、Mn 溶质元素的区域仍然能够析出铁素体，其间饱和的 C、Mn 等溶质元素不断向周围区域进行扩散析出，导致过冷奥氏体中 C、Mn 等溶质元素的浓度不断增大，温度降到 A_1 时浓度达到最高，此时过冷奥氏体发生共析反应生成珠光体[3]。

3.2　热处理工艺对组织及性能的影响

管体在进行奥氏体化的加热过程中，组织先后经历了回复、再结晶和晶粒长大 3 个过程。在回复过程中，位错通过滑移方式得以重新排列，异号位错对消、相邻亚晶合并长大，多种因素导致位错密度大幅降低，内应力得到消除。再结晶过程中，畸变晶粒通过形核、长大，形成无畸变的等轴晶粒，组织得到软化和细化[3]。

析出的 V(C、V) 颗粒和 TiN 质点在热处理加热过程中不能全部回溶入奥氏体中，总有一部分仍滞留在奥氏体晶界处。由于晶粒得到细化，晶界面积大幅增加，钉扎在奥氏体晶界处的 V(C、V) 颗粒和 TiN 质点的数量明显不足，析出强化的效果很不明显，软化的效果大于细晶强化的效果，因此，热处理后管体的强度降低，韧性大幅提高。

3.3　冷却速度对组织及性能的影响

C 元素在奥氏体中的扩散速度快于 Mn、Si、Cr、V 等溶质元素[4]，因此，在钢管的热处理加热过程中，C 元素优先达到相对均匀分布的状态，但 Mn、Si、Cr、V 等溶质元素不能均匀分布。

奥氏体化后进行快速冷却，一方面能够提高相变时的形核率，增加晶粒的数量；另一方面能够缩短相变过程，使 C、Mn、Si、Cr、V 等溶质元素没有充足的时间进行长距离扩散[4]，这就抑制了析出相的聚集和长大，达到细化晶粒、均匀组织分布的目的。

管体离开热处理炉后，喷水冷却强度明显高于空气冷却强度，因此，水冷能够相对缩短冷却时间，使管体组织得到进一步的均匀和细化，强韧性能得到相应提高。

4　工艺改进建议

(1) 适当提高连铸坯或钢管的加热温度或延长保温时间，使 C、Mn、Si、Cr、V 等溶质元素充分扩散，达到奥氏体成分相对均匀分布，以减轻枝晶偏析对相变的不利影响。

(2) 加快钢管在轧制后或热处理出炉后的冷却速度，能够缩短相变过程，组织相变时析出的 C、Mn、Si、Cr、V 等溶质元素来不及长距离扩散，以达到细晶强化的目的。

5　结论

(1) 加热过程中管体组织先后经历了回复、再结晶和晶粒长大 3 个过程。回复过程消除了内应力，组织得到软化；再结晶过程使畸变晶粒转变成无畸变的等轴晶粒，组织得到细化。软化效果大于细晶强化效果，导致强度降低、韧性升高。

(2) 管体离开热处理炉后，水冷的强度明显高于空冷的强度，这将缩短相变过程、增加相变时的形核数量，最终实现细化晶粒、均匀组织、提高管体强韧性能的综合功效。

参　考　文　献

[1] 黄开文. X80 和 X100 钢级管线钢的合金化原理和生产要点[J]. 轧钢，2004，21(6)：55－58.

[2] 何维勤，张玉庭，杜赓林，等. 简明热处理工艺手册[M]. 北京：机械工业出版社，1990.

[3] 刘宗昌，李文学，任慧平，等. 材料组织结构转变原理[M]. 北京：冶金工业出版社，2006.

[4] 朱施利，胡文豪. 40MnB 钢偏析形成带状组织的机理研究[J]. 物理测试，2009，27(6)：9－12.