

## ACC水冷工艺分析及在生产中的应用

刘晓东, 孙 玮, 夏佃秀

(济南钢铁股份有限公司, 山东 济南250101)

**摘要:** 通过在生产实践中对奥氏体3种基本转变类型的研究, 确立了低碳锰钢系列不同钢种的ACC水冷工艺。对铁素体/珠光体类钢, 用弱水量冷却强度、5~10 °C/s的冷速, 配合高温控制轧制, 可以得到比单纯控轧更好的效果; 对贝氏体钢的生产, 必须用ACC中水量冷却强度, 以10~25 °C/s的冷速快冷至生成贝氏体的温度区间。在形变诱导相变温度 ( $A_{d3}$ ) 附近终轧, 然后快速冷却, 可以生产性能优良的高强韧性针状铁素体管线钢和贝氏体结构钢; 对马氏体钢的生产, 必须采用ACC强水量冷却强度, 冷速在25 °C/s以上, 冷至Mf以下温度。通过调整冷速, 可以很容易获得不同含量的贝氏体和马氏体组织, 以满足不同强韧指标的性能要求。

**关键词:** ACC; 水冷工艺; 冷却强度; 冷却速度; 终冷温度; 扩散型转变; 过渡型转变; 切变型转变

中图分类号: TG335.5; TG113 文献标识码: A 文章编号: 1004-4620 (2007) 05-0005-04

**Analysis of ACC Water Cooling Process and Its Application in Production**

LIU Xiao-dong, SUN Wei, XIA Dian-xiu

(Jinan Iron and Steel Co., Ltd., Jinan 250101, China)

**Abstract:** The ACC water cooling process of low C-Mn steel is confirmed in research of three austenite transformations in production. To ferrite/pearlite steel, the process consisting of low water cooling intensity, 5~10 °C/s cooling velocity, and high temperature controlled rolling can get better effect than single controlled rolling. To obtaining bainite microstructure, must be adept the process of ACC medium water cooling intensity and 10~25 °C/s cooling velocity so that the temperature of plate can drop rapidly into the range of temperature where bainite microstructure grows up. Acicular ferrite pipeline plate and structure plate with high strength and toughness can be produced by the process of rapid cooling after finish rolling near a temperature of deformation induced ferrite transformation ( $A_{d3}$ ). To obtaining martensite microstructure, must be adept the process of ACC high water cooling intensity and above 25 °C/s cooling velocity so that the temperature of plate can drop rapidly under Mf. Various amounts of bainite and martensite microstructure for the need of high strength and toughness can be obtained by adjusting cooling velocity.

**Key words:** CC; water cooling process; cooling intensity; cooling velocity; finish cooling temperature; diffusion transformation; transition transformation; shear transformation

## 1 前言

ACC (Accelerated Cooling) 是继日本于20世纪80年代首次在厚板轧机上采用在线加速冷却设备后, 配合TMCP (Thermo Mechanical Control Process) 快速发展起来的控冷技术, 具有冷却能力强、精度准、自动化程度高的特点, 在厚板生产线上被广泛采用。目前国内多条中厚板生产线新上了ACC设备, 代替原来的喷流、水幕、喷雾等冷却设备, 使产品的等级和品种范围进一步拓展。ACC最显著的功能是冷却能力强, 主要用来生产高强韧性的造船、海洋结构、机器结构、管线用TMCP钢。一条中厚板生产线要同时面对不同级别和性能要求的钢种, 从几毫米到几十毫米大范围变化的规格。因此, 如何开发应用ACC水冷工艺技术, 控制

钢板的组织形态,改善内在机械性能,提高生产效率,使中厚板的生产向低合金、高性能、省工序的方向发展,是一项富有经济效益的研究课题。本研究以某厂的ACC为例,依据轧后奥氏体转变机理,分析了用ACC水冷工艺控制不同钢种的组织和性能,使低碳锰钢系列100多个钢种采用了ACC水冷工艺,显著改善了产品质量,提高了生产能力。

## 2 主要设备和冷却控制参数

### 2.1 ACC主要设备参数

某厂的ACC布置于精轧机和矫直机之间,采用通过式、无约束型冷却方式,由I区的气雾冷却和II区的喷水冷却两段以及出、入口的反喷构成,全长24 m。气雾冷却区长6 m。3组喷嘴,采用喷雾式水口,上下喷嘴1对1配置。喷水冷却区长16 m,8组喷嘴,采用扁平层流式水口(上喷嘴)和圆管层流式水口(下喷嘴),上下喷嘴1对2配置。系统最大供水能力9 000 m<sup>3</sup>/h。

### 2.2 主要冷却控制参数

2.2.1 冷却水量及其强度 该系统气雾冷却区每组喷嘴最大水流量650 m<sup>3</sup>/h,喷水冷却区每组喷嘴最大水流量750 m<sup>3</sup>/h。根据不同钢种和规格的用水量,通过设定喷嘴水流量和喷嘴开启位置,采用弱水量冷却、中水量冷却、强水量冷却3种不同的冷却强度,见表1。

表1 不同冷却强度下的喷嘴流量和喷嘴开启位置

冷却强度	I区每个喷嘴流量/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	II区每个喷嘴流量/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	喷嘴开启位置	对应冷速/(°C·s <sup>-1</sup> )
弱水量冷却	200~300	300~400	间隔开启	5~10
中水量冷却	300~500	400~600	间隔~逐一开启	10~25
强水量冷却	500~650	600~750	逐一开启	25~40

2.2.2 冷却速度 冷却速度是关键的冷却控制参数。不同的冷却速度,能够使过冷奥氏体实现扩散型、过渡型或者切变型的相变,最终得到不同的组织状态<sup>[1]</sup>。冷却速度取决于水的冷却强度和ACC辊道速度的配合,该系统辊道速度介于35~100 m/min范围内可调。根据数学模型精确匹配的水冷强度和辊道速度,按返红温度计算,该系统最大冷速可达到40 °C/s(20 mm),具备了在线DQ(直接淬火)功能。

2.2.3 开冷和终冷温度 从组织和性能控制的角度看,开冷温度和冷却速度共同影响奥氏体过冷度的大小和先共析铁素体的含量,而后者含量的多少直接影响塑性的变化。在贝氏体类钢的生产中,开冷温度作为重要的控制参数来调控组织变化和性能。终冷温度直接影响奥氏体最终转变成的室温组织结构,是控制组织状态的最直接手段。冷却速度和终冷温度共同决定了过冷奥氏体室温转变产物,是影响组织状态和机械性能的关键因素。生产实践中以钢板的返红温度作为实际终冷温度。

2.2.4 上下喷嘴的水比 水比的调整主要体现在喷水冷却段,上下水量之比以1:(2~2.5)的比例来确保上下表面冷却均匀。冷却不均首先会造成板型恶化,给矫直带来困难;其次也会带来厚度方向性能的差异。

2.2.5 水温 水温的高低影响对流换热系数,进而造成冷却温度的波动。根据实际生产经验,22~25 °C的水温最适宜冷却的控制,由数学模型控制的精度误差在2%以内。为控制水温恒定,夏秋季可将水经过地面冷却塔、地下换热管道降温,而秋冬季可直接将水回流至蓄水池保温。

## 3 奥氏体3种基本转变类型的ACC工艺

### 3.1 奥氏体扩散型转变的ACC水冷工艺

奥氏体的扩散型转变,是奥氏体在经过热轧(HR)或控轧(CR)后,通过空冷或较轻程度水冷转变成铁素体/珠光体(F/P)组织的过程。目前600 MPa以下强度的机械结构钢、锅炉容器钢、船板等热轧钢板基本

都是这种组织结构。铁素体/珠光体钢因含有较多数量的软相铁素体组织，因此具有良好的塑性，同时通过不同的控轧和控冷工艺，可以得到较高的强度和最低可达到 $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的良好低温韧性。对添加Nb、V、Ti微合金化的Si-Mn钢，单纯的控轧工艺生产高强韧性的F/P钢，需要在二次控轧时，将终轧温度控制在 $860\sim 800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 甚至更低。虽然组织性能比较稳定，但缺点是轧制温度低，设备负荷大，生产效率低。控轧和控冷的工艺组合，可以在控轧后奥氏体晶粒内形成大量变形带和位错的基础上，通过水冷使奥氏体又获得一定的过冷度，相变的驱动力大大增强，可以获得比单纯的控轧更细小的晶粒度（9~10级）。某厂的生产实践证明，生产同一种钢，采用控轧和ACC控冷工艺，比单纯的控轧工艺可以提高终轧温度 $30\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，降低设备负荷、提高轧机产量的生产优势明显。因此如何控制ACC水冷工艺，是用控轧和ACC控冷工艺生产高性能F/P钢的核心所在。

F/P钢主要通过珠光体在组织中的分散度来影响钢的强度，奥氏体的过冷度越大，珠光体的分散度就越大（即片层间距越小），强度越高。但F/P钢一般有超过20%延伸率的塑性要求，过大的过冷度会造成珠光体扩散成长速度较快，先共析铁素体比例减少，造成塑性降低。结合生产实践经验， $400\sim 600\text{ MPa}$ 强度钢应采用表1中的弱水量冷却强度，冷速 $5\sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ ，终冷温度 $750\sim 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。对同时要求越高级别低温韧性的钢，终轧温度和终冷温度应逐步降低，冷速提高。某厂应用控轧和ACC控冷工艺生产的F/P钢，取得了非常显著的性能指标和生产能力指标，见表2。

表2 不同水冷工艺下代表钢种的组织和性能

代表	代表	终轧	终冷	水冷	冷却速度	组织	$R_{cL}$	$R_m$	A	$A_{KV}$	DWTT	轧机产量
钢种	规格/mm	温度/ $^{\circ}\text{C}$	温度/ $^{\circ}\text{C}$	强度	$/(^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1})$	状态	/MPa	/MPa	/%	/J	( $-10^{\circ}\text{C}$ )	$/(\text{t}\cdot\text{h}^{-1})$
16MnR	25	880	700	弱	6.5	F/P	385	555	27	108( $0^{\circ}\text{C}$ )		270
D36	26	870	650	弱	10	F/P	450	585	25	199(-20)		255
Q460C	30	860	680	弱	8	F/P	510	655	20	118( $0^{\circ}\text{C}$ )		240
Q550D	40	850	550	中	16	F/B	630	705	19	127(-20)		245
X70	12.7	870	600	中	25	F/AF	505	610	38	315(-10)	100	220
Q690D	30	840	530	强	20	F/B	765	850	18	185( $0^{\circ}\text{C}$ )		230
DB950	25	840	300	强	30	回火M	990	1050	19	165(-20)		230
12MnNiVR	21.5	860	200	强	40	回火S	585	670	21	245(-15)		190

对F/P钢，实际冷却过程中，钢板厚度横截面上温度梯度的变化也是重点关注的对象，水冷却强度越高，冷速越快，钢板表面和中间的温差就越大。如果温度梯度控制不当就会对组织和性能产生不利的影响。当奥氏体轧制温度较高，而又选择比较快的冷却速度时（实际生产中往往容易产生用快冷代替控轧的错误做法），铁素体不仅沿奥氏体晶界析出生长，而且还会在比较粗大的奥氏体晶粒内部形成许多被珠光体间隔开的片状魏氏组织铁素体，导致韧性变差。如图1所示，终轧温度为 $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、以 $15\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 的冷速冷至 $680\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的16mm厚16MnR钢板中出现魏氏组织。 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的3个试样纵向冲击功分别为21、46、47 J，没有达到标准要求。对偏厚的规格，如果冷速过快，温度梯度过大，还有可能在表面形成贝氏体组织，造成塑性的降低，因此应采用降低终轧温度，配合较低冷速的工艺，来获得综合性能的提高。与魏氏组织形成机理相反，如果轧后冷速过慢，会使碳有足够的时间进行长距离的扩散，形成比较严重的二次带状组织，使钢的横向塑性和韧性降低。综合以上分析，根据钢的具体性能要求，确定合适的轧制温度，在 $5\sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 的冷速范围内选择适当冷却强度的水量，能够得到良好的组织状态和机械性能。

### 3.2 奥氏体过渡型转变的ACC水冷工艺

奥氏体的过渡型转变是发生贝氏体转变的过程，由于变形后奥氏体被快速冷至较低温度，碳在奥氏体中进行扩散形成珠光体的条件（温度和时间）已不具备，只能在以切变方式形成的铁素体中进行扩散，形成碳化物的析出，因而形成贝氏体组织<sup>[1]</sup>。因此从贝氏体形成的机理可以看出，生成贝氏体的首要条件是以较高的冷速冷至较低转变温度，体现在ACC水冷工艺上，即根据不同厚度，用中等冷却强度的水量，以 $10\sim$

25 ℃/s的冷速，冷至600~450 ℃的贝氏体转变区域。用这一水冷工艺可以生产性能优良的X65~X80管线钢、Q550D~Q690D等高强韧性的贝氏体钢。

贝氏体钢的水冷工艺配合控制轧制、微合金化元素的使用，能取得完美的效果。实验室研究结果指出<sup>[2]</sup>，低碳锰钢在稍高于形变诱导相变温度(Ad<sub>3</sub>)之上终轧后快速冷却，得到由仿晶界型铁素体(FGBA)和贝氏体的复相组织，其中的贝氏体铁素体呈板条状，具有良好的塑性和韧性；在稍低于Ad<sub>3</sub>温度终轧后快速冷却，会得到等轴铁素体和贝氏体，强度会进一步提高。这是由于Ad<sub>3</sub>温度附近终轧和快速冷却的工艺通过奥氏体内形成大量变形带和位错，以及水冷形成较大的过冷度，给相变提供了巨大的驱动力。实际生产也充分验证了实验室结果，某厂生产的Q550D，在低碳锰钢中添加微量的Nb、Ti、Mo，通过低温控轧和快速ACC冷却，得到F/B组织(见图2)，抗拉强度达到700 MPa以上，塑韧性也表现优良(见表2)。除控制轧制因素外，一些合金元素也在贝氏体的转变过程中起到重要作用，如加入微量的B，可以提高钢的淬透性；加入Mo、Cr，既可以提高钢的强度，又可以在冷却过程中阻止珠光体的生成。控制轧制、适量的合金元素和ACC快速水冷工艺，三者的结合为贝氏体钢的生产提供了有力的技术手段。

在某些特定条件下，ACC的快速冷却能克服其他工艺因素的不足，产生决定性的效果。某厂开发的12.7 mm厚X70管线钢，在高温轧制后(HTP)立即快速冷却，在较高的终冷温度上获得如图3所示针状铁素体(AF)组织和优良的机械性能(见表2)，为解决薄宽规格低温轧制的板型控制问题和ACC功能的深层次开发，做了非常有意义的创新性探索。

### 3.3 奥氏体切变型转变的ACC水冷工艺

当钢由奥氏体连续激冷至马氏体的转变开始温度(M<sub>s</sub>)时，奥氏体中完全没有原子的扩散过程，而是通过复杂的切变过程转变成马氏体，C<0.2%的低碳钢一般转变为板条状马氏体。对成分固定的某一种钢，组织中马氏体的含量取决于奥氏体的过冷度和终冷温度，这一点对制定ACC的DQ水冷工艺至关重要。首先，水量需要开启到8 000~9 000 m<sup>3</sup>/h强水量，辊道速度选择在60~80 m/min之间，根据不同的厚度可以形成25~40 ℃/s的冷速。对强度要求高的钢，应保证冷速基本达到临界冷却速度，防止因冷速过低在奥氏体冷却过程中产生较多的珠光体和贝氏体，减少板条马氏体的生成量。终冷温度是影响马氏体生成量的另一关键因素，在M<sub>s</sub>以上温度终止冷却，不会生成马氏体，冷至M<sub>s</sub>~M<sub>f</sub>之间，马氏体转变会随时中止。马氏体的开始和终止转变温度只随碳及合金添加元素的增加而降低，与冷却因素无关，因此对低碳、低合金钢而言，通常冷至200 ℃以下已低于M<sub>f</sub>温度。应用ACC的DQ技术，某厂已成功开发出12~32 mm在线淬火、离线回火的调质大型石油储存罐用钢12MnNiVR(见表2)。

在ACC淬火前，应先由控轧得到细而均匀的奥氏体晶粒，以便冷却后得到细小的马氏体。开冷温度应高于A<sub>r3</sub> 10~20 ℃，低于A<sub>r3</sub>会造成一部分先共析铁素体析出，淬火后在马氏体中混杂着铁素体，降低力学性能。

## 4 ACC水冷工艺在实际生产中的效果

某厂根据奥氏体转变机理，对100多个钢种进行了广泛、细致的ACC水冷工艺研究，通过准确控制生成的组织状态，得到了优良的性能指标，表2列举了代表钢种的主要工艺和主要性能指标。对铁素体/珠光体类钢，通过准确的水冷工艺控制，不仅降低了组织中的缺陷，改善了性能，而且经过控轧和控冷的工艺优化组合，提高了单纯控轧的终轧温度30~40 ℃，降低了设备负荷，轧机小时产量提高20%，取得了显著的经济效益。对ACC水冷工艺的深度开发，已成功生产出700~1 000 MPa强度级别的贝氏体和马氏体高强度结构钢、X65~X80针状铁素体管线钢，并具有实现大批量生产的能力。ACC的DQ功能的实现，使调质钢可以用在线淬火、离线回火的方式生产，探索出另一条生产高强度钢的工艺途径。

## 5 结论

5.1 通过控制ACC喷嘴的水流量，可以形成弱水量冷却、中水量冷却、强水量冷却3种不同的水冷却强度，

不同冷却强度的水量不仅会产生不同的冷却速度，同时也会影响钢板横截面温度梯度的变化。温度梯度的大小尤其会对铁素体/珠光体类钢产生明显的组织和性能影响。

5.2 对奥氏体发生扩散型转变生成铁素体/珠光体的ACC水冷工艺，应采用弱水量冷却强度，冷速 $5\sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ ，终冷温度 $750\sim 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。控轧和ACC控冷的工艺组合，与生产同一种钢单纯的控轧工艺相比，可以提高终轧温度 $30\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

5.3 若让奥氏体发生过渡型转变生成贝氏体，须采用ACC中水量冷却强度，冷速达到 $10\sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ ，终冷温度 $600\sim 450\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。将终轧温度控制在形变诱导相变温度 ( $A_{d3}$ ) 附近，然后快速冷却，用这一工艺可以生产性能优良的高强韧性管线钢和结构钢。

5.4 若让奥氏体发生切变型转变生成马氏体，须采用ACC强水量冷却强度，冷速在 $25\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 以上，冷至 $M_f$ 以下温度。通过调整冷速，可以很容易获得不同含量的贝氏体和马氏体组织，以满足不同强韧指标的性能要求。

参考文献：

[1] 宋维锡. 金属学[M]. 北京：冶金工业出版社，1980：362-375.

[2] 李龙，丁桦，杜林秀，等. TMCP对低碳锰钢组织和力学性能的影响[J]. 钢铁，2006，41（11）：53-57.

---

[返回上页](#)