

控制冷却译文集

KONGZHILENGQUE
YIWENJI



鞍钢情报研究所
一九八二年十二月

出 版 前 言

近几年来，控制冷却技术的发展，特别引人注目。应用于热轧工序中，在提高产品性能和控制形状方面取得了明显效果，对于厚钢板来说，如与控制轧制配合（即控制轧制后快速冷却），不仅可保持控制轧制提高强度和韧性的效果，而且还可以消除控制轧制中产生的层状撕裂。因此，控制冷却技术被认为是提高热轧产品质量的有效措施。

我们基于上述看法，编辑了这本《控制冷却译文集》。其内容包括板带、型钢及钢管方面控制冷却技术及其装置的专利文献、论文、资料等三十五篇译文，总共约15万字。它反映了控制冷却最新技术，因此，对我国各种热轧材厂技术改造都有参考价值。

在翻译过程中，我们力求结合生产实际，选择文章。由于水平有限，缺点错误在所难免，欢迎广大读者批评指正。

一九八二年 十二月

目 录

一、板带部分

水喷流冷却特性和在钢铁工业上的应用·····	(1)
喷水冷却原理解析及在钢材冷却中的应用·····	(10)
控制轧制后快速冷却对机械性能的影响·····	(19)
水幕冷却 (CWC) ·····	(30)
热轧带钢冷却控制—戴维·劳威公司的水幕 冷却系统 (第一部分) ·····	(40)
热轧带钢冷却控制—戴维·劳威公司的水幕 冷却系统 (第二部分) ·····	(46)
厚板在线快速冷却 (OLAC) 的应用 ·····	(52)
在轧制过程中采用强制水冷却法对中厚板 进行控制轧制 ·····	(63)
水刀喷嘴冷却·····	(73)
余热强化结构钢的某些特性·····	(78)
雾化水冷却及在轧制设备中的应用·····	(81)
热轧宽带钢轧机卷取温度控制的新方法·····	(88)
高温钢材的冷却装置·····	(95)
热轧钢材的冷却装置 (1) ·····	(99)
热轧钢材的冷却装置 (2) ·····	(102)
热轧钢材的冷却装置 (3) ·····	(105)
热轧钢材的冷却装置 (4) ·····	(108)

厚板在线调质冷却设备的研制.....	(112)
超低碳当量HT-50较厚钢板生产工艺.....	(114)
超低碳当量50公斤级控制轧制和控制冷却钢板 的强化因素.....	(115)
冷却变形产生机理及防止措施.....	(116)
二、型材部分	
克里沃洛兹厂混凝土钢筋热强化的十年.....	(118)
发展和提高轧材热强化效果的途径.....	(119)
在克里沃洛兹厂250-5小型轧机上低合金钢 和低碳钢钢筋的热强化.....	(121)
型材的冷却装置.....	(123)
具有限制水冷却工序的型钢生产方法.....	(125)
防止长尺型钢翘曲的方法.....	(128)
H型钢等减少残余应力的冷却方法.....	(130)
H型钢水冷却装置.....	(134)
S-ED-C新工艺—低碳钢线材控制冷却的进展.....	(137)
三、钢管部分	
高温处理管材的冷却方法和装置.....	(141)
钢管的浸渍冷却方法.....	(146)
钢管的冷却方法.....	(148)
钢管的冷却装置(1).....	(152)
钢管的冷却装置(2).....	(154)

水喷流冷却特性和在钢铁工业上的应用

1、绪言

水喷流冷却几乎使用于钢铁生产全部过程之中，应用成功与否是影响产品质量和成本的非常重要的技术。炉体、滑轨、轧辊设备的冷却，各种热处理的冷却，连铸凝固的控制，除鳞急冷，轧制线的温度调整等，有着各种各样的用途，采用各种冷却所要求的特性也是各式各样的。

作为水冷却的基本特性可举出冷却能力、均匀性、省水量、省动力性、可控性、维修保养性等。其中关于冷却能力的研究也有相当长的历史，现在基本上可以掌握，然而，关于其它的特性的报告还几乎看不见。

本文在解释关于这些基本特性的现状和技术特征的同时，介绍一些钢铁工业上最近应用的例子，同时也想分析一下关于喷射冷却技术的今后课题。

2、各种冷却方法的概要

各种冷却方法的名称的定义因人而异，而且也相当不明确。例如，层流和喷射就存在着非常难以区分的问题，此处，想按平田的区分法做某些说明。

(1) 层流冷却

被施加压力的水从喷嘴喷射形成喷流，当喷射的出口速度比较低时，形成平滑的层状喷流。这种喷流落到一定距离时，由于发生轴对称震动，有时破断变成

液滴流。采用这种层状喷流的冷却方法叫做层流冷却。由于该法在不发生震动的范围内，喷射距离较长能获得强冷却，所以，该法应在喷射距离较远，而且必须要求强冷时（例如，热轧出口处）使用。

(2) 喷流冷却

喷流出口速度一增加就变成紊流喷射，通过在喷流表面发生凸状紊流达到破断。把采用这种破断以前的连续喷流的冷却方法叫喷流冷却。这种冷却方法穿透性好，在水膜厚的时候（例如，厚钢板淬火：RQ、PQ）使用。

(3) 喷射冷却

把水加压从喷嘴喷出的时候，如果超过连续喷流的流速则液流发生破断，形成液滴群冲击固体表面。把这种用液滴群冷却的方法叫做喷射冷却。最适合一般使用，适合于各种用途的喷嘴，多数可在市场上买到。但是，用同一喷嘴可控制的冷却能力范围不太宽，并且需要比其他冷却方法施加更高的压力。

(4) 雾化冷却

用加压的空气使水雾化，水和高速空气流一起从喷嘴喷射出来的冷却方法称做雾化冷却。这种冷却有二种情况：①为了提高冷却能力用空气加速液滴；②为了控制冷却能力用空气使液滴极微细化，而不给予太大的动量。后者一般称作雾冷。尽管由于使用空气使联合喷嘴结构和配管系统稍变复杂，但是，有从空冷到强水冷在极宽范围能够控制冷却能力的特点。在这样宽的范围存在着必须控制冷却和对水

使用量的限制,然而,在必须强冷时,使用这种方法还是有效的。

(5) 浸渍冷却

浸渍在大量冷却水中的冷却方法叫作浸渍冷却。这是很久以来就使用的最简单的冷却法,但存在很多问题,冷却能力很难控制,均匀性不好,冷却能力随着水温变化而发生很大变化。

(6) 管内流水冷却

水在管内和平行板间流动的冷却方法叫作管内流水冷却。在水沿传热面平行流动和发生冲撞情况下,一般认为后者能得到大的冷却能力,而实际上,是在没有自由面状态发生的平行流,在可能达到最大冷却能力上处于优越地位。该法作为弱冷却法是不适当的,但是,由于喷嘴喷出压力低,可以得到高度均匀冷却,所以,人们认为作为强冷却法将来可能被广泛采用。

3、水喷流冷却能力

水喷流的冷却能力是决定冷却设备规格和操作条件的最重要的特性。因此,以前的研究报告,有关这种冷却能力的研究占一大半;关于钢铁生产工艺中重要的高温冷却的研究也有相当数量的报告。但是,从研究者的数据也可发现相当大的差异,这是因为高温面的冷却发生沸腾的复杂现象,实际上是很难解析的。

图1的沸腾曲线较清楚地定性地说明了热传递的过程。近年来,樱井等人揭示了包含加热时和冷却时滞后等更详细的沸腾曲线,按照此曲线定性划分四大区域。其特点是温度升高时,表面热通量有一段下降,达到过渡沸腾区极小值。这一点随冷却条件不同而异,不能定量表达,但是,一般认为通常水喷流冷却比莱顿霜点高 $100\sim 200^{\circ}\text{C}$ 。

HOOGENDOORN根据喷流实验,推测不锈钢板上的莱顿霜点。根据此报告,莱顿霜点受水流量密度很大影响,在水流量密度为 $10^{-4}\sim 2.5\times 10^{-2}$ 米³/米²·秒的范围内是 $330\sim 900^{\circ}\text{C}$ 。这样,莱顿霜点虽然变化很大,但是,不管怎样,在水喷流冷却时,由于温度相当高,可以认为已从膜沸腾移到过渡沸腾。除资料(7)中的雾化冷却外,在从各种冷却方法的热传递系数计算式推算的沸腾曲线上,都不存在热通量极小值,一直到过渡沸腾都是如此。从这些结果可以推测,在水喷流冷却中,除了非常高温或者弱冷却时,不可能存在完全膜沸腾。然而,无论如何,可以设想,水喷流的冷却能力是由表面上紊流强度和表面上水流速度变化梯度或者由随喷流和表面接触频率增加(提高莱顿霜点)的情况等来确定,喷流具有的动量为强度函数。

各研究者对支配水喷流冷却能力各种因素的评价也不太一致,但是,大体上可像表1整理的那样。其中水流量密度,表面上流速,喷射距离是在冲击点水喷流具有动量的因素,把这些因素归纳整理可作为动量的一个因素。国岗等人基于这种想法,把层流、喷射、雾化等冷却能力按各表面温度统一进行整理,得到了良好结果。仅将这种结果表示如下。表2示出将各种冷却法中各自流动状态都换算成管内流水那样完全连续流体的情况时的代表长度和代表速度的计算方法。图2是用这样计算出的代表长度和代表速度整理出的无因次热传递系数的一例。由此可知,在一根线上可高精度地推定热传递系数。另外,表3示出了在各表面温度的水喷流热传递系数的回归式。对此回归式评价有两点:①比以前所推荐的热传递系数计算式精度要高;②把各种冷却方法整理统一。问题是这个回归方程式以实验数据为

基础整理出来的，对实际生产线的冷却还要考虑很多干扰因素，存在相当的误差。所以，推定在实际生产线上的各种冷却方法的冷却能力时，可参考资料（7）的

P. 98~99的冷却能力推定式（钢材的强制冷却（1978），日本钢铁协会）。

支配水喷流冷却能力的因素 表1

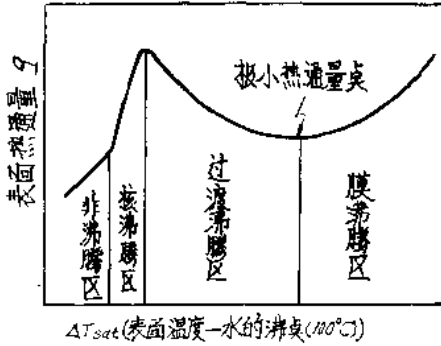


图1 沸腾曲线

因素	冷却方法					
	层流	喷流	喷射	雾化	浸渍	管内流水
水流量密度	○	○	○	○	—	—
表面流速	○	○	○	○	○	○
喷水距离	○	△	×	×	—	—
表面温度	○	○	○	○	○	○
水温	△	△	△	△	○	△
液滴直径	—	—	×~△	×~△	—	—
表面性质	△	△	×	×	△	△
喷嘴配置	○	○	×	×	—	—

注：○ 支配因素；△ 次要因素；× 可忽略因素；— 不适用。

代表长度和代表速度的计算方法

表2

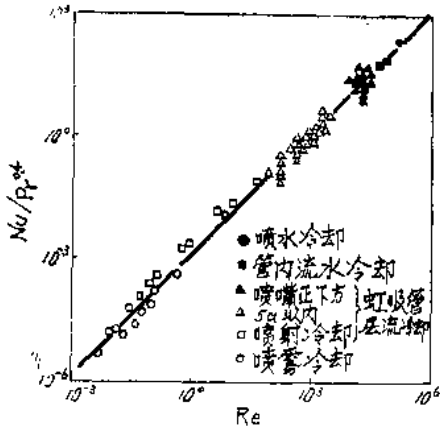
冷却方法	代表长度, δ	液滴冲击(水流)速度 v_0	代表速度 v	测定量
层流	$\delta_l = d^3/8r$	$v_0 = \sqrt{v_c^2 + 2gh}$	$v = \sqrt{\omega_0 v_0}$	v_c, h
喷射	$\delta_s = (d/4)\sqrt{\omega_0/v_c}(v_c/v_0)$	$v_0 = \frac{1}{2} \frac{\rho_f}{\rho_g} \omega_0 \left(\sqrt{1 + 8 \frac{\rho_g}{\rho_f} \frac{P \rho_g}{\rho_f \omega_0^2}} - 1 \right)$	"	P, ω_0
雾化	$\delta_m = (s/2)(\omega_0/v_0)$	"	"	"
喷水	$\delta_f = d^2/8r$	$v = \sqrt{2g(h_0 - h_1)}$	"	h_0, h_1, d
管内流水	$\delta_k = d$	$v_0 = v$	$v = v$	v

表②中d—喷水管的直径；h—喷嘴高度；r—距喷水点的距离； ρ —水密度； ω_0 —水流量密度；g—重力加速度； g_c —重力换算常数； h_0 —自由喷水柱高度； h_1 —水平面至板面间的距离； ρ_g —气体密度； v_c —喷嘴出口速度；p—冲击压力； v_0 —在冲击点的速度；s—缝隙宽度。

表③中 N_u —努塞尔特数(= $\alpha\delta/k$)； R_e —雷诺数(= $v\delta/\nu$)； P_r —普朗特数(= ν/a)； α —传热系数；K—导热率； γ —动粘性系数；a—热扩散系数。

水喷流传热系数回归式 表3

表面温度, $^{\circ}\text{C}$	回归式
50	$N_u = 19.4 \times 10^{-3} R_e^{0.8} P_r^{0.4}$
200	$N_u = 6.41 \times 10^{-3} R_e^{0.86} P_r^{0.4}$
400	$N_u = 3.40 \times 10^{-3} R_e^{0.84} P_r^{0.4}$
600	$N_u = 1.43 \times 10^{-3} R_e^{0.99} P_r^{0.4}$
800	$N_u = 0.75 \times 10^{-3} R_e^{0.99} P_r^{0.4}$



图中: Re —雷诺数= $v\delta/v$; Nu —努塞尔特数= $\alpha\delta/k$; Pr —普朗特数= v/a

图2 各种水喷流冷却方法的传热系数

4、水冷却的均匀性

多次实践表明,能否均匀冷却与工艺的成败和优劣有直接关系。尤其是钢材热处理中冷却的均匀性成为重要课题。

例如,板状热轧材进行冷却的时候,由于内外表面的冷却差产生翘曲,板面内的冷却差造成了纵向波浪而发生热变形,这不仅损坏了板形,而且也招致性能不均匀性,并且还残留着不均匀应力,在用户使用阶段往往造成事故。

(1) 内外表面冷却差和翘曲

图3示出上下表面冷却能力比和翘曲的关系。此图是上面层流和下面喷射组合起来钢板移动冷却时的实验例子。要使上下面的平均冷却能力平衡,不发生翘曲变形,下面的水量需要为上面的2~3倍,水流量密度越高,这个比值越大。

在薄带钢的情况下,即使上下面冷却能力不平衡,由于热扩散和自重约束也不发生翘曲;但当钢板厚度增加时,问题就越来越严重了,所以,上下水量比必须选择适当。

(2) 板面的不均匀冷却和控制

在上述例子中上面冷却效率高,这是由于以层流强冷終了后,在钢板上还发生滞留,流动经过广大面积的二次冷却作用,但是,这样上面流动的水也容易成为板面内冷却不均匀的原因。

另外,棒状的层流落到钢板上向宽方向流动,如以排除条件为对象,其冷却能力的分布如图4所示。如果喷嘴流量在宽方向是均等的话,则在水流量密度小的B情况下,呈二段斜率的温度分布,侧边容易冷却。在水流量密度大的A情况下,中央部位的分布得到了改善,但是,侧边存在过冷。这样冷却能力的分布,一般认为是由于落下水集积效应,向宽方向流出水

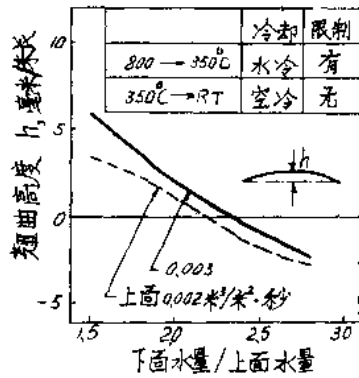


图3 上下面水量比和翘曲的关系

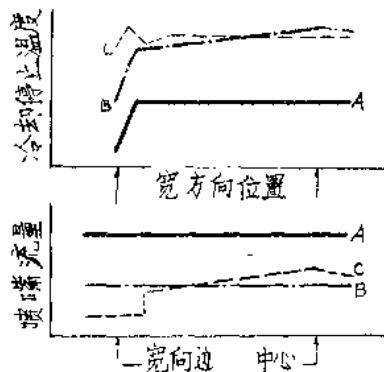


图4 板宽方向的温度分布

的流速越靠近边缘越加速，增加了二次冷却。结果冷却后要得到均匀的温度分布，需要形成图4中C那样的曲线。

3、停止冷却温度 和不均匀性

在钢材热处理冷却时，往往在某一温度停止水冷却，因此，冷却效果受到温度不均及停止温度高低的很大影响。特别是在莱顿霜点以下停止时，冷却水不淋湿钢板。冷却中的均匀性和处于怎样脱水条件的高热传递效果使温度差出现扩大的趋势。在更接近常温停止时，表面上看，停止温度波动减少了，但是，由于其中间过程的温差存在，造成了形状问题。无论如何，消除不均匀因素和采取脱水措施都是基本的。

4、由于热传递引 起的不均

材质不均匀的另一种形态，也存在热传导引起的问题。就是说，较厚的钢板在连续地强冷时，表面和内部的冷却速度的差过大，有时造成组织和机械性能分布差异。现在只好采用间歇式冷却，使表面边急冷边反复回热，以减少与内部的冷却差。

以上叙述了几个冷却不均匀的典型例子，但是，关于这些问题的报告几乎没有。为了提高均匀性，一般认为掌握流动水，滞流水的二次冷却现象和控制水流的分布是非常重要的。就冷却方式和均匀性而言，各种状态都较好，但是，雾化冷却方式和管内流水冷却方式更比较容易确保均匀性。

5、省水量、省动力

一般估算联合钢铁厂总耗水量为149米³/粗钢吨，其中大部分用于水冷却。如果把循环使用所需要的动力换算成能量消耗单位，约为 15×10^4 千卡/粗钢吨。使用水量多的以高炉、连铸、热轧为代表，在这样热轧工厂中用于中高压水除鳞、轧辊冷却的水量相当大，水冷却的成本比较高。

今后评价水冷却工艺的一个重要观点就是以省水量、省动力程度为尺子，就是说，为得到所期望的冷却性能，采用尽可能低压少水量方法是重要的。以下叙述节水的基本想法。

(1) 层流冷却最佳使用

省水量的基本途径是采用每单位水量带走热量多的冷却方向。关于这个问题，由于没有报告，所以，没有确立选择的基础。因此，用包含其他研究者的数据，并取得良好的整理结果的表2、表3的实验式，通过计算将层流冷却和喷射冷却进行了比较。

图5示出了相当于各种层流冷却的平均冷却能力（喷嘴直径的5倍以内范围）的喷射条件。喷射液滴的冲击速度为20米/秒时，喷射水量需要层流的20倍以上的水量，这实在是与常识不符的。然而，这是在非常强冷却范围内层流和喷射进行比较造成的情况。就是说，本质上讲，层流冷却比喷射冷却能力高，特别是在喷嘴直径5倍以内的层流冷却的平均冷却能力非常高，用喷射要得到这样高的冷却能力实际上是困难的。

当然，实际设备上还存在钢板上水膜和水流的互相干涉、钢板速度的影响以及层流紊乱，特别是层流冷却能力显著下降等重要因素，所以，差异并不那样大。例

如，根据田中等人得到的结论，层流冷却能力跟钢板速度成反比例关系，按喷射间距等条件，钢板速度为50~100米/分时，可降到静止状态的一半以下。然而，如在适宜条件下用层流冷却，确实可用比喷射少得多的水量得到所规定的冷却能力。

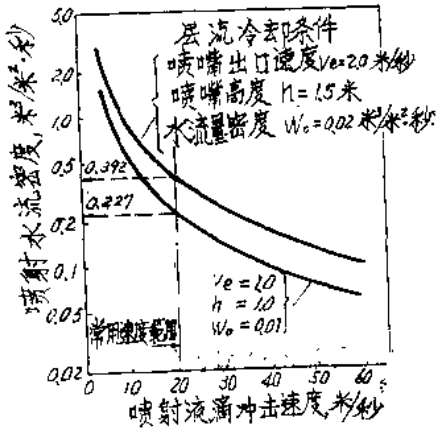


图5 为得到和层流相当的冷却能力的喷射液滴冲击速度和喷射的流量密度的关系

(2) 喷水式下面冷却

像第四节所谈到的那样，下面冷却采用喷射式要得到和层流相同的冷却能力，需要上面冷却用水量的2~3倍水量，冷却效率降低了。

现在，如图6所示，由水槽底部向上方喷射水量为 Q_n 时，水槽中的水，随之从水面喷出的水量 $Q_t > Q_n$ ，冲到钢板下部的水量为投入水量几倍。冲击水由于重力作用落入水槽，水槽的水位可通过溢出维持一定高度。在这样喷射式下面冷却情况下，也有冷却水有效的接触面积比喷射式大得多的特点。结果表明，设计每单位投入水量的带走热量能力和上面层流相当是可能的。对水量低的区域是有效的。

(3) 喷嘴配置最佳化

层流冷却喷嘴配置可考虑图7中传统

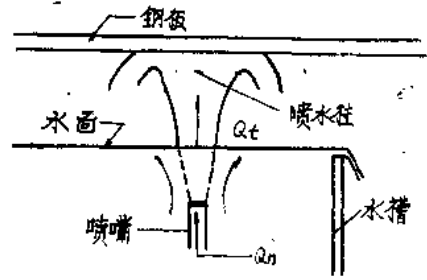


图6 喷水式下面冷却

型和交错型二个典型性例子。传统型是宽向喷嘴密，在长度方向取一定间隔，多用于热轧出口。这种方式由于跟层流正下方高热传递区重合，所以，有宽向冷却能力均匀的优点，但是，冷却效率低。

交错型在相同流量密度下，冷却速度约提高1.5倍，但是，在宽向存在冷却速度差，其相对平均值波动范围为±4~5%。只要不要求高度的冷却均匀性，交错型有省水优点。

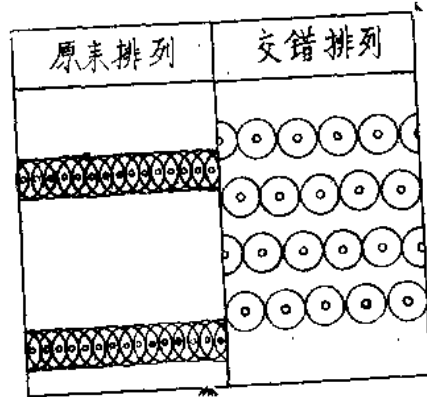


图7 层流冷却喷嘴配置

(4) 水量分配的最佳化

厚钢板依次通过流量密度高的HQ（高压淬火）区和比较低的LQ（低压淬火）区淬火的时候，通过HQ和LQ的最佳分配可降低总耗水量。

图8 示出HQ时间对板厚中心冷却速

度的影响实例。HQ时间超过某一时间时，淬火冷却速度大体上不再增加了。再增加即使延长HQ时间，继续增加总水量也是白白浪费。

在厚钢板淬火时，热通量变到最大的表面温度达到300℃，用HQ进行急冷，以后改换LQ，把表面温度缓缓降下来，这与减少总水量有密切关系。如果钢板厚度增加，用HQ时热传递速度的影响变缓慢。

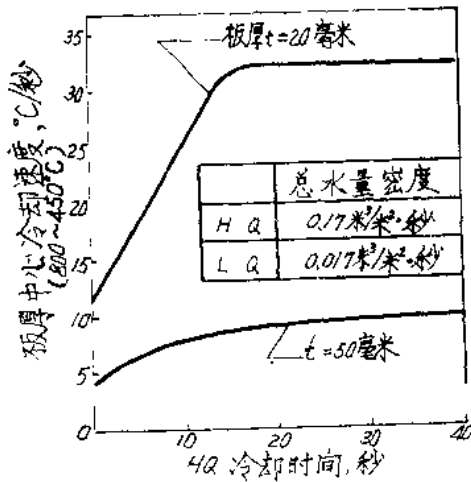


图8 淬火冷却速度和高压淬火时间的关系

6. 水冷却的控制

为了生产低成本高质量钢可普及形变热处理技术，实现钢材热处理过程和塑性加工过程的最佳化，也希望对喷水冷却进行高度的控制。

例如，当探讨通过热轧出口喷射冷却水的控制，生产低屈服比、高强度轧制状态双相钢的方法时，不仅要控制卷取温度，而且要控制包含时间因素的温度变化的全过程。为了实现高精度控制，必须以充分反映水冷却现象的冷却模型式作为基

础实行计算机控制，但历来多数模型式为概括的简便的式子，难以提高精度。

冷却喷嘴的水量控制 表4

	水量最大/最小比	下限	上限
喷射	2~3	液滴条件	压力极限
层流	4~7	开-闭性	Re极限
雾化	∞	只有气体	压力极限

7. 在钢铁工业中的应用

从前面叙述的冷却能力、均匀性、省水量控制精度等观点出发，选择几个比较有优点的水冷却设备，介绍其基本想法和特性。

(1) 厚板轧制后的快速冷却

轧制后在特定的温度区以5~15℃/秒加速冷却(OLAC)时，不但不降低韧性，而且强度会提高，特别是当和CR效果结合时，能够很经济地生产韧性、强度、焊接性能良好的厚钢板。

为了减轻轧制翘曲，要求喷嘴比轧制线约高1.5米，这样的距离在某些状态下更能维持强冷却能力，层流冷却最适宜。采用上面虹吸管层流和下面板状喷射。

在OLAC时要特别注意防止冷却变形和材质的均匀性。要掌握厚板上流动的行为，控制板宽方向的投入流量的分布(图4中C曲线)；除通过控制板长度方向的前后端浇水时间和中央稳定部位不同的冷却时间的差，力图使板面内均匀冷却外，还实现了上下面水量的比最佳化(参照图3)，以省水量观点来看，取图7那样的交错型喷嘴配置为好。

(2) 大直径焊接钢管的淬火

大直径钢管淬火时，要求强冷却能力和均匀性。尤其是大直径钢管由于矫直因

难，所以，能维持良好形状，均匀冷却性能最重要。

图9示出了管外表面冷却方法。这种方法尽可能使冲击钢管的水不飞溅，沿着管外表面流动，喷射以一定倾角和与管面成直角喷出，使反向旋流在中央处冲击，控制从狭窄的干涉带排出的水流。内表面，为减少造成不均匀的滞留水，采用雾化方式冷却，并加以旋转。

考虑强冷却的需要，认为外表面采用层流冷却（低速喷射）和内表面而采用雾化冷却方式最合适。

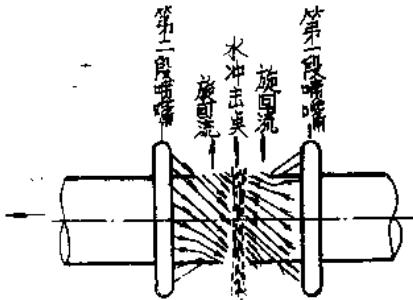


图9 钢管淬火外表面冷却

(3) 带钢连续退火中的水淬火

采用连续退火生产软钢板或者高强度钢板时，水淬火是重要技术。然而，存在蒸气膜从边部开始消失，在中央部位呈斑点残存的状况，由于板面内部的温度差引起带钢形状变坏。为了得到足够的平坦度，强制除去蒸气膜，希望钢板呈现接近一样浇水状态。

采用像图10那样窄缝喷嘴喷射，其冲击流压为15厘米Aq时可消除蒸气膜效应，得到良好的板形。反之，带钢浸进近90℃温水中淬火，钢板表面全被蒸气膜均匀覆盖，所以，也有在蒸气膜存在温度区停止淬火的思想。

(4) 厚钢板直接淬火

应该指出，利用轧后余热进行在线直

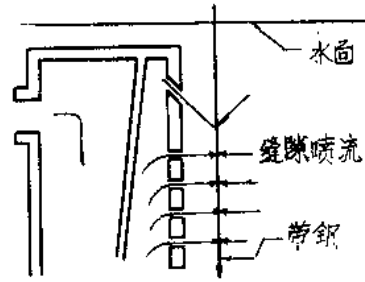


图10 带钢水淬火

接淬火是节能的有效措施，所以，希望研制高效率且均匀性优良的冷却设备。图11所示的厚板淬火设备，是适合于这种需要的独特的冷却方法之一。注入水喷射是以高速沿长度方向流过钢板表面排水方式，正像管内流水冷却，由于每单位体积水和高温面接触机会多，所以，投入水量带走热量能力较大（在板面和框架的缝隙不太大的范围）。另外，由于水沿板长方向流，在板宽方向形成温度分布因素少，因此，还有不容易发生冷却变形，并且用低压水，也比较经济等优点。

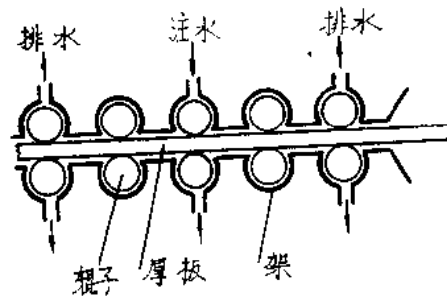


图11 厚钢板淬火装置

(5) 采用雾化冷却的连铸二次冷却

连铸坯热装炉和直接轧制是节能不可缺少的技术，防止铸坯表层裂纹是重要的。在模内发生的表层裂纹的核或不均匀壳在二次冷却带扩大，要想不破坏，需要缓和壳的热应力，从这种观点出发，研制

采用喷雾冷却的二次冷却法受到注意。

喷雾流冲击夹送辊间隔全长，使长度方向的热传递的分布均匀化。为了得到同样冷却能力而用水量比历来的喷射冷却水量都少，减少夹送辊滞留水，使在轧辊正下方的急冷缓和，即减小表面温度在轧辊间的变动幅度，这对缓和诱发裂纹的表面应力是极有效的。另外，用单喷嘴冷却有效幅度大，减少喷嘴数和防止喷嘴堵塞等对维修是有利的。

8、今后的课题

就冷却能力而言，以实验室数据为主大致也可以明确，但是，要是决定最佳设备规格，操作条件等显然是不够的，不明确点也很突出。在实际生产设备上冷却中的流动状态，和实验室条件下的流动状态是相当不同的，仅根据原来的资料作出判断不能说是正确的。何况现状是均匀性、控制程度、保养维修程度等重要特性基本没有讨论，没有公开发表，所以，水冷却的技术水平总体看来是不高的。今后无论

是提高旧有工艺水平，还是研制新的工艺，作为重要技术都需要充实。为适应这些情况，列举以下项目视为课题。

①喷嘴配置引起喷流间互相干涉的影响；②被冷却件移动速度的影响；③滞留水和流动水的二次冷却效果；④水温的影响；⑤局部冷却能力和总体（平均）冷却能力的关系；⑥超高温区域（1000℃以上）和低温区域（50~200℃）的数据的充实；⑦喷射角度的影响；⑧温度分布和热变形、热应力的关系；⑨具有高度均匀性或省动力型和强冷却能力的冷却新技术（包含有效利用缝隙喷嘴层流冷却等）；⑩确定各种冷却方法的选择基准等很多未解决项目。这些项目中大部分存在相互影响，另外，只在实验室里研究难以评价。今后的研究必须在实际作业线上进行高精度的测定，工厂和研究部门的紧密配合是更重要的。

张耀兴译自《铁と钢》1981，No 14
2117—2124

张朝生 校

喷水冷却原理解析及在 钢材冷却中的应用

1、序言

近年来,虽有许多关于喷水冷却热传导的报告,但是,不论哪一个报告都只限于各种冷却方法,似乎还没有从喷水冷却方法上做出统一的叙述。

如果从水流在冷却面上非常紊乱的情况和具有很陡速度梯度,或者在沸腾区域蒸气膜破坏等情况来考虑冷却能力增大的话,则可认为喷水冷却能力是水动量的函数。因此,本文中把层流、喷水、喷射、雾化和管内水流统称为水喷流,并试图用有关水动量的无因次量统一整理这些方法的冷却能力,得到了很好的结果。

这里讨论这种整理结果和以此结果为基础的冷却设备。

2、各种冷却方法的定义

各种冷却方法的名称因使用人不同而做出形形色色的定义,所以也存在极其含糊不清的名称,实际上,如层流和喷射非常难以区别。

下面原则上取平田技术讲座的定义。

1) 层流冷却

把水加压从喷嘴喷出,在形成水喷流时,喷流出口的流速比较低时,形成平滑的层流。这种喷流落到某段距离时,由于产生轴向对称震动招致破断,变成液滴

流,用这种层流喷水进行冷却的方法叫作层流冷却。

2) 喷水冷却

采用水中喷嘴,从喷嘴喷出的水即向上方给予动量,又和它带出的大量水从两方面进行冷却,把这种方法叫作喷水冷却。

3) 喷射冷却

把水加压从喷嘴喷出时,用大于连续喷流的流速,液流破断形成液滴群冲击固体面。把这种液滴群进行冷却的方法叫作喷射冷却。

4) 雾化冷却

为把水雾化用加压的空气加压,水与高速气流同时从喷嘴喷射进行的冷却方法叫作雾化冷却。

5) 管内流水冷却

把水流在管内流动的冷却方法叫作管内流水冷却。

3、试验方法和测定方法

3.1 试验方法

为求出各种冷却方法的热传导系数进行了非恒定冷却试验。在管内流水冷却时,把管加热到给定温度后进行冷却,通过在壁厚方向的两点镶嵌的1.6毫米 ϕ 的CA套管热电偶测量温度变化过程,其他的冷却全部采用如图1所示的试验装置和冷却试样,冷却试样的尺寸为40厚 \times 60宽

×130毫米长，在板宽和板长方向间隔20毫米切20毫米宽的长条形切口，使之在板厚方向成为一元热传导。

把试样放在电炉中加热到给定温度后进行冷却，用在板厚方向的两点镶嵌的

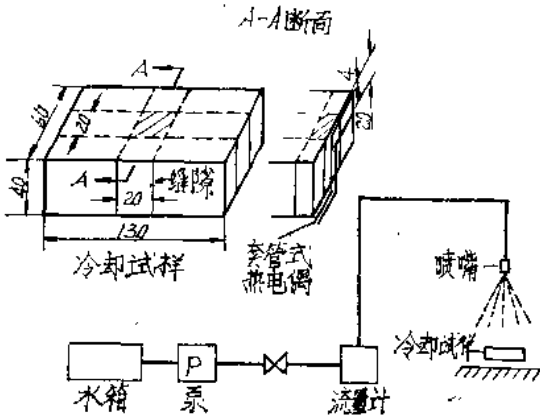


图1 实验装置和冷却试样

1.6毫米φCA套管热电偶测量温度的变化过程。

3.2物理量测定

3.2.1 体积流量密度

用图2所示的装置测定了喷射和雾化的局部流量密度。使水从所定的高度喷出来，在所定时间内通过10毫米中的方口，可通过测量烧杯内积存的量求出局部的体积流量密度。

3.2.2 冲击压力

为了计算液滴的冲击压力，用图3所示的装置测定了局部冲击压力，通过把受压面所受的压力转换成电量记录下来，传感器（检测器）就成为差动变换器。

3.2.3 实验条件

本实验范围如表1所示。

实 验 条 件

表 1

冷却方法	流量密度 $10^{-3} \text{米}^3/\text{米}^2 \cdot \text{秒}$	流 速 米/秒	喷嘴直径 10^{-3}米	喷射距离 米
喷水冷却	2000~8000	2~8	0.2~16.00	0.25~1.5
喷射冷却	2400	2.4	7.5	0.135
雾化冷却	1~200	6~40	3~10	0.2~0.6
层流冷却	0.5~1.6	30~200	0.5~1.0 (径)	0.06~0.2
管内流水冷却	1000~1600	1~1.6	16	—

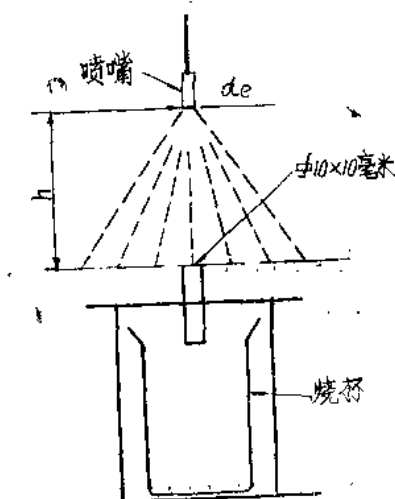


图2 流量密度测定装置

雾化喷嘴使用长条切口形的，喷射喷嘴用锥体形和平扁形2种。

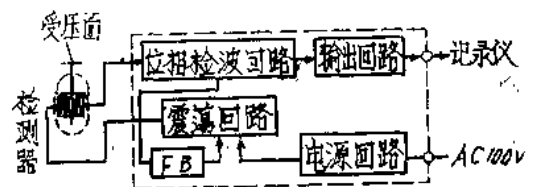


图3 冲击压力测定

4、传热系数计算方法

根据板厚方向两点的温度变化过程，用逆算法及非稳定实验结果求出沸腾区域

的传热系数。使用的基本公式是一元热传导偏微分方程式 (1)。

$$C \rho \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) \dots \dots \dots (1)$$

因此，为了减少由于温度引起的物理性能值变化所造成的计算误差，用 (2) 式定义的变换温度和焓，把 (1) 式变成 (3) 式。

$$\phi = \int_{\theta_0}^{\theta} \frac{K}{K_d} d\theta,$$

$$H = \int_{\theta_0}^{\theta} C d\theta \dots \dots \dots (2)$$

$$\rho \frac{\partial H}{\partial t} = K_d \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \dots \dots \dots (4)$$

- 式中 θ —— 温度，℃；
 θ_0 —— 基准温度，℃；
 X —— 板厚方向座标，米；
 t —— 时间，小时；
 C —— 比热，千卡/千克·度；
 K —— 导热系数，千卡/米·时·度；
 K_d —— 在 θ_d 导热系数，
 千卡/米·时·度；
 ρ —— 密度，千克/米³；
 ϕ —— 变换温度，℃；
 H —— 焓，千卡/千克。

把 (3) 式用泰勒级数展开，整理成前向差分式，可得到 (4)、(5) 式。

[内部点]

$$H_{t_0+\Delta t, i} = H_{t_0, i} + \frac{2 K_d \Delta t A}{\rho \Delta X_i \Delta X_{i-1} (\Delta X_i + \Delta X_{i-1})} \dots \dots \dots (4)$$

式中 $A = \left\{ \Delta X_i \phi_{t_0, i+1} + \Delta X_{i-1} \phi_{t_0, i-1} - (\Delta X_i + \Delta X_{i-1}) \phi_{t_0, i} \right\}$

[表面点]

$$H_{t_0+\Delta t, 1} = H_{t_0, 1} + \frac{2 K_d \Delta t}{\rho (\Delta X_1)^2}$$

$$\left(\phi_{t_0, 2} + \frac{Q_{t_0, 1} \Delta X_1}{K_d} - \phi_{t_0, 1} \right) \dots \dots \dots (5)$$

现在设 $t=t_0$ 时，板内温度分布为已知数。此时，假定表面热通量 $Q_{t_0, 1}$ ，那么用上式就可以计算出 $t=t_0+\Delta t, t_0+2\Delta t, \dots, t_0+i\Delta t$ 的热过程，把这种计算结果和实测温度值进行比较，使 $Q_{t_0, 1}$ 发生变化，直到进入所定的收敛范围。这样，如求出 $Q_{t_0, 1}$ 可从 $Q_{t_0, 1}$ 计算出 $\alpha_{t_0, 1}$ 再把 $H_{t_0, 1}, Q_{t_0, 1}$ 和 $\alpha_{t_0, 1}$ 记忆下来。

其次，设 $t=t_0+\Delta t$ ，按与上面完全相同的顺序求 $H_{t_0+\Delta t, 1}, Q_{t_0+\Delta t, 1}, \alpha_{t_0+\Delta t, 1}$ 的关系。通过反复进行这种计算，求出相对各表面温度的传热系数的瞬时值。

5、实验结果的整理方法

一般说来，传热系数被无因次化，被整理成 $Nu=f(Re, Pr)$ 的形式。严密地说，还必须考虑在沸腾区域关于产生气泡的无因次数 (如，雅各布数) 和压力修正项，而此处考虑到统一整理全部冷却方法和使用上的简便，忽略了这两点。

式中 $Nu = \alpha \delta / K = (\text{传热系数} \times \text{代表长度}) / (\text{导热系数})$

$Re = v \delta / \nu = (\text{代表速度} \times \text{代表长度}) / (\text{动粘性系数})$

$Pr = \nu / a = (\text{动粘性系数}) / (\text{热扩散系数})$

式中这些物理量按下面方法计算。

5.1 代表值的选定

5.1.1 代表速度

代表速度由 (6) 式算出。即

$$V = \sqrt{W \cdot V_0} = \sqrt{\text{达到的体积流量密度} \times \text{液滴冲击速度}} \dots \dots \dots (6)$$

此代表速度是把非连续流体具有的动

量换算成连续流体动量。即相当于把每单位时间×单位面积的流量集聚起来视为连续流体时流速。由于连续流体时 $W_0=V_0$ 。所以， $\sqrt{W_0 V_0}=V_0$ 。

体积流量密度 W_0 和冲击速度 V_0 由下面表示的方法求出。

(1) 体积流量密度

①喷射和雾化的体积流量密度使用实测值。

②在层流和喷水冷却的滞留点的体积流量密度与冲击速度相等 ($W_0=V_0$)。

另外，由于对滞留点的周围方向质量流量是一定的，因此设体积流量密度与距滞留点圆周方向的距离成反比，则

$$\pi d W_0 = \text{定值} = 2 \pi r W_r$$

$$\text{所以, } W_r = v_r / (2 r / d)$$

$$\dots\dots\dots (7)$$

式中 W_r - 层流，在距滞留点 r 位置的体积流量密度，米³/米²·秒；

r ——距冲击点的圆周方向距离，米；

d ——层流和喷水的冲击点直径，米。

(2) 冲击速度

①设液滴和空气的滑移比为1，液滴和空气的密度比为 $\rho_2/\rho_1 \ll 1$ ，根据冲击点的体积流量密度 W_0 和冲击压力 P 的测定值，用(8)式可算出喷射和雾化的液滴冲击速度。

$$V_0 = \frac{\rho_1}{2 \rho_2} W_0 \left(\sqrt{1 + 8 \frac{\rho_2}{\rho_1} \frac{P}{\rho_1 W_0^2}} - 1 \right)$$

$$\dots\dots\dots (8)$$

②当喷嘴出口流速是 V_0 时，考虑到重力受喷嘴高度的影响，由(9)式求出层流的滞留点的冲击速度。

$$V_0 = \sqrt{V_0^2 + 2 g h} \dots\dots\dots (9)$$

滞留点以外的冲击速度，当喷嘴出口直径为 d_e 时，假定在 $5 d_e$ 以内维持冲击速度 V_0 。

③喷水的冲击速度，根据没有冷却试样时的自由喷出高度 h_0 和有冷却试样的高度 h 由(10)式可求出。

$$V_0 = \sqrt{2 g (h_0 - h)} \dots\dots\dots (10)$$

5.1.2代表长度

应该用原来温度界面层厚度作为代表长度，但是，实际上求温度界面层厚度是不可能的，所以，此处用与之相应的液膜厚度。

(1) 喷射和雾化(非连续体)的情况

从流体到达被冷却体的流量和液滴速度来看，设连续流体以此速度冲击被冷却体，可用下面所示的公式算出液膜厚度。

①喷射(圆形喷嘴)的情况

$$(\pi/4) d_c^2 V_0 = (\pi/4) L^2 W_0$$

$$\dots\dots\dots (11)$$

又因 $(\pi/4) d_c^2 V_0 = \pi L \delta_0 V_0$

$$\text{所以, } \delta_0 = (d_c/4) \sqrt{W_0/V_0} (V_0/V_0)$$

式中 L ——喷射冷却直径，米；

δ_0 ——喷射的水膜厚度，米。

②雾化(缝隙喷嘴)的情况

$$S L W_0 = 2 L V_0 \delta_m$$

$$\delta_m = S (W_0/V_0) / 2 \dots\dots\dots (13)$$

式中 L ——雾化喷嘴缝隙长度，米；

S ——雾化喷嘴缝隙宽度，米；

δ_m ——雾化的水膜厚度，米。

(2) 层流和喷水(连续喷射)的情况

当冲击点邻近区域的流速在 $5 d_e$ 以内是一定时，由于质量流量一定，因此，从下式可求出液膜厚度。

$$(\pi/4) d_c^2 W_0 = 2 \pi r \delta_L V_0$$

$$\delta_L = d^2 / 8 r$$

式中 δ_L ——层流的水膜厚度，米。

6、实验结果及分析

图4表示按照上述整理法，把各种喷水冷却法的传热系数进行无因次化整理出