

Accelerated 鋼的加速冷却 Cooling of Steel

[美] P. D. Southwick 主编

鞍钢钢铁研究所 译

Edited by P. D. Southwick

鞍钢钢铁研究所



钢的加速冷却

美国矿冶石油工程师协会 (AIME) 下属
冶金学会钢铁委员会举办的专题讨论会论文集
1985年8月19日至21日宾夕法尼亚州匹兹堡

主编：美国印第安纳州东芝加哥城内陆
钢铁公司研究所 P.D. Southwick

冶金学会出版

序 言

钢铁委员会于1985年8月19日到21日在美国宾州匹兹堡市的站前雪拉顿饭店 (Sheraton Station Square Hotel) 举办了第一届有关钢的加速冷却的国际专题讨论会。

这次会议的论文涉及各种热轧钢材, 从板材到结构型钢, 即包括理论研讨又包括设备制造。讨论会激烈辩论的结果导出了一个古老的原则——水是钢中最廉价和最有效的合金化元素。开头两篇特邀报告叙述了加速冷却工艺的起源和当前的技术状况。接着, 在理论部分描述了加速冷却技术所依据的物理冶金学原理和对生产实践的转化过程。

板材部分阐述了两个原理: 微合金钢经控制冷却后其机械性能比采用常规工艺要好得多; 与控制轧制相结合, 可以获得比采用其他工艺所无法达到的综合机械性能。带材部分说明, 控制冷却可以获得新的性能并能较好地掌握其性能匹配。在最后的棒材部分显示出这种技术可以很自然地推广到型钢生产上去。

包括 J.M. Gray 博士(微合金化公司)、T. 田中博士(川崎钢铁公司)、小指军夫博士(日本钢管公司)和 H. McHenry 博士(美国国家标准局)在内的一些专家们讨论了加速冷却技术的前景。A.J. DeArdo 教授(匹兹堡大学)主持了这次讨论会。专家们强调: 加速冷却技术为钢材生产厂家提供了良机。

讨论会有几个主题。首先, 设备技术的发展已使实验室过程在生产中精确地再现。其次, 采用这种工艺, 可能对性能和断面形状进行高水平的控制。第三, 在不降低机械性能的情况下, 可采用较少含量

的合金化元素，在某些场合，甚至可以省去热处理工艺。最后，可以获得更高水平的机械性能。这次会议的结果启发人们：下次会议的名称应改为“钢的控制冷却”。

在此，对A.T. Davenport博士为筹划组织本次会议所作的努力、对匹茨堡大学A.J. DeArdo教授的现场指导、对冶金企业公司B. Jones博士和美国矿冶石油工程师协会下属冶金学会所作的广泛宣传和地方分会所做的工作表示诚挚感谢。

由于联合碳化物公司下属的联合矿业公司(M. Korchynsky先生)、微合金化公司(J.M. Gray博士)和铌制品公司(H. Stuart博士与B. Jones博士)给予的经济支援，从而确保了愉快的余兴节目，使这次学术会议圆满完成。最后，我愿借此机会向耐心帮助组织这次讨论会的内陆钢铁公司的V. Matuga女士表示谢意。

P.D. Southwick (索斯威克)

印第安纳州、东芝加哥内陆钢铁公司

1986年3月

曹荫之 译

编 译 说 明

1985年8月19日至21日在美国匹兹堡举行了首届关于钢材加速冷却的国际会议。

这次会议的主要议题包括加速冷却工艺在生产中的具体应用，以及如何应用加速冷却工艺（某些场合可省去热处理）生产出含合金元素较少、机械性能和外观尺寸符合要求的产品等等。

由美国矿冶石油工程师协会下属冶金学会编辑出版的这本《钢材的加速冷却》论文集共搜编了37篇论文，从综述、理论到实践，内容丰富而实用，是一本很有价值的资料。

参加这次会议的各国专家中有美国微合金化公司的 J.M. Gray 博士、川崎钢铁公司的田中博士、日本钢管公司的小指博士和美国国家标准局的 H.Mc Henry 博士等。我所的郭惠久副所长也参加了这次会议并宣读了论文。

承蒙美国巴西铌制品公司的 H. Stuart 博士1986年9月来鞍山时特地给我们先带来这本论文集，考虑到它对我国的加速（控制）冷却工作会有所帮助，因此组织编译这本论文集奉献给同行们。

本论文集由郭惠久、曹荫之、姚卫薰、刘元忻同志负责审订工作，刘元忻同志主编，赵待名和朱兰香编辑。

鞍钢钢铁研究所

1987年9月

目 录

• 重要文章 •

控制冷却技术的开发.....	(1)
板钢加速冷却综述.....	(9)

• 理 论 •

宽带钢热轧机输出辊道各种冷却系统冷却能力和计算机 辅助控制带钢冷却的研究.....	(21)
线材控制冷却工艺的新方法 (DLP)	(36)
用于钢板加速冷却的水刀喷射冷却系统.....	(47)
加速冷却钢的显微组织与强化因素.....	(54)
形变热处理和加速冷却对微合金钢铁素体晶粒细化的影响...	(64)

• 板 钢 •

中厚板加速冷却的最佳冷却条件.....	(79)
动态加速冷却工艺的开发.....	(86)
在线加速冷却生产的含镍低温钢板的开发.....	(97)
高强度大直径管材钢板的加速冷却.....	(110)
应用于克拉贝克钢板轧机的多功能间断式冷却工艺.....	(120)
钢板在线加速冷却技术的发展.....	(131)
热轧结构钢板的加速冷却.....	(136)
ADCO 工艺钢板加速冷却的一种新技术.....	(151)
加速冷却对形变和再结晶奥氏体中生成的相变产物的影响...	(159)

St-52 (16Mn) 中厚板轧后控制冷却工艺制度的研究.....	(166)
微合金钢板加速冷却的实验室研究.....	(173)
多功能加速冷却系统的开发.....	(189)
加速冷却的基本概念及应用.....	(199)
钢板加速冷却试验.....	(214)
适于加速冷却工艺的一种新的低碳 铌 钢.....	(225)
加速冷却对控制轧制的调节作用.....	(235)
在线加速冷却钢板的 KCL 工艺的开发.....	(245)
采用加速冷却工艺生产的高强度钢板的最佳显微组织 和强化因素.....	(258)
控轧后加速冷却大口径管线钢生产的特性.....	(269)
用控冷循环顶端淬火试验研究低合金高强度钢的成分.....	(282)
冷速对形变奥氏体相变行为的影响.....	(299)

· 带 材 ·

用于热轧带钢性能控制的在线相变检测器.....	(307)
通过控制冷却生产汽车用热轧高强薄钢板.....	(315)
钢的加速冷却和转变.....	(327)
控制冷却对热轧多相薄钢板的机械性能影响.....	(339)

· 棒材和结构钢 ·

用水冷却控制棒材和线材的温度.....	(352)
采用“心热回火”加速冷却工艺生产的高强度钢筋钢的 机械性能.....	(362)
形变热处理轧制对大型钢梁性能的改善.....	(375)
用于紧固件的热水冷却高强线材的发展.....	(384)
棒材的控制轧制.....	(394)

重 要 文 章

控制冷却技术的开发

(历史的回顾)

Michael Korchynsky

(美国联合碳化物公司下属联合矿业公司)

摘 要

60年代初,英国斯温顿研究所的科研人员找到了铁素体—珠光体钢中显微组织与性能之间的定量关系。用表述各种强化机制作用的佩奇(Petch)关系延伸式突出了晶粒细化的重要性:在大幅度降碳(或降低珠光体含量)的钢中,细小的铁素体晶粒加上沉淀析出的质点提高了屈服强度。这种“降低珠光体含量”的钢改善了焊接性能和韧性。

钢的成分和热轧工艺对于获致所需的显微组织都很重要。在开发“控制轧制”工艺时,人们致力于降低终轧温度。当在热轧带钢车间搞控制冷却时,从加热炉到精轧最后机架的前段工艺保持不变。唯一的改变只是在输出辊道上加速冷却钢带以保证卷取温度在 600°C (1100°F)左右。这些局限的目标促使操作人员很快地接受控冷这个概念,即:轧制工艺保持不变,而用低的卷取温度来消除板卷头部、中部与尾部的强度差。

钢的连续冷却转变(CCT)曲线为选择合适的冷却速度和卷取温度提供了第一手参数。早期用铌或钒微合金化钢在实验室进行的试验确认了热变形后立即加速冷却对细化晶粒的重要意义。在靠近C曲线鼻子附近保温,对铁素体中析出强化相最为有效。太高的卷取温度造成过时效,而太低的卷取温度则降低沉淀强化效应。

克利夫兰市琼斯·劳林钢铁公司80英寸(2032毫米)热轧带钢车间的投产,使得实验室试验结果有机会变成工艺现实。为了从炽热的带钢上吸走足够的热量,“层流”冷却系统首先被英国布林斯沃思市的热轧窄带钢车间采用和推广。中间试验工厂的实验结果表明:这种冷却系统能够获致所需的热传导系数。首先打算凭借更有效的冷却系统以达到缩短输出辊道长度的目的,因而可以降低车间基建费用。实验室所能提供的数字为层流冷却系统必须主要用来达到冶金学上的效益提供了强有力的论据。

应用新的热轧带钢设备开发新产品是朝着两个方向努力的:第一,改善现有产品并提高其韧性和可焊性。这方面的例子有屈服点 346 MPa (50 ksi)的含铌钢JLX50—CC。其次,

开发具有调质（淬火加回火）级强度的新产品。其最终产品是用铝脱氧的钒—氮钢，商用称呼为 VAN—80，屈服强度为554MPa（80ksi）。

为了以优异的弯折性能扩大 VAN—80 的应用，人们用加入稀土金属的方法控制硫化物形态。当与较强的调质钢对比时，人们发现经析出强化的低合金高强度钢疲劳性能优于那些具有回火马氏体组织的钢。

对厚度达25.4毫米的中板实行控制冷却是在匹兹堡市一座宽90英寸（2286毫米）带钢轧机上试验的。15年后，中板控制冷却的概念才首先被日本钢管公司实现，然后是日本、欧州和美国的钢厂。

今天，中板加速（阶段）冷却是在中板常规（低温）控轧后进行。随着人们对再结晶控制轧制工艺的兴趣日渐增长，加速冷却与再结晶控制轧制相结合的工艺可能是一种吸引人的途径。

1. 加速冷却的20年

在热轧车间输出辊道上加速（控制）冷却带钢，已经在工业上应用了20年左右。

“控制冷却的主要益处之一是晶粒细化。细晶粒导致钢的强度、缺口冲击韧性和抗脆性断裂的能力增加。采用细化晶粒作为基本强化机制，允许人们在保持相同强度水平的情况下适当降低钢中含碳量。而较低的碳含量改善了成型性能、缺口韧性与可焊性。对扁平钢材实行控制冷却保证获得匹配适宜的综合机械性能，并缩小热轧低合金高强度钢和那些需要热处理的钢之间的性能差距”

上述预测结论来源于5年实验室试验结果和在一座近代化80英寸（2032毫米）热轧带钢车间的工业实践。今天，正如这次国际学术会议所证实的那样，加速冷却是一种可行的工艺。这本论文集里面的文章有的概括了近20年取得的进步，有的阐述了未来的发展方向。

本文的目的是回顾一下早期的控制冷却并对过去的发展关键提供全景俯视。注意力主要集中于一家钢铁厂——琼斯·劳林钢公司（J&L）的活动，因为它曾在探索这门热轧工艺方面作出贡献。在短期内，不少合金成分设计和加工工艺上的发明创造很快地从科研成果转化为工艺现实，并将一系列为适应特殊用户要求而设计的新低合金高强度钢种投入生产。通过研究工作者、冶炼和轧钢操作者、工程技术人员、销售人员和更重要的人物——未来的用户们之间的紧密协

1965年发表并获得美国钢铁学会（AISI）奖励的文章⁽¹⁾对这种热处理工艺的优点作了如下总结：

作，新技术的快速转化与新产品的推广才能得到实现。

2. 高强度低合金钢的起点

60年代初，美国的主要钢铁生产厂只能供应屈服点为280—490MPa（40—70ksi）的热轧低合金高强度钢系列。大部分是加入少量铌、钒、钛的含碳0.15—0.25%的碳素钢，其韧性和抗弯折能力受到强烈方向性的限制。由于490MPa（70ksi）被公认为铁素体——珠光体级钢的强度极限，在很多工程上，只有采用350MPa（50ksi）强度级别才能得到满意的性能匹配。因而在热轧低合金高强度钢（与碳钢的价格相比）和经过热处理的钢（与合金钢的价格相比）之间，在强度和价格上存在着很大的差距。

在加工低合金高强度钢时，从板坯到

板、带材的热轧工序被公认是经济而精确地改变其几何形状的手段。在热轧的冶金含义范围内，人们充分考虑了低的终轧温度的益处，从而触发了钢板低温控制轧制工艺的进展。然而，一般说来，由于温度测量技术的早期水平所限制，热轧工艺只能由工程师们而不是冶金学家来研究。

在合金成分设计方面，人们过去相信：低的碳锰比值能够改善韧性，这就导致开发低珠光体含量钢的先驱。造船钢板灾难性断裂的经验*突出了晶粒细化的重要性，从而促成了铝脱氧镇静钢的常化技术的应用。

3. 组成——性能关系

最初对铁素体——珠光体低合金高强度钢进行合理的成分设计，是采用英钢联斯温顿研究所几位科学家（格拉德曼、欧文、匹克灵）所创造的方法^[2]。从与晶粒尺寸有关的屈服强度表达式佩奇公式着手，他们将其中的摩擦应力项扩展到包括其它两个强化机制的作用：即固溶和珠光体体积分量的效应。通过定量金相和复合回归分析，现在已经能够对由固溶、珠光体和晶粒尺寸所造成的强度增值进行定量测定。第四个主要强化机制是沉淀硬化，可由屈服强度的实测值和计算值的差值来估算。

通过评价各种强化机制对性能的影响，引伸出一个新的合金设计概念：最佳的性能匹配来源于晶粒的极大细化，以及与三相配合的经过慎重选择的沉淀强化量。这种新的合金设计概念减少了单纯靠碳和固溶来强化（亦即靠高的碳当量来强化）的低合金高强度钢的很多缺点。将铁素体晶粒尺寸由ASTM 11级降到13级，可使低合金高强度钢的碳含量减半甚至更低。

定量地估评各种强化机制使人们受到很

大的启发，它为随后的冶金发展方向提供了确切的指南：这就是开发实用的手段以求在热轧过程中实现最大程度的晶粒细化。

4. “控制冷却”的早期研究

连续冷却转变曲线表明，由奥氏体区加速冷却时，由于降低了转变温度和产生过冷奥氏体，而后导致了铁素体晶粒细化。由于这个缘故，1961年琼斯·劳林公司的最初研究计划^[3]中考虑了“在从终轧温度开始的冷却中，时间——温度循环具有重要的影响”。这个研究的最终目的是：“在车间实际生产条件下设计出一个最佳冷却工艺。”

最初几个试验是在实验室轧机上进行的，接着是等温淬火，结果表明：变形方式以及终轧到冷却开始时的时间间隔（传搁时间）对晶粒细化有重要影响。虽然微合金化元素对奥氏体再结晶动力学的影响效果还没有被完全认识，但人们注意到，延迟（传搁）时间对普通碳钢比对微合金化钢更为重要。

进一步的实验室试验精确地模拟了带钢热轧工艺，包括（1）板坯加热，（2）多道次轧到一个特定的终轧温度，（3）以给定的速率（℃/s）加速（控制）冷却到一个预定的卷取温度之后，（4）在板卷中缓慢冷却。轧制时和冷却时产生的显微组织可用快速淬火试样进行观察。

从这些小规模试验所获得的性能是鼓舞人心的。譬如，铌钢可使传统的碳含量减半甚至更多，既不损失强度，同时还可较大地改善韧性。这些实验室数据为琼斯·劳林公司建在克利夫兰工厂的一座现代化80英寸（2032毫米）热轧带钢车间的设计工作和安装一个新型输出辊道冷却系统起了促进作用。

*译者注：指40年代美制6000吨级“自由轮在冰海中大批折断的惨重事故

5. 层流冷却系统

层流冷却的概念是由英国钢铁研究协会(BISRA)在1957年开发的^[4]。与常规射流冷却相比,层流冷却可改善热传导系数。人们发现,利用水喷嘴可获得热带钢的快速冷却。当水流呈层流形式而不是紊流时,这样的喷嘴是最稳定和有效的。由于在带钢和冷却系统之间必须有几英尺的距离,所以在钢制水箱内安装虹吸管。另外,水压头保持在较低位置以便在层流范围内保持一定的流速。

第一个层流冷却系统应用在英国布里斯沃思 17 英寸(432毫米)窄带钢热轧机上^[5]。由于输出辊道较短,使用射流难以获得 600℃ 的低卷取温度,采用层流冷却系统能够很容易地达到这个温度从而防止低碳深冲钢发生表面晶粒长大。

6. 热轧宽带钢车间的层流冷却系统

装备有层流冷却系统的第一座 80 英寸(2032毫米)热轧带钢车间于1964年12月份在琼斯·劳林的克利夫兰钢厂投入使用^[1]。

最初采用层流喷嘴代替传统射流的目的,是想要缩短输出辊道长度,并降低基建投资。另外的动机是想利用产品研究成果获得长远效益。这些研究结果显示出生产新一代改进型或者新型低合金高强度钢(尽管当时还没有得到证实)的可能性。

最终的设计是一种折衷方案,以满足各部门不同愿望和要求。输出辊道保留了原始长度,但装备了层流冷却系统。

除了带钢冷却采用了新方法之外,热带钢轧机的其它操作部分均未改变。这种现实促使人们接受改革传统加工工艺的概念^[6]。

7. 控制冷却的低合金高强度钢

控制冷却最初应用在已有的老钢号上,目的是改善性能。在轧制具有 346MPa (50ksi)屈服强度的Cu—Ni—Ti钢时,很难沿板卷长度方向保持均匀的性能。这是由于卷取温度高,自身退火导致了板卷中心的低强度值。含合金元素较多的钢板卷外层则具有不能容许的高强度和低延伸性能。控制冷却能将卷取温度降低到 600℃,使自退火程度减至最小,从而得到满意的均匀性能。

第一个靠控制冷却得到显著改善的低合金高强度钢是屈服点为 346MPa (50ksi)的铌钢 J1X—50^[7]。通过控冷将卷取温度降到 600℃,由于晶粒显著细化至 ASTM 10/11级,使含碳 0.05—0.1% 的钢获得了早先需含 0.15—0.20% 碳钢所具有的同样强度。同样,也将冲击转变温度下移了 60℃,即由 +20℃ 降到 -40℃。

1966年芝加哥金属博览会上用落锤撕裂试验(DWTT)方法展示了控制冷却钢(J1X—55CC)的这种良好低温韧性。第一次商业性应用是在米德兰·罗斯公司制造的卡车侧箱板上。这种新型控冷技术使半镇静钢获得了极好的韧性。在用铌铸法生产的钢材加工过程中,使用控制冷却的半镇静钢能得到较高的屈服强度,因而比用全镇静钢轧制的产品能取得更多的经济效益。

8. 逐步增加的操作困难

新的输出辊道冷却系统的安设和使用带来了一系列必须认真对待和解决的问题。通过部门之间的协作努力,包括操纵工、冶金师、工程师、销售员和研究工作者之间的共同努力得到了解决^[6]。

*译者按:原文如此,似应改为自身回火

典型的问题包括：冷却系统的操作和维护、冷却水温度变化的影响、温度测量的准确性和信赖度，对终轧温度和卷取温度的辊缝限制，卷取温度均匀性的控制，以及卷取机在带钢整个宽度和厚度范围的可靠操纵等。

在加工低合金高强度钢板卷时，应当特别注意平整操作。平整机中的平整辊挠曲使矫直后的钢板内部产生内应力，在剪成定尺叠板后导致不能容许的弯曲^{[8][9]}。

9. VAN—80 钢

现有的控冷能力使得开发、制造和销售一种新型的钢种：VAN—80 成为可能。这种钢在热轧状态下的屈服强度为 554 MPa (80ksi)，具有匹配得很好的“一揽子”工程性能，如：成型性、韧性、抗疲劳性和可焊性。1968 年当 VAN—80 钢在商业上初露头角时，可以被认为是一个突破，它填补了低合金高强度钢和淬火回火（调质）钢之间长期存在的空白^[10]。由于冶金学上的发明改进，VAN—80 钢得到令人满意的综合性能，因而常常被用作未来低合金高强度钢发展的标尺。

为得到 554 MPa (80ksi) 的屈服强度，要求沉淀强化增值大约为 139 MPa (20ksi)。主要的强度增值是靠晶粒细化到 ASTM 12 到 13 级来保证的，而由固溶物质 (Mn、Si) 和碳所提供的额外强化增值相对来说不太重要。这样就可使钢的含碳量降低，根据钢的厚度规格在 0.08—0.18% 范围内变化^[11]。

在沉淀强化上，选择了钒和氮的结合。这种合金钢系统在欧洲以正火状态、在美国以热轧状态（伯利恒公司）得到有效地应用。对一定的钒含量来说，屈服强度随氮含量增加而提高，表明了氮化钒的优先沉淀。

为了确保钢质洁净和低的含氧量，用铝来脱氧。事实上钒、铝和氮作为关键的合金化元素，导致了这个首字母缩略词：VAN，而 80 意味着以 ksi（千磅/平方英寸）表示的屈服强度值。

为了保证氮化铝的全部固溶，根据铝和氮含量往上调整钢坯再加热温度^[9]。太低的钢坯加热温度会留下一些游离氮化铝，从而降低氮化钒的沉淀强化效果。

尽管这种新型低合金高强度钢的屈服强度与调质（淬火加回火）钢相当，但其抗拉强度有着显著差别。由于疲劳强度常常与抗拉强度（而不是屈服强度）相关，因而对 VAN—80 的疲劳性能在实验室和在卡车侧箱板的大生产中进行了全面的比较研究。这些实验表明：由于沉淀硬化铁素体显微组织的加工硬化（与回火马氏体的加工软化相反），VAN—80 钢的疲劳性能相当于或优于具有较高抗拉强度的淬火加回火钢的疲劳性能^[12]。

利用氮作为合金添加剂增加了人们的顾虑即：它可能对焊接性能产生不良影响。大量的焊接试验证明，可用各种焊接方法对 VAN—80 进行焊接，直到零下 40℃，不致使热影响区出现脆化现象^[13]。

尽管 VAN—80 钢具有强度、延伸性、韧性、疲劳强度和焊接性能良好匹配，但还是有一个较大的障碍限制它的推广应用。很多标准中所规定的自由弯曲半径对卡车侧箱板和望远镜升降台架是不允许的。在这些用途中，要求相当于板厚 1.5 倍或者低于 1.5 倍的弯曲半径是够严格的。

为了确保这种新产品在市场上生存下去，必须改善它的弯曲性能。

10. 夹杂物形状控制

影响弯曲性能的诸因素到现在还不太清楚，一些冶金学家坚持认为，较低的屈服强

度与抗拉强度比值（屈强比），对得到满意的弯曲性能是必要的。与传统的钢种相比较，细晶粒的控冷低合金高强度钢具有高的屈强比，其屈服强度与抗拉强度之间的差距较小。

硫含量对纵轧带钢各向异性的影响已经很清楚，然而，现有的炼钢技术还难以保证大量生产的钢中含硫量低于0.010%，甚至低于0.015%*。

用球化来改变长条形夹杂物以减少钢的各向异性的想法，可以与灰口铸铁中的片状石墨改为球墨铸铁的石墨形状变化相比较。由于造成各向异性的夹杂物主要是长条状硫化锰，因而在钢中形成较多的，可保持原始球状、而又在轧制中不致伸长的难熔硫化物，是一种很有希望的解决办法。

在促成高熔点硫化物的元素中，铈和其它一些稀土元素对利用氮作为合金添加剂的钢是特别吸引人的。在实验室内采用混合稀土金属或稀土硅化物的试验是很成功的，往钢锭内添加稀土金属的工厂试验结果也与之完全吻合^[14]。

金相检验证实了由稀土添加剂造成的硫化物的球化，以及所预测的冷弯和冲击值的各向同性。这就使钢的各向异性问题得到解决^{[15][16]}。从第一炉实验室探索性冶炼到具有良好夹杂物形状控制的VAN—80钢材投放市场所花费的时间不足9个月。这个非凡的成就归功于下列几个因素：正确地选择课题、市场压力、同步协调、信息灵通，以及从研究实验人员到钢材最终使用者这个接力队的全员共同努力。

最初采用VAN—80钢的厂家之一是制造重型载货车侧箱板的通用汽车公司客货车分部^{[17][18]}。必须承认，他们的技术人员和冶金工作者为使一种新材料（“未经试用过

的”）迅速应用于生产具有非凡的洞察力和勇气，因为在当时只有一家炼钢厂生产这个钢种。

11. 中板的控制轧制

在低合金高强度钢板卷的生产中，由于精整设备的限制，使开卷、平整和剪切工序出现了一些问题。

为使这些问题减至最少，在匹兹堡钢厂的96英寸（2438毫米）热轧机上安装了层流冷却系统。这样可使5—17毫米厚度的钢板迅速冷却到一个预设的“水端温度”，然后进行空冷选定类似于卷取温度的水端温度以达到奥氏体到铁素体的完全转变，并允许其在缓慢空冷中发生沉淀^[9]。

通过顶部层流水和底部喷射冷却水量的平衡，获得了极好的平直度，从而省去了矫直工序。

在轧制厚板时，终轧温度达1000℃。然而，钢板的强度和韧性在较低终轧温度时类似于带钢的强度和韧性。看起来，钢板的加工方法类似于“再结晶控制轧制”。所获得的性能证明了由完全再结晶奥氏体进行控制冷却以实现晶粒细化的益处。

12. 控制冷却技术的副产物

60年代期间，琼斯·劳林公司的冶金研究者已经对低合金高强度钢工艺作了几项重要的创新：

1. 运用组织——性能定量关系，作为合金成分设计和钢材加工指南。
2. 采用加速（控制）冷却作为一个有效的方法，对带钢和钢板实行晶粒细化。
3. 优先选用氮作为更稳定的沉淀强化元素。
4. 通过夹杂物形态控制来消灭（或减

*译者按：显系笔误，此处应为0.005%。

轻)机械性能的各向异性。

5. 在554—623MPa(80—90ksi)屈服强度范围内,开发和应用细晶粒铁素体—珠光体钢。

作为副产品,这些进展对于那些条件技术领域起着冲击和推进作用:

1. 温度测量与控制的改进。

2. 精整设备(如:平整机)设计的改进。

3. 通过合金化(用Ti, Zr)控制硫化物形状^[19],或对半镇静钢(无硅酸盐钢)控制氧含量。

4. 通过“双相”显微组织,改善其成型极限曲线,以提高低合金高强度钢薄板的成型特性。

5. 开发钢包冶金技术减少硫含量,利用喷钙来改变钢中硫化物的形状。

6. 设计和测定转变前奥氏体显微组织的最佳“调节”方式,以达到最佳的晶粒细化。

13. 控制冷却的过去和未来

回顾控制冷却的历史,明显地看出从研究阶段到技术移植、应用和商品化,要推动一个设想所走过的道路是漫长的、痛苦的。即使是较成功的开发,很快收回研究经费的可能性也是很小的。更现实的情况是:研究经费仅能与保险金的利息相当。

当需求被清楚地确定,社会给革新带来生存的机会,产生了新产品。未来用户的期

待和压力就能大大加速研究和技术开发的进程,也对新产品的推广作出了贡献。

最后,个人的重要作用即使在庞大的组织机构里也不能忽视。一个敢于冒职业、声誉风险来促进或推广革新的“虔诚的信徒”,对技术的进步起着重要作用。

控制冷却的将来似乎有很多吸引人的方面,板钢和条钢的高温再结晶控制轧制可从加速冷却得到更大的益处。钢材加工各个阶段的最佳冷却速率可以改变,这表明了“控制冷却”这个术语比“加速冷却”更适宜。由于新的冷却方法正在地平线上升起,这就增添了加工过程的灵活性与适应性。

在控制冷却的应用中,可向两个不同的目标发展:或者保证产品有最好的使用性能,或者发展比传统材料更具有成本效应、更廉价的先进工程材料。

14. 致 谢

琼斯·劳林公司在60年代所做的技术开发是很多学者共同努力的结果。在格雷区姆研究所工作过的学者中,应当提到的有: A. H. 阿隆森, J. R. 贝尔, J. H. 布赫, T. E. 丹西, J. D. 格罗齐尔, H. J. 哈定, J. E. 哈特曼, L. 鲁伊斯克斯, A. 麦克连恩, J. L. 米尔利希, B. 波拉德, H. 司徒特, E. B. 威格连因。他们的努力得到了克利夫兰冶金、生产和工程部门及匹兹堡钢厂的工作人员的全力支持,从而导致了研究工作在生产和销售上的成就。

参 考 文 献

1. E. R. Morgan, T. E. Dancy, M. Korchynsky, "Improved high strength low alloy steels through hot strip mill controlled cooling". AISI Yearbook 1965 or Blast Furnace and Steel Plant, 53 (1965) pp. 921-929.
2. T. Gladman, D. Dulieu, I. D. McIvor, "Structure-property relationships in high-strength, low-alloy steels" Proceedings "Microalloying 75", Union Carbide Corporation, M. Korchynsky ed., pp. 32-55.
3. M. Korchynsky, Proposed research program on Cb-treated steels, J&L internal memorandum, November 16, 1961.
4. A. Sigalla, JISI, 1957 (186), pp. 90-93.
5. J. N. Adcock, "The laminar jet system for cooling hot steel strip" JISI, 1962, pp. 909-913.
6. K. E. Robeznieks and E. R. Turk, Blast furnace and steel plant, 1971(17) pp. 821-831.
7. J&L-50 CC, New high strength columbium steel designed for ease of fabrication, J&L's Technical Brochure AD-344.
8. A. M. Kashay and E. G. Jabo, "Effect of roller leveling parameters on heavy gage strip shape" TMS-AIME Proceedings, 1969.
9. J. D. Grozier, "Production of microalloyed strip and plate by controlled cooling" Ref. 2, pp. 241-250.
10. J&L Announces new high strength steel with 80,000 psi minimum yield strength, J&L News Release, November 6, 1968.
11. J. D. Grozier and M. Korchynsky, "Extra-fine grain structure makes strong, formable steel" Metal Progress, August 1969, pp. 67-68.
12. P. Watson and T. H. Topper, "An evaluation of the fatigue performance of automotive steels", SAE paper 710597
13. B. Pollard and A. H. Aronson, "Weldability of VAN-80", Welding Jnl Res. Supplement, December 1970, pp. 5,595-5,665.
14. L. Luyckx, J. R. Bell, A. McLean, M. Korchynsky, "Sulfide shape control in high strength low alloy steels" Metallurgical Trans, 1970(1) pp. 3,341-3,350.
15. M. Korchynsky and H. Stuart, "The role of strong carbide and sulfide forming elements in the manufacture of formable HSLA steels" Proceedings of Symposium Low Alloy High Strength Steels, Metallurg, Nuremberg 1970, pp. 17-27.
16. J. D. Grozier, "Sheared edge bend test (Hutchinson Bend Test), Jnl of Materials, March 1971, pp. 3-7
17. L. F. McNitt, "Application of low-carbon, high strength steels" ASME paper 70-DE-62.
18. M. W. Johnson, "Heavy stampings from high-strength, low alloy steel" Ref. 2, pp. 643-644.
19. J. L. Michelich, J. R. Bell, M. Korchynsky, "Effect of inclusion shape on the ductility of ferritic steels" JISI, 1971 (209) pp. 469-477.

曹荫之 高 农 译

板钢加速冷却综述

I. Kozasu

(日本钢管公司技术研究中心)

提

要

板钢加速冷却是80年代提出的一种面向新性能要求的加工技术。这一技术可提高强度,而不危害脆性转变温度,并且可以降低碳当量。加速冷却与控制轧制结合,对这些改进更为有效,这是由于普遍的细化了相变组织。本文将综述这一技术:首先从冶金角度分析加速冷却对细化组织和提高强度的机制及冷却参数的影响。并着重介绍由于加速冷却晶内铁素体形核潜力的行为。然后从加速冷却工程和操作角度,简要地综述一下对工艺的要求。从这一技术的整体本质方面介绍一下解决的办法。接着对加速冷却所得到的钢板性能的基本性质与制造加工有关的效益加以观察,介绍一些加工制造中需要注意的事项。最后对加速冷却的派生技术,如低碳贝氏体钢直接淬火,也进行了简要的讨论。

导 言

板轧件热轧后加速冷却以改善机械性能,也许不是什么新技术。每套热带钢轧机输出辊道上都装有冷却系统,这是由于从各方面讲带钢卷取温度不宜过高所致。有些轧机输出辊道装有效率高的层流冷却系统,结合微合金化技术,从而获得高的强度。虽然其应用只限于16毫米^[1,2]以下的板带。据笔者了解,一些钢板轧机也设有喷淋冷却用于较厚的钢板,企图保持其与薄钢板相同的强度和韧性。通常得到的改善比所期望的低。

但同时有人建议钢板在控轧后速冷,有可能达到提高强度而不损害低温韧性的效果^[3,4]。可是它的工业化,在日本钢管福山工厂1980年建成在线钢板加速冷却设备(OLAC)之前,未得实现^[3,6],图1表明日本钢铁学会历次会议上发表的有关加速冷却的文章数,和在这个期间日本建成的加速冷却设备。可以看出对这一技术的兴趣和它

的工业重要意义的认识突然急剧的上升。在世界范围内,可以由1983年HSLA会议^[7]有关这方面的文章,与1975年的会议相比^[8],也可以看出同样的趋势。

在本文中加速冷却(ACC)是着重指那种宽厚板经热轧后通过中等冷却速度,可以直接在热轧状态下使用,而无需回火。所得的显微组织为铁素体—细贝氏体,抗拉强度为 50 kg/mm^2 (490MPa)。还有一种均匀的低碳贝氏体高强度钢,具有高的贝氏体淬硬性,作为一种派生变种。在多数情况下,轧制钢板加速冷却通过相变温度区,一般是 800°C — 500°C ,随后空冷至室温,这种模式有时叫作间断加速冷却(IAC)。后面所谓的加速冷却都是指的IAC。虽然产生所希望的显微组织和性能要受化学成分的影响,理想的冷速一般集中在 10°C/s 。但特殊情况下低成分的钢可用很高的冷却速度冷到室温^[9]。当冷却前的奥氏体至少有一定程度的控轧,这是很主要的,性能改进的结果是:提高强度而不恶化脆性转变温度