

· 工艺材料进展 ·

专用钢种超快速冷却研究和应用进展

唐洋洋 袁守谦 卫琛浩

(西安建筑科技大学冶金工程学院, 西安 710055)

摘要 为满足超细晶钢、双相钢(DP)、相变诱导塑性钢(TRIP)、无间隙原子钢(IF)等钢种的应用要求,近年来发展了换热效率高,使钢板和条钢短时间大幅降温的 ≥ 150 °C/s超快速冷却技术,实现钢的细晶强化和相变强化。介绍了超快速冷却技术的原理,在轧制线上的布置,适用的钢种以及在国内外钢铁企业的应用。

关键词 超快速冷却技术 专用钢种 研究 应用进展

Progress of Research and Application of Ultra Fast Cooling Technology for Specialty Steel Grades

Tang Yangyang, Yuan Shouqian and Wei Chenhao

(Institute of Metallurgical Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055)

Abstract In recent years, in order to meet the application requirement of specialty steel grades such as ultra fine grain steel, dual phase steel (DP), transformation induce plasticity steel (TRIP) and interstitial free atom steel (IF), the ≥ 150 °C/s ultra fast cooling technology with high efficiency of heat exchange, temperature drop of steel plate and long products in short time by a big margin has been developed to realize steel strengthening by fine grain size and phase transformation. The principle of ultra fast cooling technology, the layout of cooling system in rolling production line, the specialty steel grades being applicable and the application in steel works at home and abroad are presented in this article.

Material Index Ultra Fast Cooling Technology, Specialty Steel Grade, Research, Application Progress

通过轧后控制冷却来改善轧件的性能是热轧产品开发的有效途径^[1]。近年来我国热带轧机和中厚板轧机加速冷却系统的能力比过去有了增强^[2,3]。国内外相继开发了超级钢(SS, super steel), 双相钢(DO, dual phase), 相变诱导塑性钢(TRIP, transformation induce plasticity), 铁素体区热轧无间隙原子钢(IF, interstitial free)等钢种的轧制线快速冷却系统。例如比利时 CRM 钢铁厂开发了一种布置在轧制线上的超快速冷却装置(UFC, Ultra Fast Cooling)^[4], 对于 3~4 mm 厚度的带钢冷却速率达到 300 °C/s 以上, 50 mm 厚中厚板冷却速率可达 20 °C/s, 超快速冷却条件下的冷却速度是传统层流冷却条件下的 2 倍以上, 配合其它一些先进钢铁材料的轧制新技术, 在轧制生产过程中实现快速、准确的温度控制以获得相应的相变组织^[5-8]。

1 超快速冷却(UFC)技术的原理及特点

1.1 层流冷却的原理

冷却水落到热钢板表面上以后, 立刻沸腾汽化, 在冷却水与钢板的界面上生成一层汽膜。由于汽膜与钢板之间的换热系数远小于水与钢板之间的换热系数, 所以汽膜的存在影响了换热效率, 使进一步提高冷却速度受到限制^[9]。冷却水在高位水箱产生

的压力作用下自然流出, 使用管层流和水幕冷却装置, 形成的连续水流稳定地落到钢板上, 动量转化为冲击力, 击破汽膜以提高冷却效率。

管层流和水幕冷却击破汽膜的范围都仅限于在连续水流正下方的局部区域内, 在钢板和冷却水之间的界面上仍有大面积的汽膜存在, 冷却速率低、冷却均匀性差^[10], 最大冷却速度一般不会超过 100 °C/s, 而“超快速冷却”的平均冷却速度至少应大于 150 °C/s^[11]。

1.2 超快速冷却(UFC)的原理

为了进一步提高冷却效率, UFC 冷却的要点是减小每个出水口的孔径, 加密出水口, 增加水的压力, 保证小流量的水流也能有足够的能量和冲击力, 能够大面积地击破汽膜, 在单位时间内有更多的新水直接作用于钢板表面, 大幅度提高换热效率, 实现超快速冷却^[12], 各冷却方式特点见表 1^[13]。

1.3 超快速冷却(UFC)装置的布置

超快速冷却装置在轧制线上的位置分前冷(布置在精轧机和层冷之间)和后冷(布置在层冷和卷取机之间)两种方式^[6]。前冷方式可以生产高屈服强度的热轧带钢, 后冷方式则用于多相高强度钢的生产^[14], 布置方式如图 1 所示:

表 1 各冷却方式特点
Table 1 Characteristics of cooling processes

冷却方式	优点	缺点	适用范围
柱状层流冷却	冷却特性较高;水流保持层流状态,可获得较强的冷却能力;上下表面、冷却均匀性较好。	冷却区距离长;集管之间有一定的距离,达不到横向冷却均匀;须边部遮蔽装置;对水质的要求较高;高位箱体积大。	用于冷却强度要求较低的中厚板及热轧带钢的普通层流冷却;也用于热连轧机架间冷却。
水帘冷却	比冷却特性较高;水流保持层流状态,冷却能力较高,冷却区距离短,冷却均匀性好。	对水质及供水系统稳定性要求高,抗干扰能力差;冷却过程稳定性差,可控性低。	中厚板轧后的控制冷却。
超快速冷却	换热效率高,实现短时间内大幅度降温;冷却均匀性好;冷却速度高;可实现细晶强化和相变强化。	冷却区短,冷却能力大,所以要求超快速冷却系统的控制非常精确。	传统热连轧机组、中厚板机组和薄板坯连铸连轧机组冷却;轧制先进钢铁材料

(a) 用于生产超级钢、高级别管线钢、IF 钢铁素体区精轧等要求低温精轧的钢种,粗轧出口温度一般在 920 °C 以上,其精轧入口温度一般在 800 ~ 850 °C^[15]。采用此配置方式,可以减少轧件进精轧前的待温时间,并且冷却中间坯,降低精轧入口温度,为实现微合金钢的控轧、超细晶粒钢的低温大压下,以及铁素体区轧制提供了保证。

(b) 前冷方式:轧后迅速冷却,降低相变温度,抑制晶粒长大,促进铁素体晶粒细化,改变碳化物(渗碳体)尺寸和分布,在较高卷取温度(600 ~ 650 °C)下,提高钢板强度,同时可以降低微合金元素在高温转变时的析出,增加析出强化效果,以缩短开发双相钢,TRIP 等钢种所需冷却系统的长度。

(c) 后冷方式:用于控制铁素体、贝氏体转变量,当铁素体、贝氏体达到所要求的百分比后,立即快速冷却,得到马氏体组织^[16]。通过冷却速率较低的层流冷却实现部分奥氏体向铁素体相变,并由后置 UFC 通过超快速冷却进一步抑制高温区的铁素体相变,使残余奥氏体向贝氏体、马氏体转变,通过卷取温度的控制,实现 DP、TRIP 钢的生产。

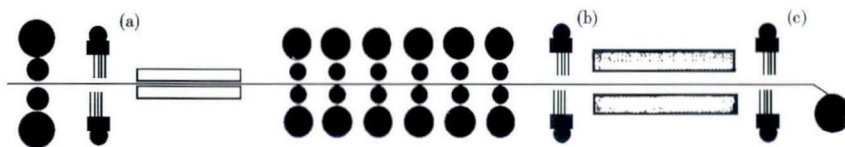


图 1 超快速冷却装置(UFC)在轧线上的位置:(a)布置在粗轧机和精轧机之间;(b)布置在精轧机与层流冷却之间(前冷方式);(c)布置在层流冷却和卷取机之间(后冷方式)

Fig. 1 Layout of ultra fast cooling device in rolling production line; located between rough mill and finishing mill (a); finishing mill and lamella cooling system (before cooling mode) (b); and lamella cooling system and coiler (behind cooling mode) (c)

2 超快速冷却技术对钢种的适应性

2.1 超级钢

超级钢具有超细化、超洁净、超均质的组织和成分特征,以及高强度、高韧性的力学性能特征^[17]。在低温大压下量获得细晶组织,利用细晶强化和相变强化机制使材料的屈服强度大幅度提高。超级钢是在正常轧制节奏下迅速降低进入精轧时的温度,如果按图 1(a)增设 UFC,迅速降低轧件温度,可实现按正常节奏生产超级钢。

2.2 IF 钢铁素体区热轧

采用铁素体区热轧工艺,可以大幅度提高 IF 钢的深冲性能。在进精轧之前利用 UFC 装置把轧件温度降低到铁素体区,可以节省进精轧前的待温时间。在新一代 CSP 半无头轧制生产线上,铁素体区热轧时中间坯的冷却已经考虑使用 UFC^[18]。

2.3 双相钢(DP 钢)

生产双相钢需要精确控制铁素体的转变时间,在轧件进入冷却区后,迅速进入到铁素体转变区,精确控制在铁素体转变区停留的时间,达到所要求的铁素体百分比后,立即快速冷却到马氏体转变区。图 1(b,c)所示的 UFC 装置对实现上述工艺要求是非常有利的。由铁素体和马氏体构成的双相钢,铁素体占多数,岛状马氏体均匀分布于铁素体晶粒间^[19],力学性能明显优于相同抗拉强度级别的铁素体+珠光体钢或贝氏体钢。前冷式超快速冷却控制铁素体量,通过后冷式超快速冷却控制贝氏体量、贝氏体形态以及马氏体量,能生产出 F+P、F+B、F+M、B+M、B、M 和 F+B+A 等不同组织和组织形态^[20],并导致较大的力学性能差异,这体现了“一钢多能”的柔性化生产策略^[21]。

采用前置式超快速冷却生产双相钢已成功申请专利^[22],在前冷装置和层流冷却之间添加空冷工艺,连铸坯热轧后进行冷却控制,终轧 800 ~ 830 °C,首先经超快速冷却,温降为 110 ~ 130 °C,冷却速度 100 ~ 140 °C/s,随后空冷 2 ~ 6 s,再经层流冷却至 100 ~ 240 °C 进行卷取,得到厚度为 2.75 ~ 4.7 mm 的钢板。采用前置式 UFC 生产 DP 钢,可以少用或者不同(微)合金^[23],降低成本且提高焊接性能。

2.4 相变诱导塑性钢(TRIP 钢)

热轧 TRIP 钢的组织中残余奥氏体在后续的变形中转变

为马氏体,同时表现出应力松弛效应,使其塑性大幅度提高。与双相钢相比,TRIP 钢除了要控制铁素体含量之外,还要精确控制贝氏体和残余奥氏体含量,更需要强有力的控冷系统。

2.5 微合金化高强钢

含有微量 Nb, V, Ti 的微合金钢使用 UFC 后,采用超快速冷却工艺后,试验钢的表面组织为马氏体,心部组织为贝氏体和少量马氏体^[24],可以抑制微合金元素的碳氮化物在较高温度的奥氏体中的析出,增加了在低温的铁素体中析出,同时,析出的碳氮化物细小、弥散,使微合金钢性能有较大提高。

2.6 多相组织钢

自 20 世纪 70 年代以来,由低合金高强度钢(HSLA)和低碳高锰钢开发出的双相钢以及 TRIP 钢,显示了优良的性能和应用前景^[25-26]。以塑性相铁素体为基体,引入硬相马氏体及贝氏体所构成的多相组织中,贝氏体、马氏体用于提高强度,铁素体、贝氏体用于改善韧性而铁素体同时能保证良好的塑性,因此多相组织的相互配合可获得较好的综合性能^[27]。

将后冷布置与传统层流、管流冷却工艺相结合,用于生产低成本的多相高强度钢。在开始阶段采用快速冷却,促使形成塑性铁素体和未转变的富碳奥氏体,此阶段冷却速度不应太快,以保证铁素体的转变量并使残余奥氏体中有足量的碳。后一阶段采用 UFC,一方面进一步抑制铁素体晶粒的长大,以细化晶粒;另一方面便于富碳的奥氏体迅速转变为贝氏体及马氏体。

3 UFC 的应用情况

3.1 国外 UFC 应用情况

国外 UFC 应用厂家、布置方式和代表产品等情况见表 2。日本、韩国等企业主要是前冷方式,结合在线或离线热处理工艺(HOP),传统热连轧机组、中厚板机组和薄板坯连铸连轧机组均有使用,产品以开发高强度热轧板及中厚板为主;若采用后冷方式,可以通过 UFC 和层流冷却的最佳结合来控制中间温度、冷却时间和卷取温度来开发双相钢。

3.2 国内 UFC 的应用情况

东北大学申请了一种超快速冷却+层流冷却的

表 2 国外 UFC 技术应用实例

企业	采用技术	工艺流程	安装位置	超快速冷却技术在热轧线使用原理	代表产品/工艺参数
JFE	SuPer-OL AC	传统热连轧中厚板生产线	精轧后	与 HOP 工艺结合,控制相变的同时使碳化物细化析出,使组织变得均匀或变成多相组织。	高强度管线钢(X100)、耐酸性气体的管线钢。
NKK	SuPer-OL AC	传统热连轧厚板生产线 H 型钢生产线	精轧后	与 HOP 工艺结合,通过快速冷却后的加热处理促进碳向着未发生相变的奥氏体聚集。	高级别管线钢(X100)、700 MPa 级和 800 MPa 级高强度汽车用钢,温降能力最大为 400 °C/s。
浦项	MUIPIC	No. 2 热连轧, No. 3 热连轧, 厚板生产线	精轧后	轧制后快速冷却或直接淬火。	30 mm 以上中厚板或高强度热轧板,温降能力最大为 100 °C/s。
蒂森克虏伯	UFC	薄板坯连铸连轧	精轧后	快速冷却后,再进行固溶热处理。	不锈钢、抗腐蚀钢(如 NIMol6CrTi)温降能力最大为 270 °C/s。
Arcelor-Carlam	UFC	传统热连轧	卷取前	层流冷却与 UFC 工艺结合,通过控制层流冷却与 UFC 之间的中间温度及卷取温度,可轻易获得多相显微组织。	主要生产高抗拉强度(650 ~ 800 MPa)、延伸率(20% ~ 25%)的双相钢。

发明专利(ADCOS)。该系统借鉴辊式淬压机实施淬火过程的基本原理,采用斜喷缝隙式喷嘴+高密管式喷嘴的混合布置,极其均匀地将板面残存水与钢板之间形成的汽膜清除,从而达到钢板和冷却水之间的完全接触,实现钢板和冷却水均匀接触的全面核沸腾。最先成功开发的是用于热轧棒材的超快速冷却系统(ADCOS-BM),可实现 200 ~ 300 °C/s 的高冷却速度(Φ20 mm 钢)。第 1 套试验性的热带超快速冷却实验装置已经应用于包钢 CSP 生产线冷却段的后部(卷取机之前),利用该套装置已经生产出 550、600 MPa 级的低成本双相钢。ADCOS 解决了 GCr15 棒材轧制时出现的网状碳化物严重析出问题^[28],瞬时冷却速度可以达到 200 °C/s 以上。

首秦 4.3 m 轧机在 ACC 系统前面预留用于安装 DQ 装置上新增一套东北大学开发的超快速冷却设备,并于 2010 年 4 月底完成热负荷试车,目前在首秦超快速冷却装置上完成开发的品种有 X70、07MnCrMoVR、SQ550、E36、Q370q 等^[29]。首钢创新开发出了表层超快(Surface Ultra Fast Cooling)工艺轧制大规格断面(准 Φ32 mm)的圆钢,以解决“超快速冷却”带来肋部和肋底基圆的冷却不均匀以及大断面芯部和边部存在温度梯度差的问题^[30]。SUFC 表层超快速冷却工艺为:热轧钢坯在完成奥氏体化后并实施较低温度的控轧,轧后采用两级强制冷却,

并强化轧后二冷,以实现轧后超快速冷却(冷却速度 $>200\text{ }^{\circ}\text{C/s}$),使得轧材大断面的表面组织晶粒细小并获得一定厚度的强化相淬透层,而芯部仍然为软相“珠光体+铁素体”。钢筋穿水冷后后进行空冷,由于芯部温度高,内部热量向外扩散,表层马氏体发生自回火反应形成回火索氏体,获得软相与硬相的良好匹配,以期使钢筋具有高的强度和韧性。

此外,攀枝花钢铁公司1450热连轧机的精轧出口增设倾斜式喷射和垂直式喷射混合配置的超快速冷却装置,已经可以实现Q235、Q345升级和部分高强钢的生产。涟钢2250热连轧生产线的控制冷却系统采用了“倾斜式超快速冷却+ACC”的混合配置方式,于2009年9月热负荷试车^[31]。宝钢在CSP线上配备超快速冷却(UFC)设备生产540、590

MPa级DP钢。

4 结束语

(1)超快速冷却工艺是一种快速冷却能力极强的新型控制冷却装置,其原理新颖,装置独特,冷却效率比传统的层流冷却有突破性的提高。

(2)超快速冷却装置已用于热轧带钢机组。在中厚板卷取温度加速冷却和直接淬火中也有应用前景。

(3)超快速冷却技术结合控制轧制可以减少钢中合金元素的加入量,这有利于降低C-Mn钢的生产成本。

陕西省教育厅产业化培育项目资助(2012JC15)

参考文献

- [1] 刘相华,王国栋,杜林秀,等.普碳钢产品升级换代的现状与发展前景[C].中国金属学会第7届轧钢年会论文集.北京:冶金工业出版社,2002:415-420.
- [2] 王国栋,刘相华,杜林秀,等.RAL与材料相关研究的现状[C].中国金属学会第7届轧钢年会论文集.北京:冶金工业出版社,2002:426-428.
- [3] 朱国荣.中厚板轧机控冷设备的开发和应用[C].中国金属学会第7届轧钢年会论文集.北京:冶金工业出版社,2002:173-176.
- [4] Buzzichelli G, Anelli E. Present Status and Perspectives of European Research in the Field of Advanced Structure Steels[J]. ISIJ International, 2002, 42(12): 1354-1363.
- [5] 王国栋.以超快速冷却为核心的新一代TMCP技术[J].上海金属, 2008, 30(2): 1-5.
- [6] Herman J C. Impact of New Rolling Technologies on Thermomechanically Processed Steels[J]. Ironmaking and Steelmaking, 2001, 28(2): 159-163.
- [7] 刘振宇,唐帅,周晓光,等.新一代TMCP工艺下热轧钢材显微组织的基本原理[J].中国冶金, 2013, 23(4): 10-16.
- [8] 袁国,于明,王国栋,等.热轧带钢超快速冷却过程的换热分析[J].东北大学学报, 2006, 27(4): 406-409.
- [9] Zuo Jun, Liu Yong, Zhang Kaihua, et al. The Applications and Practice of Front Ultra Fast Cooling Technology in C-Mn Steel[J]. Journal of Iron and Steel Research, International, 2011, 18(S1): 576-580.
- [10] 李振垒,李海军,王昭东,等.热轧板带钢的超快速冷却控制系统[J].东北大学学报(自然科学版), 2012, 33(10): 1436-1439.
- [11] 王国栋,刘相华,孙丽钢,等.包钢CSP“超快冷”系统及590 MPa级C-Mn低成本热轧双相钢开发[J].钢铁, 2008, 43(3): 49-52.
- [12] 刘相华,余广夫,焦景民,等.超快速冷却装置及其在新品种开发中的应用[J].钢铁, 2004, 39(8): 71-74.
- [13] 胡啸,李振垒,王昭东,等.中厚板轧后超快速冷却系统流量自动标定技术[J].东北大学学报(自然科学版), 2012, 33(9): 1286-1289.
- [14] 袁国,王国栋,刘相华.超快速冷却技术在短流程热带钢生产线上的应用分析[J].钢铁, 2006, 41(增刊): 384-387.
- [15] 叶晓瑜,左军,张开华,等.热轧超快冷技术发展概况及应用探讨[C].2010年全国轧钢生产技术会议论文集.内蒙古赤峰:中国金属学会, 2010: 149-153.
- [16] 倪帅.H型钢超快速冷却技术的研究[D].辽宁:东北大学, 2009: 1-5.
- [17] 胡胜亮,李运刚,田筱.新一代超级钢铁材料的研发[J].河北理工大学学报, 2005, 27(1): 18-22.
- [18] 陈礼斌,王维东,耿立唐.薄板坯连铸连轧生产中的铁素体轧制工艺[J].轧钢, 2003, 20(2): 35-36.
- [19] 马鸣图,吴宝榕.双相钢——物理和力学冶金[M].北京:冶金工业出版社, 1988.
- [20] 孙浩源,李胜利,唐广波,等.应用超快冷工艺热轧微合金带钢的试验研究[J].热加工工艺, 2011, 42(7): 26-29.
- [21] 彭良贵,朱伏先,刘相华.柔性生产策略在热轧带钢控制过程中的应用[J].钢铁研究, 2007, 35(1): 33-37.
- [22] 东北大学.一种前置式超快冷制备热轧双相钢的方法.中华人民共和国国家知识产权局,发明专利. CN 102695251 A[P]. 2012. 07. 25.
- [23] 蔡晓辉,刘旭辉,刘振宇,等.前置式超快冷方式下DP700的生产工艺[J].东北大学学报(自然科学版), 2011, 32(10): 1423-1430.
- [24] 陈静,徐光,王凤琪,等.超快冷却对含钒微合金钢组织和性能的影响[J].钢铁材料, 2013, 34(2): 84-87.
- [25] 商艳,李龙,丁桦,等.用快速冷却工艺生产高强度多相钢的实验研究[J].轧钢, 2007, 24(1): 10-13.
- [26] Bhole S D, Yu H. The Mechanical Properties of Low Carbon High Microalloyed Steels[J]. Canadian Metallurgical Quarterly, 2010, 30(1): 45-54.
- [27] Biswajit Sarkar, Jha B K, Vinod Kumar, et al. Development and Characterization of Steel Containing Very Fine Ferrite Grains[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2005, 14(2): 219-223.
- [28] 孙艳坤,吴迪.轴承钢棒材超快速冷却新工艺的应用研究[J].钢铁, 2008, 43(7): 47-50.
- [29] 田勇.中厚板超快冷技术获得重大进展[N].世界金属导报, 2011(9): 50-54.
- [30] 程四华,周玉丽,邸全康,等.SUFC工艺下830 MPa级高强精轧螺纹钢组织特征和碳氮化物析出[J].热加工工艺, 2011, 40(24): 62-65.
- [31] 王国栋,吴迪,刘振宇,等.中国轧钢技术的发展现状和展望[J].中国冶金, 2009, 19(12): 2-14.

唐洋洋(1989-),女,硕士研究生,2012年西安建筑科技大学(本科)毕业,钢铁冶金研究。E-mail:359657396@99.com
袁守谦(1963-),男,教授,冶金新技术研究。

收稿日期:2013-10-21