

特约专栏

新一代节约型高性能结构钢的研究现状与进展

王国栋, 刘振宇

(东北大学 轧制技术及连轧自动化国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110819)

摘要: 我国钢铁产业目前正面临资源匮乏, 环境和自然生态不堪重负等严重问题, 开发合金元素用量更低、力学性能更高、使用寿命更长的节约型高性能结构钢是解决我国钢铁工业可持续发展问题的主要途径。综述了以超快速冷却为核心的新一代 TMCP 工艺和以薄带铸轧为代表的“近终成形”技术的相关冶金学原理, 重点介绍了它们在开发新一代节约型高性能结构钢产品中的应用和进展, 指出了这些新技术在我国的应用前景。

关键词: 新一代 TMCP; 超快冷; 冷却路径控制; 钢材强韧化; 薄带铸轧

中图分类号: TG 146.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2011)12-0012-06

Current Status and Progress on the Development of Cost-Saving and High Performance Structural Steels

WANG Guodong, LIU Zhenyu

(State Key Laboratory of Rolling and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: China's Iron and Steel industry is facing serious environmental and ecological problems, which can be mostly solved by developing and widely applying cost-saving and high performance structural steels with lower consumption of alloying elements, better mechanical properties and longer service life. In the present paper, the metallurgical principles of new-generation TMCP (thermal mechanical controlled processing) based on ultra fast cooling and “near net shape” forming technology including strip casting were described. The development of the newest cost-saving and high performance structural steels by applying these advanced technologies has been summarized.

Key words: new generation TMCP; ultra fast cooling; cooling profile; strengthening and toughening of steels; strip casting

1 前言

当代社会发展所面临的主要矛盾之一是资源枯竭与经济的可持续发展。钢铁一直是经济建设中最重要、也是使用量最多的功能材料, 因此, 世界上所有工业大国均把钢铁生产视为与粮食和能源具有同等重要地位的产业, 这些国家的钢材 80% 以上自产。事实上, 钢铁不仅是一种性价比最高的结构材料, 更是一种温室气体排放较低的绿色环保材料, 其排放强度远低于镁、铝金属及碳纤维材料, 仅是铝的 1/6, 镁合金的 1/18。而且钢铁生产过程中仅产生 CO_2 , 而镁、铝金属在提炼过程中除产生 CO_2 外, 还会产生 CH_4 , C_2H_6 , SF_6 等对臭氧层具有根本性破坏作用的气体。在全世界工程材料用量中, 钢铁仅次于水泥, 是全世界用量第 2

位的工程材料, 它的用量是所有其它非金属材料总和的 15 倍。

由于我国国民经济持续高速发展, 使我国钢铁的需求量和生产量在本世纪初开始迅速上升, 至 2010 年已接近世界粗钢产量的 1/2, 正由于钢铁的巨大用量, 造成钢铁生产过程中的有害气体排放量占工业排放总量的 15% 左右, 成为名副其实的能耗和排放大户。我国钢铁产业目前正面临资源匮乏 (如铁矿石 60% 以上依赖进口), 环境和自然生态不堪重负等严重问题, “资源节约、环境友好、性能质量优良”即资源节约型高性能钢铁产品的开发是当前钢铁技术发展必须解决的一个主要问题。

钢铁材料的一个重要特征是可以利用物理冶金学原理来量身打造其性能, 从而满足多种多样的需求。因此, 如何通过工艺技术、关键装备和生产流程的优化和创新, 最大限度地发挥轧制、轧后冷却和热处理等生产环节对钢铁产品性能的调控作用, 尽量减少对合金元素

收稿日期: 2011-06-20

基金项目: 国家 863 项目 (2007AA03Z504)

通信作者: 王国栋, 男, 1942 年生, 中国工程院院士

的依赖和资源的消耗,减轻环境负荷,使有限资源得到合理利用,达到提高产品性能、节约能源与资源的目的,是实现钢铁材料本身的节约化和“产品生产-使用-循环”全生命周期的减量化的基础^[1],也是国内外钢铁材料领域的主要技术难点和研发热点。

本文针对“量大面广”的热轧结构钢,总结了典型工艺技术和生产流程的创新原理和应用实例,对我国节约型高性能结构钢的最新发展进行了评述。

2 新一代 TMCP 技术及热轧先进结构钢开发

20 世纪 50 年代发展起来的控制轧制与控制冷却 (TMCP - Thermal Mechanical Control Processing) 技术是保证钢材强韧性的核心技术,对高性能钢铁材料的发展起了重要的推动作用。这种工艺以“低温大压下”为基础,以添加合金和微合金元素为重要依托,故对轧机的装备水平有较高要求,为满足 TMCP 的要求我国轧机总体装备水平已经达到了国际先进水平。然而,由于实施 TMCP 工艺对轧制设备要求提高,实际热轧生产中 TMCP 应用率一般低于 30%。

绝大多数钢铁材料在轧后冷却过程中均发生复杂的相变,冷却过程的控制可以在极大范围内改变钢铁材料的组织和性能。这是钢铁材料区别于其它金属材料的一个极重要的特点。但是,在 20 世纪后半叶钢铁材料 50 余年的快速发展过程中,轧后冷却技术的发展相对落后于轧机,使钢铁材料的潜力未能很好地挖掘。因此,包括我国钢铁工作者在内的国际钢铁行业的研究人员和生产人员,近年对冷却过程进行了积极的开发和研究,不断丰富钢铁材料的组织调控手段,带动钢铁材料的发展进入了一个新的阶段。这些在传统 TMCP 基础上发展起来,组织调控机理具有新鲜特色的新的组织性能调控技术,被称为新一代 TMCP 技术。

为实现新一代 TMCP 技术,国内外轧钢领域开发出了热轧板带轧后超快速冷却技术(UFC)和中厚板轧后超高级在线加速冷却技术。与传统技术相比,可对热轧钢板进行高效率、高均匀性的冷却(对 3 mm 厚钢板的冷却速度可达 400 K/s 以上;50 mm 厚中厚板的平均冷却速度超过 50 K/s),并可避免因冷却不均匀而产生的残余应力。基于对采用新一代 TMCP 实现显微组织调控相关原理的认识,国内采用由东北大学联合钢铁企业开发的关键超快冷装备,在实验室和生产线上完成了节约型高性能热轧钢材的开发和产业化。图 1 示出的分别是我国自主开发的热轧带钢和中厚板生产线的轧后超快速冷却装置(UFC)。

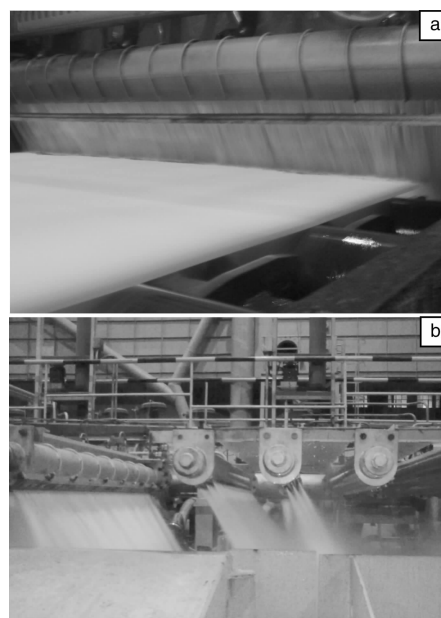


图 1 我国自主开发的轧后超快冷却关键装备:(a)热轧带钢生产线,(b)热轧中厚板生产线

Fig. 1 Ultra fast cooling system of strip and plate developed by China

图 2 示出的是轧后采用常规加速冷却 (Accelerated Cooling, ACC) 和“UFC + ACC”对相变产物控制效果的对比。采用常规 ACC 易形成等轴晶铁素体,其形成机制多为合金元素扩散与界面反应二者混合控制的“形核长大”机制^[2]。采用 UFC 使奥氏体/铁素体相变在更大过冷度条件下发生,不仅会产生大量铁素体晶核,而且造成碳和其它合金元素在相变过程中的扩散受到抑制从而更容易形成晶格切变控制的块状铁素体 (Massive Ferrite)、甚至贝氏体型铁素体 (Bainitic Ferrite)。这种非等轴晶铁

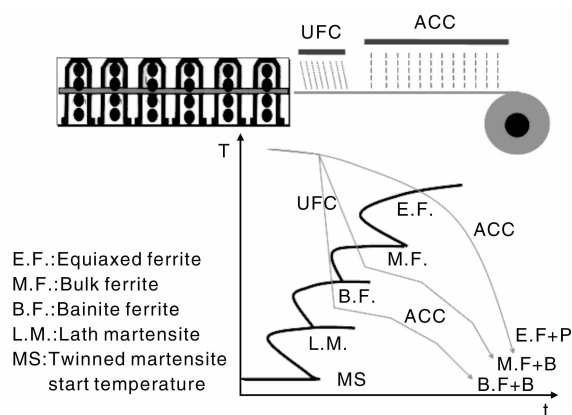


图 2 轧后“UFC + ACC”与常规 ACC 过程中相变进程的比较示意图

Fig. 2 The comparison of phase transformation between UFC + ACC and ACC

素体中存在过饱和的碳和其它合金元素, 它们仅在 γ/α 界面处进行短程扩散而富集在母相奥氏体之中, 因此有望提高钢材的强韧性并降低屈强比^[3-4]。另外, 与常规连续冷却相比, 采用 UFC 技术可以将奥氏体向铁素体相变控制在更低温度区间, 有利于产生细化的铁素体晶粒, 更好地实现细晶强化效果。

采用新一代 TMCP 生产低级别热轧 C-Mn 钢 Q235, 铁素体晶粒由 ASTM10 级细化至 ASTM11.5 级, 使 Q235 级别的热轧板带和中厚板强度提升 80 ~ 100 MPa, 稳定升级为 Q345 级别的产品。与传统 Q345 产品相比, Mn 含量相对降低 40% 以上, 用户的钢材使用量可减少 10% 以上。目前, 这种产品在常规热连轧、CSP 和中厚板生产线上实现了稳定生产。以涟钢为例, 每月节约型 Q345 的产量可达 $(2 \sim 3) \times 10^4$ t。

轧后超快冷技术的有效实施还可以更加精确地控制钢材热轧后的冷却路径, 从而实现钢材显微组织和微结构的精细化控制, 达到调控钢材力学性能的目的。采用“前置 UFC + 缓冷 + ACC 强冷”的冷却路径控制思路, 在涟钢 2250 热连轧生产线上采用抗拉强度 500 MPa 热轧钢材的化学成分 (C-0.05, Mn-1.30, Nb-0.02, Ti-0.02, 质量分数) 稳定生产出了抗拉强度为 600 ~ 700 MPa 级别的 DP600 - 700 热轧双相钢。与欧洲和日本相同级别的热轧双相钢相比, 因节省了贵重合金元素 Mo 和 Cr, 吨钢成本可降低 200 元左右。图 3 示出的是 DP700 级热轧双相钢的显微组织和制造的车轮照片。

与传统 TMCP 工艺相比, 采用轧后 UFC 技术更突出的一个冶金学特点是, 它可以很大程度上减少微合金元素在奥氏体相中的析出和已形成的析出相的粗化, 从而促进了随后 ACC 过程中 $\gamma \rightarrow \alpha$ 相变中的析出。传统 TMCP 工艺的主要目的是促进微合金元素在奥氏体中发生应变诱导析出, 这一过程发生在较高温度区间, 沉淀相尺寸一般在 20 ~ 40 nm; 而 $\gamma \rightarrow \alpha$ 相变过程中形成的沉

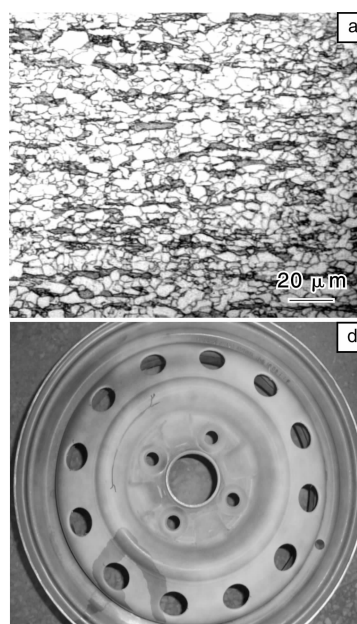


图 3 采用“前置 UFC + 缓冷 + ACC 强冷”技术生产的 DP700 级双相钢的显微组织(a)和制造卡车轮辐的实物照片(b)

Fig. 3 The microstructure of DP700 produced by “front UFC + air cooling + ACC” process (a) and picture of DP700 used for car wheel (b)

淀析出发生在更低温度区间, 沉淀相尺寸会在 1 ~ 10 nm 之间, 这样可使沉淀强化效果提高 3 倍以上^[5]。由此可见, 采用轧后 UFC 在提高强度、塑性和韧性的同时可有效降低微合金元素用量。采用超快速冷却 (UFC) 的新一代 TMCP 与传统 TMCP 生产工艺过程中微合金元素析出行为的比较如图 4 所示。应用这一冶金学原理, 针对高强工程机械用钢 (化学成分为 C-0.08, Si-0.30, Mn-1.85, Ti-0.12, Nb-0.06, Mo-0.20, 质量分数), 通过适当提高终轧温度抑制热轧过程中的应变诱导析出, 采用轧后 UFC 技术控制冷却路径, 使相变与微合金元素析出过程相耦合, 批量生产出了具有铁素

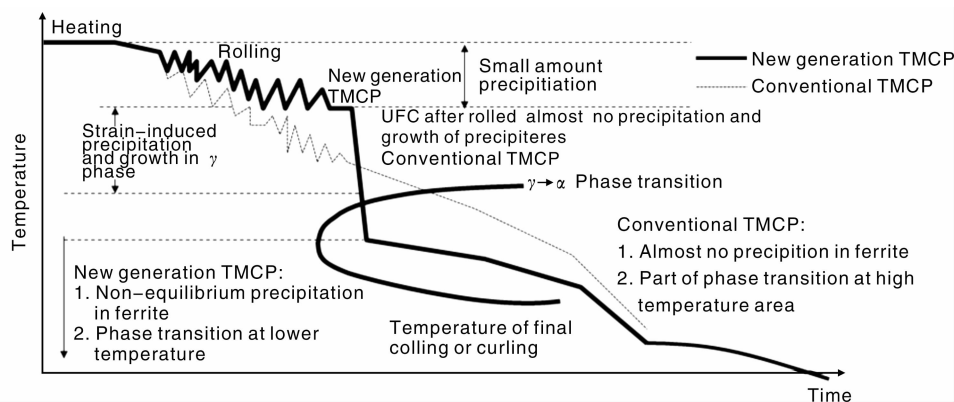


图 4 新一代 TMCP 与传统 TMCP 沉淀析出过程的对比示意图

Fig. 4 The comparison of precipitation transformation between NG-TMCP and conventional TMCP

冲击功高于 100 J, 满足屈服强度为 700 MPa 级工程机械用钢的各项要求。图 5 示出的是采用超快冷技术生产的 700 MPa 级高强工程机械用钢的显微组织和铁素体相间析出的 TEM 照片。

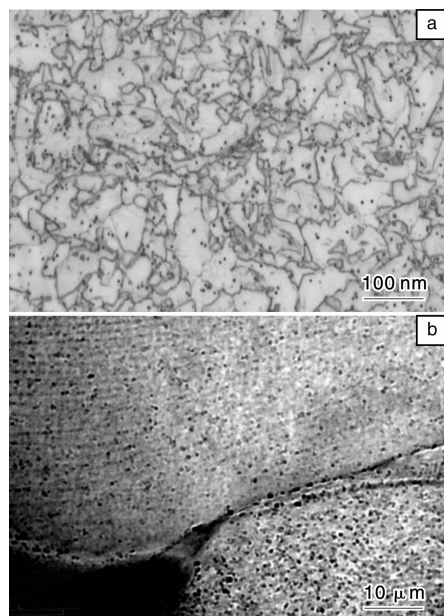


图 5 采用轧后超快冷技术生产的高强工程机械用钢的显微组织和铁素体相间析出的 TEM 照片

Fig. 5 The microstructure and TEM graph of high strength steel for engineering machine produced by UFC

体相间析出的工程机械用钢。产品厚度规格 10 ~ 17 mm, 屈服强度超过 720 MPa, 抗拉强度超过 800 MPa, -20 °C 在热轧中厚板生产中应用超快冷技术也可以大幅度提高产品的性能指标。采用新一代 TMCP 工艺技术, 在 4300 宽厚板生产线上采用 AH32 成分实现了稳定生产高强船板用 AH36 钢。与其它钢种相比, 船板生产用钢不仅需要高强度, 而且要求在确保延伸率的条件下达到船厂对钢板表面的严格要求。为此, 在实际生产中采用“UFC + ACC”控制策略, 在提高终轧温度以提高轧制生产节奏的前提下, 实现了力学性能、表面质量、生产效率和钢种成本的综合改进。图 6 示出的是采用新一代 TMCP 与传统 TMCP 生产的高强船板钢用钢的比较。图 7 示出的是采用新一代 TMCP 生产的 AH36 高强船板钢的力学性能与传统产品的比较。

在首秦 4300 宽厚板生产线采用轧后超快冷技术以后, X70 管线钢在大幅降低 Mo, Ni 和 V 等合金元素用量的前提下, 工业化生产 2×10^4 t 后的产品合格率比常规 TMCP 工艺提高了一倍以上。图 8 示出的是采用新一代 TMCP 与传统 TMCP 生产的管线钢的板形对比情况。在鞍钢 4300 宽厚板生产线上, 采用超快冷技术系统试

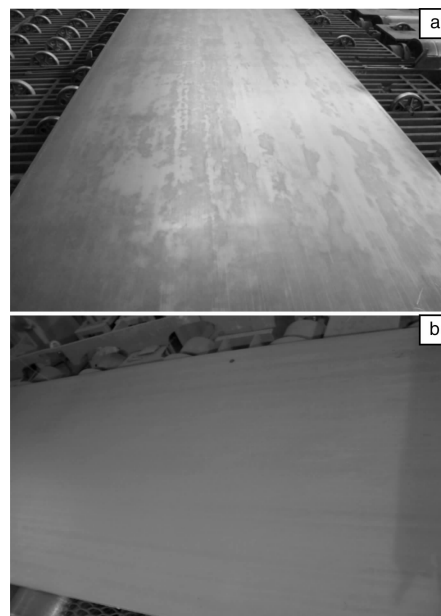


图 6 采用新一代和传统 TMCP 生产的高强船板的表面质量的实物比较; (a) 传统 TMCP, (b) 新一代 TMCP

Fig. 6 The comparison of surface quality of high strength plate for ship building between convention TMCP (a) and NG-TMCP (b)

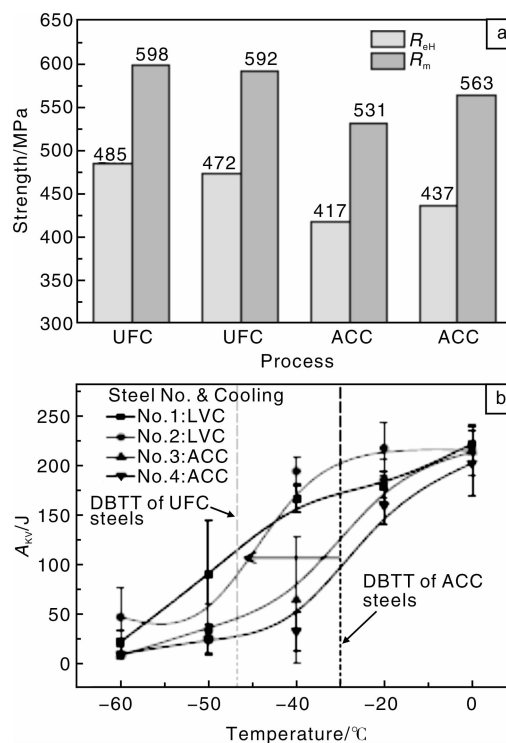


图 7 采用 UFC 技术生产的 AH36 级船板钢强度(a)和低温冲击功(b)与传统产品的比较

Fig. 7 The comparison of properties for AH36 between convention TMCP and NG-TMCP

制了 30 mm 厚 Q550D 工程机械用钢厚板。与常规产品的合金成分相比,在省去原有钢中 Mo 和 Ni 的条件下,屈服强度可超过 600 MPa,抗拉强度超过 725 MPa, -20 ℃ 冲击功由原来有时不足 47 J 稳定提高到 200 J 左右,有效解决了常规 TMCP 工艺中经常出现的冲击功偏低的质量问题,性能如表 1 所示。由这些工业生产或试制结果可以看出,新一代 TMCP 在生产低成本、高品质宽厚板方面起到了关键的作用。

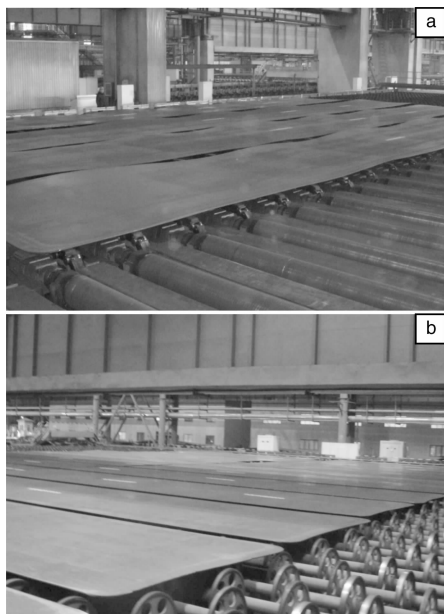


图 8 采用新一代和传统 TMCP 生产的 X70 管线钢的板形控制情况: (a) 传统 TMCP, (b) 新一代 TMCP

Fig. 8 The comparison of shape control on cold bed for X70 pipeline plate between convention TMCP (a) and NG-TMCP (b)

表 1 新一代 TMCP 生产的 Q550 的实物质量

Table 1 Properties of 30mm thick Q550D by industrial trialed

Plate billet	$R_{p0.2}$ /MPa	R_m /MPa	YR	A/%	$A_{KV-20\text{℃}}$ /J
3203285500	622	740	0.84	16.5	183 197 256
3203285500	611	726	0.84	18.0	220 207 210
Q550 standard	≥550	670-830		≥16	≥47

3 薄带的“近终成形”技术和超级耐候钢开发

薄带“近终成形”的典型技术—双辊薄带铸轧与常规热轧板带生产流程相比,除占地面积大大缩小、设备投资大幅降低等优势外,其吨钢能耗仅为传统流程的 1/4,吨钢 CO₂ 排放量仅为传统流程的 1/8,是一项名副其实的节能减排型新技术。到目前,世界工业发达国家均在此项技术上投入了大量研发力量,美国的 NU-COR 等企业已达到铸轧技术产业化的水平。因此,薄

带铸轧是一项引领现阶段钢铁生产由高能耗、高资源消耗、高环境污染型向节能环保的资源节约型和环境友好型转变的新技术。

我国科研人员在“973”和自然科学基金等的持续资助下,经长期研究发现,采用双辊薄带铸轧技术不仅可以实现钢水凝固时的亚快速凝固(凝固时的冷却速度为 $10^3 \sim 10^5$ K/s)以细化铸带坯的凝固组织,而且可以改变 P 等低熔点元素在钢中的偏析行为。用双辊薄带铸轧技术生产减量化耐候钢,正是由于适当增加 P 含量,提高了其耐候性能而又不增加其它贵重合金元素(如 Ni, Cu 和 Cr 等)的含量。这种新型长寿命的新型结构钢的批量生产将对我国高 P 劣质矿的有效利用具有重要的现实意义。

在常规 Cortten-A 耐候钢中提高 P 含量为 0.15% ~ 0.22%,采用双辊薄带铸轧技术制备出 2.5 ~ 3.0 mm 厚的铸带坯,再经冷轧和退火处理制备出 1.0 mm 厚的带材。图 9a 示出的是 P 在铸带和常规带材中沿厚度方向的分布情况。可以看出, P 在铸轧带材中呈现明显表面逆偏析,即表面富集 P 而中心部位 P 相对贫化。由于存在 P 的表面逆偏析,铸带成品的韧脆转变温度(DBTT)与常规带材相比可降低 10 ~ 15 ℃,如图 9b 所示。

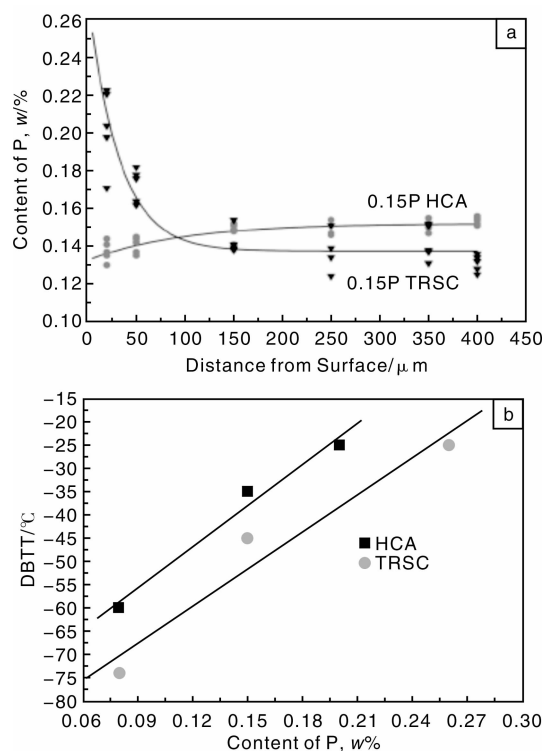


图 9 (a) 铸轧和常规带材中 P 元素沿带钢厚度方向的分布, (b) 铸轧带材与常规带材 DBTT 的比较

Fig. 9 The comparison of depth profile (a) of P concentration and DBTT (b) between TRSC and HCA

对铸轧和常规带材进行工业大气环境的模拟加速腐蚀实验后发现，与常规 Corten-A 耐候钢相比，腐蚀速度可降低近 40%，如图 10 所示。

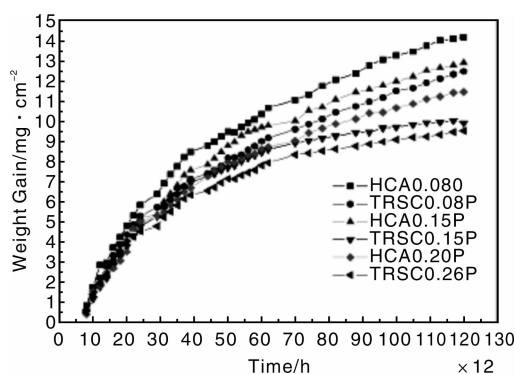


图 10 铸轧和常规带材在工业大气模拟环境下的加速腐蚀对比结果

Fig. 10 The comparison of accelerated corrosion test between TRSC and HCA

4 结 语

近年来，人们认识到地球的资源、能源、环境已经难以承担人类社会带来的负面效应，迫切希望在钢铁材料制备、生产过程中减少资源和能源的消耗，提高钢材的性能，在钢材生产、使用的各个环节实现减量化和节约化。因此，如何在钢铁材料的生产过程中减少铁矿石、煤炭、合金元素等原材料的消耗、减少有害气体排放、提高材料的性能、实现绿色化生产，是我们面临的亟待解决的问题。而新一代 TMCP 和薄带“近终成型”技术恰恰是解决这一问题的极为重要的手段。

按照建设节约型社会的要求，我国钢铁行业在未来几年中将实现吨钢合金和微合金元素用量降低 30%、钢材全面升级换代的目标。“量大面广”的结构钢材还有着巨大的潜能有待挖掘。通过工艺技术、关键装备和

生产流程的创新，可使其性能指标与以往相比有质的飞跃。以我国热轧结构钢产能约 4 亿 t 估算，由于提高钢材强度、延长使用寿命可以节省钢材 5% ~ 10%，每年可以减少钢材用量为 2 600 万 t 左右，相当于每年减少铁矿石用量约 5 200 万 t。因此，节约型高性能结构钢的成功开发和应用将促进我国钢铁材料向环境友好、可再生循环及制备服役全过程节能减排方向迈进，为我国钢铁工业的可持续发展做出重要贡献。

参考文献 References

- [1] Wang Guodong (王国栋). 认清形势、自主创新、结构调整、保持增长—论 2009 年轧钢行业的任务[J]. *Steel Rolling* (轧钢), 2009, 26(1): 1-4.
- [2] Davis J R. *Alloying: Understanding the Basics of Steels* [M]. Ohio: ASM International, Materials Park, 2001.
- [3] George Krauss. *Steels-Processing, Structure and Performance* [M]. Ohio: ASM International, Materials Park, 2005.
- [4] Yvonne Van Leeuwen, Marcel Onink, Jilt Sietsma, et al. The Transformation Kinetics of Low Carbon Steels under Ultra-fast Cooling Conditions [J]. *ISIJ International*, 2001, 41 (9): 1 037-1 046.
- [5] Funakawa Y, Shiozaki T, Tomita K, et al. Development of High Strength Hot-Rolled Sheet Steel Consisting of Ferrite and Nanometer-Sized Carbides [J]. *ISIJ International*, 2004, 44 (11): 1 945-1 951.
- [6] Liu Zhenyu (刘振宇). *Interim Report on the Key Technology of High-Strength, Thick Gauge Steel Production for “863” Offshore Oil Platform Project* (2007AA03E504) “863” 海洋石油平台用高强度、厚规格钢板生产的关键技术及原理项目 (2007AA03Z504) 中期报告[R]. Beijing: China National Offshore Oil Corporation, 2009.
- [7] Wang Guodong (王国栋). 以超快速冷却为核心的新一代 TMCP 技术 [J]. *Shanghai Metals* (上海金属), 2008, 30(2): 1-5.
- [8] Zhang Xiaogang (张晓刚). *The Development of Advanced HSLA Steel in Angang in Low Carbon Age* [R]. Beijing: The International Conference on HSLA Steels, 2011.

中国科学院技术科学部 2011 年新增院士名单

姓 名	研究方向	工作单位	姓 名	研究方向	工作单位
朱 荻	机械制造及其自动化	南京航空航天大学	赖远明	土木工程(寒区工程)	中国科学院寒区旱区环境与工程研究所
张统一	力 学	香港科技大学	翟婉明	载运工具运用工程	西南交通大学
沈保根	磁性材料	中国科学院物理研究所	崔建斌	机械设计及理论	清华大学
郑 平	工程热物理	上海交通大学	魏炳波	材料科学与工程	西北工业大学
南策文	复合材料	清华大学			

(本刊通讯员)