

·综述·

800 MPa 级超细晶粒钢研究现状和发展趋势

宋立秋

(攀钢钢铁研究院,攀枝花 617000)

摘要 800 MPa 级超细晶粒钢是通过多向变形热处理,大角度交叉轧制,大变形应变诱导动态相变和铁素体动态相变,大变形诱导铁素体相变,弛豫析出控制相变,促进针状铁素体形成等轧制技术,将钢中的晶粒尺寸由 10 μm 降到 1 μm 以下,从而达到高强韧性的一种低碳(0.05% C)微合金化钢。介绍了国内外 800 MPa 级超细晶粒钢的理论研究、生产工艺和焊接技术的新进展和今后发展趋势。

关键词 800 MPa 级 超细晶粒钢 工艺技术 研究 发展

Research and Development status of 800 MPa Grade Ultra-Fine Grain Steel

Song Liqiu

(Iron and Steel Research Institute, Panzhihua Iron and Steel (Group) Corp, Panzhihua 617000)

Abstract The 800 MPa grade ultra-fine grain steel is a kind of high strength-toughness low carbon (0.05% C) microalloying steel by the rolling technology of multi-directional thermomechanical treatment, large angle cross rolling, heavy deformation strain-introducing ferrite phase transformation, relaxation precipitation controlling transformation and promoting acicular ferrite deformation to decrease grain size of steel to less than 1 μm from 10 μm . The theory research of 800 MPa grade ultra-fine grain steel, recent development and trend in future of production process and welding technology are presented in this paper.

Material Index 800 MPa Grade, Ultra-Fine Grain Steel, Technology, Research, Development

目前,工业生产和广泛应用的低合金钢的屈服强度约为 400 MPa,抗拉强度约为 500 MPa,晶粒尺寸约为 10 μm 。由于晶粒细化既能提高钢材的强度又能改善钢材的韧性,因此世界各国研究者力争通过对碳素钢和低合金钢进行细晶化的研究,将低合金钢的屈服强度由目前的 400 MPa 级提高到 800 MPa 级。日本于 1997 年启动了“超级钢铁材料研究”(简称超级钢)(SXT-21)国家项目,目标是开发强度相当于现有钢铁材料两倍的新材料,用于道路、桥梁、高层建筑等基础设施的更新换代^[1]。韩国于 1998 年启动了“21 世纪高性能结构钢”(Hipers-21)项目,目标是开发和使用寿命比传统钢提高 1 倍的超细晶粒钢^[2]。

我国于 1998 年末确立启动了“新一代钢铁材料重大基础研究”项目(国家 973 项目),其目标是将现有的普碳钢和低合金钢的强度和寿命提高 1 倍,同时不降低钢的综合性能^[3]。

1 800 MPa 级超细晶粒钢的理论研究和进展

1.1 日本

日本“超级钢”项目研究的课题之一是“焊接性能优良的 800 MPa 级高强度钢研究”^[4]。目前铁素体-珠光体钢的抗拉强度都在 500 MPa 以下,抗拉强度超过 500 MPa 的高强度钢主要是通过添加合金成分,形成贝氏体、回火马氏体等高强度钢。但是,随着合金元素的增加,不但提高钢的成本,而且使炼钢和精炼难度加大,更重要的是使焊接性能变差,高强钢焊接接头的疲劳强度仅为 60 ~ 100 MPa(为母材基体强度的 10%)。具有 C-Si-Mn 基本成分的铁素体钢具有良好的焊接性能,但用目前技术生产的钢的强度有限,因此该课题的研究目标是:以 C-Si-Mn 成分为基础,通过晶粒细化,将晶粒尺寸从 10 μm 细化到 1 μm ,获得强度与硬度平衡的超细铁素体-珠光体复相组织,开发出抗拉强度为 800 MPa 级别的超细晶粒钢,同时开发具有优良焊接性能的超级钢的焊接工艺。为此,该课题从以下两个方面进行研究。

(1) 超细晶材料的研制。采用大的塑性应变能够制备出超细晶铁素体晶粒。但是采用大的塑性应变进行单向变形时,材料在厚度方向变形不

均匀,致使应变主要集中于试样的中心部位。Nagai 等^[5]采用“多向变形”技术制备超细晶铁素体晶粒,其特点是采用双向或多向变形可明显地改善应变分布的不均匀性,从而有利于获得均匀的超细晶组织。

Nagai 等^[5]利用研制的多向变形热机械处理模拟机,在实验室采用单向变形和多向变形对比方法研究了化学成分(%)为 0.16C-0.4Si-1.4Mn 的碳素钢的晶粒变化情况,结果表明采用“多向变形”方法制备的超细晶粒钢具有更均匀的超细晶组织。多向变形热机械处理模拟机的特点是每轧制一道次,试样便可旋转 90°。Nagai 等利用实验室轧机采用多向轧制技术,用低碳 Si-Mn 钢成功地制备出尺寸为 $\Phi 18 \text{ mm} \times 20\,000 \text{ mm}$ 的棒材,将钢的晶粒尺寸由 $10 \mu\text{m}$ 细化到 $0.5 \mu\text{m}$ 时,钢的屈服强度可由 320 MPa 提高到 740 MPa,当将 $12 \text{ mm} \times 700 \text{ mm} \times C \text{ mm}$ 规格的热轧钢板的晶粒尺寸细化到 $1 \mu\text{m}$ 时,钢板的抗拉强度达到 800 MPa,且制备的热轧钢板在厚度方向具有均匀的超细晶粒^[6]。

通过大变形生产的厚钢板力学性能的各向异性,特别是某些方向上韧性的降低是人们关注的焦点。为此,Nagai 等^[7]采用了“大角度交叉轧制”方法以改变材料的结晶取向。通过交叉轧制,材料的织构或(100)极指数得以有效地改变,使材料在横向和轧向的韧脆转变温度的差异很小。

(2) 超细晶粒钢高效率焊接技术研究。工业应用超细晶粒钢最重要的问题之一是 HAZ 的软化问题,采用传统的焊接方法将由于晶粒粗化引起 HAZ 软化而导致接头强度降低。Reisuke ITO 等^[8]开发了新型超窄间隙气体保护焊接方法。采用二道焊接 19 mm 厚的钢板,钢板的化学成分(%)为 0.15C-1.50Mn-0.20Si-0.02P-0.002S,其 HAZ 宽度只有 3 mm,其接头的硬度低于 HV250,因此可有效地阻止焊接裂纹和应力腐蚀裂纹的产生。

S. Tsukamoto 等^[9]利用 20 kW CO₂ 大功率激光焊接设备研究了化学成分(%)为 0.049C-1.50Mn-0.981Si-0.021P-0.000 9S 超细晶粒钢的焊接方法和接头特性,目的是使超细晶组织的破坏极小化,同时使焊接接头性能得到明显的改善。

Akihiko OHTA 等^[10]研制了一种提高疲劳强度的低转变温度型焊丝。此焊丝含有 10% Cr 和 10% Ni,其奥氏体转变为马氏体的开始温度约为

180 ℃,转变结束温度为室温。马氏体发生转变时,焊缝金属产生膨胀导致焊缝周围产生压缩残余应力,从而提高了焊接接头的疲劳强度。用此焊丝焊接晶粒尺寸为 $1 \mu\text{m}$ 的超细晶粒棒材,接头的疲劳强度达到 300 MPa,比用传统焊丝焊接的疲劳强度提高了 100 MPa。

1.2 韩国

韩国高性能结构钢开发的目的是:(1) 通过提高传统材料的强度和韧性,降低钢结构成本,提高钢结构寿命;(2) 提高结构钢的耐大气腐蚀性能和耐海水腐蚀性能;(3) 改善钢材的可焊性以提高钢结构的安全性;(4) 开发的高性能结构钢可重复利用并有利于保护环境。

“21 世纪高性能结构钢”项目中的其中一个课题——“800 MPa 级结构钢研究”课题分两阶段进行,第 1 阶段研究从 1998 年至 2002 年。在第 1 阶段 5 年工作中,主要进行了实验室超细晶粒钢的研究,课题组提出了应变诱导动态相变(SIDT)理论,即通过在较低温度下轧制获得大的驱动力,从而达到细化晶粒的目的。

韩国研究者主要进行了以下 4 方面的研究^[11]。

(1) 高强细晶粒钢机理研究。对 0.15C-0.4Si-1.5Mn 化学成分(%)的 C-Mn 钢的研究结果表明:当钢在 A_{e3} 和 A_{r3} 之间进行大变形时,发生了应变诱导动态相变,其铁素体晶粒尺寸可以细化到 $2 \mu\text{m}$;当钢在 A_{r3} 和 A_{r1} 双相区进行大变形时,发生了应变诱导动态相变和铁素体动态再结晶,其铁素体晶粒尺寸可细化到 $1 \mu\text{m}$;当钢在 A_{r1} 温度以下进行大变形时,发生了铁素体动态再结晶,其铁素体晶粒尺寸可细化到 $0.6 \mu\text{m}$ 。通过对成分(%)为 0.1C-0.25Si-1.5Mn-0.01Ti-0.01Nb-0.05V 钢的研究表明:应变必须超过一个临界值时才能发生应变诱导动态相变,否则将发生铁素体动态再结晶。当应变超过临界值时,多道次小变形与单道次大变形同样可以得到超细晶粒铁素体,在多道次变形中,为了得到超细的铁素体晶粒,道次间隔时间非常重要,因为道次间隔时间增长将引起变形能的释放,从而导致应变诱导动态相变铁素体体积分数的降低。

(2) 高氮 TiN 型钢的研究。高氮 TiN 型钢的研究目的是为了阻止细晶粒钢焊接时 HAZ 奥氏体晶粒的长大。该钢的特点是在钢中添加氮形成

的TiN粒子,该粒子即使在1400℃加热条件下也不溶解到基体中,由于高热稳定性TiN粒子的钉扎作用,有效地阻止了HAZ奥氏体晶粒的长大。采用60 J/cm大线能量的埋弧焊接方法对高氮TiN型超细晶粒钢进行焊接,其HAZ的宽度只有传统TMCP钢HAZ宽度的1/10。

(3) 超细晶粒钢新型焊接系统研究。为了有效地抑制超细晶粒钢HAZ力学性能的恶化,研制开发了3种新型焊接系统:激光焊接系统、窄间隙焊接系统和多极高速焊接系统。其中多极高速焊接系统比其它系统实用性更强。

(4) 600 MPa级和800 MPa级焊接材料的研制。研制了2种焊接超细晶粒高强度钢时不需预热的焊接材料。其一是抗拉强度为600 MPa级的药芯焊丝,该焊丝将氢含量控制在0.06 mol/g,药芯的碱度控制在0.8。其二是抗拉强度为800 MPa级气体保护焊丝,其碳含量为0.01%,同时添加了Ni和Mo以获得低碳马氏体组织,使焊接接头达到所要求的韧性和强度。

1.3 中国

对于800 MPa级超细晶粒钢的研究,国内针对不同种类的高强度钢建立了“形变诱导铁素体相变(DIFT)”、“弛豫析出控制相变(RPC)”和“针状铁素体”3种理论体系。钢铁研究总院董瀚等对形变诱导铁素体相变热力学、变形参数、合金元素等对DIFT影响规律进行了系统研究^[12],并应用形变诱导铁素体相变轧制工艺,在实验室获得了晶粒尺寸小于1 μm的微合金钢板,开发出不同强度级别(600 MPa、700 MPa、800 MPa)的新一代HSLA钢原型^[13]。北京科技大学贺信莱、尚成嘉等进行了贝氏体/马氏体中温转变产物超细化的机理研究,建立了“弛豫-析出-控制相变”的理论,利用该技术在鞍钢、武钢等钢铁厂实现了8~20 mm厚的强度级别为600~800 MPa级新一代钢板的批量工业生产^[13-18]。中国科学院金属研究所的杨柯、赵明纯等对管线钢中针状铁素体进行了深入研究,以传统X60铁素体-珠光体型管线钢的成分为基础,开发出综合性能优异、强度级别达到X80的输油用管线钢原型材料,并在宝钢、本钢实现了工业生产。

1.3.1 形变诱导铁素体相变(DIFT)技术

DIFT不同于传统控轧控冷(TMCP)的相变之处,是其相变(低碳钢中 $\gamma \rightarrow \alpha + P$)主要发生在轧钢

过程中而不是轧后冷却过程中,DIFT相变具有以下特性:(1) DIFT相变是动态相变,是由形变产生储能能提高相变驱动力的相变;(2) DIFT相变是以形核为主的相变, α 相形核首先产生于具有高畸变能的原有 γ 晶界;(3) DIFT相变具有快速相变的特性,DIFT相变是扩散型相变,碳的走势是上坡扩散,在较高温度时在最后的三角界区形成珠光体,在较低温度和高畸变的晶内区形成离异状珠光体、颗粒状珠光体;(4) DIFT形成超细晶,DIFT相变相对于传统的 $\gamma \rightarrow \alpha$ 相变或再结晶都有更小的临界核心尺寸,而它又是以形核为主,而不是长大为主的快速动态相变,因此新生的 α 相具有超细晶特点;(5) DIFT的发生伴随着产生铁素体的动态再结晶;(6) 钢的化学成分影响DIFT过程及其特征;(7) DIFT的工艺控制中过冷度、应变量及应变速度等可以在相当大的范围内变化^[13]。

钢铁研究总院董瀚等^[19]对形变诱导铁素体相变(DIFT)热力学、温度、变形量等变形参数以及Mn、Nb等合金元素对DIFT的影响规律进行了系统研究。对成分(%)为0.003C-0.22Si-1.12Mn-0.052Nb的超低碳微合金钢在实验室进行了轧制,结果发现在780~900℃温度范围内发生了形变诱导铁素体相变及铁素体动态再结晶,得到1.0 μm左右的超细晶组织,其屈服强度大于800 MPa^[20]。通过对成分(%)为0.087C-0.25Si-0.51Mn-0.017Nb-0.35Cu-0.25RE、0.094C-0.29Si-1.42Mn-0.045Nb和0.041C-0.25Si-1.07Mn-0.036Nb三种Nb微合金化钢研究表明^[13]:随着变形温度的降低,依次发生奥氏体的完全动态再结晶、部分动态再结晶、未再结晶和DIFT过程。应变速率的影响规律与温度有关。在相对高温变形(>800℃)时,一定应变量下形变诱导铁素体随应变速率的升高而减少;而相对低温变形(760℃)时,形变诱导铁素体量随应变速率的升高首先减少而后增加。铁素体晶粒尺寸随应变速率增加而减小,最后达到一个稳定值。C、Mn含量的增加均不利于DIFT的进行,但有利于细化晶粒。固溶Nb不利于形变诱导铁素体相变的进行,而Nb的沉淀析出有利于DIFT进行。对于低Mn含量钢, $\epsilon = 1.20$ 时,DIFT可以在高于 A_{e3} 温度发生;而对于Mn含量较高的钢(Mn > 1.0%),在 $\epsilon = 0.92$ 时,DIFT在 A_{e3} 之上不能发生。

1.3.2 弛豫析出控制相变(RPC)技术

北京科技大学贺信莱、尚成嘉等进行了贝氏体/马氏体中温转变产物超细化的机理研究,建立了“弛豫-析出-控制相变”(RPC)的理论,利用该技术获得了 800 MPa 级高强度结构钢。弛豫-析出-控制(RPC)相变技术基本原理是^[14,16,17]:在控轧终轧后充分利用非再结晶区大量变形的高密度位错,适当空冷再加速冷却使位错弛豫,在弛豫过程中形成大量细小的位错胞状结构。通过微合金元素(Nb、Ti、B)在这些微结构上的应变诱导析出,使钢在相变前晶内产生大量相变形核优先位置,促使随后的加速冷却过程中晶内贝氏体在这些位置优先形成。这些优先形成的贝氏体板条把变形奥氏体晶粒分割成许多细小区域,从而限制了后续

的相变在这些小区域中进行,最终获得细化的板条贝氏体/马氏体复合组织。

利用 RPC 技术,在鞍钢和武钢现有设备上批量生产了 12 mm 钢卷和 20 ~ 30 mm 钢板,其钢板的化学成分范围如表 1 所示,其钢板的力学性能为:ReL:720 ~ 750 MPa, Rm:770 ~ 810 MPa, A:18% ~ 20%^[13-18]。弛豫热处理超细组织钢的成分及组织特征是尽量降低合金元素的含量,所需的合金元素比常规低合金钢大大降低,而强度则提高了 1 倍,且经过 RPC 工艺生产的钢板只须进行简单的回火处理,不需要进行再加热调质热处理,因此节约能源、降低了成本。

1.3.3 针状铁素体的组织细化

表 1 弛豫析出控制相变 800 MPa 贝氏体/马氏体细晶粒钢的化学成分/%

Table 1 Chemical composition of 800 MPa grade bainite/martensite ultra-fine grain steel /%

C	Mn	Si	S	P	Cu	Mo	Ni	Nb	B	Ti
0.03 ~ 0.07	1.4 ~ 1.8	0.25 ~ 0.55	≤0.005	≤0.01	0.2 ~ 0.6	0.1 ~ 0.3	0.2 ~ 0.4	0.03 ~ 0.09	0.000 5 ~ 0.002 0	0.01 ~ 0.08

采用传统工艺方法生产的铁素体-珠光体型 X70 管线钢,在管线现场焊接时会出现焊接性能下降,组织粗化,冲击韧性下降,对延性断裂扩展不能有效地止裂,包辛格效应导致螺旋焊管的屈服强度下降等一系列问题^[21]。为了解决这些问题,中国科学院金属研究所的王仪康、杨柯等^[21-25]通过对不同组织结构管线钢的力学性能、抗腐蚀性能及焊接性能的综合分析研究,表明针状铁素体组织的管线钢具有高强度、高韧性和良好的抗 H₂S 应力腐蚀和氢致开裂等综合性能。

针状铁素体管线钢的特征是^[21]:进一步提高纯净度,采用钙处理对硫化物进行变性,在连铸铸锭过程中采用电磁搅拌或软压缩措施,钢中加入微量钼(0.2% ~ 0.4%)以促使针状铁素体的形成,在高温动态再结晶区停轧,通过在线强制加速冷却,进一步细化晶粒。

赵明纯等^[22-25]通过对针状铁素体组织的系统研究,形成了“细化针状铁素体组织的三阶段理论”,即对于低碳微合金管线钢在奥氏体再结晶温度区间粗轧后,在奥氏体未再结晶温度 $T_{nr} \sim Ar_3$ 的温度区间进行轧制,或进入 Ar_3 以下的 $\gamma + \alpha$ 两相区进行轧制,终轧后冷却速度控制在 10 ~ 30 °C/s,终冷温度在 400 ~ 600 °C 之间,最终获得超细化的针状铁素体组织结构。钢的化学成分如表 2 所示。

表 2 针状铁素体超细晶粒钢的化学成分/%

Table 2 Chemical composition of acicular ferrite ultra-fine steel /%

C	Mn	Si	S	P	Nb	V	Mo	N
≤0.03	≤1.6	≤0.3	≤0.001	≤0.002	≤0.06	≤0.04	≤0.4	≤0.007

宝钢、本钢等钢厂利用针状铁素体管线钢组织控制和针状铁素体组织细化的研究成果,在轧制生产线上获得了组织形态为针状铁素体 + 少量多边形铁素体的规格为 14.6 mm × 1 500 mm × C mm 管线用热轧板卷,性能达到了西气东输工程制管用热轧板卷技术条件对 X70 针状铁素体管线钢的要求。

1.3.4 800 MPa 级超细晶粒钢的焊接

钢铁研究总院的田志凌、彭云等^[26-32]针对超细晶粒钢的特点,研究了焊接热循环对 800 MPa 级超细晶粒钢的母材组织、力学性能的影响规律,并研究了适合超细晶粒钢的新型焊接技术和工艺。

超低碳贝氏体组织不仅具有高的强韧性及裂纹抗力,而且其强度、塑性和低温韧性对热输入和冷却速率不敏感,因此,针对 800 MPa 级超低碳微合金钢的成分、组织及性能特征,研制出了低 C_{eq} 的高强、高韧特别是低温韧性优异的(超低碳贝氏体钢)ULCB 焊丝^[27-29]。ULCB 焊丝熔敷金属的组

织是由无碳化物板条贝氏体、粒状贝氏体及针状铁素体组成的混合组织。应用研制的 ULCB 气保护焊丝对武钢 12 mm 厚 RPC 超细组织低合金钢板进行了焊接,研究了不同焊接热输入对 RPC 超细组织低合金钢焊接接头组织与性能的影响。研究表明:采用 ULCB 焊丝焊接 800 MPa 级超低碳微合金钢能够获得强韧性匹配良好的焊接接头,焊缝金属在较高热输入条件下,仍具有优良的低温韧性。应用 ULCB 焊丝焊接鞍钢 20 mm 厚的 RPC 超细组织低合金钢板,采用 MAG 焊接工艺以 20 kJ/cm 的线能量进行焊接,焊接接头的抗拉强度达到 810 MPa 的强度(焊缝金属的抗拉强度略高于母材的抗拉强度),而且获得了足够的塑性和韧性储备,焊缝金属具有优良的低温韧性。

对 800 MPa RPC 超细组织低合金钢(表 3)的激光焊接性进行研究,结果表明^[30,31]:激光焊接 800 MPa RPC 超细组织低合金钢 HAZ 显微组织主要为低碳马氏体;随着 $t_{6/5}$ 增大,马氏体量降低贝氏体量增加,HAZ 的硬度降低,但其硬度仍高于母材基体的硬度;激光焊接后,HAZ 未出现明显的软化区;激光焊接 HAZ 表现出优良的低温冲击韧性,当 $t_{6/5}$ 在 3~8 s 之间变化时,HAZ 在 -40 °C 的冲击功达到 220 J/cm²,比母材高 160 J/cm²。

表 3 激光焊接试验的 800 MPa 级超细晶粒钢的化学成分/%

Table 3 Chemical composition of 800 MPa grade ultra-fine steel for laser welding test / %

C	Mn	S	P	Cu	Ni	Mo	Nb	Ti	B
0.041	1.59	0.005	0.008	0.285	0.264	0.25	0.053	0.030	0.001

2 800 MPa 级超细晶粒钢的发展趋势

日本在第 1 期超级钢研究工作即将结束时,日本经济产业省于 2002 年 4 月启动了“超级钢”第 2 期研究项目“环境友好型超微细晶粒钢的基础技术研究”,应用第 1 期在实验室研究的“多向变形”等成果,在工业生产线上采用低碳 Si-Mn 化学成分,批量生产 800 MPa 级超细晶粒钢,通过晶粒细化,在提高钢的强度的同时,降低钢的韧脆转变温度,同时使钢具有优良的抗震性能^[32]。

同时与工程结构技术相联系,特别是在基础设施建设中应用工业生产的超级钢产品,由国家金属研究所和国家民用工程研究所共同负责的国家项

目“抗震、耐蚀及轻量化桥梁模型设计”项目已启动,提出了用超级钢材料建造“超级钢结构”型的超级大桥,大桥支撑梁采用具有耐氯离子腐蚀的低镍不锈钢,使用寿命大于 100 年;大桥底梁采用现有钢种工作寿命两倍的、韧脆转变温度低于 -97 °C 的高韧性 800 MPa 级超级钢,其耐腐蚀时间超过 100 年;同时采用强度大于 1 800 MPa 强度级别的超级高强螺栓连接;桥梁焊接接头的疲劳寿命为现在的 2 倍,通过第 2 期“超级钢”的研究,使超级钢在经济建设中实现降低环境污染、节约能源、可循环利用、高安全性和长寿命的目的^[32]。

韩国“21 世纪高性能结构钢”(Hipers-21)项目第 2 阶段为期 5 年(2003 年~2007 年),其研究任务是继续完善和发展实验室取得的成果,特别是应变诱导动态相变(SIDT)技术,同时将第 1 阶段实验室研究的应变诱导动态相变技术应用到工业生产中,批量进行工业生产和产品应用研究,从而实现 Hipers-21 项目的最终目标,工业上将 C-Mn 成分碳素钢的晶粒尺寸细化到 1 μm,将 C-Mn 成分碳素钢的性能由 400 MPa 级提高到 800 MPa 级别,并将工业生产的超细晶粒钢应用到建筑、桥梁、汽车和管线等领域。研制的高氮 TiN 型钢由于 HAZ 具有优良的综合性能,将被广泛地应用到需要进行大线能量焊接的船板、沿海结构和建筑结构等领域。耐腐蚀钢计划从两个方面进行研究:(1)降低损害耐腐蚀性能的有害元素含量,同时通过细化晶粒保证钢的力学性能;(2)通过晶粒细化进一步提高钢的强度水平,以满足未来建筑和桥梁结构的需求^[11]。

中国在“新一代钢铁材料重大基础研究”项目(国家 973 项目)的研究中,形成了一批具有自主知识产权关键技术,如形变诱导铁素体相变、弛豫析出控制相变以及针状铁素体组织细化等。国家在 863 项目等中安排了一系列后续开发项目:如 863 产业化技术项目“低成本,高性能超细组织结构钢系列”课题。今后研究的重点是:将取得的具有自主知识产权的关键技术进行产业化,同时解决工业化生产过程中的关键设备、技术问题,实现低合金钢的工业化生产,形成年产几十万吨厚度在 4~30 mm 范围的强度为 600~800 MPa 新一代钢的生产能力,以满足国民经济的需要,实现强度和寿命翻倍的目标。同时由钢铁研究总院等多家发起组织的“先进钢铁材料技术国家工程研究中

心”已启动,将进一步推进超细晶粒钢成果的工程化和产业化。

3 结语

国内外 800 MPa 级超细晶粒钢以及相关技术的研究发展,已将传统的钢铁材料发展为“高性能和低成本相统一的先进钢铁材料”。随着社会经

济的迅速发展以及能源、环保问题的日益突出,采用超细晶强韧化技术,实现钢铁材料的高强化、高寿命、低成本将成为今后先进钢铁材料研究的方向,为了推进超细晶粒钢的产业化和工程化,钢铁企业需要与车辆、桥梁和建筑等领域密切配合,以促进超细晶粒钢的开发、生产和应用。

参考文献

- Nagai K. An Introduction of New Organization for Advanced Steel Research at NIMS, The Sino-Japan Seminar on Advanced Steels, Beijing, 2002, 1
- Choo W Y. Present Developing Status of High Performance Steel in Korea (HIPERS-21 Project), Workshop on New Generation Steel, The Chinese Society for Metals, Beijing, 2001, 16
- Weng Yuqing. New Generation of Iron and Steel Material in China, 新一代钢铁材料重大基础研究论文集(上册). 北京, 2000, 1
- 长井寿. 向 800 MPa 级铁素体-珠光体焊接结构钢挑战. 《高洁净度超细晶微合金化高强度高韧钢》文集 1. 北京: 钢铁研究总院, 1998: 34
- Kotobu Nagai. State-of-The-art of 800 MPa Steel Project in Japan. Workshop on New Generation Steel, The Chinese Society for Metals, Beijing, 2001, 8
- Kotobu Nagai. The State of the Arts of the Ultra-Steel Project, 7th Workshop on the Ultra-Steel. Requirements from New Design of Constructions, Japan, 2003, 23
- Kotobu Nagai. Progress in Metallurgy for Ultrafine Grained Steels in Japan-STX21. 構造材料研究センタープログレヌレポヘト超鐵鋼プロツエウト第 I 期總括, 物質材料研究機構, 平成 13 年度. 31
- Reisuke Ito, Chiaki Shiga, Yoshiaki Kawaguchi, et al. Controlling of the Softened Region in Weld Heat Affected Zone of Ultra Fine Grained Steels. 構造材料研究センタープログレヌレポヘト超鐵鋼プロツエウト第 I 期總括, 物質材料研究機構, 平成 13 年度. 115
- Tsukamoto S, Kawaguchi I, Otani T, et al. Formation Mechanism and Suppression of Welding Defects in 20 kW CO₂ Laser Welding. 構造材料研究センタープログレヌレポヘト超鐵鋼プロツエウト第 I 期總括, 物質材料研究機構, 平成 13 年度. 109
- Akihiko Ohta, Osamu Watanabe, Kazuaki Matsuoka, et al. Fatigue Strength Improvement of Box Welded Joints by Using Low Transformation Temperature Welding Material. 構造材料研究センタープログレヌレポヘト超鐵鋼プロツエウト第 I 期總括, 物質材料研究機構, 平成 13 年度. 120
- Choo Wung Yong. First Stage Achievement of HIPERS-21 Project and Plan of Second Stage. Second International Conference on Advanced Structural Steels, Shanghai, 2004, 23
- Han Dong. Deformation Induced Ferrite Transformation in Microalloyed Steels, Workshop on New Generation Steel, The Chinese Society for Metals, Beijing, 2001, 41
- 翁宇庆. 超细晶钢-钢的组织细化理论与控制技术. 北京: 冶金工业出版社, 2003: 72, 303, 333, 11, 100, 111
- 尚成嘉, 杨善武, 王学敏, 等. RPC 对 800 MPa 低合金高强度钢的影响. 北京科技大学学报, 2002, 24(2): 129
- 王学敏, 杨善武, 尚成嘉, 等. 贝氏体组织细化的 RPC 工艺参数优化. 北京科技大学学报, 2002, 24(2): 173
- 王学敏, 尚成嘉, 杨善武, 等. 组织细化的控制相变机理研究. 金属学报, 2002, 38(6): 661
- 王学敏, 尚成嘉, 杨善武, 等. 高强度低碳贝氏体钢的工艺与组织细化. 金属学报, 2003, 39(10): 1019
- 尚成嘉, 杨善武, 王学敏, 等. 新颖的贝氏体/铁素体双相低碳微合金钢. 北京科技大学学报, 2003, 25(3): 288
- Han Dong. Deformation Induced Ferrite Transformation in Microalloyed Steels, Workshop on New Generation Steel, The Chinese Society for Metals, Beijing, 2001, 41
- Han Dong, Liu Qingyou, Yang Zhongmin, et al. Ultrafine Grained Steels and Their Characteristics, Second International Conference on Advanced Structural Steels, Shanghai, 2004, 47
- 王仪康, 杨柯, 单以银, 等. 高压输气管线用钢. 焊管, 2002(1): 1
- 赵明纯, 单以银, 杨柯, 等. 管线用超低碳钢中针状铁素体的形成及强韧化行为. 材料研究学报, 2002(6): 619
- 赵明纯, 肖福仁, 单以银, 等. 超低碳针状铁素体管线的显微特征及强韧性行为. 金属学报, 2002, 38(3): 283
- 赵明纯, 单以银, 杨柯, 等. 显微组织对管线钢抗硫化物应力腐蚀开裂的影响. 金属学报, 2001, 37(10): 1087
- 赵明纯, 单以银, 杨柯, 等. 控制热加工下管线钢中针状铁素体的形成. 金属学报, 2001, 37(8): 820
- 田志凌, 何长红, 张晓牧, 等. 400 MPa 级超细晶粒钢的焊接. 焊接学报, 2002(6): 1
- 马成勇, 田志凌, 杜则裕, 等. 超低碳贝氏体钢及其焊接特性. 钢铁, 2002, 37(6): 68
- Ma Chengyong, Tian Zhiling, Du Zeyu, et al. Study on the Sensitivity of ULCB Deposited Metal to Cooling Rate. Second International Conference on Advanced Structural Steels, Shanghai, 2004, 1050
- Liu Jibin, Hu Lunji, Wang Yutao, et al. Effect of Welding Heat Input on Microstructure and Mechanical Properties of the Welding Affected Zone of 800 MPa Grade Ultra Fine Microstructure Steel. Second International Conference on Advanced Structural Steels, Shanghai, 2004, 979
- Zhao Lin, Zhang Xudong, Chen Wuzhu, et al. Microstructure and Mechanical Properties of Laser Welded HAZ of 800 MPa Grade RPC Ultra-fine Microstructure Low-alloy Steel. Second International Conference on Advanced Structural Steels, Shanghai, 2004, 974
- 张旭东, 王成, 陈武柱, 等. CO₂ 激光深熔焊热循环及其对焊接接头组织性能的影响. 应用激光, 1999(5): 272
- Kotobu Nagai. Second Phase of Ultra Steel Project at NIMS. Second International Conference on Advanced Structural Steels, Shanghai, 2004, 15

宋立秋(1964-), 女, 1985 年沈阳大学毕业, 从事冶金新产品开发和材料研究。