

# 大线能量焊接用钢的研究概况

李 敏, 郑香增

(济南钢铁股份有限公司 技术中心, 山东 济南 250101)

**摘 要:** 介绍了单面埋弧焊、气电立焊以及电渣焊3种在钢制结构制造行业应用最为广泛的大线能量焊接技术。针对大线能量焊接技术的大线能量、高自动化、强迫成型的特点, 指出大线能量焊接用钢开发的关键技术是降碳、增锰、加钛、精确控制Ti/N比的成分设计及微合金化, 优化冶炼工艺, 加强热影响区中细小针状铁素体形成的组织控制和控冷中的板形控制, 配套焊接工艺优化及焊材的研究等。

**关键词:** 大线能量焊接用钢; 热影响区 (HAZ); 韧性; 针状铁素体 (AF)

中图分类号: TG142 文献标识码: A 文章编号: 1004-4620 (2008) 03-0008-05

## Research Survey of High-heat Input Welding Steels

LI Min, ZHENG Xiang-zeng

(The Technology Center of Jinan Iron and Steel Co., Ltd., Jinan 250101, China)

**Abstract:** This paper introduced three high-heat input welding technologies, that is, one-side submerged arc welding, electrogas arc welding and electroslag welding, which are used most abroad at steel structure manufacturing industry. Contraposing the characteristics of high-heat input, automatic, forced molding of high-heat input welding technologies, authors pointed out that the composition design and microalloy of reducing carbon, increasing manganese and optimizing Ti/N; optimizing smelting process; the microstructure controlling which accelerates the forming of thin AF in HAZ; plate shape controlling in controlled cooling; the study of compatible welding process and welding materials are pivotal technologies that should be used on the research and development of high-heat input welding steels.

**Key words:** high-heat input welding steel; hest affecting zone (HAZ); toughness; acicular ferrite (AF)

## 1 前 言

单面埋弧焊、气电立焊及电渣焊等大线能量焊接技术因其熔敷效率高、焊接速度快、焊接质量好、节约能源、操作方便且易于自动化等优点, 成为现代钢制结构制造行业中应用最为广泛的高效焊接技术。以往钢材在焊接施工中的焊接线能量 $\geq 50$  kJ/cm即可称之为大线能量焊接, 而目前资料显示<sup>[1]</sup>, 气电立焊大线能量焊接的实际焊接线能量甚至已超过500 kJ/cm。在如此大的焊接线能量下, 传统的低合金高强钢 (HSLA) 的热影响区 (HAZ) 组织将急剧长大, 焊接部位的强度和韧性将有较大的下降, 易产生焊接冷裂纹问题, 给大型钢结构的制造带来困难。另外, 对于传统的热机械轧制 (TMCP) 技术, 随着钢板强度的提高和厚度的增加, 必须提高碳当量 (Ceq), 这是焊接冷裂纹敏感性等焊接性能和焊接部位韧性恶化的又一因素。开发适于大线能量焊接, 同时具有高强度、低焊接裂纹敏感性的钢材是国内外众多钢铁企业品种钢开发的重要课题。

## 2 大线能量焊接技术

### 2.1 单面埋弧焊

单面埋弧焊技术是采用较大的焊接电流 (1 000 A左右), 在背面用衬垫强迫成型条件下, 将焊件一次焊透从而获得双面焊缝的一种焊接工艺<sup>[2]</sup>。根据所用衬垫的不同, 单面埋弧焊技术又可分为焊剂铜衬垫法

(FCB法)和焊剂垫法(RF法)。FCB法是在坡口背面放铜板,铜板之上均匀地铺1层焊剂,利用通气软管等简单的上升机构将铜板压紧在坡口背面,只在正面焊接1道,背面也能形成焊道。FCB法原理见图1。RF法是将含有热硬化性树脂粉末的焊剂放入皮带式或槽型的RF装配架内上层,其下部是装有铺底焊剂的焊剂袋,再下部是膨胀用的通气软管,依靠膨胀将焊剂压紧在坡口背面,同样是正面焊接一道,背面也能形成焊道。RF法原理见图2。单面埋弧焊技术可应用于船舶、钢结构、桥梁等钢板的焊接。

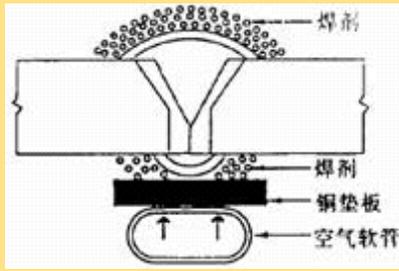


图1 FCB法原理示意图

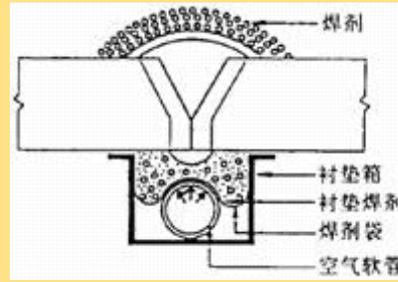
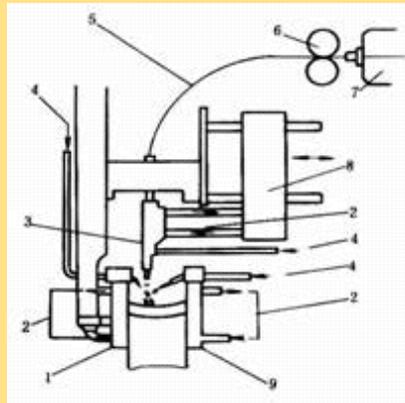


图2 RF法原理示意图

## 2.2 气电立焊

气电立焊是采用自动控制上升系统、配用专门的药芯焊丝、以 $CO_2$ 或 $Ar+O_2$ 气体保护进行自动单面焊双面一次成型的高效大线能量焊接技术<sup>[3]</sup>,其工艺过程稳定、操作简便、焊缝质量优良,生产效率比手工电弧焊高10倍以上。气电立焊多用于大型石油储罐、高炉、巨型船舶的大立缝焊接,其原理如图3所示。



1—水冷挡块; 2—水; 3—焊枪; 4—保护气体 ( $CO_2$ ,  $Ar+O_2$ ); 5—导丝管; 6—送丝滚轮;  
7—焊丝矫直机构; 8—摆动器; 9—水冷滑块

图3 气电立焊原理示意图

## 2.3 电渣焊

电渣焊是利用电流通过导电的液体熔渣所产生的电阻热使金属熔合的一种大线能量熔焊方法<sup>[4]</sup>。为了保持熔池形状,必须辅以铜冷滑块(内通冷却水)强制焊缝成形。电渣焊的热源来自焊丝自身的电阻热和渣池热,渣池最高温度达 $2\ 000\ ^\circ C$ 左右,渣池内产生剧烈的涡流,使温度比较均匀,从而使工件边缘熔化。电渣焊的原理如图4所示。

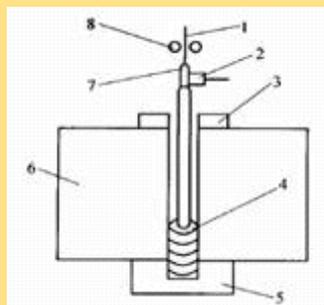


图4 电渣焊原理示意图

### 3 大线能量焊接用钢开发的关键技术

大线能量、高自动化、强迫成型是目前大线能量焊接技术都具有的突出特点。随着高效率的大线能量焊接技术在工程中的大量应用，奥氏体晶粒粗化倾向和韧性损失成为影响材料使用性能的关键问题<sup>[5]</sup>。为了适应大线能量焊接技术自动化程度高和焊缝背面强迫成型的要求，高精度的板形控制也是大线能量焊接用钢生产的难点之一。焊接HAZ奥氏体晶粒粗化和韧性损失的影响因素众多，材料的合金设计，纯净度，冶金生产过程，析出相类型及其成分，形态和尺寸、分布等都有不同程度的影响。大线能量焊接用钢的高精度板形控制与控冷中的板形控制工艺有很大关系。本研究综合国内外大线能量焊接用钢研究成果，重点对成分设计与微合金化、冶炼工艺、组织控制及控制冷却中的板形控制、大线能量焊接工艺优化及配套焊材研发等大线能量焊接用钢开发的关键技术进行阐述。

#### 3.1 成分设计

传统的大线能量焊接用钢成分设计的基本思路是，降C、增Mn、加Ti。碳含量降到0.10%以下，甚至<0.05%，或更低，可以显著细化M-A组元，从而改善大线能量焊接HAZ的韧性，降低钢的焊接裂纹敏感性。对于因降低碳含量造成的部分强度损失，可以通过增加Mn含量来弥补，而且Mn生成碳化物的能力弱于Mo、Nb等元素，也可使得大线能量焊接HAZ韧性明显改善。大线能量焊接用钢的成分设计随钢板厚度增加变化很小，一般只是增加Mn含量，而C、Nb、V等元素的含量基本不变，主要通过TMCP工艺的变化来确保钢板强度不随厚度增加而降低。Ti的添加，特别是Ti/N比例的精确控制是大焊接线能量用钢与传统HSLA的显著区别之一。

近年来日本钢铁界在大线能量焊接用钢的开发方面做了许多新的尝试。如日本新日铁公司应用细微粒子开发HAZ高韧性技术HTUFF<sup>[6]</sup> (Super High HAZ Toughness Technology with Fine Microstructure Imparted by Fine Particles)。该技术是为实现良好的大线能量焊接HAZ韧性，针对490~590 MPa级钢板大线能量焊接化、高强度厚板化和高韧性要求而开发的，目的是强力抑制熔合线附近HAZ的奥氏体晶粒长大，使高温稳定性氧化物在钢中得以细微分散，通过奥氏体晶粒的显著细化，使HAZ组织细微化。其重点是从工业上确立在钢中适当加入Mg或Ca，使几十至几百纳米的氧化物或硫化物细密分散。

#### 3.2 微合金化

采取最佳微合金化处理，即添加必要的微合金元素 (Ni、Cr、Mo、Nb、V、Ti、B等)，是确保大焊接线能量钢在低C的前提下仍具有高强度 ( $\sigma_s \geq 490$  MPa,  $\sigma_b \geq 610 \sim 730$  MPa) 的主要实现途径之一<sup>[7]</sup>。同时通过TMCP工艺的综合运用，以其中一些元素的碳氮化物或氧化物为核心，形成很小的析出相，于钢的固相阶段析出，钉扎晶粒在大线能量焊接高温下的长大。

添加Ni后，基材和HAZ的低温韧性都明显提高。不同的合金成分下，随着Cr量的增加AF有不同程度的增加。Mo在降低贝氏体开始转变温度 ( $B_s$ ) 及避免铁素体相变的最低冷却速度方面是最有效的元<sup>[8]</sup>。Nb、V的添加能在钢中产生有效的细晶强化、析出强化和沉淀强化作用。另外钢中加入微量 (0.01%) 稀土元素 (RE)，可降低焊接氢致裂纹敏感性，但过多时，将在钢中产生RE夹杂或RE偏聚。O、S、Ca作为晶内铁素体形核核心之一的 (Ca、Mn) S系非金属夹杂物是抑制产生板条铁素体和上贝氏体的物质，可以细化晶内组织，提高HAZ的韧性，但是为了增加晶内铁素体的形核机率，O、S及Ca必须严格控制。

添加Ti元素虽然对高C钢种的韧性有害，但可以改善低碳钢种HAZ的韧性<sup>[9]</sup>，其机理是：TiN颗粒 (见图5) 在1 360 °C加热时，仍不易发生分解，可起到抑制奥氏体晶粒长大的作用，因此仍保持较细的奥氏体晶粒尺寸。模拟焊接过程钢加热到不同温度时、不同析出相对奥氏体晶粒尺寸的钉扎作用如图6所示<sup>[10]</sup>，可见TiN钉扎效果最好。另外大量的第二相粒子TiN还有助于促进AF组织在较高温度时转变，从而促进AF和粒状贝氏体的形成，抑制侧板条贝氏体和M-A组元大量产生。当微Ti钢中的Ti/N值接近于理想化学配比时，即TiN粒子是严格按1:1的Ti、N原子比析出的，相应于重量百分比约为3.42，这时TiN粒子更加细小且分布弥散

[11]。Ti还能降低大焊接线能量用钢的淬硬倾向。另外，日本的研究人员还发现氧化钛比氮化钛具有更强的高温稳定性，对钉扎晶界，阻止晶粒长大更为有效（即HTUFF技术），使钢种承受的焊接线能量大大提高。

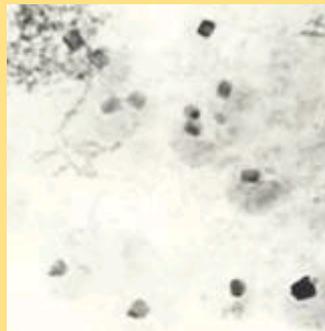


图5 TiN析出相形貌图 100 000×

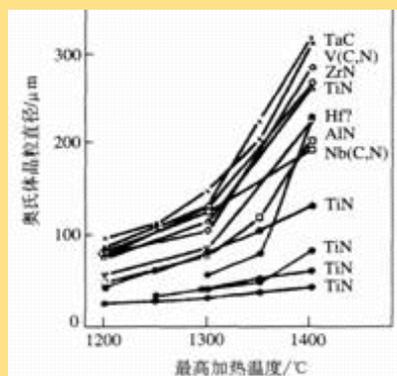


图6 不同析出相对高温奥氏体的钉扎作用

B的使用也是形成晶内铁素体的一种方法，由于大线能量焊接的焊缝区域的冷却速度较慢，钢板添加B在冷却过程中以BN析出，奥氏体-铁素体相变时BN在晶粒内部能作为铁素体晶核，从而起到提高HAZ韧性的目的。添加B元素还可提高大焊接线能量用钢的淬透性，提高钢的屈服强度及抗拉强度，但B含量过高，将导致晶界开裂。据文献<sup>[12]</sup>，日本JFE公司在其大线能量用钢HITEN610E中采取了不添加B元素的微合金设计。

### 3.3 冶炼工艺

大线能量焊接用钢的冶炼需综合运用铁水预处理、CAS/LF/VD真空精炼、全程保护浇铸、电磁搅拌或铸坯末端轻压下等技术，确保钢坯钢质纯净、无内部及表面缺陷。冶炼用废钢应严格控制质量，若废钢中混有Sn、As、Sb等有害元素，将很难通过氧化排除，对钢的韧性及焊接性极为不利<sup>[13]</sup>。冶炼中加强Ti铁加入时间及回收率的控制，确保Ti/N合理。脱氧剂的选用除Al外，加强使用CaSi，促使夹杂物球化，同时控制夹杂物性能和形态。连铸工序合理控制拉速，加大冷却速度，促进TiN等粒子的析出。

表1为宝钢、鞍钢、武钢、日本JFE为中国国家石油储备库工程专门生产的21.5 mm厚大线能量焊接石油储罐用钢典型成分。可以看出各钢厂大线能量焊接用钢的生产都采取了低C、高Mn、微Ti，同时添加其他系列微合金元素的成分设计思路，在保证钢适应大线能量焊接的同时，焊接裂纹敏感性指数（Pcm）≤0.20，表明钢的焊接冷裂纹敏感性极低。几家钢厂在大线能量焊接用钢的成分设计中都取消了B的添加，Cr的含量也极低，原因是Cr、B均为强淬透性元素，极易增加钢的淬硬倾向，从而使得钢的Pcm值虽然不高，但HAZ的HV10max常超出330，超出传统经验认为的600 MPa级钢板焊接后不产生根部裂纹的HAZ最高硬度，使其焊接裂纹敏感性大大增加<sup>[14]</sup>。

表1 宝钢、鞍钢、武钢、JFE生产的石油储罐用大线能量焊接用钢的典型成分

钢厂	牌号	C/%	Si/%	Mn/%	P/%	S/%	Cu/%	Ni/%	Cr/%	Ti/%	Mo/%	V/%	Nb/%	Al/%	Pcm
宝钢	B610E	0.08	0.22	1.38	0.007	0.003	0.01	0.23	0.04	0.011	0.12	0.041	0.028	0.026	0.18

鞍钢	AH610E	0.07	0.25	1.56	0.007	0.002	0.01	0.26	0.05	0.011	0.25	0.037	0.046	0.050	0.18
武钢	WH610D2	0.09	0.25	1.40	≤0.02	≤0.01	1.2			0.10	0.05		0.015	0.19	
JFE	HITEN610E	0.09	0.20	1.37	0.010	0.002	≤0.30						0.18		

注:  $P_{cm} = C + Si/30 + Mn/20 + Cu/20 + Ni/60 + Cr/20 + Mo/15 + V/10 + 5B$

### 3.4 组织控制

大线能量焊接用钢利用连续在线TMCP控制工艺,在大大降低 $C_{eq}$ 的情况下使强度保持高水平。HAZ的常见组织为先共析铁素体、魏氏组织、珠光体、上贝氏体、下贝氏体、粒状贝氏体、板条马氏体和片状马氏体等,都是连续冷却转变的组织。由于钢板化学成分的不同以及焊接线能量的变化,具体的金相形态都有变化。根据文献<sup>[15]</sup>,对大线能量焊接HAZ保持高强度、高韧性的主要贡献是AF(见图7)。AF是含有高密度位错的组织形态,因为AF相变温度处于晶界铁素体与贝氏体之间,转变时无需铁原子的重新排列,而且与奥氏体保持共格或半共格,并遵循N-W或K-S关系,这种相变往往使AF中产生很大的应变和位错密度,加之其位相杂乱,能够较好地阻止裂纹扩展<sup>[16]</sup>。因此,以AF为主的HAZ具有较高的韧性。

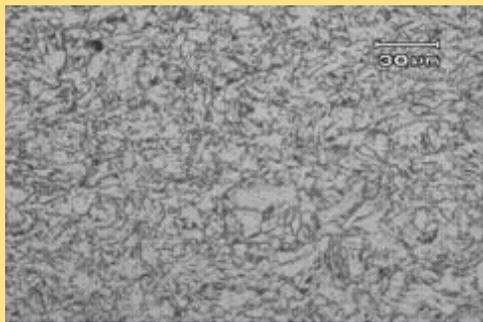


图7 21mm厚、回火状态(1/4处)AF组织

目前,虽然关于AF的形核机理的论说较多,但一致公认的是,无论是钢板,还是焊缝金属中,针状铁素体是以晶内夹杂物为形核核心形成的<sup>[17]</sup>。Ti-B系钢针状铁素体形核机理主要学说有以下3种:1)形核夹杂物与基体和针状铁素体之间具有良好的共格关系,从而降低界面能,使针状铁素体很容易从析出相上形核<sup>[18]</sup>。2)在高应变区的夹杂物上形核<sup>[19]</sup>。贫Mn区或/和贫B区、夹杂物与基体之间热膨胀系数不同,造成高应变区,应变能提供形核能。3)夹杂物提供的高能惰性表面,针状铁素体在夹杂物表面上形核,从而降低形核的势垒<sup>[20]</sup>。但夹杂物在AF形成中的作用还远没研究清楚,甚至有些机理是相互矛盾的。

### 3.5 控冷中的板形控制

由于大线能量焊接过程自动化程度高、强迫成型,各种参数都是提前设定,灵活性差,对焊接坡口尺寸、错边量的稳定性要求严格,以免焊缝背面与衬垫材料密封接触不良,而产生咬边、焊瘤、未熔合等缺陷,因此,大线能量焊接用钢的板形精度要求极高。大线能量焊接用钢轧后冷却速度高达20~30 °C/s,最终冷却温度多在450 °C以下,由于冷却速度大,矫直温度低,如何精确控制板形也是大线能量焊接用钢生产的一大难题。目前大线能量焊接用钢控制冷却中板形控制多综合运用水凸度控制技术,头尾遮蔽、边部遮挡技术,喷嘴高度调节技术,辊道速度精准控制技术,大范围的水流量调节及下水管阻尼技术等,同时,配备强力矫直机解决钢板终冷温度低、钢板变形抗力大的问题,保证大线能量焊接用钢板的板形精度。

### 3.6 大线能量焊接工艺及配套焊材

保证焊缝的高强度和高韧性是大线能量焊接工艺优化及配套焊材研发的工作重点。在优化大线能量焊接工艺方面,电渣焊除采用窄间隙焊、提高焊接电流和焊接速度以及改善焊缝的冷却速度等措施来改善和细化焊缝晶粒外,还采用了优化电渣焊焊接结构品质的新工艺—振动焊接<sup>[21]</sup>(vibratory weld conditioning—VWC),在焊接过程中施加机械振动外场,利用焊接热场及振动应力在金属凝固-结晶过程细化晶粒和减小凝固过程应力,使焊接接头的质量明显优化。文献<sup>[22]</sup>指出,大线能量MAG焊时,通过焊材中添加合金元素如Ti、Al等,并伴有保护气氛中氧的适量介入(≤4%),有助于在焊接冶金过程中诱发第2

相粒子在HAZ粗晶区 (CGHAZ) 产生复杂氧化物形核质点, 生长出细晶AF, 使焊缝 (焊接接头) 具有高强度高韧性的性能。单面埋弧焊工艺优化方面的研究文献及报道较少。

金属药芯焊丝合金成分调整方便, 焊接效率高, 是大线能量焊接用钢焊材的发展方向。大线能量焊接所用的焊材设计的目的在于获得以AF为主的焊缝, 因此焊丝中一般都含有Ti和B。表2为600 MPa级大线能量焊接石油储罐用钢焊材DWS-60G焊缝熔敷金属的典型成分和性能。在大线能量焊接时焊材中的B能向HAZ扩散, 扩散的B可与母材中因高温分解出的N结合, 增加晶内的铁素体晶核, 从而降低了钢中的游离N。焊接后冷却速度较小时, B的扩散距离将增加, 因此对厚件的大线能量焊接更为有效。B含量有一个最佳值, 过高或过低都对熔敷金属的韧性不利。焊丝药芯配方中的Ti、B加入量应适当配合, 用B来抑制先共析铁素体, 使之在较低温度下发生奥氏体→铁素体相变, 用Ti来得到大量的相变核心, 使相变温度降低, 得到以AF为主的组织, 从而改善了熔敷金属的韧性<sup>[23]</sup>。获得高韧性时, Ti、B加入量较少, 且其适应范围较窄, 故应进行严格的控制, 同时只有Ti、B含量适当时, 才有利于韧性的提高<sup>[24]</sup>。

表2 DWS-60G焊缝熔敷金属的典型成分和性能

化学成分/%									熔敷金属力学性能			
C	Si	Mn	P	S	Ni	Mo	Ti	B	$\sigma_s$ /MPa	$\sigma_b$ /MPa	$\delta$ /%	$A_{kv}$ (-20℃横向) /J
0.08	0.32	1.67	0.010	0.008	0.71	0.25	0.03	适量	520	650	26	65

## 4 结 语

适应大线能量焊接是厚板的发展趋势, 单面埋弧焊、气电立焊及电渣焊等大线能量焊接技术必将应用越来越广泛。HAZ奥氏体晶粒粗化倾向和韧性损失依旧是影响大线能量焊接用钢使用性能的主要问题。借鉴国外特别是日本的先进技术, 不断提高我国中厚板企业的冶炼和轧制控制水平, 加大大线能量焊接用钢及其配套焊材组织在大线能量焊接时的变化机理研究是今后努力的方向。

### 参考文献:

- [1] 郭桐. 优质大线能量焊接用高强船板的开发[J]. 宽厚板, 2005, 11 (3) :42-47.
- [2] 贾贵忱, 吴执中, 吕纯杰, 等. 单面埋弧焊双面成形的焊接缺陷及防止措施[J]. 焊接, 1995 (8) :21-22.
- [3] 季伟明. 高效焊接技术在10万m<sup>3</sup>油罐施工中的综合应用[J]. 石油工程建设, 2000 (6) :16-19.
- [4] 姜焕中. 电弧焊及电渣焊[M]. 北京:机械工业出版社, 1995.
- [5] 史弼, 曹涵清, 郭君飞. Nb-Ti微合金钢中含氮量对焊接粗晶热影响区韧性的影响[J]. 宝钢技术, 2001 (2) :28-31.
- [6] 兕岛明彦. 应用微细粒子开发焊接热影响区高韧性技术HTUFF[J]. 世界钢铁, 2004 (6) :55-58.
- [7] 王蕾, 陈晓, 习天辉. 大线能量低焊接裂纹敏感性钢的研究[J]. 材料导报, 2002, 16 (5) :24-26.
- [8] 马成勇, 田志凌, 杜则裕, 等. 超低碳贝氏体钢及其焊接特性[J]. 钢铁, 2002, 37 (6) :68-73.
- [9] 张朝生. 建筑用大线能量焊接高强度钢板的开发[J]. 宽厚板, 2002, 8 (6) :45-46.
- [10] S Kanazawa. Improved toughness of HAZ by fine TiN particles and development of a steel for large heat input welding[J]. Tetsu-to-Hagane, 1975, 61 (11) :2589-2603.
- [11] 章小许, 李晓燕. 大焊接线能量石油储罐用钢的开发与应用[J]. 压力容器, 2003, 20 (1) :16-19.
- [12] 林谦次, 高宏适. 储罐、压力容器用高性能钢板[J]. 鞍钢技术, 2006 (1) :57-62.
- [13] 郭桐, 韦明, 侯彩霞, 等. 改善大线能量焊接韧性的冶炼技术研究[J]. 宽厚板, 2007 (2) : 19-21.
- [14] 陈晓, 卜勇, 张莉勤, 等. 大线能量低焊接裂纹敏感性钢性能及组织研究[J]. 钢铁研究, 2002 (6) : 21-25.
- [15] 张莉芹, 袁泽喜, 陈晓, 等. 大线能量低焊接裂纹敏感性钢的焊接 (一) ——热影响区强韧性机理研究[J]. 焊接技术, 2002, 19 (7) :29-34.
- [16] R A Farrar. Acicular ferrite in carbon-manganese weld metals: an overview[J]. J. Mat. Sci., 1987 (22) : 3812-3820.
- [17] 习天辉, 陈晓, 袁泽喜. 大线能量焊接用钢热影响区组织和性能的研究进展[J]. 特殊钢, 2003 (5) : 1-5.

- [18] Gregg J M, Bhadeshia H K D H. Acta metal[J].Mater, 1994 (42) : 3321.
- [19] Kohichi Yamamoto, Toshiei Hasegawa, et al. Effect of Boron on Intra-granular ferrite formation in Ti-Oxide Bearing steels[J].ISIJ International, 1996, 36 (1) :80.
- [20] Tae-Kyu LEE, Kin H J, Kang B Y, et al. Effect of inclusion size on the nucleation of acicular ferrite in welds[J].ISIJ International, 2000, 40 (12) :1260.
- [21] 卢庆华, 陈立功, 倪纯真, 等. 振动焊接技术在大型焊接构件中的应用[J]. 焊接学报, 2007 (2) :92-94.
- [22] 栗卓新, 刘秀龙, 李虹, 等. 高强钢焊材及焊接性的国内外研究进展[J]. 新技术新工艺, 2007 (5) :16-18.
- [23] 胡强, 熊第京, 史耀武. 微量元素对自保护药芯焊丝熔敷金属韧性的影响[J]. 焊接, 2002 (2) :15-18.
- [24] 温家伶, 王强, 陈明清, 等. 自保护药芯焊丝研究的现状[J]. 武汉理工大学学报 (交通科学与工程版), 2002, 26 (6) : 733-736.
- 

[返回上页](#)