

武钢大线能量焊接系列钢的研发进展

陈晓, 卜勇, 习天辉

(武钢研究院, 湖北 武汉 430080)



陈晓

摘要: 提出了氧氮化物和氧硫化物冶金新思路、新原理, 发明了高熔点第二相质点诱导相变技术, 突破了钢铁材料不能承受大线能量焊接的难关, 从技术背景、冶金原理、技术关键及应用情况等方面详细介绍了武钢近年来自主研发的大线能量低焊接裂纹敏感性钢、大线能量焊接高强度钢、大线能量焊接低温钢、大线能量焊接耐火耐候钢、大线能量焊接抗震钢等系列钢种。该系列钢的集成技术及产业化应用, 为我国该系列钢的需求提供了技术支撑, 有效带动了我国有关钢厂对高性能高技术含量钢材的研发和生产, 结束了大线能量焊接钢长期依赖进口并受制于人的历史。

关键词: 大线能量焊接钢; 低温钢; 耐候钢; 抗震钢; 冶金原理

中图分类号: TG142 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2011)12-0034-06

Progress on Research and Development of Large Heat Input Welding Steel Series in WISCO

CHEN Xiao, BU Yong, XI Tianhui

(R&D Center, Wuhan Iron and Steel (Group) Corporation, Wuhan 430080, China)

Abstract: In this paper, new ideas and principles of oxide-nitride and oxide-sulfide metallurgy was put forward, the technique of the second phase particles with high melting point which induced phase transformation was invented, thus the technical difficulties of iron and steel materials can not withstand large heat input welding were broken. The new generation series of large heat input welding steel innovated by Wuhan Iron and Steel (Group) Corporation (WISCO) in recent years was introduced on the following aspects including technology background, metallurgy theory, technology characteristics as well as applications. The steels are as follows, large heat input welding steel with low susceptibility to welding crack, large heat input welding steel with high strength, large heat input welding steel with low temperature, large heat input welding steel with fire-resistance & weathering, large heat input welding steel with earthquake-resistance. The integration and industrialization of the steel series provided technical support for the demand of this series steel in China, effectively promoted the research, development and production of high performance and high-tech steels, and ended the long-term history of the dependence on imports of those steels.

Key words: large heat input welding steel; low temperature steel; fire-resistance and weathering steel; earthquake-resistance steel; metallurgy principles

1 前言

大线能量焊接钢是大幅度提高焊接效率的新一代钢种, 其焊接线能量比传统的低合金高强度钢(≤ 35 kJ/cm)提高5~10倍。1996年以前, 国际上仅有日本几家钢铁企业研制了这类钢种, 并严格限制技术输出。当时我国全部依靠进口, 为打破垄断, 武钢从1996年起自主创新开展了该系列钢的研究, 以全新的氧氮化物、氧硫化物冶金新思路、新原理和新方法, 发明了高熔点第二相质点诱导相变等方法, 突破了钢铁材料不能承受大线能量焊接难关, 研发了一系列大线能量焊接的新钢种, 可

承受5~10倍于16Mn钢的焊接线能量, 大幅度提高了焊接效率与工程进度。

武钢大线能量焊接系列钢已全部实现产业化, 广泛应用于压力容器、石油化工、水电及建筑结构等行业, 综合性能达到国际先进和国际领先水平。《武钢大线能量焊接系列钢的技术发明及应用》获2009年国家技术发明二等奖, 实现了武钢零的突破。

2 大线能量焊接钢技术背景

70年代末80年代初, 从造船部门开始, 在石油、化工、水电、城建等许多技术领域, 产品结构日益大型化。与此相应, 在建造这些结构时, 采用焊接效率高的单面埋弧焊、气电焊或电渣焊等大线能量(≥ 50 kJ/cm)焊接方法的趋势也日益增强。为大幅度提高焊接效率,

收稿日期: 2011-08-18

通信作者: 陈晓, 男, 1940年生, 教授, 博士生导师

国外大线能量焊接技术应运而生,为此相应地开发了大线能量焊接用钢。因此,大线能量焊接技术是以造船行业钢板单面焊接技术为契机而提出的一种能确保钢板韧性的焊接方法^[1]。为适应大型构件对厚钢板的强度和韧性不断提高的需要,世界各国已相继开发了一些新型大线能量焊接用建筑钢板^[1-4],并进行了推广应用。

为适应钢结构大型化后提高焊接效率的要求,先后开发出了抗拉强度 490 MPa, 590 MPa 和 780 MPa 级大线能量焊接建筑用钢。如神户制钢的 KST50, KST60 级钢,在 260 kJ/cm 焊接线能量下,热影响区 HAZ 具有良好韧性^[5];JFE 利用 EWEL 技术研制了建筑用高性能抗拉强度 550 MPa 级钢,在粗晶热影响区(CGHAZ)中利用细小的 TiN 细化奥氏体晶粒,同时利用 BN 和 Ca 系夹杂物细化晶内组织的 590 MPa 级钢及抗拉强度 780 MPa 级 JFE-HITEN780LE 钢^[6];新日铁利用 HTUFF 技术研制了抗拉强度 490~590 MPa 级钢和能承受 1 000 kJ/cm 焊接线能量的 780 MPa 级高强度钢等^[7]。

3 武钢大线能量焊接钢的技术原理

鉴于传统的低合金高强度钢(HSLA)焊接时,一般只能承受 35 kJ/cm 以下的线能量,如果采用大线能量(50~400 kJ/cm)焊接会使 HSLA 的粗晶热影响区(CGHAZ)性能(强度、韧性)不可避免地发生恶化,对于大线能量焊接钢研究而言,氧氮化物、氧硫化物冶金的技术关键就在于如何细化粗晶热影响区(CGHAZ)(见图 1)。

武钢大线能量(50~400 kJ/cm)焊接钢创新点如下:

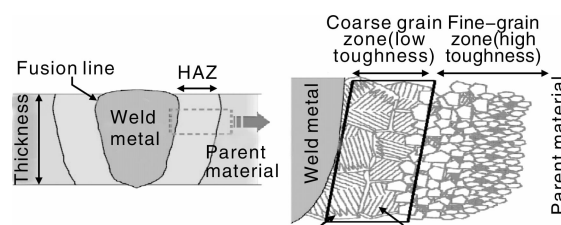


图 1 焊接接头各区部位

Fig. 1 Various parts of the welded joints

(1) 利用变钢中有害夹杂为有利夹杂的思路,提出了与之相匹配的钢中微量元素原子平衡公式: $0.002\ 0 \geq N - Ti/3.4 - B/0.77 \geq 0$ 和 $4.0C + Mn \leq 2.0$;

(2) 发现了微米级高熔点 Ti, Nb 氧氮化物(如 $(TiNb)N$, $(TiNb)_2O_3$)诱导相变细化晶粒的规律,形成了全新的氧氮化物冶金新思路,开发了可承受大线能量(50~200 kJ/cm)焊接的钢种;

(3) 通过在钢中形成弥散分布的纳米级高熔点 Mg, Ca 氧硫化物(如 $(CeCa)_2S_2O_3$),使之在钢水凝固时成为奥氏体形核核心,从而细化晶粒;在焊接时,氧硫化物钉扎粗晶热影响区(CGHAZ)的奥氏体晶界,诱导相变形成大量针状铁素体,从而研制成功了可承受大线能量达 200~400 kJ/cm 焊接的钢种。

4 武钢大线能量焊接系列钢的技术特点

4.1 大线能量焊接系列钢主要技术参数

武钢大线能量焊接系列钢的主要技术参数如表 1 所示。

表 1 大线能量焊接系列钢主要技术参数

Table 1 The main technical parameters of large heat input welding steel

Steel series	Trademark	Tensile test			Impact test	
		R_{el}/MPa	R_m/MPa	$A/\%$	Temperature / $^{\circ}C$	Horizontal A_{KV}/J
Large heat input welding high strength steel	WH610D2	≥ 490	610~730	≥ 17	-20	≥ 100
Large heat input welding fire-resistant and weathering steel	WGJ510C2	≥ 325	510~630	≥ 21	0	≥ 4
Large heat input welding earthquake-resistant building steel	WGJ490D	≥ 345	490~630	≥ 22	-20	≥ 47
	WGJ510D	≥ 390	510~670	≥ 21	-20	≥ 47
Large heat input welding low crack sensitivity steel	WDL610D2	≥ 490	610~730	≥ 17	-20	≥ 80
	WDL610E2	≥ 490	610~730	≥ 17	-40	≥ 80
Large heat input welding low temperature and room temperature steel	WHD4	≥ 300	440~560	≥ 23	-70	≥ 60
	WH530	≥ 370	530~630	≥ 20	-20	≥ 60

4.2 大线能量焊接高强度钢

为了大幅度提高原油储罐用高强钢 WH610D2 的焊接效率,采用最佳的微合金成分设计和氧化物冶金原理,提出了变高强钢中氮、氧化物有害夹杂为有利夹杂的微量元素原子平衡公式,解决了炼钢过程中氮、氧化

物易于偏聚长大问题,使之形成弥散分布的高熔点的第二相质点(如 $(TiNb)N$, $(TiNb)_2O_3$)等。它们不仅钉扎原奥氏体晶界,阻止晶粒粗化,而且在大线能量焊接条件下,作为针状铁素体 AF 的形核核心,在原 A 晶粒内诱导析出细小 AF。这种 AF 具有较大的应变抗力和位错

密度, 且交错排列, 从而抑制了焊接 CGHAZ 晶粒粗化, 保证该种钢可承受大线能量 (50 ~ 200 kJ/cm) 焊接, 同时采取合理的调质热处理工艺, 可使之形成高密度位错多面滑移的强韧性组织结构, 保证其具有高强度、高韧性。



图2 大线能量焊接系列钢 100 kJ/cm 焊接 CGHAZ 典型光学组织

Fig. 2 The typical optical structure of 100 kJ/cm welding CGHAZ of large heat input welding steel

4.3 大线能量低焊接裂纹敏感性钢

大线能量焊接高强度钢 WH610D2 能承受大线能量焊接, 但不具备优异的焊接性, 即焊前仍要预热, 而低焊接裂纹敏感性系列钢 WDL610D/E 则不能承受大线能量焊接, 为此, 在上述 2 个钢种研制成功的基础上, 采用了以下新思路, 设计开发了大线能量低焊接裂纹敏感性系列钢 WDL610D2/E2。

思路一, 采取最佳的微合金化处理, 设计时严格控制 C 含量 ($\leq 0.09\%$) 和焊接裂纹敏感性组成 $P_{cm} = C + Si/30 + Mn/20 + Cu/20 + Ni/60 + Mo/15 + V/10 + 5B$ ($\%$) $\leq 0.20\%$, 使厚度 ≤ 50 mm 钢板, 焊前可不预热或稍加预热就不产生焊接冷裂纹, 厚度 ≤ 38 mm 的钢板焊后可不进行消除应力 (SR) 处理。

思路二, 利用氧化物冶金原理, 通过添加 Nb, V, Ti 等微合金元素, 利用原子平衡公式, 使冶炼过程中形成高熔点的第二相质点, 抑制奥氏体晶粒长大和阻碍 CGHAZ 晶粒粗化。并在大线能量焊接条件下, 高熔点氧化物既能诱导针状铁素体析出, 又能促进 M-A 组元分解, 使 CGHAZ 组织由上贝氏体逐渐转变为以针状铁素体为主。针状铁素体本身较稳定, 不易长大, 具有优良的韧性, 较大的应变抗力和位错密度, 且其位向杂乱, 具有较好的阻止裂纹扩展的能力, 这样就达到了承受大线能量 (50 ~ 200 kJ/cm) 焊接的目的。

思路三, 通过合理的调质热处理工艺, 使其形成高密度位错的强韧化组织结构, 这种组织结构不仅保证该钢板具有高强度 (600 MPa 级), 而且还保证了该钢具有高韧性 ($-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ $A_{kv} \geq 80$ J)。同时已形成的高熔点的氮、氧化物 (TiN , Ti_2O_3) 抑制晶粒粗化, 有效地阻止晶粒长大。

大线能量低焊接裂纹敏感性钢的特性及主要影响因素如图 3 所示。

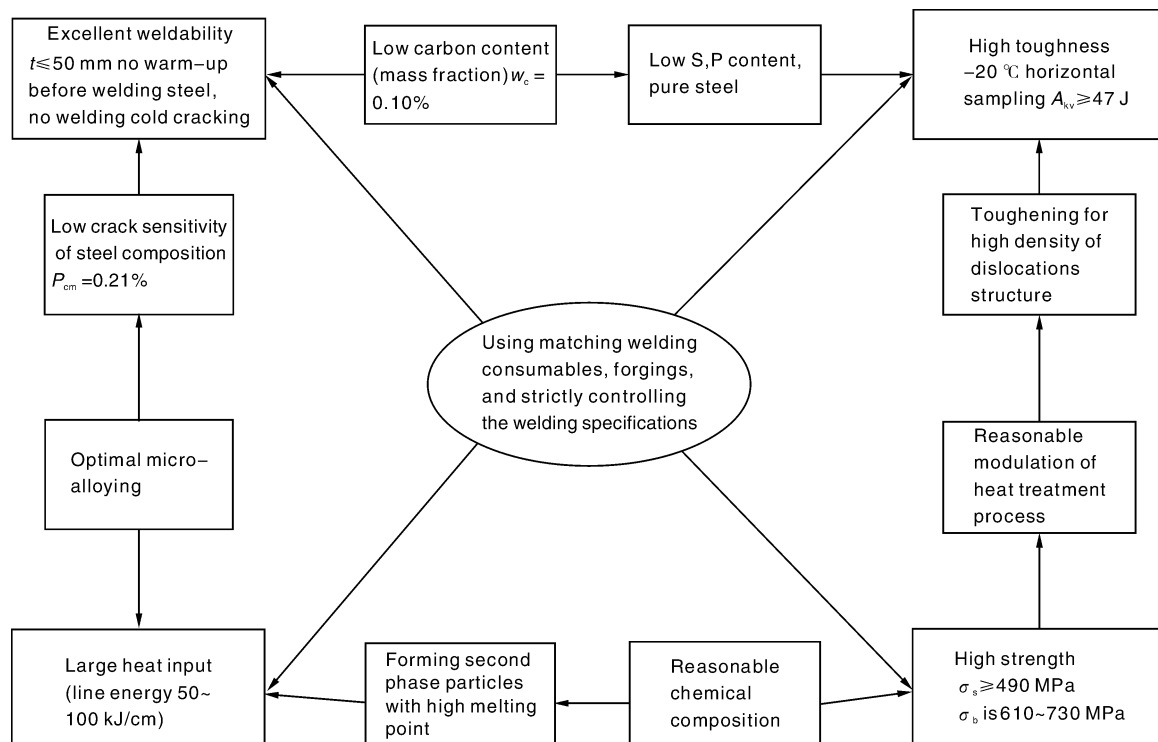


图3 大线能量低焊接裂纹敏感性钢的特性及其主要影响因素

Fig. 3 The characteristics and main factors of large heat input low weld crack sensitivity steel

4.4 大线能量焊接耐火、耐候钢

钢结构有很多优点,但也有致命的弱点,如不耐火(350 ℃就屈服软化),不耐候(在大气下易锈蚀)。为确保高耐火性(600 ℃下屈服强度不低于室温下强度的2/3),在钢中添加 Mo, Cr, V, Nb, Ti 等微量元素,交互形成微细的碳、氮化物,可阻止位错滑移,使材料具有足够的高温屈服强度。为确保高耐候性(耐大气腐蚀性能为普通建筑用钢的4~8倍),可添加抗大气腐蚀元素 Cu, P, Ni, Cr 等,并发挥 Cr, Ti 的双重作用。

提高 HSLA 韧性及焊接性的最佳又经济的手段是降低碳含量,将低碳(碳含量一般为0.03~0.10%,质量分数,下同)乃至超低碳(碳含量一般 $\leq 0.03\%$)作为该项目成分设计的首选。为使材料具有耐火性能,应添加适量的 Mo。Mo 固溶于基体中,能显著提高钢的高温强度,Mo 还能形成微细的碳化物,籍以利用其沉淀强化

来提高高温屈服强度,确保耐火性。但如果 Mo 含量过高,易恶化焊接性和热影响区的韧性,故需控制适量。然而,如果在钢中仅仅单独添加 Mo,在600 ℃的高温下,还很难获得足够的屈服强度,故而还需要添加适量的 Cr, V, Nb 等微量元素,形成稳定的化合物,以提高钢的高温强度。同时采用合理的轧制工艺,形成铁素体—贝氏体组织,这样就能有效地使钢在高温下具有高的屈服强度。为使该钢具有耐候性能,必须添加具有抗大气腐蚀性能的元素,即添加适量的 Cu, P, Cr, Ni 等元素能有效地提高钢的抗大气腐蚀性能。Mo, Cr, Cu, P 等微合金元素虽利于提高耐火性和耐候性,但对钢板焊接性不利,尤其不利于大线能量焊接,因此添加适量的 Ca, Mg, Ce, Nb, V, Ti 等元素,利用多元微合金的交互和叠加作用,可消除 Mo, Cr, Cu, P 等微合金元素对焊接性能的不利影响。并在钢中形成弥散分布的高熔点 Ti, Ca, Mg, Ce 氧、硫化物微细颗粒(见图4,5)。

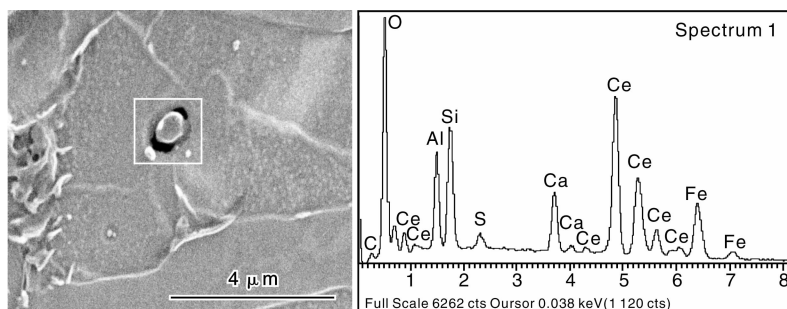


图4 HAZ断口高熔点 Ca-Ce 氧硫化物 SEM 照片及能谱

Fig. 4 SEM images and oxygen sulfide spectrum of refractory Ca-Ce oxide and sulfide in HAZ fracture

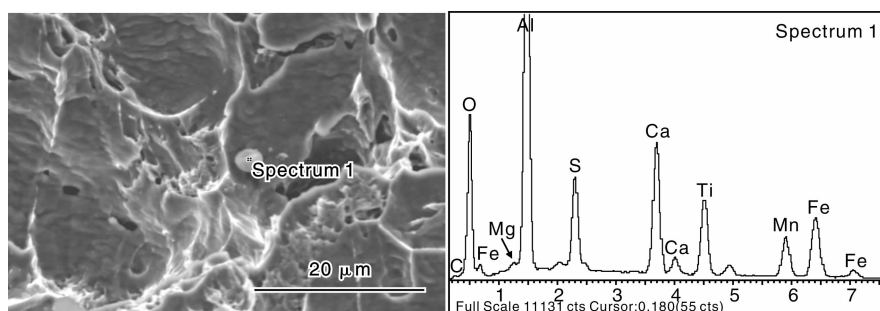


图5 HAZ断口高熔点 Ti-Ca-Mg 氧硫化物 SEM 照片及能谱

Fig. 5 SEM images and oxygen sulfide spectrum of refractory Ti-Ca-Mg oxide and sulfide in HAZ fracture

利用这些高熔点氧、硫化物微细颗粒,可使之成为奥氏体形核核心,细化晶粒。焊接时这种微细颗粒还能钉扎 HAZ 奥氏体晶界(见图6)。

与此同时还能在焊接 CGHAZ 诱导 AF 析出,使之转变为以针状铁素体为主。通过上述的设计思路,在兼

顾材料成本的同时,辅以先进的冶炼、轧制和热处理工艺,使该钢种达到同时具有高强度、高韧性、高 Z 向性能、高耐火性能、高耐候性能和承受大线能量(200~400 kJ/cm)焊接性能的目的,并成功地通过了公安部消防研究所的耐火试验和武汉科技大学的耐候试验。

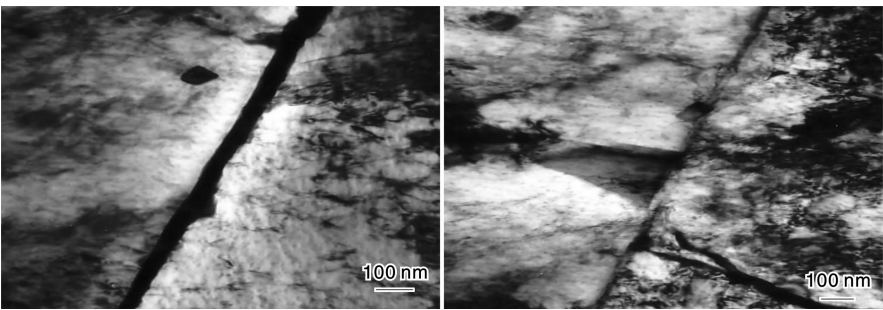


图 6 纳米级第二相质点钉扎奥氏体晶界

Fig. 6 Nano-scale second phase particles pinning austenite grain boundaries

5 国内外同类钢种主要技术参数对比

武钢大线能量焊接钢与当前国内外同类钢种主要技 术参数和实物性能对比见表 2 。

表 2 武钢大线能量焊接钢与当前国内外同类钢种主要技术参数对比

Table 2 The major technical parameters contrast of large heat input welding steel of WISCO and the current domestic and international similar steel

WISCO large heat input welding	Comparison of steel grade	Key technical parameters for comparison
Large heat input welding low crack susceptibility series steel	WISCO 1 WDL610E2 steel Nippon Steel WELTEN610CF steel	Transverse impact toughness -40 ℃A _{KV} ≥47 J Longitudinal impact toughness -20 ℃A _{KV} ≥47 J
Large heat input welding high strength steel	WISCO WH610D2 steel Japan SPV490Q steel	Impact toughness 10 ~ 60 mm thick transverse -20 ℃A _{KV} ≥80 J I groove gas - electric vertical welding energy 193kJ/cm Large heat input welding HAZ impact toughness -10 ℃A _{KV} =98 J 10 ~ 45mm thick transverse -15 ℃A _{KV} ≥80 J I groove gas - electric vertical welding energy 164kJ/cm Large heat input welding HAZ impact toughness -10 ℃A _{KV} =73 J
Large heat input welding low temperature steel	Europe 13MnNi6-3 and 11MnNi5-3 steel Domestic 09MnNiDR steel WISCO WHD4 steel	Transverse impact toughness -60 ℃A _{KV} ≥27 J Transverse impact toughness -70 ℃A _{KV} ≥47 J Transverse impact toughness -70 ℃A _{KV} ≥60 J
Large heat input welding steel at room temperature	Europe P355N steel Japan SPV355 steel WISCO WH530 steel	Transverse impact toughness 0 ℃A _{KV} ≥27 J Longitudinal impact toughness 0 ℃A _{KV} ≥47 J Transverse impact toughness -20 ℃A _{KV} ≥60 J

6 应 用

武钢自主研发的 6 大系列 10 多个大线能量焊接钢种已全部实现产业化，其中大线能量焊接高强度钢已由武钢独家生产 10 余年，制造了 189 台国家战略石油储备库，如镇海、舟山等几大基地和燕山石化等 10 × 10⁴ m³原油储罐，打破了日本钢板独霸市场的局面。国家发改委的评价是：“其突出特点是攻克了大线能量焊接技术难关，为大型储罐建设用高强度钢板国产化奠定了坚实基础”。大线能量低焊接系列钢集高强度、高韧性和优异焊接性于一体，已由武钢独家生产 23 年，为国家制造了年产 30 ~ 60 万 t 乙烯、30 万 t 合成氨，1 000 万 t 炼油及冶金行业的各类球罐、LPG 运输船、铁道储罐车和高寒地区使用的工程机械等 2 500 余台(套)以及新疆

喀什、四川彭水、贵州响水等 20 多座水电站引水压力钢管和岔管。由 4 位院士参加的大线能量耐火耐候钢鉴定委员会认为：“该钢集高耐火性、高耐候性、高 Z 向性和能承受大线能量焊接于一体，属技术首创。其技术性能指标达到了国际领先水平”。用这种钢建筑了国家大剧院、中国残疾人体育艺术培训基地等。用大线能量抗震建筑钢，建造了国家体育馆(俗称“鸟巢”，武钢生产的钢占用钢量 37.5%，全国排第一)、中央电视台、北京电视中心、首都国际机场、广州新电视塔和拉萨火车站等 20 余座大型建筑。大线能量低温、中常温等系列用钢中的 -50 ℃，-70 ℃低温钢被部级鉴定为“国际领先水平”，用这种钢建造了 300 余台低温设备。用中常温系列钢，特别是首研的 WH530 制造了 1 000 余台大型球罐，特别是建造了三峡水电工程特大型引水压力

钢管，还建造了吉林丰满、贵州索风营等 10 余座水电站压力钢管和岔管，这些应用大大提升了我国重大技术工程用钢国产化的整体水平。

参考文献 References

- [1] Liao Jianguo(廖建国). 大线能量焊接用厚钢板的发展[J]. *Wide and Heavy Plate*(宽厚板), 2002, 8(2): 44-48.
- [2] 林謙次, 藤沢清二, 中川一郎. 建築用高性能 550 MPa 級高張力鋼板—鉄骨コストのミニムム化と環境負荷軽減を実現する新設計基準強度厚板 HBL385 [J]. *JFE Technical Report* (JFE 技報), 2004, 5: 45-50.
- [3] 木村達己, 久田光夫, 藤沢清二. 超大入熱溶接部靱性に優れる建築構造用厚鋼板[J]. *Kawasaki Iron Technical Report* (川崎製鉄技報), 2002, 34(4): 158-163.
- [4] 児島明彦, 吉井健一, 秦知彦. 大入熱溶接に対応した建築鉄骨用高 HAZ 靱性鋼の開発[J]. *Nippon Steel Jechnical Report* (新日鉄技報), 2004, 380: 33-37.
- [5] Qiu H, Mori H, Enoki M, *et al.* Effect of Welding Thermal Cycle and Cold Working on the Ductility of SN490 Steel Under Low and High-Speed Loading [J]. *Materials Science and Engineering*, 2001, A316: 217-223.
- [6] 富田孚, 高崎修嗣, 北方賢一郎, *et al.* 大入熱溶接用鋼板 KST シリーズ[J]. *Kobe Steel Technical Report* (神戸製鋼技報), 1979, 29(4): 4-8.
- [7] 児島明彦, 清瀬明人, 植森龍治, *et al.* 微細粒子による HAZ 細粒高靱化技術“HTUFF®”の開発[J]. *Nippon Steel Jechnical Report* (新日鉄技報), 2004, 380: 1-4.

四川大学王玉忠小组高分子材料无卤阻燃研究取得突破

在国家自然科学基金等项目的长期支持下，四川大学教授王玉忠带领团队在高分子材料无卤阻燃化的基础研究方面获重要进展，并取得一些关键技术的突破，成功地解决了一些高分子材料的高效无卤阻燃问题，有效地协调了阻燃性与无卤化、保持其他性能和降低成本的矛盾，并成功应用于多个领域。

阻燃剂是高分子材料阻燃的关键。原则上，能够阻止有机高聚物材料燃烧的物质都可选作阻燃剂。但实际上，除阻燃性外，阻燃剂还必须具备：热分解温度要高于高聚物的加工温度、与高聚物相容性好、对其阻燃对象的其他性能无严重不良影响、燃烧时不释放有毒和腐蚀性气体、生产成本低等条件。

由于不同的高分子材料在高温或燃烧时的热分解和燃烧机理是不同的，因此必须使用与之相适应的阻燃剂才能发挥阻燃作用。例如，聚烯烃类高分子材料，在燃烧时能有效捕捉氢自由基和氢氧自由基物质的含溴阻燃剂是最有效的阻燃剂。而无卤阻燃剂要实现对其阻燃，需要添加更多的量，这就使得无卤与阻燃的高效相矛盾。

针对聚烯烃类高分子材料的无卤化必然导致阻燃效率低的矛盾，王玉忠设计合成了无卤的线形和支化/超支化高分子高效成炭剂，并制备了具有催化脱氢成炭的金属络合物构成的新型膨胀阻燃体系，大幅度提高无卤阻燃体系的阻燃效率，同时还具有显著的抑烟作用。

为解决提高阻燃性与保持力学性能之间的矛盾，王玉忠设计合成了一系列高阻燃性无卤热致液晶高分子，利用液晶高分子在力场作用下易在分子基体中“原位”形成微纤的性质，在加工过程中在被阻燃高分子材料中形成微纤，既起到增强作用，又起到阻燃作用。

另外，王玉忠设计合成了与玻纤具有较好相互作用的支化和可交联大分子阻燃剂，在玻纤增强的高分子体系中应用时，可降低玻纤的导热和导气作用，显著降低了玻纤的“烛芯效应”对体系阻燃性的负面影响，并改善了材料力学性能。

在解决一些高分子材料兼具阻燃性和抗熔滴性方面，王玉忠也作了有益探索，取得较大进展。

目前，王玉忠在国际学术刊物上已发表上百篇与无卤阻燃研究相关的学术论文，且多次在国际阻燃学术会议上作大会特邀报告，还申请与无卤阻燃有关的发明专利 30 余项，专利成果在多家企业实施，产品获得了 20 多个国外权威机构的检测认证。据不完全统计，该成果已累计创造 20 多亿元的经济效益。

(来源：科学时报)