

焊接结构材料与焊接材料的匹配

王元良

(西南交通大学,四川 成都 610031)

摘要:采用微合金化提高材料的综合机械性能和焊接性能是焊接钢结构材料发展的方向;采用低C、低SP和微合金化是改善强韧性匹配和提高焊接性能的重要途径。大量掺合金可制成各种焊丝、焊剂和焊条,以满足不同需要。

关键词:焊接结构材料;焊接材料;强韧匹配;质量控制

中图分类号:TG421 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-2303(2006)11-0020-05

Matching of welding construction material and welding consumables

WANG Yuan-liang

(Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Using the micro-alloy to enhance the general performance and welding ability of material is the development direction of material for welded steel construction. Using the low carbon, low SP and micro-alloy is the main approach for improving strength-toughness match and welding performance. Mixing a great deal of alloy can be made into various welding wire, flux and electrode to meet different needs.

Key words: material for welded steel construction; welding consumables; strength-toughness matching; quality control

0 前言

整体大型钢结构对焊接质量有很高的要求。焊接是一个复杂的化学和物理过程,它改变了接头的成分、组织和性能,因此焊接接头的强度和韧性是保证整个结构安全和可靠性的关键,特别是高速、重载、大运量情况下的机车车辆、船舶、汽车和钢桥,强度和韧性对结构的影响尤为突出。调整合金成分,使其在保证和提高强度的基础上提高韧性和焊接性;调整焊缝合金成分,优化焊接工艺,使其在保证强度的基础上提高韧性和抗裂性;优化结构材料组合,减少因结构和工艺带来的应力集中和焊接残余应力,保证整个结构的安全和可靠。

1 焊接钢结构材料的发展

采用微合金化提高材料的综合性能,降低等效含碳量 C_{eq} 和焊接裂纹敏感指数 P_{cm} ,提高焊接性。几种常用钢结构材料的化学成分和机械性能见表1。16Mn 钢是我国长期广泛使用的结构用钢,如16Mnq 桥梁钢、16Mnr 容器钢、16Mnc 船舶钢等,随着冶金技术的发展,S、P 含量降低,母材和焊接性能得到提高。

收稿日期:2006-10-16

作者简介:王元良(1929—),男,重庆人,教授,中国桥梁钢结构协会理事,主要从事焊接工程方面软科学研究及焊接材料、自动化系统工程开发研究和教学工作。

随着钢材的发展,国产14MnNbq 钢(包括日本/韩国产的SM490C)中C、S、P 和杂质含量进一步降低,其成分采用微量Nb 合金化(见表1),材料综合性能特别是低温韧性大幅度提高, P_{cm} 降低,焊接性能改善。

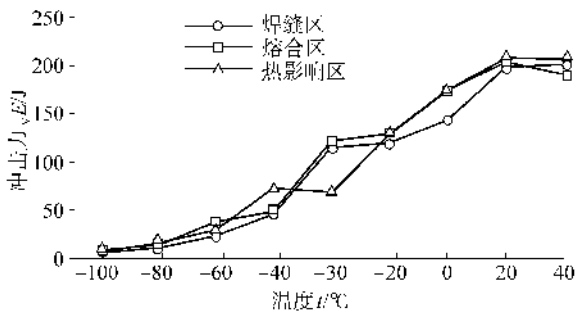
2 焊缝和焊接接头的韧性评定

焊缝和焊接接头是影响结构质量和安全的关键部位,焊接接头的强度和塑性较易控制,焊缝特别是熔合区韧性较难控制。韧性是一个抗起裂和扩展的重要且敏感的指标,要求通过焊接材料与母材的匹配来改善。焊接接头的韧性评定方法是采用却贝试件,将尖切口开在焊缝区、熔合区和热影响区,在指定温度进行冲击试验,达到和超过规定冲击功。有的结构还要求在一系列不同温度做冲击试验,画出冷脆转变温度曲线,如图1所示。由图可知,三个区的冷脆转变温度曲线较为接近,结果良好。通常热影响区的韧性主要取决于母材的基本性质和焊接线能量,与焊材的匹配无关;焊缝的韧性主要取决于焊材和线能量,与母材关系较小;熔合区的韧性与母材、焊接材料的匹配以及线能量都有关系。

如果将图1折线平滑化,可得到如图2a 左边所示曲线,则可得出中值冷脆转变温度 $vTrE$,并找出冲击值47J 时的温度作为评定标准。在冲击试验时,

表 1 母材成分及性能^[1]

钢号	板厚 产地	ω (C) /%	ω (Si) /%	ω (Mn) /%	ω (P) /%	ω (S) /%	其他	C_{eq}	P_{cm}	σ_b /MPa	σ_s /MPa	δ /%	\sqrt{E}/J (-40 °C)
16Mnq	24.C	0.15	0.35	1.34	0.023	0.018	—	0.390	0.17	522	352	25	65
14MnNb	32.C	0.15	0.38	1.34	0.023	0.025	0.025Nb	0.390	0.17	550	416	28	146
SM490C	20.H	0.14	0.29	1.47	0.018	0.006	0.029Nb	0.400	0.16	550	444	26	158
SM490C	24.J	0.12	0.28	1.41	0.011	0.002	0.029Nb	0.370	0.13	569	502	23	200
15MnVNqC	56.C	0.16	0.42	1.52	0.016	0.014	0.14V, 0.01N	0.440	0.26	610	434	30	87
62CF	50.C	0.08	0.38	1.32	0.020	0.006	0.24Cr, 0.23Mo	0.440	0.21	690	600	19	130~172
X70	14.7C	0.05	0.22	1.57	0.008	微量	0.053Nb, 0.023Ni, 0.357Mo, 0.044V, 0.014Ti, 0.029Cu	0.402	0.16	625	595	38	—



H08Mn2E 焊丝, SJ101 烧结焊剂, 埋弧自动焊, 线能量 36.3 kJ/cm, 双 U 型坡口多层焊对接; 韩国产厚 44 mm 的 14MnNbq 钢板。
图 1 一定材料匹配和焊接工艺焊接的韧脆转变温度曲线^[2]

记下脆性断口百分比 FP, 可画出图 2a 右边曲线, 从而得出 50%脆性断口的转变温度 $vTrS$ (又称 FATT)。对多种常用结构材料的焊接接头的冲击试验结果分析表明, $vTrS$ 与 $vTrE$ 数值相近。将图 2a 左边曲线的横坐标取 $1000/Tk$, 则可变成图 2b 所示的两条直线, 并可转换成韧脆转变温度曲线的数学表达式, 在计算机数值模拟和控制中应用。

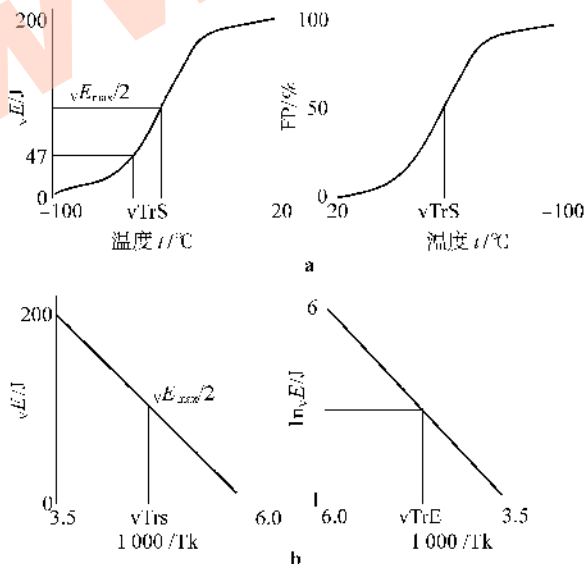


图 2 焊接接头韧性评定办法

3 焊接材料的匹配

在焊接结构钢材韧性提高后, 焊接接头的焊缝和熔合区更是焊接结构最薄弱的部位, 采用微合金化焊接材料以提高焊缝和熔合区的综合性能, 是提高焊接结构质量和保证结构安全工作的根本。如采用 Mo, B, Ti, Zr, Re 微合金化的焊接材料可改善焊缝组织, 提高焊缝和熔合区韧性; 增加 Mn, Cr, Mo, V, B, Ti 等可不同程度提高焊缝强度; 加 Ni 是提高低温韧性的重要途径; 加 Cr, Mo, V 是提高热强性的重要元素。据此配成了各种焊接材料。

3.1 手工焊条和药芯焊丝

在手工焊条药皮中加入铁合金粉, 可以制成不同强韧性的结构钢焊条, 也可制成药芯焊丝作自动或半自动保护焊。国外广泛应用药芯焊丝气体保护焊来提高焊缝性能, 如通过调整药芯焊丝中 Mo, B, Ti, Re 的含量, 在大线能量 (86 kJ/cm) 时将针状铁素体含量由 20% 增加到 90%, 从而使 vTs 脆性转变温度由 0 °C 降低到 -60 °C。

药芯焊丝近几十年来发展甚快, 如日本 1979~1991 年, 手工焊条从 60% 降到 22%, 而药芯焊丝由接近 0 上升到 18%, 各种合金的气体保护焊丝由 22% 上升到 52%, 是钢结构焊接发展的重要方向。我国在这方面应用还很不普遍, 应大力加强优质药芯焊丝的研究、生产及其推广应用。如加大并调整铁合金含量, 不仅可制成各种特殊钢焊条、堆焊焊条、不锈钢焊条和铸铁焊条, 还可制成相应的药芯焊丝。其优点是: 不仅减少了对钢铁企业供应合金焊丝的依赖, 还可使掺合金效率提高, 节约能源。天津三英公司生产的部分药芯焊丝的成分和性能如表 2 所示。

3.2 埋弧自动焊剂

目前钢结构的生 产较多使用埋弧自动焊, 其焊丝与焊剂分别供给到电弧区完成冶金过程。焊剂

专题讨论——焊接材料

表 2 三英公司生产部分药芯焊丝的成分和性能

种类	牌号*	相当于 GB	基本成分 /%	其他合金成分 /%	σ_b /MPa	A_{kv} /J	硬度 /HRC	选用
结构 钢用 药芯 焊丝	SQJ501	EF11-5032		—	560	100(-20℃)	—	按结构母材
	SQJ501-Ni2	—		Ni1.43	600	86(-60℃)	—	和重要性及
	SQJ501-CrNiCu	—		Cr0.54Ni0.38Cu0.23	590	100(0℃)	—	工作条件选
	SQJ507-Ni	E501T5 Ni	$\omega(C)=0.040\sim0.090$	Ni1.0Mo0.2	570	160(-20℃)	—	A_{kv} 一般的
	SQJ607-NiMo	E600T5-K2	$\omega(Mn)=1.010\sim1.600$	Ni1.1	670	100(-20℃)	—	都可用 CO ₂
	SQJ707-CrNiMo	E700T5-K4	$\omega(Si)=0.350\sim0.500$	Cr0.6Ni2.40Mo0.5	780	80(-20℃)	—	气保焊,重要
	SQJ807-CrNiMo	E800T5-K4	$\omega(S)=0.009\sim0.025$	Cr0.6Ni2.6Mo0.4	850	70(-20℃)	—	结构和强度
	SQL-607	—	$\omega(P)=0.010\sim0.030$	Ni0.52.6Mo0.28	650	54(-20℃)	—	级别高的用
	SZJ-431	—		Ni1.0	520	60(-20℃)	—	Ar+CO ₂ 保护
	SZJ-502	—		Ni1.4	580	100(0℃)	—	焊
耐热 钢用	SQR107	E550T5-B3L	$\omega(C)=0.06\sim0.12$	Mo0.2Ni0.05Ti0.08	530	80(20℃)	—	按母材合金
	SQR307	E550T5-B2	$\omega(Mn)=1.20\sim1.50$	Cr1.2Mo0.47	610	100(20℃)	—	成分选焊丝
	SQR337	—	$\omega(Si)=0.35\sim0.80$	Cr1.3Ni0.4Mo0.4V0.25	680	80(20℃)	—	焊接工作温
	SQR407	E550T5-B3	SP \leq 0.035	Cr2.5Mo1.0	620	120(20℃)	—	度 510℃~ 600℃钢
不锈 钢用	SQA308	E308T0-1	$\omega(C)=0.016\sim0.050$	Cr19.56Ni9.72	580	—	—	焊 18-8 钢
	SQA308L	E308LT0-1	$\omega(Mn)=1.22\sim1.58$	Cr19.49Ni9.91	565	—	—	焊超低碳钢
	SQA308L-T	E308LT1-5	$\omega(Si)=0.43\sim0.82$	Cr18.91Ni12.51Mo2.35	595	—	—	异种钢打底
	SQA316	E316LT0-1	SP \leq 0.022	Cr19.50Ni12.05Mo2.32	—	—	—	焊 Cr,Ni,Mo 钢
合金 堆焊 用	SQD112	EDP Cr Mo	$\omega(C)=0.18, \omega(Mn)\leq 2.0, \omega(Cr)\leq 2.0, \omega(Mo)\leq 0.5$		—	—	≥ 22	一般耐磨层
	SQD337	EDR CrW-15	$\omega(C)=0.25\sim0.35, \omega(Cr)=2.0\sim3.5, \omega(W)=7\sim10$		—	—	≥ 48	热模具堆焊
	SQD517	EDP Cr-B-15	$\omega(C)\leq 0.25, \omega(Cr)=12\sim16, \omega(\text{其余})\leq 5.0$		—	—	≥ 45	阀门堆焊
	SQD608	EDZ-B2-08	$\omega(C)\leq 3.0, \omega(Cr)=4\sim5, \omega(Mo)=8.5\sim14.0$		—	—	≥ 60	合金铸铁层
	SZD25	自保护焊丝	$\omega(C)\leq 1.1, \omega(Mn)=11\sim16, \omega(Si)=1.3, \omega(\text{其余})\leq 5.0$		—	—	≥ 20	高锰钢焊层
	SMD452	埋弧药芯焊丝	$\omega(C)\leq 0.5, \omega(Mn)=1.2, \omega(Mo)=1.0, \omega(Cr)\leq 5.0, \omega(Si)\leq 1.0$		—	—	≥ 45	热轧辊堆焊

注*:S—焊丝;Q—气保护;Z—自保护;L—立焊;其余同手工焊。

分熔炼焊剂和烧结焊剂。前者常用型号的组成成分见表 3,烧结焊剂型号的组成成分如表 4 所示。

表 3 熔炼焊剂的常用型号及组成部分

型号	性质	$\omega(MnO)$	$\omega(SiO_2)$	$\omega(CaO)$	$\omega(CaF_2)$	$\omega(Al_2O_3)$	$\omega(FeO)$	$\omega(S)$	$\omega(P)$
HJ350	碱性	34~38	40~44	≤ 6	3~7	≤ 4	≤ 1.8	≤ 0.06	≤ 0.08
HJ431	酸性	14~19	30~35	10~18	14~20	$\leq 13\sim 18$	≤ 1.0	≤ 0.06	≤ 0.08

表 4 烧结焊剂的常用型号及组成部分

型号	性质	$\omega(SiO_2 + TiO_2)$	$\omega(CaO + MgO)$	$\omega(Al_2O_3 + MgO)$	$\omega(CaF_2)$	$\omega(S)$	$\omega(P)$
SJ101	碱性 (中氟)	15~25	25~35	20~30	15~25	≤ 0.06	≤ 0.08
SJ101	碱性 (高氟)	10~15	35~45	15~25	20~30	≤ 0.06	≤ 0.08
SJ501	弱碱性 (低氟)	25~40	—	45~60	≤ 10	≤ 0.06	≤ 0.08

我国熔炼焊剂的生产已有很长的历史,由于成型好和脱渣容易,HJ431 焊剂得到长期使用;焊强度级别高的钢结构使用 HJ350 焊剂,以提高焊缝韧

性。熔炼焊剂的生产是用电炉高温(1 800℃以上)熔化原料,激冷后粒化而成,故耗能大,焊接时还要高温熔化焊剂,焊接热效率降低。此外,熔炼焊剂掺合金极难,主要靠焊丝掺合金。

烧结焊剂是先粒化再经中温(650℃~850℃)烧结而成(不中温烧结只低温烘干的叫陶质焊剂)。因此,使用烧结焊剂能有效降低生产过程的能耗,提高焊接热效率,有利于焊剂掺合金和净化焊缝金属。目前生产的烧结焊剂在成型和脱渣方面不亚于熔炼焊剂,因此应大力推广应用。



3.3 埋弧焊丝和气体保护焊丝

埋弧焊接中,主要是用不同合金成分的焊丝掺合金,用焊剂来保证高的合金过渡系数,以改善焊缝性能。气体保护焊更是完全要求由焊丝过渡合金。新大洋生产的常用表面镀铜埋弧焊丝和气体保护焊丝如表 5 所示。由表 5 可知,埋弧焊丝的牌号与合金含量有关,用途各异。大批量使用的埋弧

焊丝和气体保护焊丝是由冶金企业炼出焊条钢,轧成盘条,再由焊接材料厂拉丝镀铜绕盘而成而对于应用量少的焊丝,冶金企业则难以供应。有两种解决办法:一是在焊剂(最好是烧结焊剂)中加入所需铁合金粉末或自制陶质焊剂;二是用小型电渣炉用管装铁合金粉末和矿粉电渣熔炼得到所需合金,但都需要反复调整配方,多次试验才能取得效果。

表 5 常用典型埋弧焊丝和气体保护焊丝

埋弧焊丝		气保护焊丝	
牌号(相当于 GB)	合金特点	牌号(相当于 GB)	合金特点
DHM08A(H08A)	最普通的焊丝	DHQ44-8(ER44-8)	H08MnSiCuCrNi 耐候用
DHM08MnA(H08MnA)	$\omega(\text{Mn})=0.8\sim 1.0$	DHQ49-1(ER49-1)	H08Mn2SiA, CO ₂ 焊通用
DHM10MnSi(H10MnSi)	$\omega(\text{Si})=0.6\sim 0.9$	DHQ50-2(ER50-2)	AlTiZr 微量,提高韧性
DHM10Mn2(H10Mn2)	$\omega(\text{Mn}_2)=1.5\sim 1.9$	DHQ50-3(ER50-3)	MnSi 稍低,CO ₂ +Ar 用,也可 CO ₂ 焊
DHM08MnMoA(H08MnMoA)	$\omega(\text{Mo})=0.3\sim 0.5$	DHQ50-4(ER50-4)	MnSi 稍低,CO ₂ +Ar 用,也可 CO ₂ 焊
DHM08CrMoA(H08CrMoA)	$\omega(\text{Cr})=0.8\sim 1.15$	DHQ50-5(ER50-G)	加 Ti 微量,提高韧性
DHM08Mn2MoA(H08Mn2MoA)	$\omega(\text{Mo})=0.5\sim 0.7, \omega(\text{Ti})=0.5$	DHQ50-6(ER50-6)	MnSi 稍高,CO ₂ +Ar 用
DHM10Mn2MoA(H10Mn2MoA)	比上略增 Mn, Mo	DHQ55-1(ER55-B2)	加 Cr1.3Mo0.5 提高强度
DHM10Cr2MnMoWVTiBA	$\omega(\text{Cr}_2)=1.8\sim 2.2,$ 加 Ti0.13B0.04W0.04	DHQ60-1(ER60-G)	加微量 Mo0.38Ni0.15Ti
DHM08CrMoVA(H08CrMoVA)	加 $\omega(\text{V})=0.15\sim 0.35$	DHQ60-2(ER62-B3)	加 Cr2.5Mo1.1,提高强度
DHM08CrMnSiMoA	Cr1.3Si0.5Mo0.5	DHQ70-1(ER69-1)	主成分相同,SP \leq 0.010, $\omega(\text{Ni})=0.5\sim 2.1,$ 加 Mo0.4 左右,提高强韧性
DHM05MnSiAlTiZrA	降 C 加 AlTiZr 微	DHQ70-2(ER69-2)	
DHM05CrMoVTiReA	CrMoV 加 TiZr 微	DHQ70-3(ER69-3)	
DHM10Mn2NiMoA(H10Mn2NiMoA)	$\omega(\text{Ni})=0.8\sim 1.2$ 加 Ti 微	DHQ70-4(ER70S-G)	MoCr0.4Ni2.2Ti 微高韧
DHM13CrMoA(H13CrMoA)	CrMo 升 C	DHQ80-1(ER83-1)	Mn 略高, $\omega(\text{Ni})=2.0\sim 2.8, \omega(\text{Mo})=0.45$
		—	—

注:DH—厂号,M—埋弧焊,Q—气保护焊,数字—抗拉强度,尾数—类。

4 焊缝质量控制

4.1 焊接材料匹配对焊缝韧性的影响

将板厚和焊接线能量十分接近、材料匹配不同焊成的接头进行焊缝系列温度冲击试验,结果按图 2 方法整理得图 3。由图 3 可知,过去用 H08MnA 配 HJ431 的焊缝韧性最低,如用烧结焊剂 SJ101 可提高焊缝韧性;采用低 SP 的 H08Mn2E 也可提高焊缝韧性;加 Mo, B, Ti, Re 焊接 H08C 和 WQ-1,在提高焊缝韧性的同时提高了焊缝强度。

4.2 改善焊接材料匹配的途径

在 14MnNbq 厚板焊接试验中,用 H08MnA 和 H10Mn2 配 SJ101 焊剂焊接,强度够而韧性低;采用微合金化的焊丝 H08C,韧性高但又强度高。为了解决高韧性与不超强的矛盾,试用小型电渣炉熔炼,在 H08 基础上加微量 B, Ti, Re 制成焊丝,配 SJ101 焊剂焊韩国进口 SM490C 对接接头,接头性能为:拉

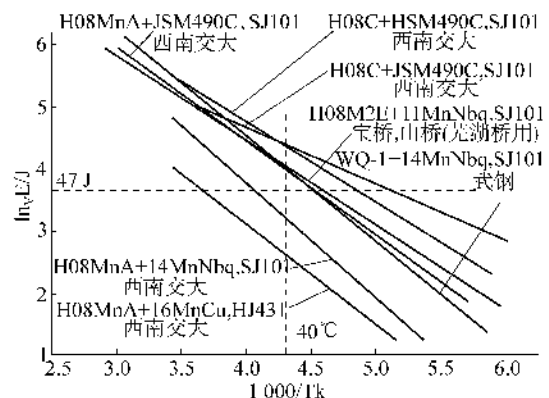


图 3 焊接材料匹配对焊缝韧性的影响^[1]

伸强度 T.S=583 MPa,屈服强度 Y.S=469 MPa,延伸率 E.L=24%,断面收缩率 F.D=74%,冲击韧性 $\sqrt{E}(-25\text{ }^\circ\text{C})=50\text{ J}, \sqrt{E}(-45\text{ }^\circ\text{C})=36\text{ J}$, 屈强比 Y.S/T.S=0.8。全面达到设计要求。试验结果如图 4 所示。

采用 $\varphi 2\text{ mm}$ 焊丝 H08D,以线能量 32 kJ/cm 埋弧焊日本产 SM490C 钢的棱角焊缝(水平板+立板=



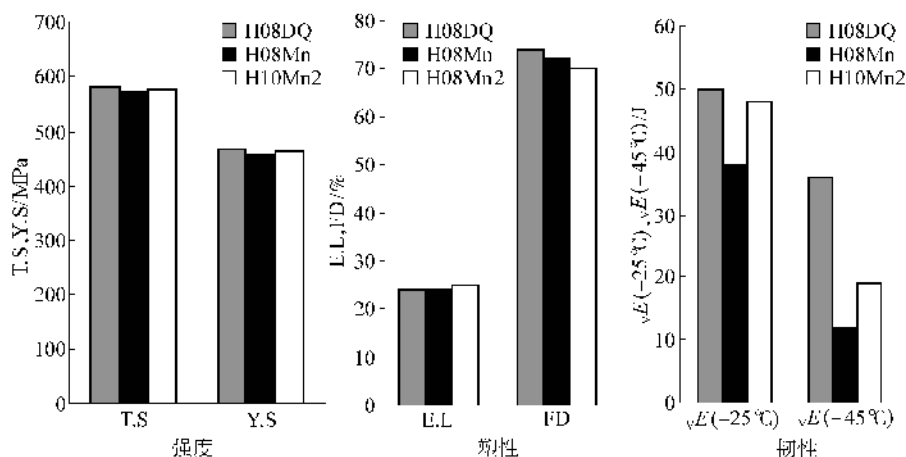


图 4 $\phi 4$ mm H08D 焊丝, 线能量 32 kJ/cm, 埋弧焊, 板厚 24 mm, 无坡口对接性能对比

16 mm+24mm, 半 V 形坡口, 深 10 mm), 试验结果如表 6 所示。结果显示, 由于日本钢板性能比韩国的要好, 因此性能比对接的要好, 加之采用细焊丝和半 V 形坡口, 加大了焊缝中熔化焊丝比例, 有利于提高焊缝韧性, 降低强度, 保证了设计技术要求。这些工作都为解决高韧不超强的矛盾提供了方向。

表 6 $\phi 2$ mm H08D 焊丝, 以线能量 32 kJ/cm 埋弧焊日本 SM490C 钢棱角焊缝的性能

项目	冲击试验温度 $t/^\circ\text{C}$					
	0	-20	-25	-45	-60	-70
冲击功 \sqrt{E}/J	160.70	110.60	104.20	72.20	36.10	31.60
塑性断口率 FP/%	90.00	80.00	63.00	25.00	23.00	0
侧向收缩率 DP/%	40.48	30.70	30.30	16.50	9.20	8.50

拉伸试验(室温): T.S.=529 MPa; Y.S.=414 MPa; E.L.=25%; F.D.=62%。

4.3 焊接板厚和焊接规范对焊缝性能的影响

母材厚度不同, 所开坡口就不同。按不同板厚的坡口要求, 以 H08C 配 SJ101 焊剂对 SM490C 钢以 35 kJ/cm 线能量对接焊, 试验结果如图 5a 所示。由于坡口不同, 焊丝金属在焊缝中的比例在 20%~75% 变化, 因而得到不同的强韧性, 若改变其线能量, 则可改变其变化规律。如图 5b 所示, 相同焊接材料匹配不同线能量对接焊 16 mm 厚板, 图中有一韧性最佳区间, 随板厚的增加, 此区间将向右移。因此, 除材料匹配之外还须注意工艺的调控。

5 结论

(1) 采用微合金化提高材料的综合性能和焊接性是焊接结构材料发展的方向。

(2) 焊缝和焊接接头是影响结构质量和安全的关键部位, 韧性是一个抗起裂和扩展的重要而敏感的能量指标, 特别是要评定和控制焊缝及熔合区韧

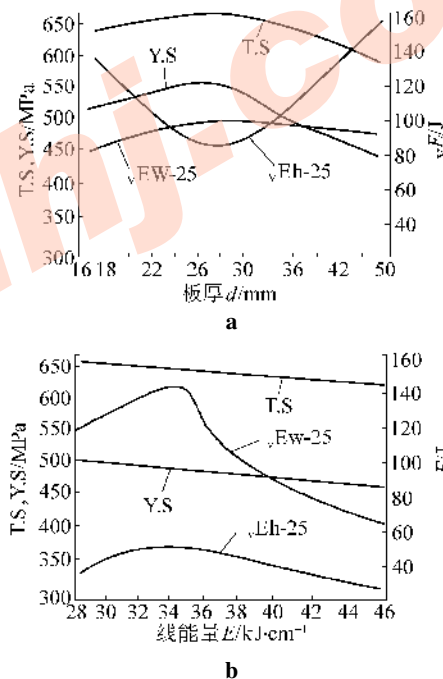


图 5 焊接工艺对强度和焊缝及熔合区韧性的影响^[1]

性, 以保证焊接结构的安全。

(3) 在焊接结构钢材韧性提高后, 必须保证焊接材料的强韧匹配, 采用低 C、低 SP 和微合金化是改善强韧匹配和提高焊接性能的重要途径。大量掺合金可制成各种焊丝、焊剂和焊条。

(4) 影响焊缝性能的主要因素是焊接材料匹配, 但焊接板厚和焊接规范也有重要影响。

参考文献:

- [1] 王元良, 周友龙, 胡久富. 我国钢结构技术及其发展[J]. 钢结构, 2005(8): 10.
- [2] 中国铁路工程总公司. 芜湖长江大桥钢梁制造技术总结[M]. 北京: 科学出版社, 2001.

