双相钢 DP540、DP590 焊接工艺研究

张凤明，付学义

（内蒙古包钢钢联股份有限公司技术中心，内蒙古 包头 014010）

摘 要： 实验通过对 DP540、DP590 采用各类型不同焊接实验，对比力学性能及微观金相组织找出合理的焊接工艺，同时进行不同工艺参数条件下的熔敷效率及焊道成形性、飞溅量的变化研究，试验用焊接材料熔敷金属力学性能及扩散氢含量测试，研究焊缝经过超声冲击（UIT）处理后的力学性能、疲劳强度及接头内部残余应力的变化。

关键词： 双相钢；DP540；DP590；焊接工艺；UIT 处理

中图分类号： TG457 **文献标识码：** B **文章编号：** 1009－5438（2017）03－0050－05

DOI:10.13647/j.cnki.btgkj.2017.03.015

Study on Welding Technology of DP540 and DP590 Dual Phase Steel

ZHANG Feng－ming, FU Xue－yi

（*Technical Center of Steel Union Co. Ltd. of Baotou Steel (Group) Corp.*, *Baotou* 014010, *Nei Monggol*, *China*）

Abstract: Experiments are carried out on DP540 and DP590 using different types of welding experiments, and the mechanical properties and microscopic metallographic structure are compared to find out the reasonable welding technology. At the same time, the deposition efficiency and welding bead formability, change of spatter amount under different process parameters are studied. The mechanical properties and diffusible hydrogen content of the tested welding materials were tested. The mechanical properties, fatigue strength and residual stress of the weld joint after ultrasonic impact (UIT) treatment are studied.

Key words: dual phase steel; DP540; DP590; welding technology; UIT treatment

在钢材新产品研发过程中，焊接技术已经成为其中极其重要的一个环节，钢材焊接性能的优劣会直接影响到产品的使用性能，最终关乎产品是否安全可靠。合适的焊接工艺参数及工艺措施是确保钢材安全可靠使用的关键步骤。大多数的新钢种的开发与销售都需要掌握钢材的最佳焊接工艺、焊接性试验方法及焊接工艺评定方法，确定钢材的可焊性及焊接工艺，尤其在低合金高强度级别的钢材中焊接性能显得尤其重要。

1 焊接材料和方法

1.1 实验材料

试验用双相钢化学成份及力学性能见表 1。

收稿日期： 2017－03－31

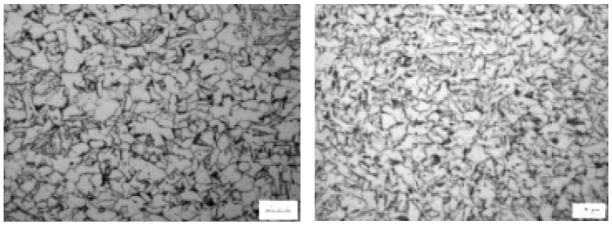
作者简介： 张凤明（1987－），男，内蒙古赤峰市人，助理工程师，现从事焊接、轧钢技术工作。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 1　DP590、DP540 化学成分及力学性能

牌号	炉号	板厚/mm	化学成分(质量分数)/%					力学性能		
			C	Si	Mn	P	S	R_{el}/MPa	R_m/MPa	A/%
DP590	120180752D0	11	0.065	0.44	1.64	0.011	0.004	360	570	35.5
DP540	125366951D0	6	0.057	0.42	1.65	0.013	0.001	387	601	30.5

试验用双相钢金相组织，见图 1。



DP590　　DP540

图 1　DP590 及 DP540 显微组织(F + M + P)

试验原始母材金相组织均为铁素体 + 马氏体 + 珠光体。

1.2　焊接实验设备及焊丝

使用的焊机为 OTC DIGITAL INVERTER DP500；摆动式自动焊接小车 HK - 100K；MF - 1 型水银法扩散氢测定仪；HY2050 型豪克能焊接应力消除设备。

保护气体：富氩气体(80% Ar + 20% CO_2)。

焊丝：选用 MERITS - 6 实心焊丝，规格 1.2 mm，批号 1065894。

焊丝力学性能见表 2。

表 2　MERITS - 6 实心焊丝

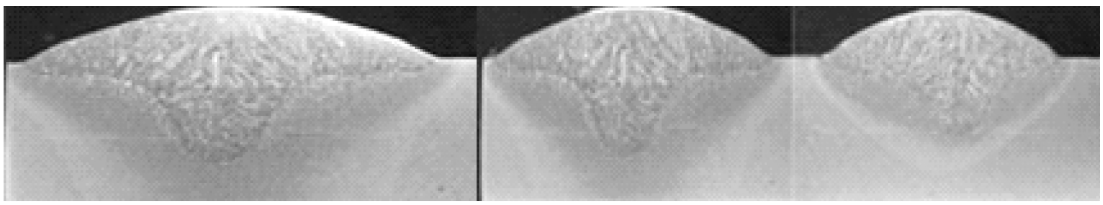
焊丝名称		屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	延伸率/%	冲击功/J(实验温度：-30℃)		
MERITS - 6	标准值	400	480	22	27		
	实测值	465	580	26	88	88	88

2　焊接实验结果与分析

2.1　焊接工艺参数影响

2.1.1　焊接电流与焊道成形

焊接工艺参数，主要是焊接电流、焊接电压，对焊道成形、飞溅量的影响非常显著，在合适的焊接电流、电压下，焊道的宽、高比例适中且成形美观，飞溅量也最小，焊丝的熔敷效率也比较高。当焊接电流偏小时，焊道相对高而狭窄，熔深较浅；焊接电流偏大时，焊道宽而扁平，熔深较大。DP - 500 焊机不同电流焊缝形态参见图 2。



I=350 A　　I=300 A　　I=250 A

图 2　不同焊接电流时焊道截面形状

图 2 为 MERITS - 6 焊丝在其它条件固定不变(焊接速度、焊丝干伸长度、母材种类)，调节不同电流，电压一元化调节(一元化：是指调节一个参数，其他参数相应也在按一定规律匹配变化)的焊缝断面形态。由图可知，随着电流的增大，工件上的电弧力和热输入均增大，热源位址下移，焊缝的熔深增大，熔深与焊接电流接近于正比关系；随着电流的增大，焊丝熔化量近与正比例额定增加，所以焊缝余高增大；随着电流增大，相应的一元化调节电压增大，电弧功率增加、热输入增加，焊缝熔宽增大。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

2.1.2 焊接电流与飞溅率

焊接过程中熔化的金属飞向熔池之外，飞到熔池之外的金属为飞溅。随着飞溅率的增加不但降低了焊接生产效率，也影响了焊接质量。所以焊接过程中尽量降低飞溅的影响。

本实验采用 MERITS－6 焊丝，焊接速度 v = 53.3 cm/min，保护气体：富氩气体（80% Ar + 20% CO_2），气流量为 20 L/min，焊丝干伸长度为 18 mm。不同的焊接电流与焊接飞溅关系变化见图 3。

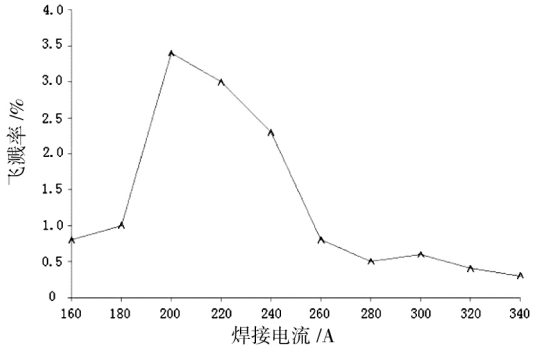


图 3 一元化调节状态下焊接电流与飞溅率

由图 3 可知，随着电流的增加飞溅率开始增加，当电流增加到 200～210 A 时焊丝飞溅率达到最高，随后随着电流增加飞溅率开始下降，当电流达到 280 A 左右时，飞溅率趋于平稳。

在实际焊接过程中，焊接电流都存在一个临界值，即熔滴射流过渡的最小电流值，在电流临界值时，熔滴飞溅降至最低，此时熔敷率达到最高。熔滴射流过渡临界值约为 330 A，飞溅率降低到 0.3%，熔敷率高达 99.7%。

2.2 熔敷金属性能测定及扩散氢

2.2.1 焊丝熔敷金属力学性能测试

焊接实验开始前，要对选用的焊丝进行熔敷金属的力学性能测试。本次测试工艺参数为：焊接电流 I = 250 A，焊接电压 U = 26.5 V，焊接速度 v = 33.3 cm/min，热输入量 E = 11.9 kJ/cm，气体流量 20 L/min，焊接试验后所测得焊丝熔敷金属力学性能实际值见表 3。

表 3 焊丝熔敷金属力学性能

焊丝名称	屈服强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	延伸率 /%	冲击功/J（实验温度：－30 ℃）
MERITS－6	460	570	27	85 90 81

由表 3 可知，测试结果与焊丝质量保证书所列性能数据相差不大，测试结果满足标准要求，本次实验选用焊丝各项力学满足 DP540、DP590 双向钢焊接实验要求。

2.2.2 熔敷金属扩散氢含量测定

实际测试中，使用 MF－1 型水银法扩散氢测定仪，按照 GB/T 3965—1995《熔敷金属中扩散氢测定方法》[1] 进行测试。工艺参数为：一元化调节状态下，电流 I = 280 A，电压 U = 30.4 V，焊接速度 v = 33.3 cm/min，热输入量 E = 15.3 kJ/cm，气体流量 20 L/min，焊接环境温度 18 ℃，湿度 3% RH，仪器测量分辨率 0.01 mL。试验后测量结果见表 4。

表 4 MERITS－6 熔敷金属扩散氢含量

焊丝名称	规格/mm	H_{DM} /（mL·100 g^{-1}）	等级
MERITS－6	Φ1.2	0.98	超低氢型

注：熔敷金属扩散氢含量：H_{DM} ≤5 mL/100 g 属于超低氢型。

2.2.3 焊前预热温度计算

工艺研究中涉及的焊接性计算[2]，如碳当量及焊接裂纹敏感指数等计算公式说明如下：

碳当量：$CE = w(C) + w(Mn)/6 + [w(Cu) + w(Ni)]/15 + [w(Cr) + w(Mo) + w(V)]/5$

冷裂纹敏感系数：$P_{cm} = w(C) + w(Si)/30 + [w(Mn) + w(Cu) + w(Cr)]/20 + w(Ni)/60 + w(Mo)/15 + w(V)/10 + 5w(B)$

冷裂纹敏感性：$P_w = P_{cm} + H_{DM}/60 + h/600$ 或 $P_w = P_{cm} + H_{DM}/60 + R/40000$

式中：H_{DM}：熔敷金属中扩散氢含量，mL/100g；R：焊缝拉伸拘束度，kN/cm；h：板厚，mm。

最低预热温度：$T = 1\,440P_w - 392$

计算后：DP540、DP590 双相钢的碳当量均为：0.33%；冷敏感系数均为：0.15；

DP540 冷裂纹敏感性 P_w = 0.17；DP590 冷裂纹敏感性 P_w = 0.18。

所以 DP540 及 DP590 焊接无需预热。

2.3 DP540 焊接工艺

2.3.1 不同焊接工艺的力学性能

DP540 焊接方式采用 I 型坡口，双面对接自动焊接，焊接前清理好坡口及坡口附近母材。焊接对比实验不变量为：焊接电流 I = 200 A，电压 U = 20 V，气体流量 20 L/min，焊丝干伸长度为 18 mm，板厚 6 mm。焊后试样力学性能见表 5。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 5　DP540 在不同焊接工艺条件下的力学性能

编号	v /(cm·min^{-1})	E /(kJ·cm^{-1})	R_{el} /MPa	R_m /MPa	A /%	KV2 – WM (5 mm×5 mm) /J	KV2 – HAZ (5 mm×5 mm) /J
1#	33	5.3	436,435	601,603	28,27	84,74,74	98,98,100
2#	40	6.7	448,448	608,604	24,28	86,110,86	108,104,108
3#	50	8.0	442,439	599,597	23,24	75,89,99	100,100,100

DP540 焊接试验后进行开肩板拉伸试验，1#—3#断裂位置均为母材，由表 5 数据可知，各项力学性能指标符合焊接要求。当焊接热输入量大于 8 kJ/cm时，焊缝熔敷金属过多，造成不必要的焊丝浪费，而且热影响区增大，使热影响区位置容易断裂。当焊接热输入量小于 5.3 kJ/cm 时，就必须多道次焊接，增大道间焊接缺陷的危险，使焊缝处出现夹杂等，并且降低了生产效率。

2.3.2　不同焊接工艺接头显微组织

DP540 在不同热输入量下的焊接组织见图 4。焊缝组织为(B + $F_{先共析}$)，粗晶区组织为 B，正火区组织为(F + P)。

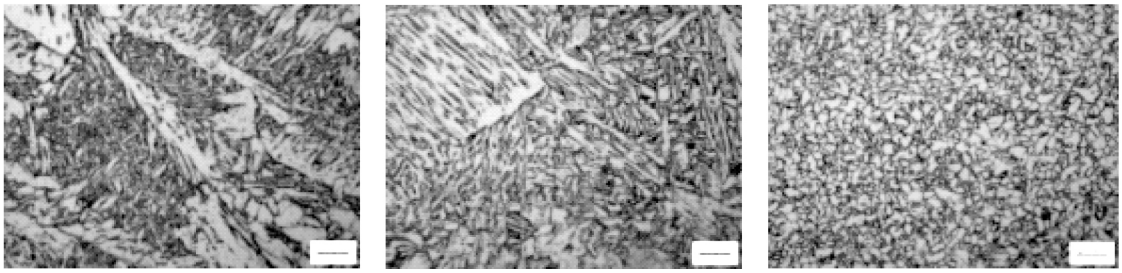


图 4　不同热输入量下的焊接组织

由图 4 可知，DP540 在热输入量 5.3 ~ 8.0 kJ/cm时，焊缝及热影响区组织没有大的变化。焊缝处均为贝氏体和先共析铁素体；粗晶区均为贝氏体；正火区均为铁素体和珠光体。焊缝中心熔合良好，显微组织无夹杂及缺陷。

2.4　DP590 焊接工艺

2.4.1　不同焊接工艺的力学性能

DP590 焊接方式采用 X 型坡口，双面对接自动焊接，焊接前清理好坡口及坡口附近母材。焊接对比实验不变量为：气体流量 20 L/min，焊丝干伸长度为 18 mm，板厚 11 mm。焊后试样力学性能见表 6。

表 6　DP590 在不同焊接工艺条件下的力学性能

编号	I/A	V /(cm·min^{-1})	E /(kJ·cm^{-1})	R_{el} /MPa	R_m /MPa	A /%	KV2 – WM (10 mm×10 mm) /J	KV2 – HAZ (10 mm×10 mm) /J
1#	230	37	10.0	448,451	561,560	33,32	148,136,104	190,134,144
2#	330	62	11.1	449,458	564,567	37,33	120,116,110	169,130,14
3#	280	33	15.0	431,444	543,544	26,27	138,115,98	189,160,197

DP590 焊接试验后进行开肩板拉伸试验，1#—3#拉伸断裂位置均为母材，由表 6 数据可知，各项力学性能指标符合焊接要求。当焊接热输入量大于 15 kJ/cm 时，焊缝熔敷金属过多，造成不必要的焊丝浪费，而且热影响区增大，使热影响区位置容易断裂。当焊接热输入量小于 10 kJ/cm 时，就必须多道次焊接，增大道间焊接缺陷的危险，使焊缝处出现夹杂等，并且降低了生产效率。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

2.4.2 不同焊接工艺接头显微组织

DP590在不同热输入量下的焊接组织见图5。其中，焊缝组织为($B+F_{先共析}$)，粗晶区组织为B，正火区组织为(F+P)。

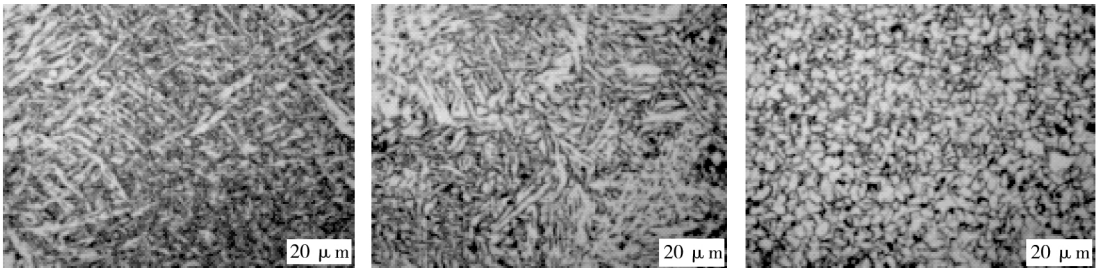


图5 不同热输入量下的焊接组织

由图5可知，DP590在热输入量10.0～15.0 kJ/cm时，焊缝及热影响区组织没有大的变化。焊缝处均为贝氏体和先共析铁素体；粗晶区均为贝氏体；正火区均为铁素体和珠光体。焊缝中心熔合良好，显微组织无夹杂及缺陷。

2.5 焊接接头超声冲击处理[3]

本次试验中，采用HY2050型豪克能焊接应力消除设备对DP590及DP540焊后接头焊趾部位进行处理，并进行接头疲劳试验，见表7。

表7 处理前后疲劳寿命对比

试样编号	应力幅/MPa	循环次数/次	疲劳寿命提高倍数
1-5*	80	8 000 000	3.9
1-8	80	2 070 733	3.9
1-2*	100	4 486 030	2.6
1-7	100	1 709 967	2.6
1-3*	120	856 581	2.9
1-10	120	293 971	2.9

注：带* 为经过处理的试样；疲劳寿命提高倍数为处理过的试样循环次数除以未处理过的试样循环次数。

由表7可知，试板经过焊接应力消除设备处理后，残余应力及疲劳强度变化明显。疲劳强度明显提高，最高为3.9倍，疲劳循环直至断裂的次数明显增加。

3 结论

(1) 实验结果分析可知DP540(板厚6 mm)的焊接工艺为：电流/电压一元化调节I=200 A，焊接速度v=33～50 cm/min，热输入E=5.3～8.0 kJ/cm，气体流量为20 L/min；DP590(板厚11 mm)的焊接工艺为：电流/电压一元化调节I=230～330 A，v=33～62 cm/min，热输入E=10～15 kJ/cm，气体流量为20 L/min。

(2) 疲劳试验结果表明，焊后接头焊趾部位进行处理工艺可以降低焊接结构的残余应力及裂纹敏感性，在接头被处理表面形成有益的压应力，并提高接头的疲劳寿命。因此，在实际焊接生产中比较重要的焊接结构完全可以采用高频冲击消除应力的工艺，进而提高焊接产品疲劳性能及焊接结构的安全可靠性。

参考文献

[1] GB/T 3969—1995，熔敷金属扩散氢测定方法[S].

[2] 曹良裕. 魏战江. 钢的碳当量公式及其在焊接中的应用[J]. 材料开发与应用，1999，14(1)：39-43.

[3] 唐佩绵. 抑制焊接钢结构疲劳裂纹发生的超声波冲击处理技术[N]. 世界金属导报，2015-6-9(B07).

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net