

900 MPa 高强度低匹配焊接研究及应用

赵俊丽, 尹永霞

(郑州煤矿机械集团有限责任公司, 河南 郑州 450013)

摘要:首次对液压支架用屈服强度 900 MPa 高强度钢的焊接性进行了研究, 采用热模拟的方法测定了 SHT900D 钢焊接 CCT 图, 对 SHT900D 钢强韧性匹配焊接进行了试验研究。通过斜 Y 型坡口试验、插销试验及热影响区最高硬度等抗裂性试验对低匹配焊接工艺进行了优化设计, 研究成果已成功应用于 6.2, 6.3 m 高端液压支架的焊接中。

关键词:900 MPa 高强度钢; 热模拟; 低匹配焊接; 液压支架; CCT 图

中图分类号: TG457.11 **文献标志码:** B

0 概述

随着高产高效矿井建设的不断发展, 对综采设备的生产能力和可靠性要求也越来越高, 支架开始向着大配套、大阻力、高可靠性方向发展, 为减小支架的自身质量, 提高支架的可靠性, 支架结构件选用钢板的强度也越来越大^[1]。为保证高端液压支架焊接接头的综合力学性能满足高强度高可靠性的设计和使用要求, 达到国际先进水平, 本文选择 900 MPa 新型高强度钢 SHT900D 作为高端液压支架的材料。应用 Formaster-D 型全自动快速膨胀仪通过热模拟手段获得了 SHT900D 钢的焊接热影响区组织, 对该钢的低匹配焊接进行了深入研究, 确定了 SHT900D 钢低匹配焊接的可行性, 借助对 SHT900D 高强度钢焊接接头进行拉伸、冲击等力学性能试验和斜 Y 形坡口试验、插销试验及热影响区最高硬度等抗裂性试验, 优化设计了预热温度、焊接热输入和道间温度等工艺参数因素对接头强度、弯曲性能和热影响区冲击韧性的影响。最后, 根据焊接性分析结果并结合实际生产条件, 按照“低强匹配原则”选取 HS-80 高强焊丝作为 SHT900D 钢的焊接材料, 采用 Ar+CO₂ 混合气体保护焊, 并进行多层多道焊接。在焊接性分析的基础上优化设计了焊接工艺, 即预热温度 ≤100 ℃、焊接热输入 1.0~1.2 kJ/mm、道间温度 150~200 ℃、焊后热处理 250 ℃, 保温 2 h。焊后对焊接接头进行力学性

能试验, 结果显示, 笔者所确定工艺下的接头性能良好, 能够满足设计要求。

1 900 MPa 高强度钢焊接性分析

1.1 试验材料及试验方法

试验用 900 MPa 高强度钢板 SHT900D 为调质状态, 钢板厚度 20 mm。试验钢板的化学成分及力学性能分别见表 1 和表 2。插销冷裂纹试验按 GB 9446—1999 执行, 使用 HCL-3MC 微机控制五头插销试验机, 插销试样从 20 mm 厚 SHT900 钢板的 1/4 处取样, 试件的缺口形式及尺寸如图 1 所示, 插销试验采用断裂准则进行评定; 斜 Y 形坡口试验按国家相关标准规定进行, 试件焊后放置 48 h, 进行表面、断面裂纹检查; 焊接接头冲击试验和焊缝金属拉伸试验按照国标 GB 2650-2652—1989 规定进行。

表 1 SHT900D 钢板的化学成分 (质量分数) (%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cu	Cr	Mo
0.096	0.30	1.43	0.012	0.008	0.61	0.053	0.48	0.41

表 2 试验选用钢板 SHT900D 的力学性能

厚度/mm	R_m /MPa	$R_{0.2}$ /MPa	A (%)	A_{KV} /J (-20 ℃)
20	895	950	18	94

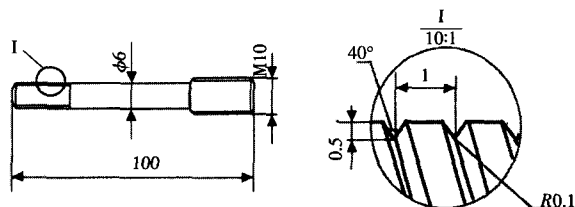


图 1 插销试验试件

根据以上计算和比较并考虑成本、焊接方式等方面因素,最终选用了焊接性更好的 900 MPa SHT900DD 高强钢作为液压支架。

1.2 CCT 图测定

焊接 CCT 图可反映钢在焊接热循环作用下热影响区的组织转变规律,预测 HAZ 淬硬及冷裂倾向,为钢材制定合理的焊接工艺提供了科学依据^[2]。本文采用 Formaster-D 型全自动快速膨胀仪,对 SHT900D 钢的临界点及不同焊接热循环条件下的焊接热影响区过热区组织转变规律进行测定和研究,热膨胀试样规格 $\phi 3.5 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 。设定冷却速度分别为:4800, 3000, 600, 60, 20, 12, 10, 8, 6, 5, 3, 2, 1 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。根据试验测得到不同冷却速度下出现的相变开始点、终了点以及相应的组织转变量和所测得硬度值列表,绘制 SHT900D 钢焊接 CCT 图如图 2 所示。

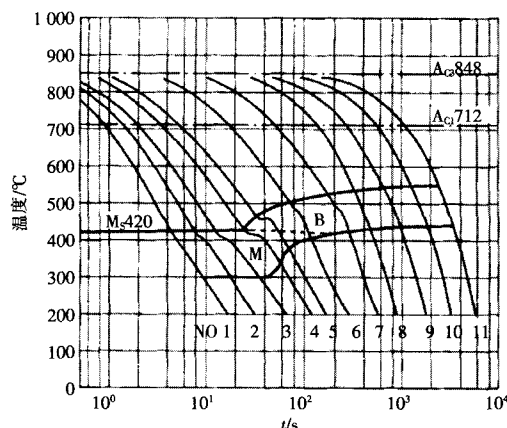


图 2 SHT900D 钢焊接 CCT 图

从图 2 焊接 CCT 图可知, SHT900D 钢出现贝氏体的临界冷却时间为 60 s, 马氏体转变结束时的临界冷却时间为 260 s。当 $t_{8/5} \leq 60 \text{ s}$ 时, HAZ 过热区组织为 100% 马氏体, 硬度为 HV₅ 395; 当 $60 \text{ s} < t_{8/5} \leq 260 \text{ s}$ 时, HAZ 过热区组织为 M+B 混合组织。随 $t_{8/5}$ 增加, M 逐渐减少, B 逐渐增加, 硬度逐渐降低; 当 $t_{8/5} > 260 \text{ s}$ 时, HAZ 过热区组织为 100% 贝氏体, 随着 $T_{8/5}$ 的延长, HAZ 过热区硬度值进一步降低, 但变化幅度较小, 不十分明显。

2 低匹配焊接研究

根据 SHT900D 钢焊接 CCT 图特点知该材料焊接热影响区有一定的淬硬倾向, 实际焊接过程中必须采

取相应的措施防止焊接裂纹的产生。本文先借助 CCT 图定性确定较准确的工艺参数研究范围, 然后应用试验的方法对 SHT900D 钢的焊接材料、焊接工艺进行进一步精确的定量研究和优化。

对于 900 MPa 级钢材的焊接, 由于国内没有与之匹配的焊接材料, 因此本文在分析高强钢对焊接材料的要求的基础上, 通过对 900 MPa 高强钢的低匹配性研究, 选择焊接材料强度等级低于母材金属强度的, 即低强度匹配。对于低合金高强钢, 适当降低强度可以减小焊接接头的拘束应力, 从而减轻熔合区的负担, 有利于减小产生根部裂纹的倾向^[3]。在 SHT900D 钢焊接材料的选择中主要考虑以下 2 个因素: (1) 选择与母材强度相当的焊接材料, 同时必须综合考虑焊缝金属的塑韧性及抗裂性能; (2) 将 SHT900D 钢首选在 6.2 m 液压支架的推杆部件上使用, 该构件工作时承受拉、压、弯曲及扭转载荷, 受力条件复杂苛刻。

综合考虑各方面的因素, 通过对几种不同焊丝的比较检测, 最后选用国产焊丝 HS-80 $\phi 1.2 \text{ mm}$ 进行焊接性试验, 表 3, 表 4 所示分别为焊丝的化学成分和焊丝熔敷金属的力学性能及扩散氢含量 (水银法)。

表 3 HS-80 焊丝化学成分 (质量分数) (%)

C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	S	P
0.087	0.47	1.64	2.50	0.63	—	0.007	0.012

表 4 HS-80 熔敷金属力学性能及扩散氢含量

拉伸性能			冲击性能 A_K/J		扩散氢含量 [$\text{mL} \cdot (100 \text{ g})^{-1}$]
R_m/MPa	R_{m2}/MPa	$A(\%)$	-20 ℃	-40 ℃	
830	735	16	47, 46, 48(47)	44, 32, 44(40)	1.4

3 900 MPa 高强钢焊接工艺优化设计

为进一步优化 SHT900D 钢的焊接工艺参数, 本文对 0.85~2.05 kJ/mm 范围内的热输入和 100~250 $^{\circ}\text{C}$ 的道间温度等参数进行了优化。

3.1 热输入对焊接接头性能的影响

表 5 所示为采用不同热输入焊接 SHT900D 钢时, 焊接接头的力学性能变化情况。由表 5 可见, 焊接热输入在 1.46 kJ/mm 以下变化时, 焊缝金属拉伸性能及焊接接头的冲击性能变化不大, 焊缝金属强度保持在较高的水平上, 焊接接头冲击性能较好; 当焊接热输入达到 2.05 kJ/mm 时, 焊缝金属强度及焊接热影响

区冲击韧性下降明显。因此,为了优化 SHT900D 钢焊接接头的综合力学性能,采用 HS-80 焊丝焊接时,应适当控制焊接热输入在 1.04~1.46 kJ/mm 比较合适。

表 5 不同热输入对焊接接头力学性能的影响

试样 编号	热输入 $I/(kJ \cdot mm^{-1})$	焊缝金属拉伸性能			焊接接头 A_{KV}/J ($-20^{\circ}C$)	
		R_m/MPa	R_d/MPa	$A(\%)$	焊缝中心	热影响区
1	0.85	985	910	15	82	96
2	1.04	960	875	15.5	85	88
3	1.46	970	880	15	71	113
4	2.05	825	735	21	103	54

注:表中焊接电流及电弧电压为平均值;试板打底焊均采用 230 A, 26 V, 380 mm/min 的焊接工艺参数。

3.2 道间温度对焊接接头性能的影响

液压支架结构采用多层多道焊,道间温度是影响焊接接头性能的重要参数,试验在 4 种不同焊缝道间温度条件下焊接,焊缝金属拉伸及焊接接头低温冲击试验结果见表 6。从表 6 可以看出,随着焊缝道间温度的提高,焊接接头焊缝金属的抗拉强度和屈服强度

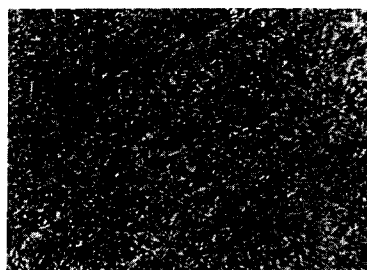
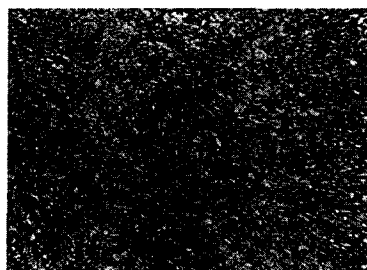
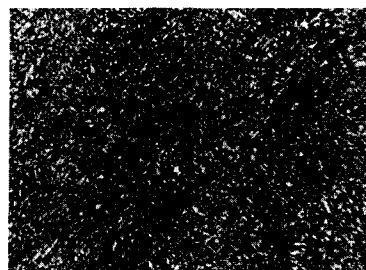
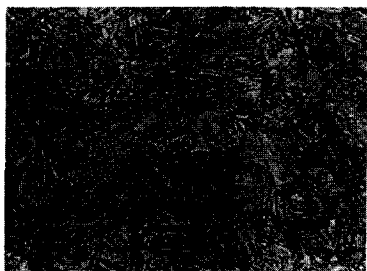
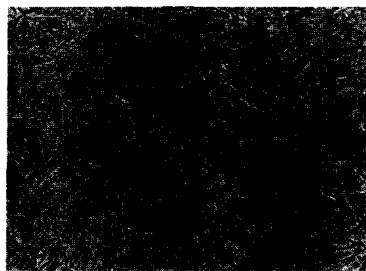
降低、伸长率增大;而焊缝道间温度对焊接接头冲击韧性的影响呈现先提高后降低的趋势,当焊缝道间温度控制在 $150 \sim 200^{\circ}C$ 时,焊接接头焊缝金属及热影响区的 A_{KV} 值均保持在较高的水平上。因此,综合考虑焊接接头的拉伸及冲击性能,焊缝将道间温度控制在 $150 \sim 200^{\circ}C$ 比较合适。

表 6 焊缝道间温度对焊接接头力学性能的影响

试样 编号	道间温度 $/^{\circ}C$	焊缝金属拉伸性能			焊接接头 A_{KV}/J ($-20^{\circ}C$)	
		R_m/MPa	R_d/MPa	$A(\%)$	焊缝中心	热影响区
5	100	1010	930	13	62	75
2	150	960	875	15.5	85	88
6	200	915	830	18	93	92
7	250	915	815	19.5	63	75

3.3 基于金相试验的工艺参数确定

采用光学显微镜分别对不同焊接工艺参数下 SHT900D 钢焊缝区及焊接过热区微观组织进行了分析,分析结果如图 3、4 所示。

(a) 热输入 1.04 kJ/mm, 道间温度 $150^{\circ}C$ (b) 热输入 1.45 kJ/mm, 道间温度 $150^{\circ}C$ (c) 热输入 1.04 kJ/mm, 道间温度 $200^{\circ}C$ 图 3 不同焊接条件下 SHT900D 钢焊缝区金属组织金相图 (500 \times)(a) 热输入 1.04 kJ/mm, 道间温度 $150^{\circ}C$ (b) 热输入 1.45 kJ/mm, 道间温度 $150^{\circ}C$ (c) 热输入 1.04 kJ/mm, 道间温度 $200^{\circ}C$ 图 4 不同焊接条件下 SHT900D 钢焊接过热区组织金相图 (500 \times)

由图可见,不同焊接工艺参数条件下,焊缝金属组织呈均匀细小的针状铁素体+粒状贝氏体的混合组织。道间温度从 $150^{\circ}C$ 提高到 $200^{\circ}C$ 时,焊缝金属的金相组织变化不明显;焊接热输入从 1.04 kJ/mm 提高到 1.45 kJ/mm,焊缝金属的金相组织中出现粒状贝氏体。不同焊接工艺参数条件下, SHT900D 钢焊接过热区组织为马氏体+贝氏体的混合组织。热输入

1.04 kJ/mm, 道间温度 $150^{\circ}C$ 时组织为马氏体+少量贝氏体;热输入 1.04 kJ/mm, 道间温度 $200^{\circ}C$ 时焊接过热区组织为下贝氏体+马氏体,下贝氏体比例较大;热输入 1.45 kJ/mm, 道间温度 $150^{\circ}C$ 时焊接过热区组织为马氏体+少量下贝氏体。分析认为,随着焊接热输入的提高,焊缝金属中粒状贝氏体组织的出现及重热区所占比例的减小,导致了焊缝金属低温冲击韧

性降低;而道间温度从 150 ℃ 提高到 200 ℃,焊接过热区中的下贝氏体所占比例增加是其韧性提高的主要原因。

因此,综合以上原因考虑焊接接头的冲击韧性,焊接热输入控制在 1.04 kJ/mm 左右,道间温度控制在 150 ℃ 左右可得到比较理想的焊接接头组织。

4 研究结果及应用

根据以上试验结果,按优化后焊接工艺参数对 900 MPa 高强钢 SHT900D 进行实际焊接生产。焊缝金属及焊接热影响区冲击吸收功分别为 45 J 和 56 J,该工艺下的焊接接头力学性能见表 7。

表 7 SHT900D+SHT900D 对接接头综合力学性能

抗拉强度 R_m /MPa	断裂位置	焊接接头侧弯 $d=3a, \alpha=120^\circ$	接头冲击吸收功 A_{KV}/J ($-20^\circ C$)	
			焊缝	热影响区
950	母材	完好	42, 49, 44 (45)	50, 62, 57 (56)

本文研究成果已成功应用于 ZY9400/28/62 和 ZY10800/28/63D 等高端液压支架产品的生产中,液压架试验通过了 MT312—2000 标准和欧洲标准强度、寿命试验,产品已应用于晋城、神东等矿区的综采生产中,焊接的稳定性、可靠性经受住了复杂载荷的考验,满足了设计和使用要求。

5 结论

(1) 首次对 900 MPa 高强钢焊接性进行了研究, SHT900D 钢焊接 CCT 图测定结果表明焊接热影响区有较大的淬硬倾向。

(2) 针对国内没有可靠的 900 MPa 高强焊材的现状,对 SHT900D 钢的低匹配焊接进行了研究,根据研究结果选用了与之等韧性的国产 800 MPa 级高强焊丝 HS-80 作为焊接材料。

(3) 通过插销试验和斜 Y 型坡口试验等试验方法对 SHT900D 钢低匹配焊接工艺参数进行了优化设计,通过金相分析确定了合理热输入、道间温度等工艺参数。

(4) 研究成果推广应用于 6.2, 6.3 m 等大工作阻力高端液压支架中,效果良好。

参考文献:

- [1] 高有进, 杨以淳. WH70 高强钢焊接试验及在液压支架上的应用[J]. 中国煤炭, 2004, 30(2): 36-38.
- [2] 祁文军, 方建疆, 周建平, 等. 基于焊接 CCT 图的焊接接头组织和性能预测[J]. 焊接技术, 2003, 32(5): 33-34.
- [3] 严鸢飞, 杨毅力, 印建正, 等. 钢焊接接头的强韧性设计原则的研究[J]. 机械工程学报, 1996, 32(2): 101-105.

作者简介: 赵俊丽 (1976—), 女, 河南兰考人, 助理工程师, 2002 年毕业于河南科技大学, 现任郑州煤矿机械集团下料分厂技术室主任。

· 信息 ·

林尚扬院士获国际焊接学会 2009 Evgenij Paton 奖

7 月 12 日, 在新加坡举行的国际焊接学会 (IIW) 第 62 届年会的开幕式上, IIW 副主席、乌克兰科学院院士尤申克先生亲手将 IIW 的大奖——Evgenij Paton Prize (巴顿终生成就奖) 授予机械科学研究总院林尚扬院士, 来自各成员国的 600 余名会议代表见证了中国焊接界的这一辉煌时刻。

巴顿终生成就奖是国际焊接学会设立的重要奖项之一, 由乌克兰国家焊接委员会和乌克兰巴顿焊接研究所共同出资赞助, 以乌克兰科学院院士、著名桥梁建筑专家、焊接专家 Evgenij Paton 先生命名。该奖项主要奖励给将毕生精力奉献给焊接事业, 在焊接及相关工艺先进技术、材料、设备等科技领域做出重要贡献的专家学者。

该奖项在世界各国焊接专家学者中征集人选, 经 IIW 技术委员会评选, 每年在世界范围内评选出一名获奖者, 到目前为止已有 6 名学者获此殊荣。该奖项自设立以来, 林尚扬院士是首位获得该荣誉的中国专家。

林尚扬院士 40 多年来一直奋斗在科研第一线, 在机械科学研究总院哈尔滨焊接研究所先后创建了 4 个新实验室, 领导了 4 个新领域的研究, 先后完成 25 项重大课题, 取得多项科研成果, 共获得国家发明奖、国家科技进步奖和部委级科技进步奖 11 次, 发表论文 50 多篇, 专著 2 部, 培养博士、博士后和硕士 10 余名。

(节选自: 国资委网站)