

400MPa级超细晶粒钢的焊接

田志凌¹, 何长红¹, 张晓牧¹, 邹刚¹, 屈朝霞²

(1. 北京钢铁研究总院, 北京 100081; 2. 上海宝钢技术中心, 上海201900)

摘要: 对超细晶粒钢在焊接热循环作用下晶粒长大和组织、性能变化的规律进行了研究。400MPa级钢由于不存在第Ⅱ相粒子对晶粒长大的钉扎作用, 晶粒长大趋势明显, 焊接热输入越大, 长大程度越严重。无论是焊接热模拟试件还是焊接接头硬度测试均表明HAZ不存在软化问题, 接头拉伸试验断在远离热影响区的母材上。HAZ粗晶区有较多的侧板条铁素体, 但缺口冲击功未显示热影响区的冲机韧性低于母材, 尽管试件断口分析说明粗晶区的韧性低于母材。

关键词: 超细晶粒钢; 焊接; 晶粒长大; 组织

中图分类号: TG401 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X (2001) 06-01-03

0序言

在国家重大规划基础研究项目“新一代钢铁材料重大基础研究”中, 将通过晶粒超细化实现钢材强度韧性提高一倍的目标。对于超细晶粒钢而言, 热影响区(HAZ)晶粒粗化导致的性能恶化及不当焊接热输入导致的HAZ软化将是最主要的问题。研究焊接热循环对母材组织、性能的影响规律及研究适合超细晶粒钢的新型焊接技术和工艺是非常必要的。日本在其“超级钢”规划中, 将超级钢焊接技术作为三个研究主题之一, 在800MPa级高强度课题中更将焊接置于极其重要的位置^[1, 2]。韩国在新世纪高性能结构钢中也非常重视超细晶粒钢的焊接问题^[3], 为使焊接接头具有90%以上的母材性能(强度、韧性), 从焊接技术、焊接材料和焊接工艺三个方向全面开展工作。作者对超细晶粒钢焊接热影响区晶粒长大规律进行了初步的研究, 进行了脉冲MAG、激光焊等方法对超细晶粒钢的适应性研究, 以及利用焊后特殊处理技术提高焊接接头性能的探索性研究工作。

1 试验用超细晶粒钢及试验研究

试验用材为400MPa级课题组在宝钢轧制的SS400热轧钢板, 该材料的研究目标是通过晶粒细化使屈服强度提高一倍, 板厚3mm, 其化学成分和力学性能如表1和表2所示。材料的原始铁素体尺寸为6~8 μm 。

表1 SS400 试验用钢的化学成分(质量分数, %)

Table 1 The chemical composition of the test material

C	Si	Mn	P	S	Al	Cu	Cr	Mo	Ni
0.17	0.09	0.36	0.013	0.013	0.02	0.01	0.02	0.01	0.03

表2 SS400 钢的力学性能和硬度

Table 2 The mechanical properties and hardness of the test material

Material	σ_s /MPa	σ_b /MPa	δ_5 (%)	HV ₁₃₀	Grain size/ μm
SS400	480	365	31	132	7

在本研究中, 用焊接热模拟试验研究了焊接热影响区的晶粒长大规律, 研究了400MPa级超细晶粒钢的脉冲MAG焊接适应性、热影响区组织及焊接接头力学性能。

2 超细晶粒钢的HAZ晶粒长大趋势和组织及性能

为研究焊接热循环对超细晶粒钢的影响, 利用Gleeble-1500焊接热模拟试验机对试验材料进行了焊接热模拟试验, 试验设计如下。(1) 加热峰值温度固定 $T_p=1350^\circ\text{C}$ 改变冷却速度 $t_{8/5}$ 从3~24s, 模拟在不同焊接热输入条件下热影响区粗晶区的组织和性能。(2) 冷却速度固定 $t_{8/5}=5\text{s}$, 改变峰值温度 T_p 从1400~650 $^\circ\text{C}$, 模拟在同一焊接热输入条件下, 焊接热影响区不同部位的组织和性能。焊接热模拟试验结果如图1所示。图1a为焊接热输入对粗晶区原始奥氏体晶粒尺寸的影响, 在峰值温度为1350 $^\circ\text{C}$ 时, 随着 $t_{8/5}$ 逐渐增加, 即随着焊接热输入的增加, 热影响区粗晶区的原奥氏体粒径不断增加, 当 $t_{8/5}$ 为20s时, 奥氏体粒径达到170 μm , 这说明超细晶粒钢焊接热影响区晶粒长大倾向严重, 奥氏体粒径受 $t_{8/5}$ 的影响很大, 在条件允许的情况下, 应尽可能采用低热输入焊接, 加快焊接冷却速率。图1b为 $t_{8/5}=5\text{s}$ 时峰值温度对原始奥氏体晶粒尺寸的影响, 当 T_p 介于1100~1200 $^\circ\text{C}$ 时, 奥氏体粒径明显开始粗化, 可把这个温度区间作为SS400钢的粗化温度。当 $T_p>1350^\circ\text{C}$ 时, 奥氏体晶粒不再继续粗化, 而奥氏体晶粒有所减小, 这有可能是因为在奥氏体晶界局部熔化导致晶粒尺寸有所减小。图1c、d为显微硬度测量结果。由上面图表的数据可以得出: 随着 $t_{8/5}$ 增加, 热影响区粗晶区的硬度逐渐降低并趋于平稳, 当 $t_{8/5}=3\text{s}$ 时, 硬度最大。当 $t_{8/5}=5\text{s}$ 时, 随着峰值温度 T_p 的升高, 其显微硬度逐渐增加, 当 $T_p=1400^\circ\text{C}$ 时, 其硬度达到最大。经 $t_{8/5}=5\text{s}$, 不同峰值温度的焊接热模拟后, SS400钢的整个热影响区硬度都不低于母材, 于是可以预言: 当 $t_{8/5}$ 时, SS400钢的热影响区不会出现软化现象。



田志凌

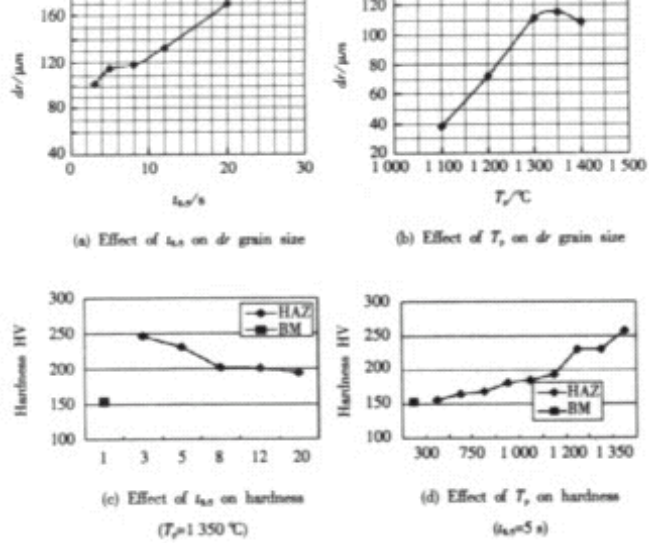


图1 400 MPa 级钢焊接热模拟试验结果

Fig.1 Welding thermal simulation test results

3 400MPa级超细晶粒钢的脉冲MAG焊接适用性研究

将试板对接，压紧在镶有成形铜条的工作台上，采用95%Ar+5%CO₂（质量分数）气体保护进行低热输入脉冲MAG焊接。三种规范下的SS400钢脉冲MAG焊接。三种规范下的SS400钢脉冲MAG焊接规范及其相对应的焊接接头的拉伸性能列于表3。

表3 SS400 脉冲 MAG 焊接规范及接头拉伸试验结果(全部断在母材)

Table 3 Pulse MAG welding parameters and mechanical test results of the welded joints (all ruptured at base metal)

Joint number	I /A	U /V	v /($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	$t_{8/5}$ /s	σ_b /MPa	σ_s /MPa	δ_5 (%)
5	95	20.8	6.5	4.7	480	360	24
10	151	24.2	6.5	5	480	350	28
11	156	23.8	6.5	10	485	355	26

因超细晶粒钢主要是在形变条件下获取细晶的，不能通过热处理手段来恢复，所以焊后HAZ会出现软化，尤其当高热输入时，就更加明显。不过这种局部软化对接头整体强度的影响是受其它因素控制的，如局部软化区的宽度、板厚和焊缝强度匹配等因素。三种规范下的SS400接头拉伸均断在母材，说明至少当 $t_{8/5} < 10\text{s}$ 时，SS400钢接头中的HAZ不存在软化问题。从接头的硬度分布（图2）也可看出SS400钢5号接头的热影响区不存在软化问题，这一点与焊接热模拟试验结果一致。

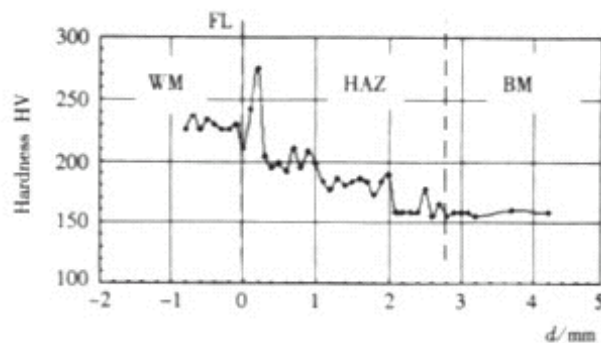


图2 5号接头中部的硬度分布

Fig.2 Hardness distribution over joint No. 5

在焊接热影响区的粗晶区晶粒长大严重，如图3所示。其组织以贝氏体为主，沿原奥氏体晶界，有较多的侧板条铁素体，这样的组织韧性水平往往较低。

为评估热影响区的韧性不平，从焊接试板上取样进行V型缺口冲击试验，试样尺寸 $2.5\text{mm} \times 10\text{mm} \times 55\text{mm}$ ，取样位置如图4所示，试验结果列于表4。

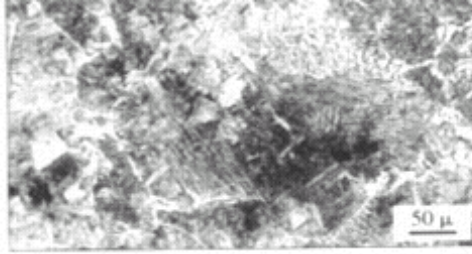


图3 接头粗晶区全相组织照片

Fig.3 Microstructure of the coarse grained zone

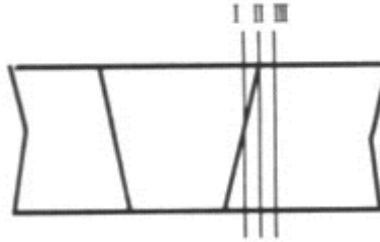


图4 取样示意图

Fig.4 Illustration of notch position

表中 I、II、III 为试样的位置，其中 II 为焊脚熔合线，向焊缝侧移 2mm 为 I，向母材侧移 2mm 为 10S。单从冲击功试验结果来看，热影响区的数值与母材相比并无明显差距，但低温试验热影响区断口结晶状的比例高于母材。位置 I 裂纹扩展前沿由焊缝+粗晶区+母材组成，结晶状断口比例最高；位置 II 由粗晶区+细晶区+母材组成，结晶状断口比例次高；位置 III 由细晶区+母材组成，结晶状断口比例与母材相同。这些结果显然与裂纹前沿粗晶区所占的比例有关，位置 I 的粗晶区所占的比例最高，结晶状断口比例也最高，位置 III 粗晶区所占的比例为零，结晶状断口比例也与母材一样为零，这说明粗晶区的韧性低于母材。然而，由于焊接接头，特别是熔合线附近，为复合组织，韧性较差的粗晶区只占裂纹扩展前沿很小的比例，所以焊接接头的抗裂性能与母材相比并不一定会有明显差距，这在冲击值中已有所体现。然而，由于试件以尺寸很小，厚度仅仅 2.5mm，试验的结论尚须通过断裂韧性试验进一步证实。

表4 脉冲MAG焊接接头热影响区冲击试验结果

表4 脉冲MAG焊接接头热影响区冲击试验结果

Table 4 Charpy-V impact test results of the HAZ

Specimen	$a_{KV}/(J \cdot cm^{-2})$		Ratio of crystalline fracture (%)	$a_{KV}/(J \cdot cm^{-2})$		Ratio of crystalline fracture (%)	$a_{KV}/(J \cdot cm^{-2})$		Ratio of crystalline fracture (%)
	0 °C	-20 °C		-40 °C	-60 °C				
BM	92	93	0	89	0	88	0		
5-I	93	85	4.5	82	26.3	60	39		
5-II	105	105	0	97	6.8	78	22.3		
5-III	95	96	0	93	0	90	0		
10-I	143	114	1.3	106	3.7	78	30.2		
10-II	102	102	0	106	0	88	14.7		
10-III	93	94	0	90	0	91	0		

4 结论

- (1) 超细晶粒钢焊接热影响区有严重的晶粒长大倾向，长大程度随焊接热输入增长而迅速增长。
- (2) 虽然400MPa级超细晶粒钢焊接影响区晶粒严重粗化，但不存在软化现象。
- (3) 焊接热影响区中有明显脆性组织，但缺口冲击功上难以看出脆化现象。从结晶状断口比例来看，缺口前沿粗晶区组织越多，结晶状断口比例越大，这说明粗晶区的韧性低于母材，但这种局部脆性区对焊接接头的韧性有多大影响，尚须进一步研究证实。

参 考 文 献

[1] Akira Sato. Research project on innovative steels in japan (STX-21 Project) [C], Proc. of the International Conference Ultra Steel 2000, Tsukuba, Japan 2000. 1~10.
 [2] Shiga C. Progress in welding and joining in STX-21 project [C]. Tsukuba, Japan, 2000. 159~173.
 [3] Won-Pyo Lee. Development of high performance structural steels for 21st. century in korea [C]. Tsukuba, japan, 2000, 179~186.

作者简介：田志凌，男，1961年3月20日出生，工学博士，教授级高工。主要从事金属焊接性与焊接材料方面的研究、开发

工作，发表论文30余篇。
Email:tian zhl @cisri.com(编辑：王亚)

摘自：焊接学报 第22卷 第6期