

焊后多次正火对超细晶粒钢热影响区 组织与硬度的影响

张贵锋, 苗慧霞, 张建勋, 裴怡, 肖克民, 杨永兴
(西安交通大学焊接研究所, 710049, 西安)

摘要: 为研究 400 MPa 级超细晶粒钢焊接接头热影响区粗晶区的晶粒细化行为, 对其空冷与水冷接头均进行了 3 次焊后正火热处理. 组织观察表明: 第 1 次正火后粗晶区晶粒明显细化, 但细晶区和母材区的晶粒均比正火前的稍微粗大, 第 2 次与第 3 次正火并不能进一步细化晶粒; 冷却条件对热影响区组织的影响并不十分显著. 显微硬度测试表明: 第 1 次正火使接头硬度大幅度降低, 甚至低于母材的原始硬度, 后续正火对硬度的影响较小; 在所有试样中, 仅水冷接头第 1 次正火后的热影响区硬度与原始母材及母材区的硬度接近. 由于焊后多次正火并不能使热影响区晶粒进一步细化, 反而使其有粗化与软化的趋势, 故应避免焊后多次正火处理.

关键词: 焊接; 超细晶粒钢; 正火; 组织; 硬度

中图分类号: TG441 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2008)01-0065-05

Effects of Multiple Post Welding Normalizations on Microstructure and Hardness of Heat Affected Zone of Ultra-Fine Grained Steel

ZHANG Guifeng, MIAO Huixia, ZHANG Jianxun, PEI Yi, XIAO Kemin, YANG Yongxing
(Institute of Welding Research, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To investigate the refinement of the grains in the coarse grain heat affected zone (CGHAZ) of 400 MPa ultra-fine grained steel joints welded by gas tungsten arc welding (GTAW) with air cooling and water cooling, post welding normalization treatments (PWNT) are performed respectively for three times. The microstructure examinations show that the grains of CGHAZ are remarkably refined after the first PWNT, however the grains in the fine grain heat affected zone (FGHAZ) and base metal are slightly coarsened. The grains can not be further refined after the second and third normalizations. The cooling conditions after welding exert less effect on the microstructure in heat affected zone (HAZ). The results of micro-hardness test indicate that the joints hardness decreases greatly after the first PWNT, so that the whole joints hardness is below the original hardness of base metal. Further PWNTs have less effect on the hardness of HAZ. Among all specimens, after the first PWNT only the HAZ hardness of the joints with water cooling is equivalent to the hardness of the original base metal. Multi-normalization post welding ought to be avoided since the grains in the HAZ can not be refined further, on the contrary, coarsening and softening may arise.

Keywords: weld; ultra-fine grained steel; normalization; microstructure; hardness

钢铁材料的强化主要经历了添加合金元素、热处理、微合金化、控轧控冷等技术阶段. 自 1997 年以

来,晶粒超细化成为 21 世纪初中、日、韩三国选定的主流钢铁材料强化技术^[1]. 晶粒超细化强化技术具有能同时实现强韧化、节约合金元素资源、免除焊前预热等优点^[1]. 作为新一代高性能钢铁结构材料代表的超细晶粒钢,是在比传统控轧控冷钢更低的轧制温度、更大的轧制变形量下,通过形变诱导铁素体相变机理^[2]而获得超细小铁素体晶粒的(粒径约 5 μm 左右),同时渗碳体也被细化而趋向于呈极为细小的球状^[3]. 虽然超细晶粒钢由于上述组织特征而能同时实现强韧化,然而由于其晶粒本身细小,故长大驱动力(与粒径成反比)随之变大^[4],热稳定性变差,所以在焊接性方面存在的最大障碍是热影响区(HAZ)晶粒的显著粗化及由此导致的软化^[1]. 目前,我国超细晶粒钢的开发在“973 计划”的支持下已实现了产业化,近年来已逐步在汽车、建筑、造船等行业开始大范围应用. 目前,国内外基于减小热输入与热影响区宽度的思路^[1],主要采用激光焊^[5],此外还有热输入低的脉冲弧焊^[6]、固相焊^[7]等工艺.

目前,关于焊后 2 次以上正火热处理对焊接接头组织影响的研究甚少. 本文主要研究焊后多次正火处理对超细晶粒钢热影响区组织和硬度的影响,旨在为制定焊接工艺提供参考.

1 试验材料及方法

试验用钢为鞍钢产 8 mm 厚的 ANS400(400 MPa)超细晶粒钢板,抗拉强度为 535 MPa,屈服强度为 440 MPa,化学成分如表 1 所示^[8-9].

表 1 ANS400 钢的化学成分

元素	C	Mn	Si	P	S	N	Al
$w/\%$	0.121	0.30	0.131	0.014	0.005	0.002 1	0.001

采用不填丝钨级氩弧焊(电流 120 A,焊速 10 cm/min,气流量 8 L/min),在 2 块面积为 115 mm $\times$ 60 mm 的试板上各熔一道,以此获得不同冷却条件下(A 板空冷、B 板水冷)的热影响区. 焊后从 A、B 试板上各切取 3 块试样(尺寸为 60 mm $\times$ 15 mm $\times$ 8 mm),得 2 组试样,对每组试样分别进行 3 次正火处理. 正火升温速率为 10 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$,保温温度为 900 $^{\circ}\text{C}$,保温时间为 10 min,空冷. 对正火后的 A1、A2、A3 和 B1、B2、B3 试样分别进行显微组织观察和硬度检测,以评价焊后多次正火对热影响区组织与软化行为的影响,特别是对晶粒细化效果的影响.

此外,为系统研究正火工艺细化母材及热影响

区晶粒的潜力,也观察了单次正火对未经历焊接热循环的母材原始晶粒尺寸的影响(为加快冷速,选用了小型试样,尺寸为 14 mm $\times$ 12 mm $\times$ 8 mm).

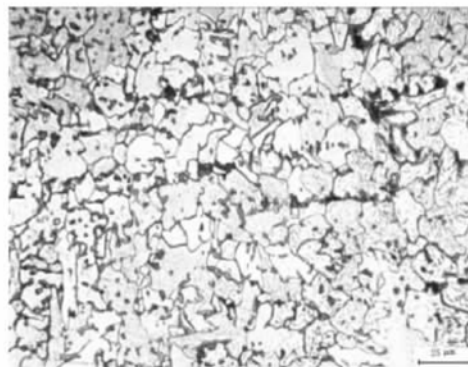
2 试验结果及分析

2.1 正火对超细晶粒钢母材原始组织的影响

图 1a 为超细晶粒钢母材的原始组织,由金相组织测试可知,原始母材平均粒径约为 7 μm . 图 1b 为超细晶粒钢母材正火后的组织,平均粒径约为 15~20 μm . 可见,普通正火工艺并不能使超细晶粒钢母材的晶粒细化,反而使晶粒长大了 1 倍多.



(a)母材的原始组织 $\times 400$



(b)正火后的组织 $\times 400$

图 1 400 MPa 级超细晶粒钢母材正火前后晶粒对比

通过比较母材制备与正火 2 种工况下的 $\gamma \rightarrow \alpha$ 相变条件,可知正火后晶粒粗化的原因有二. 其一,冷速不同:普通正火条件下相变过程中的空冷(自然冷却)慢于制备工况下的水冷(加速冷却). 其二,相变前原奥氏体母相内的缺陷密度不同:在制备工况下,经较低温度下的大变形量轧制(强加工),使相变前原奥氏体母相内的缺陷密度远大于无任何变形的普通正火工况,而在正火情况下,相变前原奥氏体母相内较低的缺陷密度与相变中较慢的冷速是正火后铁素体晶粒粗化的主要原因. 此外,渗碳体也有随冷速变慢而粗化的趋势. 可见,与传统热轧钢不同,在

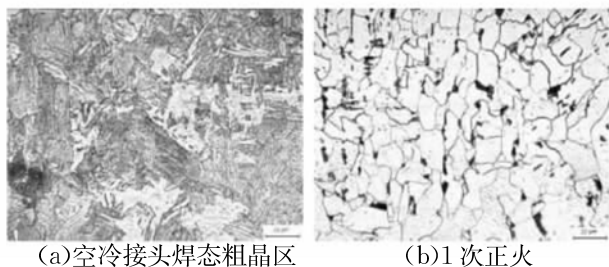
超细晶粒钢构件中远离焊缝而未受到焊接热循环影响的母材区域,工件经整体正火处理后,母材晶粒有粗化趋势,此为超细晶粒钢焊接工件不宜进行整体正火热处理的原因之一。

2.2 多次正火对热影响区组织的影响

多次正火对空冷接头及水冷接头热影响区粗晶区(Coarse Grained Heat Affected Zone, CGHAZ)组织的影响分别如图2、图3所示。正火后的组织主要为铁素体和珠光体,但在晶粒尺寸和组织组成物量上存在差别。仅第1次正火可将CGHAZ的晶粒细化至约15 μm ,其后的第2次与第3次正火均难以进一步细化CGHAZ的晶粒,反而使晶粒出现不规则性长大。仅从细化CGHAZ晶粒的角度看,焊

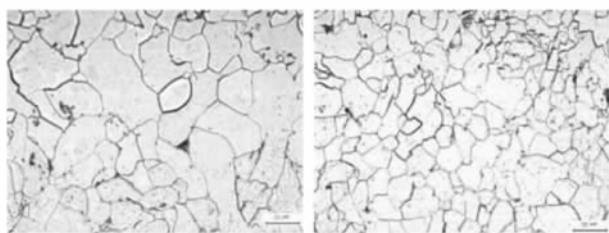
后进行1次正火还是有积极意义的。此外,冷却条件对CGHAZ及其正火组织的影响并不十分显著。

多次正火对空冷接头及水冷接头热影响区细晶区(Fine Grained Heat Affected Zone, FGHAZ)组织的影响分别如图4、图5所示。首先,与传统热轧钢相同,超细晶粒钢接头在焊态也存在FGHAZ(尽管细化效果有限),并非所有热影响区的晶粒全都长大,这应归因于焊接热源所具有的局部加热特征,这样在原奥氏体母相晶粒未充分长大且冷速较快的区域内(因局部加热),便可能出现FGHAZ。其次,第1次正火引起了FGHAZ铁素体晶粒的长大以及珠光体的粗化(渗碳体经历了溶解及再次析出、长大),这主要是由于工件整体加热正火导致冷却速度比



(a)空冷接头焊态粗晶区

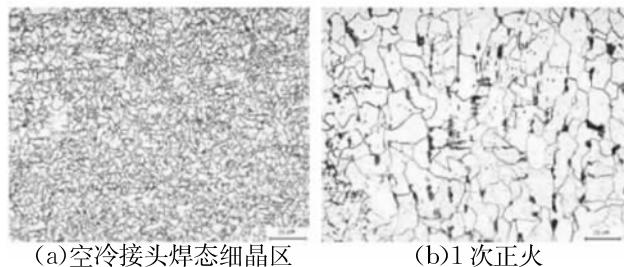
(b)1次正火



(c)2次正火

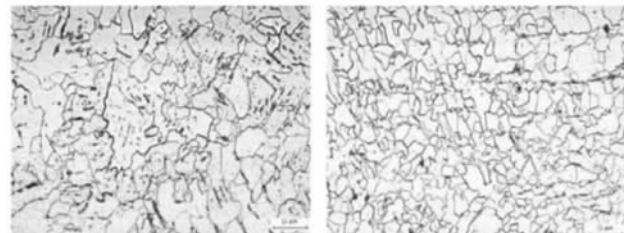
(d)3次正火

图2 空冷条件下3次正火前后的粗晶区组织 $\times 400$



(a)空冷接头焊态细晶区

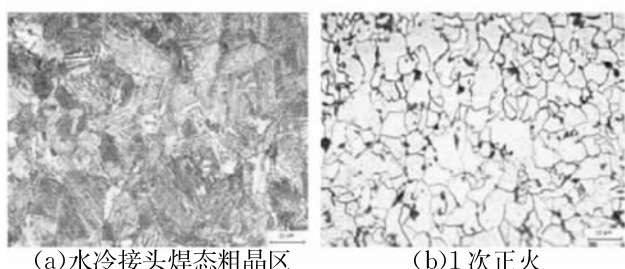
(b)1次正火



(c)2次正火

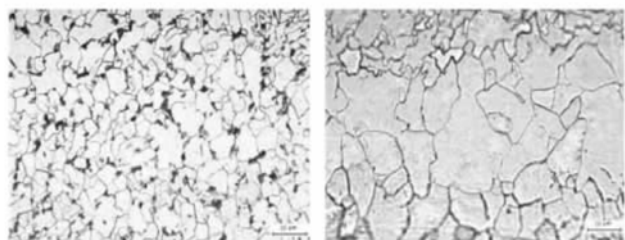
(d)3次正火

图4 空冷条件下3次正火前后的细晶区组织 $\times 400$



(a)水冷接头焊态粗晶区

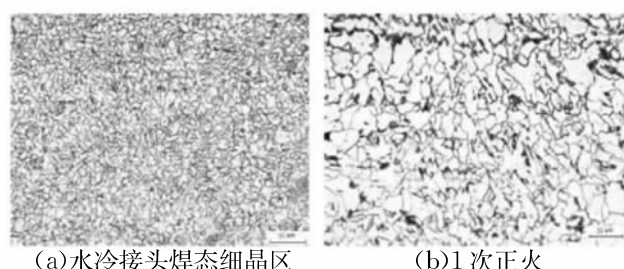
(b)1次正火



(c)2次正火

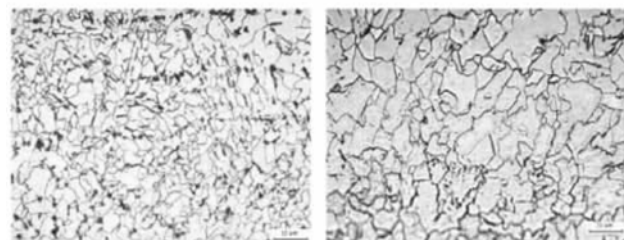
(d)3次正火

图3 水冷条件下3次正火前后的粗晶区组织 $\times 400$



(a)水冷接头焊态细晶区

(b)1次正火



(c)2次正火

(d)3次正火

图5 水冷条件下3次正火前后的细晶区组织 $\times 400$

焊接局部加热情况慢的缘故。同样,第2次与第3次正火均难以进一步细化已有所粗化的FGHAZ的晶粒,反而会使晶粒不规则性长大。冷却条件对FGHAZ及其正火组织的影响也并不十分显著。

综上所述,冷却条件及焊后多次正火对热影响区组织影响的基本趋势可概括为:冷却条件对热影响区组织的影响并不十分显著。第1次正火可使CGHAZ晶粒明显细化,与此同时,FGHAZ的晶粒出现粗化,2个区域的晶粒大小趋于均匀化,接近母材正火处理后的晶粒尺寸(平均粒径约为15~20 μm);第2次与第3次正火均难以进一步细化热影响区的晶粒,反而会使晶粒不规则性长大。因此,从防止晶粒长大的角度看,应避免焊后多次正火。

2.3 焊后多次正火对热影响区硬度的影响

利用MH-5型显微硬度计,在焊道侧面从焊缝中心沿与焊缝垂直方向向母材一侧每间隔0.25 mm测一硬度值,加载50 g,保载时间10 s,结果见图6、图7。

从图6中明显可以看出:与焊态相比,焊后3次正火使接头的硬度大幅度降低且均低于原始母材的硬度。其原因有两方面:首先,金相组织观察表明,正火后热影响区的贝氏体状组织消失,取而代之的是铁素体+珠光体;其次,铁素体粒径比原始母材的大,主要是由于相变过程中正火条件下的空冷慢于制备条件下的加速冷却所致。

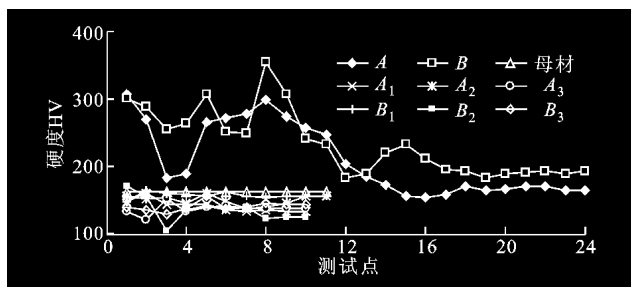


图6 接头焊态(空冷和水冷)与正火后的硬度比较

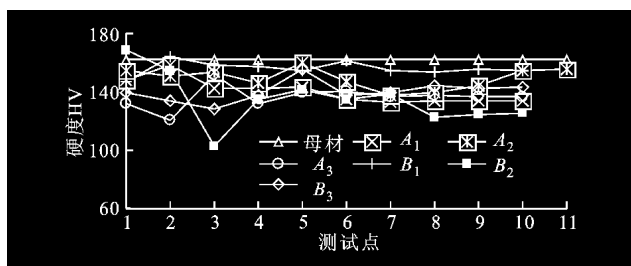


图7 空冷后和水冷后3次正火的硬度值比较

图7为空冷和水冷接头每次正火后的显微硬度测试值(即图6左下部曲线的放大图)。由图可见:与原始母材相比,正火后热影响区及母材区的硬度均

低于原始母材的硬度,出现了轻微软化现象;在2组焊接接头的所有正火试样中,水冷接头经第1次正火后(B1试样)的硬度虽然也低于原始母材硬度,但与原始母材硬度最为接近。因此,水冷的主要优势或目的在于可预先提高热影响区的硬度,以防止后续正火过程中出现过度软化。此外,鉴于首次正火可细化粗晶区晶粒并降低整个热影响区的硬度,所以在实际应用中如有需要且要求不高时,可通过焊后紧急水冷再经一次正火使热影响区的性能达到与母材区及原始母材接近。

3 结 论

(1)与传统的热轧钢不同,超细晶粒钢工件中远离焊缝而未受到焊接热循环影响的母材区域在经工件整体正火处理后,母材晶粒有粗化趋势。这正是超细晶粒钢焊接工件不宜进行整体正火热处理的原因之一。

(2)焊态热影响区存在晶粒粗化与硬化。焊接过程中冷却条件对CGHAZ组织的影响并不十分显著,仅第1次正火具有能显著细化CGHAZ晶粒的优点,但同时存在使FGHAZ晶粒粗化与接头软化的缺点。第1次正火使接头硬度与焊态相比大幅度降低,以至于低于母材的原始硬度;后续正火对硬度的影响较小。在所有试样中,仅水冷接头第1次正火后的热影响区硬度与原始母材及母材区硬度接近。水冷的主要优势或目的在于可预先提高热影响区的硬度,以防止后续正火过程中出现过度软化。

(3)与传统热轧钢不同,焊后多次正火并不能使超细晶粒钢热影响区的晶粒进一步细化,反而使其有粗化与软化的趋势。因此,无论是为了防止晶粒长大还是为了防止软化,都应避免接头焊后多次正火处理,特别是工件整体多次正火处理。

(4)推荐采用焊后于相变前立即水冷再经1次正火的工艺,因其具有既能细化CGHAZ晶粒、又能避免过度软化的优点。

参考文献:

- [1] 张贵锋,张建勋. 日本关于新世纪结构材料(超微细钢)及其焊接的研究[J]. 焊接, 2001(5): 37-40.
ZHANG Guifeng, ZHANG Jianxun. Study of 21st century structural materials projects (ultra-fine grained structural steels) and its welding projects in Japan [J]. Welding, 2001(5): 37-40.
- [2] 张贵锋,米运卿,张建勋,等. 超细晶粒钢制备工艺与机制与传统控轧控冷(TMCP)钢的异同[J]. 材料导

- 报,2004,18(8): 53-55.
- ZHANG Guifeng, MI Yunqing, ZHANG Jianxun, et al. Similarities and differences in prepared technologies and its mechanisms between ultrafine-grained (UFG) steels and TMCP steels [J]. Journal of Material, 2004,18(8): 53-55.
- [3] 张贵锋,苗慧霞,张建勋,等. 超细晶粒钢的焊接方法及接头组织特征[J]. 焊管,2007,30(2):39-43.
- ZHANG Guifeng, MIAO Huixia, ZHANG Jianxun, et al. Welding methods and microstructural characteristics of ultra-fine grained(UFG) steel joints welded by variant methods [J]. Weld Pipe, 2007,30(2):39-43.
- [4] 田志凌,屈朝霞,杜则裕,等. 细晶钢焊接热影响区晶粒长大及组织转变[J]. 材料科学与工艺,2000,8(3): 16-20.
- TIAN Zhiling, QU Chaoxia, DU Zeyu, et al. Grain growth and microstructure transformation in heat affected zone of fine-grain steels [J]. Material Science and Technology, 2000, 8(3): 16-20.
- [5] 彭云,王成,陈武柱,等. 两种规格超细晶粒钢的激光焊接[J]. 焊接学报,2001,22(1):31-35.
- PENG Yun, WANG Cheng, CHEN Wuzhu, et al. Laser welding of two super-fine grain steels [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2001, 22(1):31-35.
- [6] 田志凌,何长红,张晓牧,等. 400 MPa 级超细晶粒钢的焊接[J]. 焊接学报,2001,22(6): 1-3.
- TIAN Zhiling, HE Changhong, ZHANG Xiaomu, et al. Welding of 400 MPa ultra-fine grain steels [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2001, 22(6): 1-3.
- [7] 张贵锋,张建勋. 日本关于超细晶粒钢制备与焊接新工艺的研究进展[J]. 材料导报,2005,19(9): 94-96.
- ZHANG Guifeng, ZHANG Jianxun. Recent progress in new producing and welding process for ultrafine-grained steels in Japan [J]. Journal of Material, 2005, 19(9): 94-96.
- [8] 傅博,李巍,程钢. 鞍钢 ANS400 超细晶粒钢焊接热影响区的冲击韧性[J]. 焊接,2004(1):23-25.
- FU Bo, LI Wei, CHENG Gang. Impact toughness of ANS400 ultra-fine grained steel heat affected zone [J]. Welding, 2004(1):23-25.
- [9] 孙建伦,张万山,王科强,等. 鞍钢超细晶粒钢的开发[J]. 钢铁钒钛,2005,26(1):26-29.
- SUN Jianlun, ZHANG Wanshan, WANG Keqiang, et al. Development of ultra-fine grain steels in Anshan Steel Group [J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2005, 26(1): 26-29.

(编辑 葛赵青)