

## 超细晶粒钢 HAZ 晶粒长大的规律

屈朝霞<sup>1</sup>, 田志凌<sup>2</sup>, 杜则裕<sup>1</sup>, 何长红<sup>2</sup>, 张晓牧<sup>2</sup>, 杨 柏<sup>2</sup>

(1. 天津大学, 天津 300072; 2. 钢铁研究总院, 北京 100081)

**摘 要:** 研究了低碳钢、普通市售 X65 钢和高洁净度 X65 钢三种超细晶粒钢焊接 HAZ 的晶粒长大倾向。试验结果表明, 这些超细晶粒钢都具有严重的晶粒长大倾向; 低碳超细晶粒钢比 X65 超细晶粒钢有更为严重的晶粒长大, 这是因为前者不含有能阻碍晶粒长大的稳定碳、氮化物形成元素 Nb 和 Ti, 而后者中含有这些元素; 高洁净度 X65 超细晶粒钢的 HAZ 晶粒长大倾向小于普通市售 X65 超细晶粒钢。这是因为钢中杂质元素含量越多,  $\alpha \rightarrow \gamma$  转变温度越低, 即  $A_{\gamma}$  点越低, 在同样的焊接热循环条件下, 普通市售 X65 超细晶粒钢中的  $\gamma$  晶粒在高温停留时间就越长, 晶粒长大的程度也就越大。

**关键词:** 超细晶粒钢; HAZ; 晶粒长大; 洁净度

**中图分类号:** TG402 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2000)04-09-04



屈朝霞

### 0 序 言

纵观近年来国内外有关钢铁材料的文献来看, 人们又重新开始重视钢铁, 并着手研究和开发新一代钢铁材料, 如日本 1997 年启动了“超级钢铁计划”<sup>[1-3]</sup>, 韩国也正从事这方面的工作, 1997 年我国在有关专家的建议下, 于 1998 年也开始了“新一代钢铁材料”的研制工作, 并作为 973 国家重点基础研究项目。新一代钢铁材料的主要特征是在充分考虑经济性的条件下, 钢材具有高洁净度、超细晶粒、高均匀度的优点, 强、韧性比常用钢材提高一倍, 使用寿命增加一倍, 其理想微观组织的晶粒尺寸为微米、亚微米级<sup>[4]</sup>。

从新一代钢铁材料的特征来看, 由于晶粒超细化带来了许多优异性能和良好的应用前景, 如钢强度的上升和韧性的显著改善, 从而可大幅度减少用于建筑物和大型结构上的钢材总用量。但超细晶粒钢经过焊接后, 热影响区的粗晶区由于晶粒严重粗化, 将使 HAZ 性能与母材性能严重不匹配, 焊接接头不再具有母材的许多优异性能, 为了控制超细晶粒钢焊接热影响区的晶粒粗化, 研究超细晶粒钢晶粒长大规律及其影响因素则具有重要意义。

在 973 正式启动之前的攀登预选项目“新一代微合金高强高韧钢”中, 分别以低碳钢和 X65 钢为基础, 对其实施晶粒细化、纯净化, 使其强韧性提高、

寿命提高。目前超细晶粒钢还没有进行大规模生产, 所以本文以低碳钢和 X65 钢为试验研究对象, 依据本项目前期研究结果, 在热轧机上或热-应变模拟机上采用合适的大应变快冷工艺, 实现超细晶粒, 再把这些试样加工成热模拟试样, 进行焊接热影响区粗晶区的热模拟试验, 研究其奥氏体晶粒长大规律。

### 1 试验材料及试验方法

#### 1.1 试验材料

试验材料选用低碳钢、X65 钢和高洁净度 X65 钢, 其化学成分见表 1。

表 1 试验用钢的化学成分(%)

Table 1 Chemical compositions of experimental materials

| Materials             | C     | Si   | Mn   | Nb    | Ti    | Al    | (O+N+S+P+H) × 10 <sup>-6</sup> |
|-----------------------|-------|------|------|-------|-------|-------|--------------------------------|
| Mild steel            | 0.170 | 0.17 | 0.52 | —     | —     | —     | 608                            |
| X65 steel             | 0.094 | 0.29 | 1.42 | 0.045 | 0.008 | —     | 255                            |
| High-purity X65 steel | 0.100 | 0.17 | 1.42 | 0.048 | 0.019 | 0.044 | <76                            |

#### 1.2 试验方法

低碳钢在热轧机上经适当大应变快冷后, 获得超细晶粒钢, 对其进行金相观察并利用图像分析仪 IAS-4 测定其铁素体的平均晶粒尺寸; 对低碳超细晶粒钢进行焊接粗晶区热模拟试验, 热模拟的试样

为板材,其板厚、板宽、板长为:2.4 mm×11 mm×60 mm,热模拟参数为:峰值温度  $T_p=1\,350\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $t_{8/5}$  分别为 3 s、8 s 和 20 s。即模拟不同热输入条件下的热影响区中的粗晶区组织。沿均温区中心截开制成金相磨片,观察模拟粗晶区的金相组织,用截线法测定其奥氏体的平均晶粒尺寸。

把 X65 钢和高纯净度 X65 钢加工成热模拟试样,如图 1 所示。在 Gleeble1500 热-应变模拟机上进行适当大应变快冷的热轧工艺,使晶粒细化,得到超细晶粒钢,用 IAS-4 图像分析仪测量铁素体相的平均晶粒尺寸;重新加工焊接热模拟试样,然后再进行焊接热影响区粗晶区的热模拟试验,热模拟参数为:峰值温度  $T_p=1\,350\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $t_{8/5}$  分别为 3.5 s、8 s 和 30 s。焊接热模拟后,对其进行金相观察,并用截线法测定奥氏体相的平均晶粒尺寸。

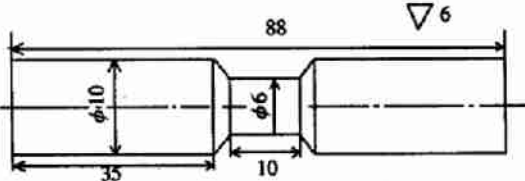


图 1 普通 X65 钢和高纯净度 X65 钢的热模拟试样尺寸  
Fig. 1 Size scheme of thermal simulation sample

磨好但未腐蚀的金相试样,在 100 倍显微镜下随机选取十个视场,采用 LEICA Q500IW 图像分析仪测定 X65 超细晶粒钢和高纯净度 X65 超细晶粒钢的夹杂物尺寸和所占的体积百分比。

为研究纯净度对晶粒长大的影响,从 X65 钢和高纯净度 X65 钢上取样,加工成热膨胀试样,如图 2 所示。利用 Formaster-Digital 全自动相变仪测定其相变点。

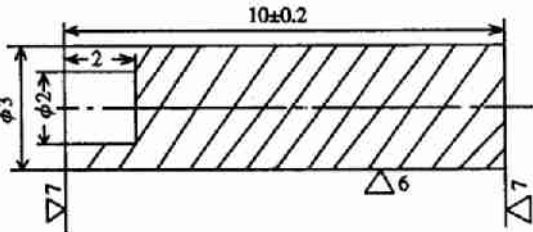


图 2 测定相变点的热膨胀试样尺寸图  
Fig. 2 Geometry of heat expansion specimen for measuring transformation point

2 试验结果

低碳超细晶粒钢的金相组织如图 3a 所示,铁素体相的平均晶粒尺寸为  $2.8\text{ }\mu\text{m}$ 。低碳超细晶粒钢,经焊接热影响区粗晶区(CGHAZ)热模拟后,金相组

织如图 3b、c、d 所示,奥氏体相的平均晶粒尺寸如表 2 所示。

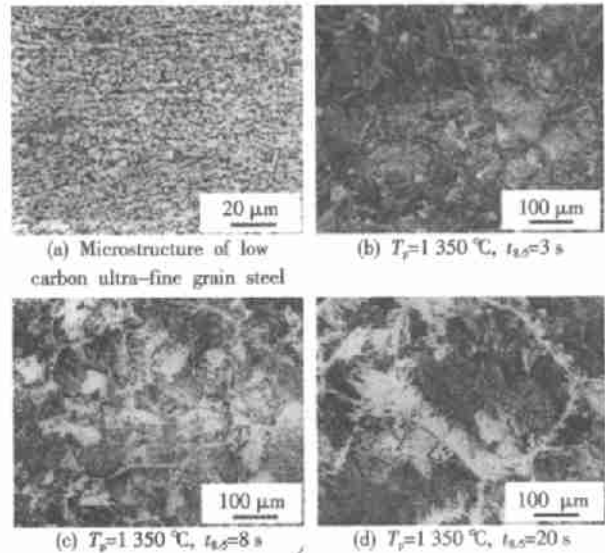


图 3 低碳超细晶粒钢及模拟 HAZ 组织  
Fig. 3 Microstructure of low carbon ultra-fine grain steel and simulated HAZ

表 2 奥氏体相的平均晶粒尺寸 ( $T_p=1\,350\text{ }^{\circ}\text{C}$ )  
Table 2 Austenite grain size of ultra-fine grain mild steel

| $t_{8/5}/\text{s}$ | 3  | 8   | 20  |
|--------------------|----|-----|-----|
| $D_v/\mu\text{m}$  | 86 | 118 | 170 |

X65 超细晶粒钢和高纯净度 X65 超细晶粒钢夹杂物的平均尺寸和体积百分比分别为  $4.00\text{ }\mu\text{m}$ 、0.26% 和  $3.82\text{ }\mu\text{m}$ 、0.14%。

X65 超细晶粒钢和高纯净度 X65 超细晶粒钢的金相组织分别见图 4a 和图 5a,铁素体相的平均晶粒尺寸分别为  $2.6\text{ }\mu\text{m}$  和  $1.4\text{ }\mu\text{m}$ ,经焊接热影响区粗晶区热模拟后,其金相组织分别见图 4b、c、图 5b、c、d,奥氏体相的平均晶粒尺寸如表 3 所示;X65 钢和高纯净度 X65 钢的相变点见表 4。

表 3 奥氏体相平均晶粒尺寸 ( $\mu\text{m}$ )  
Table 3 Austenite grain size when ( $T_p=1\,350\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

| $t_{8/5}/\text{s}$               | 3.5 | 8  | 30 |
|----------------------------------|-----|----|----|
| Ultra-fine X65 steel             | 26  | 52 | —  |
| High-purity ultra-fine X65 steel | 21  | 28 | 54 |

表 4 相变点测试结果  
Table 4 Phase transformation points of experimental materials

| Materials             | $A_{c1}$ | $A_{c3}$ | $A_{f1}$ | $A_{f2}$ |
|-----------------------|----------|----------|----------|----------|
| X65 steel             | 725      | 845      | 630      | 785      |
| High-purity X65 steel | 725      | 940      | 675      | 805      |

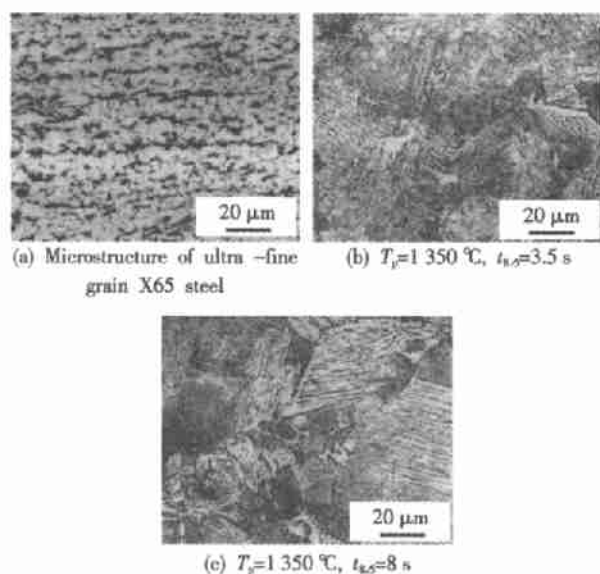


图4 X65超细晶粒钢及模拟HAZ组织

Fig. 4 Microstructure of ultra-fine grain X65 steel and simulated HAZ

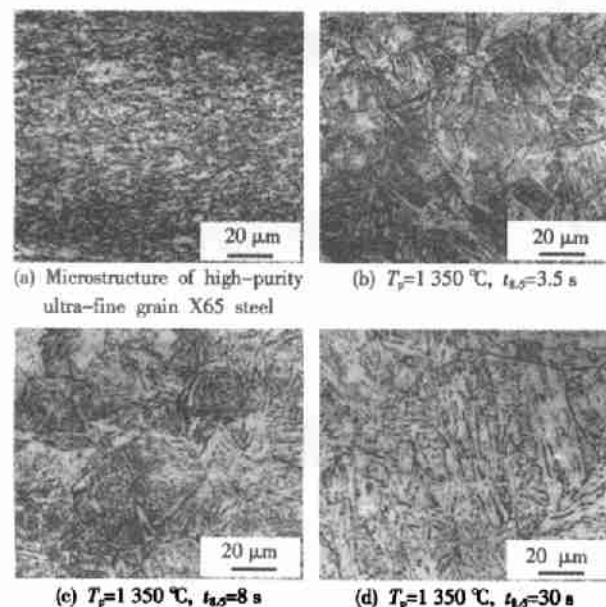


图5 高洁净度X65超细晶粒钢及模拟HAZ组织

Fig. 5 Microstructure of high-purity ultra-fine grain X65 steel and simulated HAZ

### 3 讨论与分析

在焊接热作用下,铁素体 $\alpha$ 向奥氏体 $\gamma$ 转变后,晶粒与晶界表面能处于不平衡状态,大晶粒吞并小晶粒,导致晶粒长大<sup>[5]</sup>。若 $\gamma_{gb}$ 代表晶界表面能, $d$ 代表晶粒平均直径,单位体积的平均驱动力可表示为

$$\Delta G = 2\gamma_{gb}/d \quad (1)$$

平均晶粒长大速率 $v$ 为

$$v = \frac{dd}{dt} = M \cdot 2\gamma_{gb}/d \quad (2)$$

式中: $M$ 是所谓的晶界迁移率,主要受温度影响,是温度的指数函数。从式(1)和式(2)可以看出,晶粒越细,晶粒长大速度和驱动力都将越大,也就是说,从理论上讲,超细晶粒钢有很大的晶粒长大倾向。

从表2和表3可以看出,低碳超细晶粒钢比X65超细晶粒钢的HAZ有更为严重的晶粒长大现象;单由表3可以看出,X65超细晶粒钢焊接时,即使 $t_{8/5}$ 很小,HAZ也出现晶粒粗化现象,且随着 $t_{8/5}$ 的增加,晶粒粗化更为严重。于是可以得出:超细晶粒钢焊接后,与母材晶粒相比,其热影响区中的奥氏体晶粒将严重粗化,不再具有超细晶粒特征,这样就会因热影响区晶粒长大而使母材因超细晶粒所具有的优异性能丧失。

钢化学成分对晶粒长大有重要的影响,一般来讲,钢中含有碳化物、氮化物形成元素(如Nb和Ti)都可降低晶粒长大的倾向。因为碳化物、氮化物形成元素一般在晶内和晶界上形成细小而分布均匀的难熔质点,当加热时,分布在晶内和晶界上的碳、氮化物会机械地阻碍晶粒长大,只有加热到很高温度,或者时间较长时,才使这些难熔的质点溶解在奥氏体中,晶粒才会显著长大。从表1可知:低碳钢中不含有能阻碍晶粒长大的稳定粒子形成元素Nb和Ti,因而在相同的条件下,其晶粒长大倾向比含有碳、氮化物形成元素的X65超细晶粒钢严重得多。而X65钢中含有Nb和Ti,在焊接过程中会形成碳、氮化物,尤其是钢中形成的TiN粒子是阻止奥氏体晶粒粗化的有效析出相<sup>[6]</sup>,再加上焊接时的加热速度极快,使得TiN粒子的溶解有明显的延迟滞后效应,因而它在高温阶段仍有一小部分TiN保持稳定,可有效阻碍晶粒长大,所以低碳超细晶粒钢比X65超细晶粒钢的焊接HAZ晶粒长大更为明显。

从试验结果可以看出:经过相同的大应变快冷工艺,高洁净度的X65钢所获得的铁素体平均晶粒尺寸比X65钢的更细小。这个现象可解释如下:由金属学原理可知,提高形核率是相变细化晶粒的机制之一,当过冷度加大时,在奥氏体的分解过程中,形核率增加且在较低温度下晶粒长大速度变慢。由试验结果可知,X65钢与高洁净度的X65钢相比,前者中的夹杂物数量多,在快冷过程中,这些夹杂物将促进奥氏体分解,导致相变时过冷度减小,这样因形核率降低,使铁素体相晶粒尺寸较大;但相变时夹杂物也可作为形核质点,这样就增加了形核率,且高熔点的夹杂物对晶粒长大又有一定的拖曳作用。夹

杂物的这两个方面的作用是矛盾的,对于本研究试验用钢而言,高洁净度有利于获得超细晶粒钢。

由表3还可看出,在相同 $t_{8/5}$ 时,与普通市售X65钢相比,高洁净度X65钢热影响区晶粒长大程度要小。大家知道,处于固溶态的杂质元素,通过晶界原子间的弹性吸引而阻碍晶粒长大,同时以非金属夹杂物形式存在的杂质元素由于其高熔点,对晶粒长大有拖曳作用。由此可见,钢中杂质元素含量越高,对晶粒长大的阻碍作用便越大。然而本研究的试验结果与此相反。一方面由于这两种超细晶粒钢的夹杂物尺寸为 $4\mu\text{m}$ 和 $3.8\mu\text{m}$ ,已超过其超细化的铁素体晶粒尺寸,没有起到阻碍晶粒长大的作用;另一方面由于钢中杂质元素含量越多, $\alpha\rightarrow\gamma$ 转变温度越低,即 $A_{\gamma}$ 点越低,这与表4相变点的试验测定相吻合,即两种钢铁材料在平衡态时 $A_{\gamma}$ 相差就达 $95^{\circ}\text{C}$ ,在焊接条件下,其差值会更大,因此经过同样的焊接热循环,与高洁净度X65超细晶粒钢相比,普通市售X65超细晶粒钢中的 $\gamma$ 晶粒的高温停留时间就越长,晶粒长大的程度也就越大。试验结果说明了 $\alpha\rightarrow\gamma$ 转变温度高低的作用超过了杂质元素的拖曳作用。

由于这两种超细晶粒钢,除洁净度有差别外,在合金元素含量上也略有差别,如含Ti量。众所周知,TiN是阻止晶粒长大的有效析出粒子,高温难熔的细小弥散TiN粒子,拖曳和钉扎了高温奥氏体晶界的迁移,TiN粒子尺寸越细小,数目越多,细化奥氏体晶粒的作用越强。钢中实际Ti/N值对奥氏体晶粒度有重要影响,当Ti/N值稍低于理想化学配比3.42时,细化奥氏体晶粒的作用最佳,此时TiN粒子尺寸最细小,数目最多,在高温下具有最为细小均匀的奥氏体晶粒,Ti/N值过高或过低都会削弱这一细化作用。原因是:在钢中氮含量适当时,比理想化学配比稍低的Ti量,限制了Ti在基体中的溶解度,减少了颗粒长大所必需的溶解原子扩散流,阻碍了TiN颗粒的长大<sup>[8,9]</sup>。但当钢中的Ti/N值过小,钢中含Ti严重不足,高温下TiN颗粒数目太少,阻碍奥氏体晶粒长大的作用有限。当Ti/N值过大,钢中Ti大量溶入基体,钢液中析出的少量TiN颗粒会特别粗大,从而不能有效地阻碍奥氏体晶粒长大。

普通市售X65超细晶粒钢中的N含量为

0.0038%,其最佳的Ti含量应为0.013%,由此可见0.008%Ti的含量有些偏低,差0.005%;高洁净度X65超细晶粒钢中的N含量为0.0044%,其最佳的中Ti含量应为0.015%,可见0.019%Ti有些偏高,超出0.004%。也就是说,这两种超细晶粒钢都没有合理的Ti含量,因此作者认为这两种材料HAZ中奥氏体相晶粒长大程度的差别,主要不是由TiN所引起的。

## 4 结 论

(1) 经焊接热循环作用后,超细晶粒钢焊接热影响区会发生明显的晶粒长大,且随 $t_{8/5}$ 的增加,晶粒长大更为明显。

(2) 低碳超细晶粒钢比X65超细晶粒钢HAZ晶粒长大严重,这是由于后者含有能有效阻碍热影响区中奥氏体晶粒长大的第二相粒子。

(3) 钢中夹杂物的存在对HAZ晶粒长大有双重作用,对本研究的试验用钢而言,高洁净度可减缓超细晶粒HAZ的奥氏体晶粒长大。

## 参考文献:

- [1] 八木晃一. 新世紀構造材料の開発プロジェクト[J]. 鉄鋼界, 1996, (12): 12~17.
- [2] 佐藤彰. 革新鉄鋼材料開発プロジェクト-超鉄鋼材料[J]. Tekkoku, 1997, (12): 14~15.
- [3] 佐藤彰. フロンティア構造材料研究プロジェクト[J]. 溶接学会志, 1997, 66(8): 31~38.
- [4] 屈朝霞, 田志凌, 何长红, 等. 超细晶粒钢及其焊接性[J]. 钢铁, 2000, 35(2): 70~73.
- [5] Cerjak H, Bhadeshia H K D H. Mathematical modelling of weld phenomena 2.1 carlton house terrace [C]. London SW1Y 5DB, 1997. 163~171.
- [6] 小林洋, 笠松裕. NbおよびTiを添加した高張力鋼における析出物とオーステナイト結晶粒の成長挙動[J]. 鉄と鋼, 1981, 67(11): 124~133.

作者简介: 屈朝霞,女,1973年9月出生,天津大学材料学院博士生。硕士论文题目为:异种钢焊接接头特征的分析探讨;博士论文题目为:新一代钢铁材料焊接热影响区晶粒长大规律的研究,发表论文10余篇。

(责任编辑:王 亚)

## 《焊接学报》被EI收录论文目录(2000年第1期)

|                                            |      |                                                |      |
|--------------------------------------------|------|------------------------------------------------|------|
| SiC <sub>w</sub> /6061Al 铝基复合材料激光焊机理 ..... | 牛济泰等 | 气保护药芯焊丝熔滴过渡的形式及特点 .....                        | 李 桓等 |
| GTAW 神经网络-模糊控制技术的研究 .....                  | 高向东等 | 铁路钢轨与辙叉焊接工艺 .....                              | 郭面焕等 |
| 20MnNiMo 钢焊接热影响区的组织和韧性及其氢致裂纹特征 .....       | 张显辉等 | CO <sub>2</sub> 焊接过程熔滴过渡频率的 Fuzzy/PID 控制 ..... | 韩赞东等 |