

再结晶区轧制工艺参数对 X80 管线钢组织及织构的影响

叶晓瑜^{1,2} 黄贞益¹ 李拔³ 陈述² 贾书君³ 左军²

(1 安徽工业大学冶金工程学院, 马鞍山 243002; 2 攀钢集团研究院有限公司钒钛资源综合利用国家重点实验室, 攀枝花 617000; 3 钢铁研究总院工程用钢所, 北京 100081)

摘要 通过单道次和双道次热模拟实验, 研究了变形量 20% ~ 50% 在 980、1 000、1 020 °C 变形温度、1 000 °C 下不同变形量 (25% ~ 40%) 以及 1 000 °C 变形后间隔不同时间 (1 ~ 20 s) 的再结晶区的轧制过程。结合金相检测、电子背散射衍射 (EBSD) 及 X-射线衍射 (XRD) 等检测方法表征和分析了变形过程中的间隔时间、变形温度和变形量对晶粒尺寸、解理单元尺寸以及织构的影响。结果表明, 随着再结晶间隔时间的减少、再结晶区变形温度的降低和变形量的增加, 组织晶粒尺寸和解理单元尺寸均细化显著。当变形温度降低至 980 °C 时, 可获得更多的 {110} 滑移面, 使得韧性提高。

关键词 再结晶区 变形间隔时间 变形温度 变形量 组织 织构

Affect of Technological Parameter of Recrystallization Zone Rolling on Microstructure and Texture of X80 Pipeline Steel

Ye Xiaoyu^{1,2}, Huang Zhenyi¹, Li Ba³, Chen Shu², Jia Shujun³ and Zuo Jun²

(1 School of Metallurgy Engineering, Anhui Polytechnical University, Ma'anshan 243002; 2 State Key Lab of Vanadium and Titanium Resources Comprehensive Utilization, Pangang Group Resear Institute Co Ltd, Panzhihua 617000; 3 Institute of Engineering Steel, Central Iron and Steel Institute, Beijing 100081)

Abstract Through single pass and two pass thermal simulation experiment, the rolling process in recrystallization zone with deformation 20% ~ 50% at deformation temperature 980, 1 000, 1 020 °C, and with defferent deformation 25% ~ 40% at 1 000 °C, and interval time (1 ~ 20 s) after deformed at 1 000 °C is studied. And the affect of deformation process interval time, deformation temperature and deformation quantity on grain size, cleavage unit size and texture are characterized and analyzed through metallographic examination, EBSD (Electron Backscattering Diffraction) and X-ray deffraction (XRD). The results show that microstructure grain size and cleavage unit size greatly refine with recrystallization interval time decreasing, deformation temperature decreasing in recrystallization zone and deformation increasing. When deformation temperature decreases to 980 °C, more {110} glide plane can be obtained, thereby increasing toughness.

Material Index Recrystallization, Deformation Interval Time, Deformation Temperature, Deformation Quantity, Microstructure, Texture

X80 管线钢通常采用低温大压下技术细化晶粒, 以获得更加优异的综合性能, 但管线钢在控制轧制、控制冷却及相变过程中不可避免的出现织构, 从而严重影响材料的断裂行为和低温韧性^[1]。以往的大多数研究都集中在材料的显微组织, 力学性能和冲击性能^[2,4], 对晶体织构的研究则相对较少。本文通过热模拟实验, 考察了再结晶区变形过程中的间隔时间、变形温度和变形量对材料组织和微观织构影响, 提出了通过细化晶粒尺寸、解理单元尺寸以及获得更多的 {110} 滑移面, 可以使 X80 管线钢韧性提高。

1 试验材料及方法

试验材料为工业试制的厚度 21.4 mm X80 热连轧管线钢, 化学成分见表 1。试验材料通过工业试制获得, 生产流程: 铁水预处理脱硫 → 200 t 转炉

表 1 X80 试验用钢的化学成分 / %
Table 1 Composition requirement of X80 tested steel / %

| C | Si | Mn | P | S | Nb | Ti | Cu | Cr | Mo | Ni |
|------|-----|-----|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|
| 0.07 | 0.3 | 1.8 | 0.015 | 0.005 | 0.074 | 0.025 | 0.31 | 0.17 | 0.17 | 0.22 |

冶炼 → 吹氩处理 → 200 t LF → 加热炉 → 连铸 (规格: 230 mm × 1 600 mm) → 热连轧 (成品尺寸: 21.4 mm × 1 570 mm) → 层流冷却 → 卷取。

由于钢板在热连轧粗轧阶段不是连续的生产过程, 在材料热变形过程中会有时间间隔, 这会造成材料内部未发生动态再结晶的部分晶粒会在间隔时间内发生静态回复和再结晶, 这会对材料后续的组织性能带来影响。同时, 再结晶区变形温度和变形量是钢板生产过程中重要的工艺参数, 晶粒在受力变形过程中晶体取向的变化不是随机分布的, 它们总是在某个地方优先形核, 朝着有利于发生滑移或

表2 X80 试验钢的热模拟工艺
Table 2 Thermal simulation technology of X80 tested steel

| 工艺编号 | 试验目的 | 热模拟工艺 | 首道次变形温度/℃ | 首道次变形量/% | 第二道次变形量/% | 变形间隔时间/s | 冷却方式 |
|------|---------------|-------|-----------------|-------------|-----------|---------------|------|
| 1 | 再结晶间隔时间对组织的影响 | 双道次 | 1 000 | 18 | 18 | 1、2、5、8、12、20 | 水淬 |
| 2 | 变形温度对组织的影响 | 单道次 | 980、1 000、1 020 | 20、50 | - | - | 水淬 |
| 3 | 变形量对组织的影响 | 单道次 | 1 000 | 25、30、35、40 | - | - | 水淬 |

者孪生的方向发展,导致材料在变形中获得优选的取向。因此,将钢板加工成 $\Phi 8 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$ 的热模拟圆柱试样,在 Gleeble-3500 热模拟机上开展以下热模拟实验:将试样以 $10 \text{ }^\circ\text{C/s}$ 的速度加热到 $1\ 200 \text{ }^\circ\text{C}$ 保温 5 min 充分奥氏体化,然后以 $5 \text{ }^\circ\text{C/s}$ 的冷却速度冷却至不同温度进行热模拟试验以考察变形过程中间隔时间、变形温度和变形量对组织的影响,具体热模拟工艺见表 2。

2 试验结果及分析

2.1 变形过程中间隔时间对组织的影响

图 1 为试样在 $1\ 000 \text{ }^\circ\text{C}$ 变形过程中不同间隔时间下的 EBSD 照片。其中,黑色粗线

为大角度晶界(晶界取向差大于 15°),深灰色细线为小角度晶界(晶界取向差在 $2^\circ \sim 15^\circ$)。可见,在间隔时间小于 5 s 时,晶粒尺寸明显细化且组织分布均匀;当间隔时间大于 5 s 时,材料组织明显粗化,且部分区域可以看到有晶粒异常长大,这对材料的韧性不利。

表 3 是根据晶粒尺寸分布统计的平均晶粒尺寸,可见,随着间隔时间由 1 s 增加到 20 s ,平均晶粒

表 3 X80 试验钢 $1\ 000 \text{ }^\circ\text{C}$ 变形过程不同再结晶间隔时间的解理单元尺寸和晶粒尺寸

Table 3 Cleavage unit size and grain size of X80 test steel in deformation process at $1\ 000 \text{ }^\circ\text{C}$ with various recrystallization interval time

| 间隔时间 /s | 解理单元尺寸 / μm | 晶粒尺寸 / μm |
|---------|------------------------|----------------------|
| 1 | 17.02 | 2.81 |
| 2 | 19.76 | 3.29 |
| 5 | 20.28 | 3.47 |
| 8 | 21.34 | 3.83 |
| 12 | 25.12 | 4.45 |
| 20 | 25.45 | 4.75 |

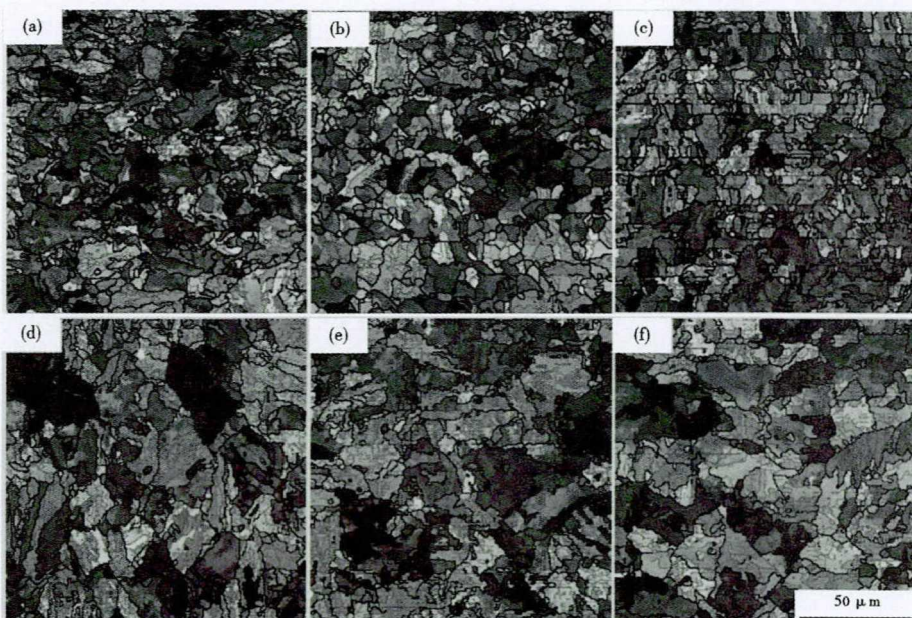


图 1 X80 试验钢 $1\ 000 \text{ }^\circ\text{C}$ 变形过程间隔时间 (a) 1 s ; (b) 2 s ; (c) 5 s ; (d) 8 s ; (e) 12 s ; (f) 20 s 的 EBSD 照片

Fig. 1 EBSD pictures of X80 test steel in deformation process at $1\ 000 \text{ }^\circ\text{C}$ with interval time (a) 1 s ; (b) 2 s ; (c) 5 s ; (d) 8 s ; (e) 12 s and (f) 20 s

尺寸由 $2.81 \text{ } \mu\text{m}$ 逐渐增大到 $4.75 \text{ } \mu\text{m}$,解理单元尺寸也逐渐由 $17.02 \text{ } \mu\text{m}$ 增加到 $25.45 \text{ } \mu\text{m}$ 。随着间隔时间的延长,晶粒有充分的时间发生回复再结晶,并长大,导致材料晶粒尺寸长大。减小间隔时间可以得到更加细小的晶粒。

图 2 给出了不同间隔时间下材料的 ODF 图。可见,在间隔时间为 1 s 时,存在再结晶织构 $\{001\} \langle 110 \rangle (3.96)$ 和形变织构 $\{110\} \langle 110 \rangle (3.2)$;间隔时间延长到 2 s 时,再结晶织构 $\{001\} \langle 110 \rangle$ 强度减弱基本消失,而形变织构 $\{110\} \langle 110 \rangle$ 增强到 5.41 ;随着间隔时间继续延长至 5 s 以上时,各方向的织构强度都变的很微弱,可认为是随机分布的。这是由于当间隔时间足够长时,晶粒有足够的时间进行再结晶,晶粒重新排列长大,形变储能得到释放,晶粒的择优取向减弱甚至消失。

2.2 变形温度对微观组织特征和织构的影响

图 3 为试样在不同变形温度下的 EBSD 照片。可见,随着变形温度的增高和变形量的减小,组织晶

粒尺寸显著增大, 特别在 1 020 ℃ 变形时, 无论变形量是 20% 还是 50%, 均可见晶粒尺寸分布不均, 出现异常粗大的晶粒; 随着变形温度的降低和变形量的增加, 组织晶粒尺寸显著细化, 组织也更加均匀, 且部分视场可以看到晶粒的轧制方向。

表 4 是根据晶粒尺寸分布统计的平均晶粒尺寸。可见, 变形量 20% 时, 随着变形温度由 980 ℃ 增加到 1 020 ℃, 晶粒尺寸由 2.5 μm 逐渐增大到 2.9 μm, 解理单元尺寸也逐渐由 14.3 μm 增加到 16.1 μm; 变形量 50% 时, 随着变形温度由 980 ℃ 增加到 1 020 ℃, 晶粒尺寸由 2.3 μm 逐渐增大到 2.8 μm, 解理单元尺寸也逐渐由 14.2 μm 增加到 15.9 μm。即在变形量相同时, 随着变形温度的降低, 原始奥氏体压扁宽度变窄, 形变储能和晶界数量明显增加, 有利于细化晶粒, 提高材料的低温韧性。

图 4 给出了不同变形温度下材料的 ODF 图, 可见不同的变形温度下微观结构的演变情况。当变形量为 20% 时, 不同变形温度下, 材料表现出的结构类型和结构强度有所不同, 随着变形温度的升高, 先后出现 {112}

$\langle 111 \rangle$ 、 $\{001\}$ $\langle 110 \rangle$ 、 $\{112\}$ $\langle 110 \rangle$ 和 $\langle 110 \rangle$ //ND 方向的结构组分; 当变形量为 50% 时, 结构组分种类明显增多, 先后出现 $\{112\}$ $\langle 110 \rangle$ 、 $\{110\}$ $\langle 110 \rangle$ 、 $\{110\}$ $\langle 001 \rangle$ 结构等, 980℃ 时, $\{110\}$ $\langle 110 \rangle$ 和 $\{110\}$ $\langle 001 \rangle$ 结构强度分别达到 7.64 和 6.33, 材料经再结晶区热轧变形后相变结构主要是 $\{110\}$ $\langle 110 \rangle$, 且随着变形温度的升高, $\{110\}$ $\langle 110 \rangle$ 组分降低甚至消失, $\{112\}$ $\langle 110 \rangle$ 组分一

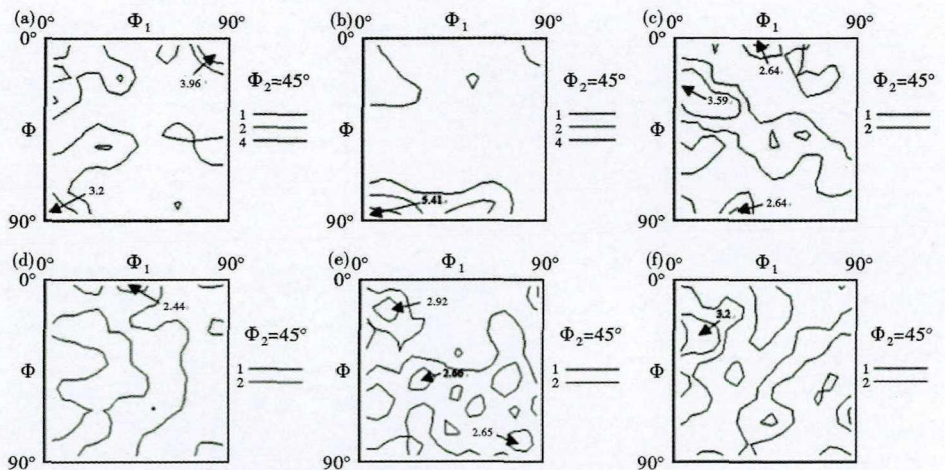


图 2 X80 试验钢间隔时间(a)1 s;(b)2 s;(c)5 s;(d)8 s;(e)12 s;(f)20 s 的取向分布函数 $\Phi_2=45^\circ$ 截面 ODF 图

Fig. 3 Distribution function $\Phi_2=45^\circ$ section ODF diagram of X80 test steel with interval time (a) 1 s; (b) 2 s; (c) 5 s; (d) 8 s; (e) 12 s and (f) 20 s

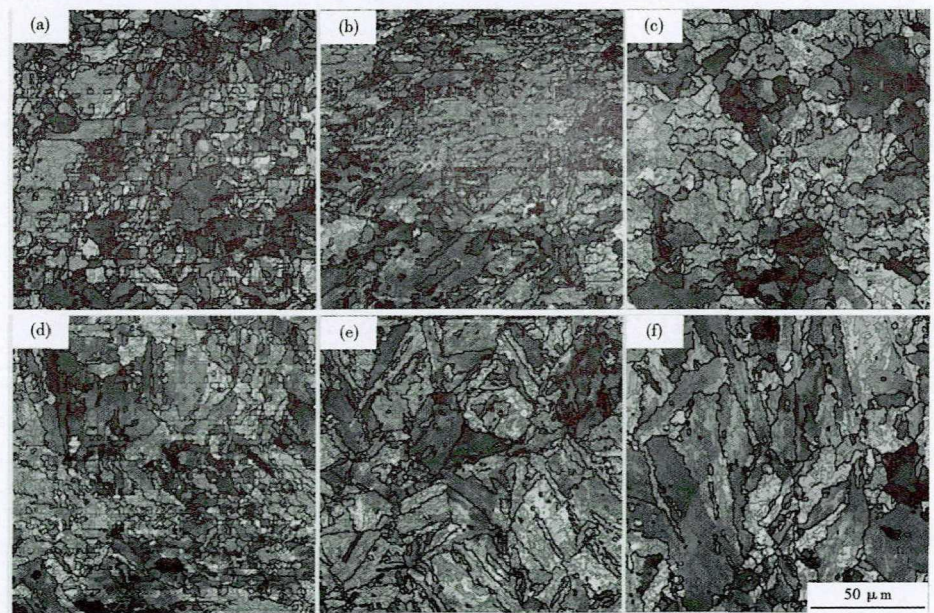


图 3 X80 试验钢在(a) 980 ℃ + 20%;(b) 1 000 ℃ + 20%;(c) 1 020 ℃ + 20%;(d) 980 ℃ + 50%;(e) 1 000 ℃ + 50%;(f) 1 020 ℃ + 50% 温度 + 变形量下的组织形貌

Fig. 3 Morphology of structure of X80 test steel with (a) 980 ℃ + 20%; (b) 1 000 ℃ + 20%; (c) 1 020 ℃ + 20%; (d) 980 ℃ + 50%; (e) 1 000 ℃ + 50% and (f) 1 020 ℃ + 50% temperature + deformation

表 4 不同变形温度下 X80 试验钢的解理单元尺寸和晶粒尺寸

Table 4 Cleavage unit size and grain size of X80 test steel with various deformation temperature

| 变形温度/℃ | 20% 变形量 | | 50% 变形量 | |
|--------|-----------|---------|-----------|---------|
| | 解理单元尺寸/μm | 晶粒尺寸/μm | 解理单元尺寸/μm | 晶粒尺寸/μm |
| 980 | 14.3 | 2.5 | 14.2 | 2.3 |
| 1 000 | 14.2 | 2.6 | 14.8 | 2.4 |
| 1 020 | 16.1 | 2.9 | 15.9 | 2.8 |

表 5 X80 试验钢 1 000 °C 变形过程不同变形量的解理单元尺寸和晶粒尺寸

Table 5 Cleavage unit size and grain size of X80 test steel with various deformation quantity at 1 000 °C

| 变形量/% | 解理单元尺寸/ μm | 晶粒尺寸/ μm |
|-------|-----------------------|---------------------|
| 25 | 24.1 | 4.2 |
| 30 | 23.5 | 4.0 |
| 35 | 21.1 | 3.4 |
| 40 | 18.2 | 3.1 |

直存在且变化不明显。

2.3 变形量对微观组织特征和织构的影响

图 5 为试样在 1 000 °C 变形过程中不同变形量下的试样的 EBSD 照片。可见,在轧制变形量较低时(25%),组织晶粒尺寸较大,晶界比较平滑圆润;随着变形量的增加,组织晶粒尺寸在细化的同时,等轴化程度在降低,出现压扁的晶粒,同时组织内部出现亚结构,内部的亚结构组织单元尺寸也随之明显细化。

表 5 是根据晶粒尺寸分布统计的平均晶粒尺寸。可见,随着变形量由 25% 逐渐增加到 40%,晶粒尺寸由 4.2 μm 细化到 3.1 μm ,解理单元尺寸也由 24.1 μm 细化到 18.2 μm 。随着变形量的不断增加,导致钢中相变受到有效抑制,同样,变形量的增大导致相变驱动力明显增强,变形带增加,形核点增多,从而使组织得到细化改善材料韧性性能。

图 6 给出了不同变形量下材料

的 ODF 图。可见,当变形量为 25% 时,主要是单一的 $\{110\} \langle 110 \rangle$ 织构,随着变形量由 25% 增加到 40%, $\{110\} \langle 110 \rangle$ 织构强度从 7.63 降低到 2.19,且在变形量为 30%、35% 和 40% 时,出现 $\{100\} \langle 110 \rangle$ 、 $\{110\} \langle 001 \rangle$ 、 $\{112\} \langle 110 \rangle$ 和 $\{332\} \langle 113 \rangle$ 等变形织构。

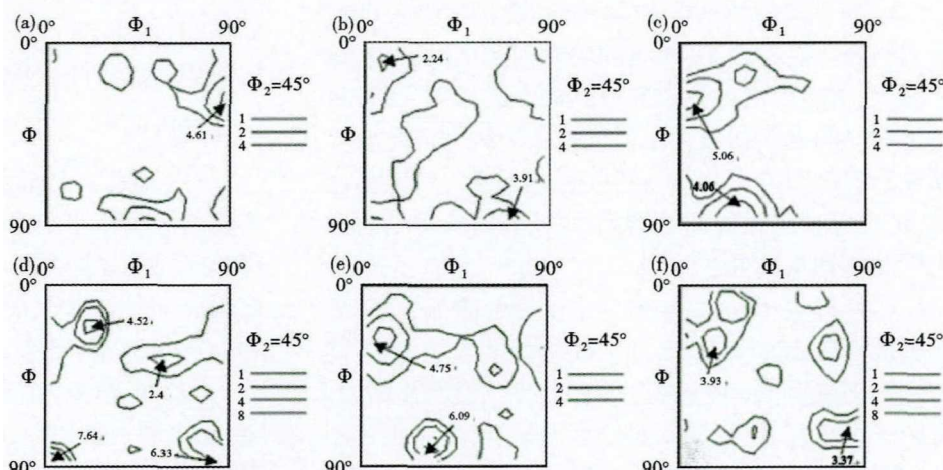


图 4 X80 试验钢在温度 + 变形量 (a) 980 °C + 20%; (b) 1 000 °C + 20%; (c) 1 020 °C + 20%; (d) 980 °C + 50%; (e) 1 000 °C + 50%; (f) 1 020 °C + 50% 的分布函数 $\Phi_2 = 45^\circ$ 截面 ODF 图

Fig. 4 Distribution function $\Phi_2 = 45^\circ$ section ODF diagram of X80 test steel with (a) 980 °C + 20%; (b) 1 000 °C + 20%; (c) 1 020 °C + 20%; (d) 980 °C + 50%; (e) 1 000 °C + 50% and (f) 1 020 °C + 50% temperature + deformation

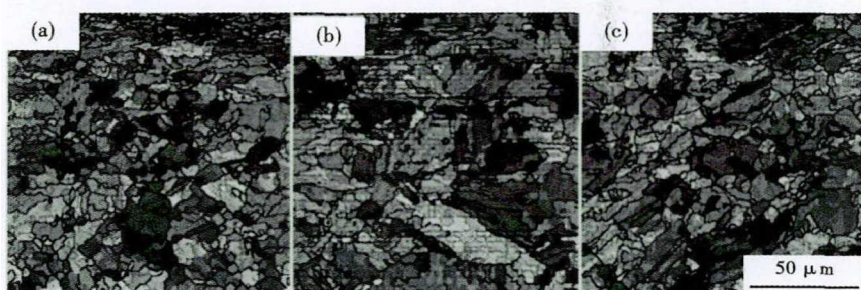


图 5 X80 试验钢 1 000 °C 变形过程 (a) 25%; (b) 30%; (c) 40% 变形量的 EBSD 照片
Fig. 5 EBSD pictures of X80 test steel with deformation process (a) 25%; (b) 30% and (c) 40% at 1 000 °C

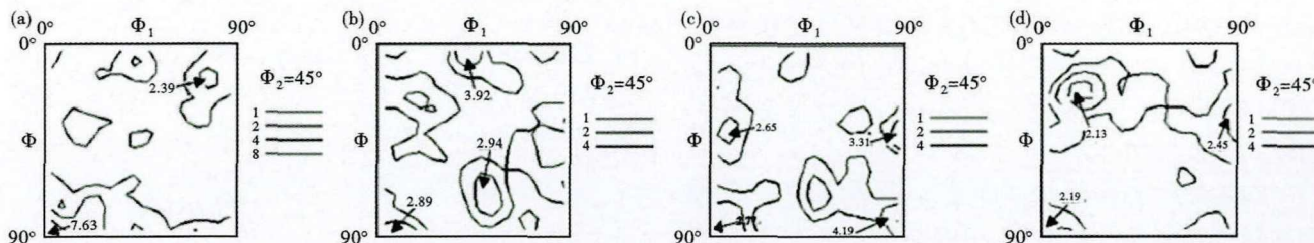


图 6 X80 试验钢 1 000 °C 变形量 (a) 25%; (b) 30%; (c) 35%; (d) 40% 的分布函数 $\Phi_2 = 45^\circ$ 截面 ODF 图

Fig. 6 Distribution function $\Phi_2 = 45^\circ$ section ODF diagram of X80 test steel with deformation process (a) 25%; (b) 30%; (c) 35% and (d) 40% at 1 000 °C

3 结果分析讨论

管线钢在轧制变形过程中,由于受力会发生变形和再结晶,从而晶粒发生择优取向,即会产生形变织构和再结晶织构。虽然管线钢在奥氏体再结晶区轧制一般产生再结晶织构和部分形变织构,但由于再结晶区轧制温度比较高,晶粒很快会发生回复再结晶,导致两种织构类型的织构强度一般比较弱。

随着道次停留时间的延长,晶粒尺寸呈逐渐增大的趋势。这是因为,随着间隔时间的增大,回复程度越大,材料内部的位错和亚结构不断回复,晶粒有充足的时间发生回复再结晶而长大。再结晶主要受到变形温度、道次间隔时间的影响较大,一定温度下,随着道次间隔时间的增加,奥氏体有充足的时间进行回复和再结晶。

在变形量相同时,随着变形温度的降低,一是原始奥氏体压扁宽度变窄,加工硬化程度增加;再者随着变形温度降低,形变储存能和晶界数量明显增加,有利于细化晶粒,提高材料的低温韧性,这是引起不同变形温度下材料晶粒尺寸和解理单元尺寸不同的根本原因,但过低的变形温度不能保证轧件在奥氏体单相区获得充分的晶粒细化,对钢板的最终性能带来不利影响,并使变形抗力增加,给轧制带来困难。随着变形量的不断增加,导致钢中相变受到有效抑制,同样变形量的增大导致变形驱动力明显增强,变形带增加,形核点增多,从而使组织得到细化改善材料韧性性能。因此,再结晶区轧制时,通过降低变形温度,加大道次变形量,可增加形核点,对材料的韧性有利。

在 BCC 金属中裂纹最容易沿着 {001} 解理面解理,试样的长轴与 {001} 解理面法线之间的夹角越小,晶体越容易脆断。相比之下, {110} 滑移在改善材料低温韧性性能方面发挥着重要的作用,因为 {110} <111> 滑移系是 BCC 金属塑性变形的主要来源,参与微孔形核和聚集长大的 {110} 面将增加塑性变形的数量和相关低温韧性的性能。因此,为了改善材料的低温韧性,需要在沿着裂纹扩展路径上增加 {110} 滑移面密度和减少 {001} 解理面密度, {001} 解理面和 {110} 滑移面的比例将直接影响断裂模式和低温韧性。

随着再结晶间隔时间的减少、再结晶区变形温度的降低和变形量的增加,组织晶粒尺寸和解理单

元尺寸均细化显著。调控静态再结晶合适的间隔时间,既可以保证晶粒得到充分细化,又可以消除再结晶织构和形变织构对最终材料各向异性的影响。当变形温度降低到 980 ℃,织构以 {112} <110> 和 {110} <110> 为主,获得更多的 {110} 滑移面,使得韧性提高。变形量增加到 30%, {110} <110> 织构减弱, {112} <110> 织构增多,整体对滑移面比例影响不大,但对晶粒细化作用显著。因此,降低变形温度加大压下量,细化晶粒,为未再结晶区轧制和后续的冷却相变打下基础。

4 结论

(1) 随着再结晶间隔时间的减少、再结晶区变形温度的降低和变形量的增加,组织晶粒尺寸和解理单元尺寸均细化显著。再结晶区的轧制工艺,既可以保证晶粒得到充分细化,又可以消除再结晶织构和形变织构对最终材料各向异性的影响。

(2) 轧制温度降低到 980 ℃,织构以 {112} <110> 和 {110} <110> 为主,获得更多的 {110} 滑移面,使得韧性提高。

(3) 变形量增加到 40%, {110} <110> 织构减弱, {112} <110> 织构增多,整体对滑移面比例影响不大,但对晶粒细化作用显著。

(4) 降低变形温度可以提高 {110} 滑移面的比例,增加道次压下率可以降低 {110} <110> 的织构强度,提高材料低温韧性。

参考文献

- [1] Venkatsurya P K C, Jia Z and Misra R D K. Withstanding Mechanical Property Anisotropy in High Strength Niobium-Microalloyed Line-pipe Steel [J]. Materials Science and Engineering A, 2012, 556: 194-210.
- [2] Kong JH, Zhen L and Guo B. Influence of Mo Content on Microstructure and Mechanical Properties of High Strength Pipeline Steel [J]. Materials and Design. 2004, 25(8): 723-728.
- [3] 邓伟. 低碳贝氏体管线钢轧制工艺及组织性能研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2011. PHam
- [4] 孙宏, 孙志刚, 李健一, 等. 螺旋埋弧焊管的各向异性及其抗变形性能研究 [J]. 焊管 2017, 40(7): 12-17.

叶晓瑜(1982-), 女, 硕士(2008年昆明理工大学), 正高级工程师, 2004年昆明理工大学(本科)毕业, 热轧板带产品开发。E-mail: yexiaoyupzh@163.com

收稿日期: 2021-02-03