

高加热速度下温度对45[#]钢再结晶和晶界特征的影响

贾智^{1a,1b}, 王彤^{1a,1b}, 赵小龙², 罗晓阳², 王慧芳^{1a,1b}, 张鹏飞^{1a,1b}, 汪彦江^{1a,1b}

(1.兰州理工大学 a.材料科学与工程学院 b.省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室, 兰州 730050; 2.酒钢集团宏兴钢铁股份有限公司 碳钢薄板厂, 甘肃 嘉峪关 735100)

摘要: 目的 针对45[#]钢的再结晶行为受退火工艺的影响较大这一问题,研究了2种加热速度下不同退火温度对45[#]钢再结晶行为、再结晶形核长大机制以及晶界特征分布的影响规律。方法 采用箱式电阻炉模拟罩式退火实验,分别以2℃/s和0.08℃/s的加热速度将试样加热到不同温度(660℃、720℃)并保温30min,利用电子背散射衍射(EBSD)研究退火后45[#]钢的再结晶行为和晶界特征。结果 与0.08℃/s加热速度相比,当加热速度为2℃/s时,试样的晶粒细小,再结晶温度较高。在高加热速度下,随着退火温度的升高,再结晶晶粒分数增大,一些小角度晶界转变为大角度晶界,促进了再结晶过程。再结晶晶粒通过亚晶合并形核并呈等轴状分布,亚晶粒通过相互吞并的方式生长,导致亚晶粒减少,几何必要位错密度增大。在2种加热速度下,720℃时 $(\Sigma9+\Sigma27)/\Sigma3$ 的比值大于660℃时的比值,且在720℃下低 Σ CSL晶界更高,更有利于45[#]钢中晶界团簇形成,晶界特征分布更优。结论 与慢速加热相比,在高加热速度下退火会提高生产率,改善材料的微观结构,这主要通过晶粒细化来实现。

关键词: 高加热速度; 退火温度; 45[#]钢; 再结晶; 晶界特征

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2023.011.018

中图分类号: TG161 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2023)011-0156-08

Effect of Temperature on Recrystallization and Grain Boundary Characteristics of 45[#] Steel at High Heating Rate

JIA Zhi^{1a,1b}, WANG Tong^{1a,1b}, ZHAO Xiao-long², LUO Xiao-yang², WANG Hui-fang^{1a,1b},
ZHANG Peng-fei^{1a,1b}, WANG Yan-jiang^{1a,1b}

(1. a. School of Materials Science and Engineering, b. State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Nonferrous Metals, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. Carbon Steel Sheet Plant, Jiu Steel Group Hongxing Iron & Steel Co., Ltd., Gansu Jiayuguan 735100, China)

ABSTRACT: The work aims to study the effect of different annealing temperature under two heating rates on the recrystallization behavior, recrystallization nucleation and growth mechanisms, and grain boundary characteristic distribution of 45[#] steel, so

收稿日期: 2023-07-11

Received: 2023-07-11

基金项目: 国家自然科学基金(52265049); 甘肃省高等学校产业支撑计划(2022CYZC-26); 兰州理工大学红柳优秀青年支持计划(CGZH001)

Fund: The National Natural Science Foundation of China (52265049); Industrial Support Program for Colleges and Universities in Gansu Province (2022CYZC-26); Lanzhou University of Technology Support Plan for Excellent Young Scholars (CGZH001)

引文格式: 贾智, 王彤, 赵小龙, 等. 高加热速度下温度对45[#]钢再结晶和晶界特征的影响[J]. 精密成形工程, 2023, 15(11): 156-163.

JIA Zhi, WANG Tong, ZHAO Xiao-long, et al. Effect of Temperature on Recrystallization and Grain Boundary Characteristics of 45[#] Steel at High Heating Rate[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2023, 15(11): 156-163.

as to solve the problem that the recrystallization behavior of 45[#] steel is greatly influenced by the annealing process. The specimens were heated to different temperature (660 °C and 720 °C) at 2 °C/s and 0.08 °C/s for 30 min by simulated hood annealing experiments in a box-type resistance furnace and the recrystallization behavior and grain boundary characteristics of the annealed 45[#] steel were investigated by the electron backscatter diffraction (EBSD) method. Compared to the heating rate of 0.08 °C/s, the grain size of the specimen was fine and the recrystallization temperature was increased when the heating rate was 2 °C/s. At a high heating rate, with the increase of annealing temperature, the recrystallization volume fraction increased and some small-angle grain boundaries transformed into large-angle grain boundaries, thereby promoting the recrystallization process. Recrystallized grains nucleated and grew through the merging of subgrains, exhibiting an equiaxed distribution. Subgrains grew by mutual engulfment, leading to a reduction in subgrains and an increase in geometrically necessary dislocation density. At two heating rates, the ratio of $(\Sigma 9 + \Sigma 27) / \Sigma 3$ at 720 °C was higher than that at 660 °C, and the grain boundary at low Σ CSL is higher at 720 °C, which was more conducive to the formation of grain boundary clusters and better grain boundary characteristic distribution in 45[#] steel. Therefore, compared with that at slow heating rate, the annealing at high heating rate can increase productivity and improve the microstructure of materials by grain refinement.

KEY WORDS: high heating rate; annealing temperature; 45[#] steel; recrystallization; grain boundary characteristics

随着我国经济的发展, 钢铁行业的竞争日益激烈, 中碳钢因具备价格低廉、冶炼成形工艺简单以及综合力学性能和加工性能良好等优势, 在工业领域得到了广泛的应用^[1]。但中碳钢的含碳量较高、屈服强度较低, 不能应用于高强度结构件, 如轴类部件、支撑传动部件、紧固件等^[2-3], 一般采用轧制方式进行强化。然而冷轧后的钢铁产品会产生加工硬化现象, 同时伴随着强度、硬度的上升和塑性、韧性的下降。因此, 必须对冷轧后的板带进行退火处理, 以消除加工硬化, 降低冷加工硬化引起的位错密度, 改善合金性能, 细化晶粒尺寸^[4-8]。塑性变形结合后续退火处理是优化材料性能最为经济有效的工艺^[9]。

目前, 关于轧制后退火工艺参数的研究大多集中于退火温度和保温时间^[10-16], 而对加热速度的研究很少。Xie 等^[17]对 AlCoCrFeNi 高熵合金进行了研究, 发现随着加热速度的升高, 材料的维氏硬度和耐磨性降低, 而加热速度对其相、组织结构无明显影响。关于加热速度对再结晶的影响, Muljono 等^[18]研究表明, 在超低碳钢中, 当加热速度较高时, 再结晶温度的提高会使晶粒尺寸降低。Chbihi 等^[19]对 0.015C-1.48Mn-Fe 的再结晶过程进行了研究, 发现快速加热对细化晶粒有明显的促进作用。Liu 等^[20]研究表明, 与常规加热速度相比, 高的加热速度能够加速 Q&P 样品中原有奥氏体的转变和晶粒细化。部分学者对不同加热速度下退火试样的织构进行了研究, 发现加热速度对回复和再结晶行为产生了显著影响, 因此加热速度被认为是控制织构形成的最有效因素^[21-22]。关于加热速度对高强钢力学性能的研究表明, 高加热速度可以使高强钢的强度增强、伸长率降低^[23-24]。

在有限的关于加热速度的研究中, 大多数研究集中在不同加热速度对再结晶晶粒的影响, 而有关高加热速度下温度对其影响的研究较少, 此外, 有关退火过程中不同加热速度下晶界特征演变的研究也鲜有

报道。因此, 研究高加热速度下温度对再结晶行为和晶界特征的影响具有重要意义。本文以最常见的 45[#]钢为实验材料, 在 2 °C/s 的加热速度下对 45[#]钢冷轧板进行不同温度的退火实验, 并与 0.08 °C/s 慢速加热的样品进行对比, 系统、全面地论述了高加热速度下不同退火温度对 45[#]钢再结晶行为和晶界特征的影响。再结晶是控制退火组织的主要因素, 揭示不同加热速度下退火温度对再结晶行为的影响对科学研究和工程应用都有重要意义。

1 实验

1.1 材料

材料选择 45[#]钢冷轧板, 其化学成分如表 1 所示。冷轧板由工厂实际生产线生产, 最终厚度为 1.8 mm, 退火工艺在实验室完成。

表 1 45[#]钢的化学成分

Tab.1 Chemical composition of 45[#] steel

							wt. %
C	Cr	Mn	Ni	Si	S	P	Fe
0.45	≤0.25	0.50	≤0.25	0.30	≤0.035	≤0.035	Bal.

1.2 方法

为了研究 2 种加热速度下退火温度对 45[#]钢再结晶行为和晶界特征的影响, 用线切割技术将冷轧样切割成多块 10 mm×8 mm 的样品, 在实验室 KSL-1200X 型箱式电阻炉中进行退火实验, 采用 2 °C/s 和 0.08 °C/s 的加热速度分别将冷轧钢板加热到 660 °C 和 720 °C, 保温 30 min, 最后空冷至室温。

采用电子背散射衍射仪 (EBSD) 研究了 45[#]钢冷轧板在退火条件下的再结晶行为和晶界特征, 对试样轧制方向-横向 (RD-TD) 的表面进行观察。先用

400[#]~3000[#]砂纸对试样的 RD-TD 表面进行研磨,然后用 0.5 μm 金刚石溶液抛光。退火后样品的扫描步长为 0.5 μm ,用 Channel 5 软件对 EBSD 数据进行分析。

2 结果与讨论

2.1 45[#]钢不同加热速度下退火过程中再结晶行为

再结晶行为是中碳钢在退火过程中微观组织演变最主要的特征,包括形核和长大 2 个部分。再结晶晶粒的形核过程与中碳钢退火过程中亚晶粒的发展以及晶界形态的演变息息相关,再结晶晶粒的生长是通过晶界的迁移来实现的,晶界的迁移不仅与储存的能量有关,而且与温度有关。45[#]钢在 2 种加热速度、不同退火温度下的再结晶晶粒分布情况如图 1 所示,图 1 中主要分布有变形晶粒、亚晶粒以及再结晶晶粒。从图 1a 和图 1b 可以看出,在 2 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 加热速度下,随着退火温度的升高,亚晶粒逐渐被再结晶晶粒所取代,在 720 $^{\circ}\text{C}$ 时,亚晶粒几乎全部消失,完全被近乎均匀分布的再结晶晶粒所取代,说明发生了再结晶过程。从图 1c 和图 1d 可以看出,在 0.08 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 加热速度下,当退火温度为 660 $^{\circ}\text{C}$ 时,已经发生了再结晶过程,

在试样的微观组织中仅有少量亚晶粒,表现为完全再结晶的微观结构,这表明在高加热速度下,再结晶温度会提高。

综上所述,再结晶对中碳钢退火过程中晶粒尺寸的演变有较大的影响。在 2 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 加热速度下,随着退火温度由 660 $^{\circ}\text{C}$ 上升到 720 $^{\circ}\text{C}$,试样的平均晶粒尺寸从 6.41 μm 增大到 6.80 μm 。在 0.08 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 加热速度下,随着退火温度由 660 $^{\circ}\text{C}$ 上升到 720 $^{\circ}\text{C}$,试样的平均晶粒尺寸从 6.53 μm 增大到 7.11 μm 。这是由于新形成的再结晶晶粒没有畸变,原晶粒位错密度较高,使得 2 种晶粒间的位错密度不平衡,进而导致晶粒长大^[25]。很明显,在高加热速度下试样的晶粒更加细小,低温下平均晶粒尺寸减小的原因是再结晶的不断形核,而在高温下晶粒尺寸增大的原因是大角度晶界在高的退火温度下具有较快的迁移速度。

45[#]钢在不同加热速度下退火后的取向角分布图如图 2 所示。可以看出,试样的晶界取向角均呈单峰分布。在 2 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 的高加热速度下,晶界对温度非常敏感。从图 2a 可以看出,当退火温度为 660 $^{\circ}\text{C}$ 时,大角度晶界 (HAGBs>15 $^{\circ}$) 比例较高,占 77.1%。随着温度升高至 720 $^{\circ}\text{C}$,小角度晶界的数量减少,大角度晶界的数量增加,如图 2b 所示,此时 HAGBs 占

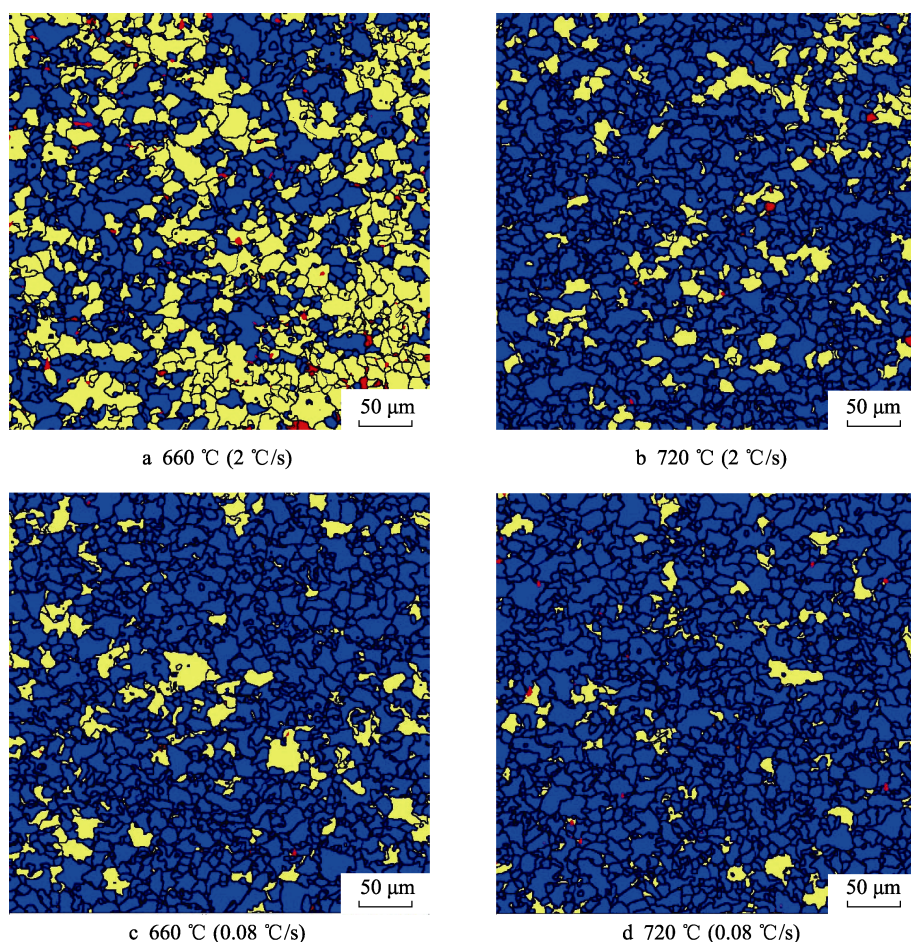


图 1 45[#]钢退火过程中再结晶组织

Fig.1 Microstructure of 45[#] steel during annealing and recrystallization process

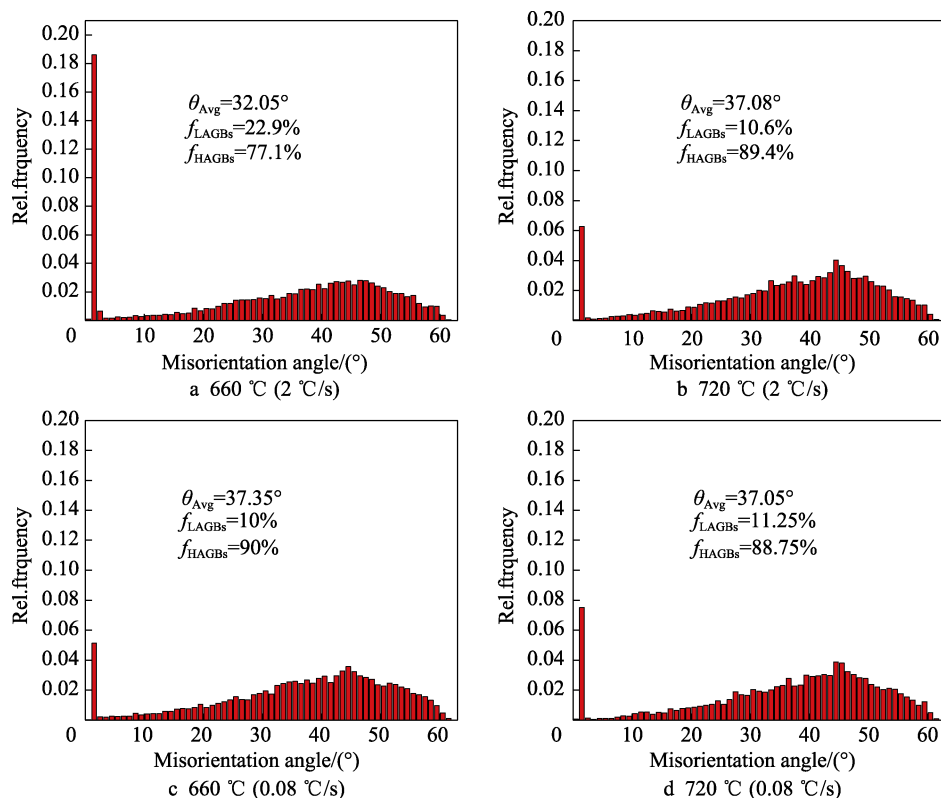


图2 45#钢退火过程中的取向角分布图

Fig.2 Orientation angle distribution diagram during the annealing process of 45# steel

89.4%, 小角度晶界 (LAGBs, $2^{\circ}\sim 15^{\circ}$) 占比较小, 仅占 10.6%, 此时为无变形态。这表明随着退火温度的升高, 一些小角度晶界转变为大角度晶界, 促进了再结晶过程, 但仍存在一定量的小角度晶界, 说明仍存在少量冷轧变形基体。普遍认为, 再结晶过程依赖 HAGBs 的迁移来消除变形结构, 这与再结晶大角度晶界迁移的再结晶理论相一致, HAGBs 的界面能较高, 促进了晶界的迁移, 这是再结晶形核的首要条件^[25]。在 0.08 °C/s 加热速度下, 从图 2c 可以看出, 当退火温度为 660 °C 时, 大角度晶界所占的比例为 90%, 几乎没有小角度晶界, 表明此时已经发生了完全再结晶。随着退火温度升高至 720 °C, 小角度晶界的数量增加, 大角度晶界的数量减少, 这是由于 HAGBs 在高温下的迁移率较高, 使晶粒迅速长大, 大角度晶界所占的比例减小。总体来说, 2 °C/s 加热速度下大角度晶界的占比要低于 0.08 °C/s 加热速度下大角度晶界的占比。这是因为在高加热速度下, 由于可供铁素体再结晶孕育时间过短, 铁素体尚未充分完成再结晶过程, 因此再结晶过程推迟到更高温度下进行。

为了进一步探究 45#钢退火过程中加热速度和退火温度对再结晶行为的影响, 利用 EBSD 技术统计了不同退火条件下的再结晶体积分数, 如图 3 所示。结果表明, 在不同加热速度下, 再结晶体积分数随退火温度的升高而增大, 在相同退火温度下, 再结晶体积分数随着加热速度的升高而降低, 这是由于较快的加

热速度会使再结晶推迟到在较高的温度下发生。值得注意的是, 在 2 °C/s 加热速度下, 显微组织对温度非常敏感, 660 °C 时的再结晶体积分数为 46.8%, 720 °C 时的为 84.3%。随着退火温度的升高, 出现了大量的再结晶晶粒, 变形晶粒不明显, 形成了等轴晶粒组织, 表明发生了完全再结晶。

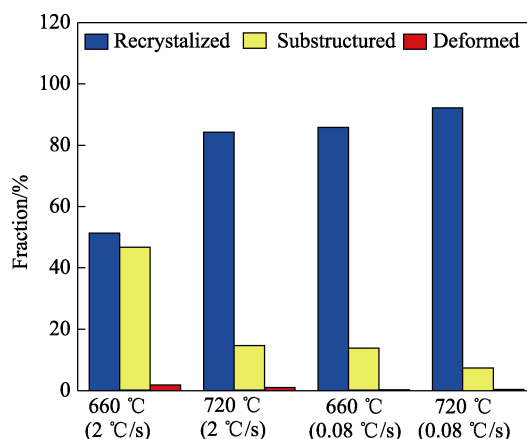


图3 45#钢退火过程中再结晶体积分数

Fig.3 Volume fraction of recrystallization during the annealing process of 45# steel

2.2 高加热速度下 45#钢再结晶形核长大机制

对高加热速度下不同退火温度的试样进行微观

取向分析,结果如图4所示。结合图1可知,在高加热速度下,发生少量再结晶时的组织大部分为亚晶粒,再结晶晶粒在亚晶粒周围形成。分析可知,再结晶晶粒和亚晶粒多为 $\{111\}$ 取向,少量为 $\{110\}$ 取向,说明在高加热速度下再结晶形核方式为定向形核。在高加热速度下退火时,由于升温所用的时间较短,再结晶驱动力较大,变形基体内的亚结构获得的激活能较高,成为再结晶形核点,再结晶晶粒通过亚晶合并形核并呈等轴状分布。

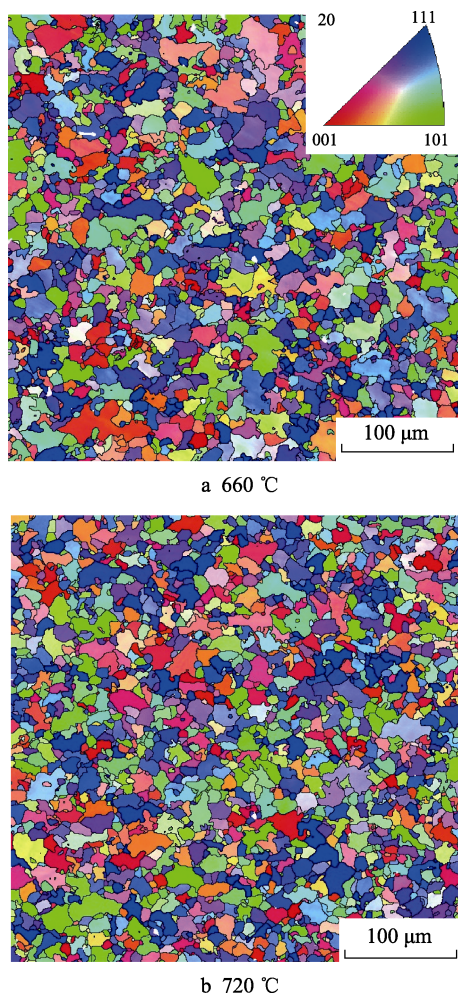


图4 45#钢在2 °C/s加热速度下的IPF图
Fig.4 IPF (Inverse Pole Figure) of 45# steel at a heating rate of 2 °C/s

亚晶粒在再结晶过程中起着重要作用。45#钢在高加热速度下不同温度退火后的核平均取向偏差(KAM)图和局部取向偏差角分布如图5所示。KAM映射是一种点对点测量试样中局部取向差的方法,可以定性反映塑性变形的均匀化程度,数值较高的地方表示塑性变形程度较大或者缺陷密度较高。从图5可以看出,KAM图中大部分为亚晶粒($<2^\circ$),随着退火温度的升高,亚晶粒数逐渐减少,平均角度逐渐减小,几何必要位错密度增大,但在大角度晶界附近仍然可以看到少量的其他区域,说明静态再结晶试样的

位错密度较低,位错主要分布在晶界处,为亚晶形核和晶界处再结晶的形成提供了条件。结果表明,在再结晶过程中,亚晶粒通过相互吞并的方式生长,导致亚晶粒减少和几何必要位错密度增大。

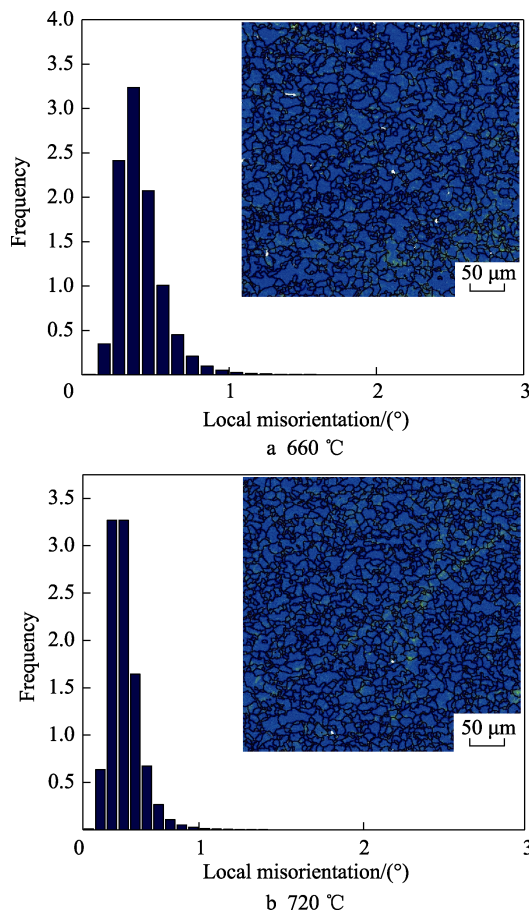


图5 核平均取向偏差(KAM)图和不同温度下的局部取向偏差角

Fig.5 Kernel Average Misorientation (KAM) map and local orientation deviation angles at different temperature

2.3 不同加热速度下45#钢的晶界特征分布

晶界特征分布对45#钢的性能有重要影响,如果晶体中有过多的大角度晶界,会使晶界结合强度过低,从而容易发生沿晶断裂。为了研究低 Σ CSL晶界对45#钢性能的影响,通过对上述快速升温 and 慢速升温的660 °C和720 °C退火后试样的EBSD数据进行处理,分别得到如图6和图7所示的晶界特征分布图。

从图6a和图6b可以看出,在2 °C/s加热速度下,660 °C和720 °C时45#钢中的低 Σ CSL晶界所占比例分别为71.1%和74.5%。从图6c和图6d可以看出,在0.08 °C/s加热速度下,660 °C和720 °C时45#钢中的低 Σ CSL晶界所占比例分别为74.5%和75.5%。在2种加热速度下,随着退火温度的升高,合金中的低 Σ CSL晶界所占比例均呈现增大的趋势。这是因为在较低的退火温度(660 °C)下,因热激活能太低,45#钢在退火过程中再结晶的孕育期较长,从而难以诱导晶界的

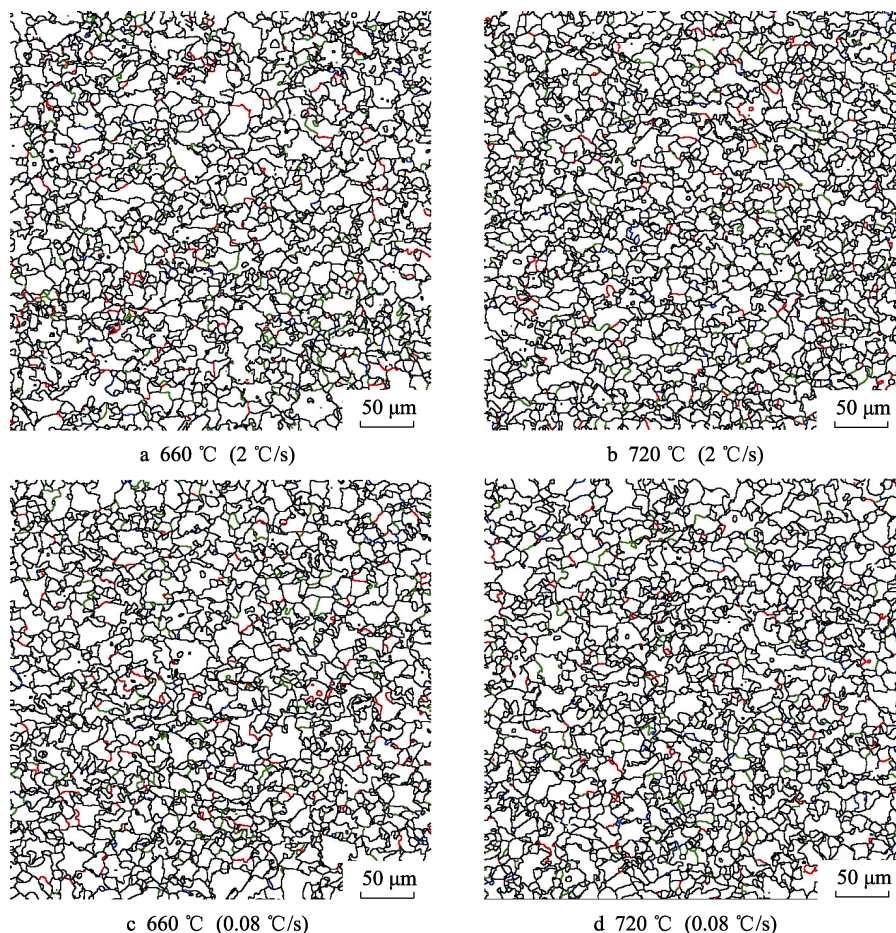


图6 45#钢不同加热速度下退火后的特殊晶界分布图

Fig.6 Distribution of special grain boundaries of 45# steel after annealing at different heating rates

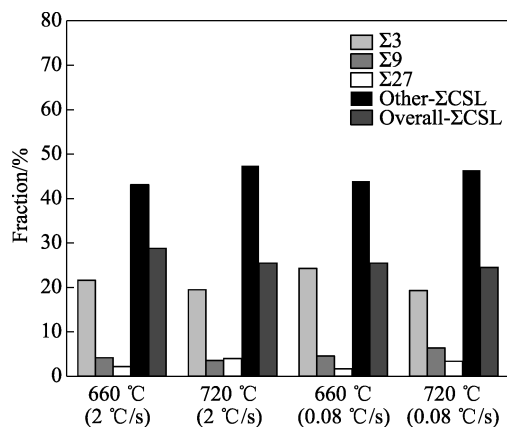


图7 45#钢不同加热速度下退火后的晶界特征分布图

Fig.7 Distribution of grain boundary characteristics of 45# steel after annealing at different heating rates

迁移,使形成的低 Σ CSL晶界的比例较低,在720 °C退火温度下,热激活能足以诱导晶界迁移,且基本完全再结晶,使得在此温度下低 Σ CSL晶界比例最高。

不同加热速度及不同退火温度下45#钢的晶界特征分布图如图7所示。可以看出,通过退火处理后,45#钢中 $\Sigma 3$ 晶界比例随退火温度的升高而减小,但加热速度的影响不明显,由此可知,45#钢晶界特征分布主要受退火温度的影响。在2 °C/s加热速度下,当

退火温度为720 °C时, $(\Sigma 9 + \Sigma 27) / \Sigma 3$ 的比值为0.39,大于660 °C退火温度下的0.30,在0.08 °C/s加热速度下,当退火温度为720 °C时, $(\Sigma 9 + \Sigma 27) / \Sigma 3$ 的比值为0.51,大于660 °C退火温度下的0.26,这就表示在720 °C退火温度下更有利于45#钢中晶界团簇的形成,经过720 °C退火温度下的晶界工程处理后,晶界特征分布最优。

总体来说,在2种退火温度下,慢速升温退火试样中低 Σ CSL晶界比快速升温中的要多。这是由于高位点降低 Σ CSL晶界的晶界能量低,晶界结合力强,所以在塑性变形过程中,当位错在晶界处堆积到一定程度时晶界会发生迁移,并不会像析出相粒子一样钉扎晶界,导致裂纹产生,进而使材料失效,同时这种晶界延缓运动使晶粒形变更加均匀,不易发生断裂。

3 结论

通过实验室模拟罩式退火工艺,对45#钢进行了不同加热速度下的退火,研究了2种加热速度下退火温度对45#钢再结晶过程和晶界特征分布的影响。得到以下主要结论:

1) 加热速度的提高有利于晶粒细化,同时会导

致再结晶温度提高。在高加热速度下退火时,由于升温所用的时间较短,再结晶驱动力较大,变形基体内的亚结构获得的激活能较高,再结晶晶粒通过亚晶合并形核并呈等轴状分布。

2) 在 2 °C/s 加热速度下,随着退火温度的升高,一些小角度晶界转变为大角度晶界,促进了再结晶过程的进行。在 0.08 °C/s 加热速度下,在 660 °C 时,几乎没有小角度晶界,表明发生了完全再结晶。而在 720 °C 时,由于 HAGBs 在高温下的迁移率较高,晶粒迅速长大,大角度晶界所占的比例减小。

3) 45[#]钢晶界特征分布主要受退火温度的影响。在 2 种加热速度下,随着退火温度的升高,合金中的低 Σ CSL 晶界所占的比例均呈现增大的趋势,当退火温度为 720 °C 时,试样中低 Σ CSL 晶界比例最高,有利于 45[#]钢中晶界团簇的形成,晶界特征分布最优。

参考文献:

- [1] 樊宽远. 中温孔型轧制对中碳钢的组织细化及力学性能的影响研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2021: 3.
FAN Kuan-yuan. Study on the Effect of Medium Temperature Hole Rolling on the Tissue Refinement and Mechanical Properties of Medium Carbon Steel[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2021: 3.
- [2] KARMAKAR A, MANDAL M, MANDAL A, et al. Effect of Starting Microstructure on the Grain Refinement in Cold-Rolled Low-Carbon Steel during Annealing at Two Different Heating Rates[J]. Metall Mater Trans: A, 2016, 47: 268-281.
- [3] JANG J M, KIM J, KANG N H, et al. Effects of Annealing Conditions on Microstructure and Mechanical Properties of Low Carbon, Manganese Transformation-Induced Plasticity Steel[J]. Met Mater Int, 2009, 15: 909-916.
- [4] PRIMIG S, LEITNER H, KNABL W, et al. Influence of the Heating Rate on the Recrystallization Behavior of Molybdenum[J]. Materials Science and Engineering: A, 2012, 535: 316-324.
- [5] DALAI B, MORETTI M A, AKERSTROM P, et al. Mechanical Behavior and Microstructure Evolution during Deformation of AA7075-T651[J]. Materials Science and Engineering: A, 2021, 822: 141615.
- [6] FERREIRA A M, MARTORANO M A, DE LIMA N B, et al. Effects of Recovery and Recrystallization on Microstructure and Texture during Annealing of a Cold Deformed Superconducting Nb-50wt.% Ti Alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 887: 161334.
- [7] CIUCANI U M, THUM A, DEVOS C, et al. Recovery and Recrystallization Kinetics of Differently Rolled, Thin Tungsten Plates in the Temperature Range from 1325 °C to 1400 °C[J]. Nuclear Materials and Energy, 2019, 20: 100701.
- [8] YUAN K, CHEN J, YANG D, et al. Effect of Annealing Process on the Microstructure and Texture of Cold-Rolled High-Purity Al-0.5%Cu Plates[J]. Materials, 2022, 15(10): 3489.
- [9] CHEN Y D, DAN C Y, SHI Q W, et al. Influence of Heating Rate on the Recrystallization Temperature of Al-Mg Alloy[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 22: 2206-2211.
- [10] ZHI Y, KE D, LIU X, et al. Effects of Annealing Temperature on Microstructure and Properties of Tailor-rolled Blank of Medium-Manganese Steel[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2020, 27: 933-939.
- [11] TANG X C, KUANG C, ZHOU W L, et al. Effect of Annealing Process on Microstructure and Electrical Conductivity of Cold-Rolled Ti Microalloyed Conductive Steel[J]. Materials Characterization, 2023, 201: 112930.
- [12] XIE Z Q, HUI W J, BAI S Y H, et al. Effects of Annealing Temperature and V Addition on Microstructure and Mechanical Properties of Fe-Mn-Al-C Austenitic Low-Density Steel[J]. Materials Today Communications, 2023, 35: 106328.
- [13] MOHAPATRA S, DAS K, DAS S. Effect of Annealing Time on the Microstructure and Mechanical Properties of Aluminum Added Low-Density Medium Manganese Steel[J]. Materials Letters, 2022, 318: 132211.
- [14] MISHRA G, CHANDAN A K. Effect of Cold Deformation Extent and ART Annealing Duration on the Microstructure and Mechanical Properties of a Medium Manganese Steel[J]. Materials Chemistry and Physics, 2021, 271: 124940.
- [15] LIAN X, LI Y, XIONG Y, et al. Effect of Annealing Time on Microstructure and Mechanical Properties of Cryorolled AISI 310S Stainless Steel[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2023, 30(3): 548-556.
- [16] WANG F, YE X, REN S, et al. Effect of Inter-critical Annealing Time on Microstructure Evolution and Mechanical Properties of Low Carbon Medium Manganese Steel Subjected to Multi-Step Heat Treatment Process[J]. Materials, 2022, 15(7): 2425.
- [17] XIE S Y, LI R D, YUAN T C, et al. Effect of Heating Rate on Microstructure and Mechanical Properties of AlCoCrFeNi High Entropy Alloy Produced by Spark Plasma Sintering[J]. Materials Characterization, 2019, 154: 169-180.
- [18] MULJONO D, FERRY M, DUNNE D P. Influence of Heating Rate on Anisothermal Recrystallization in Low and Ultra-Low Carbon Steels[J]. Materials Science and Engineering: A, 2001, 303(1/2): 90-99.
- [19] CHBIHI A, BARBIER D, GERMAIN L, et al. Interactions Between Ferrite Recrystallization and Austenite Formation in High-Strength Steels[J]. Journal of Mate-

- rials Science, 2014, 49(10): 3608-3621.
- [20] LIU G, ZHANG S G, LI J, et al. Fast-Heating for Inter-critical Annealing of Cold-Rolled Quenching and Partitioning Steel[J]. Materials Science and Engineering: A, 2016, 669: 387-395.
- [21] 石文敏, 杨光, 吴章汉, 等. 退火加热速度对高牌号无取向硅钢组织、织构及磁性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2023, 44(4): 138-145.
- SHI Wen-min, YANG Guang, WU Zhang-han, et al. Effect of Annealing Heating Rate on the Organization, Weave and Magnetic Properties of High-Grade Non-Oriented Silicon Steel[J]. Journal of Materials Heat Treatment, 2023, 44(4): 138-145.
- [22] HILINSKI E J. Recent Developments in Semiprocessed Cold Rolled Magnetic Lamination Steel[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2006, 304(2): 172-177.
- [23] KARMAKAR A, GHOSH M, CHAKRABARTI D. Cold-Rolling and Inter-Critical Annealing of Low-Carbon Steel: Effect of Initial Microstructure and Heating-Rate[J]. Materials Science and Engineering: A, 2013, 564: 389-399.
- [24] XU D, LI J, MENG Q, et al. Effect of Heating Rate on Microstructure and Mechanical Properties of TRIP-Aided Multiphase Steel[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2014, 614: 94-101.
- [25] JIA Z, GAO Z, JI J J, et al. Study of the Dynamic Recrystallization Process of the Inconel625 Alloy at a High Strain Rate[J]. Materials, 2019, 12(3): 510.

责任编辑: 蒋红晨