

轧后冷却工艺对模拟 CSP 含铜 Hi-B 钢热轧组织和结构的影响

余冲¹ 肖欢²

(1 武汉工程大学邮电与信息工程学院, 武汉 430073;

2 武汉科技大学钢铁冶金及资源利用省部共建教育部重点实验室, 武汉 430081)

摘要 以模拟 CSP 工艺-真空感应炉熔炼含铜 Hi-B 钢(成分: 0.06C, 3.38Si, 0.14Mn, 0.013P, 0.003S, 0.019Al, 0.37Cu, 0.0015O, 0.0087N) 模铸成 210 mm × 120 mm × 60 mm 板, Φ350 mm 二辊热轧机 1 065 °C 开轧经 5 道次从 60 mm 轧成 3.5 mm 板(终轧 865 °C)为试验基板, 研究了轧后水冷和轧后水冷至 580 °C 再空冷两种冷却工艺对实验钢组织和结构的影响。结果表明, 热轧后水冷到 580 °C 再空冷到室温的冷却方式有助于获得更高取向精度的高斯织构、更低比例的黄铜织构以及其他合理的织构组成, 较轧后水冷工艺更加适合实验钢。

关键词 含铜 Hi-B 钢 热轧 冷却工艺 组织 织构

Effect of Cooling Process after Rolling on Structure and Texture of Simulated CSP Hot-Rolled Hi-B Steel Bearing Copper

Yu Chong¹ and Xiao Huan²

(1 College of Post and Telecommunication Engineering, Wuhan Engineering University, 2 Key Laboratory for Ferrous Metallurgy and Resources Utilization of Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081)

Abstract The simulated CSP process of tested plate of Hi-B steel bearing copper (成分: 0.06C, 3.38Si, 0.14Mn, 0.013P, 0.003S, 0.019Al, 0.37Cu, 0.0015O, 0.0087N) is melting by vacuum induction furnace and mold casting to 210 mm × 120 mm × 60 mm plate, rolling at 1 065 °C from 60 mm to 3.5 mm plate with finishing rolling at 865 °C by Φ350 mm two-high hot rolling mill and 5 passes. The effect of both processes- water cooling after rolling and water cooling to 580 °C, air cooling after rolling on structure and texture of tested steel has been studied. Results show that the cooling process of water cooling to 580 °C, air cooling to room temperature after hot-rolling is available to get Goss texture with higher orientation accuracy and lower content of Brass texture, and other reasonable texture component, as compared with water cooling process after rolling it is more suitable for tested steel.

Material Index Hi-B Steel Bearing Copper, Hot-Rolling, Cooling Process, Structure, Texture

Hi-B 钢即高磁感取向硅钢是电工钢的一种, 因其具有高纯度大尺寸的 {110} <001> 取向晶粒从而具有单一方向良好的磁性能被广泛应用于电工、电子以及国防军工领域, 在国民经济中占有重要的地位^[1], 又因其生产流程繁琐, 工艺复杂, 技术参数控制要求严格, 被称之为钢铁材料中的“艺术品”^[2]。

CSP 工艺由于不需要二次加热避免了能量浪费, 对于企业节能减排以及降低生产成本有着显著的作用^[3]。但在现有 CSP 生产工艺中, 由于设备能力的限制, 无法满足传统 Hi-B 钢在热轧前需要充分固溶抑制剂的温度需求。因此, 通过加入铜元素, 以固溶温度更低的 Cu₂S 来取代传统抑制剂 MnS 成为一种研究方向^[4-5]。

本文通过模拟 CSP 工艺试制含铜 Hi-B 钢, 采取调整热轧后的冷却工艺的方式, 获得不同的热轧样品, 再通过对比不同冷却工艺下的热轧样品组织,

以确认本实验钢种最佳的冷却工艺, 为后续相关研究提供理论基础。

1 实验方法

本实验钢种由武汉科技大学耐火材料与冶金国家级重点实验室真空感应炉进行熔炼, 之后浇铸到 210 mm × 120 mm × 60 mm 的铸模中, 铸坯凝固后高温脱模, 脱模后放到加热炉中进行中均热 3 h, 脱模温度为 1 032 °C, 均热温度为 1 250 °C。之后再通过武汉科技大学高精度轧制重点实验室 Φ350 mm 二辊热轧试验机组上进行热轧, 热轧过程中不取样, 开轧温度 1 065 °C, 经 5 道次 60 mm → 40 mm → 20 mm → 8 mm → 5.5 mm → 3.5 mm 进行轧制, 终轧温度 865 °C。轧后将轧件送到冷床上通过不同方式进行控冷。一部分样品进入冷床后直接快速水冷至室温, 编号 A; 另外一部分样品进入冷床后先快速进行冷却, 当样品表面温度冷却至 580 °C 时停止喷水, 让其继续空冷至室温, 编号 B。

表 1 实验 Hi-B 钢的化学成分/%

Table 1 Chemical composition of tested Hi-B steel / %

C	Si	Mn	P	S	Als	Cu	O	N
0.06	3.38	0.14	0.013	0.003	0.019	0.37	0.001 5	0.008 7

实验钢种的主要化学成分如表 1 所示。之后将两种不同冷却工艺的热轧样品分别取样在 Zeiss Axio-plan 万能金相光学显微镜上进行金相观察,在装有背散射探头的 NOVA400 Nano SEM 的场发射扫描电子显微镜上进行 EBSD 织构数据采集。

2 实验结果

2.1 热轧样品金相组织分析

图 1 为 A 和 B 样品的金相组织图片,由于热轧板厚度尺寸太大,这里节选的是从热轧板边部到中部的组织。从图 1 中可以看出,A、B 两个热轧样品的金相组织存在明显的梯度:最表层的再结晶区域、中间的过渡区以及中心的变形组织区。其产生原因主要是由于轧件在轧制过程中由于厚度尺寸较大,表面和中心区域的变形量不同,从而造成了各区域发生再结晶的形变储能不同。表面区域变形程度大,在热轧时发生了再结晶,形成再结晶组织;而过渡区仅部分发生了再结晶,且中心区的再结晶程度进一步减小。这种组织梯度关系为织构梯度的形成提供了条件,从而为取向硅钢发展成完善的二次再结晶组织提供了有利条件。

对比两种不同冷却制度的热轧金相组织可以发现 A 样品的纤维带状组织的密集程度要比 B 样品高,其原因是由于 A 样品是直接水冷到室温,而 B 样品表面只水冷至 580 °C 左右的温度,由于样品较厚,沿厚度方向存在温度梯度,此时的中心温度较高,在较长的空冷过程中组织仍然发生着回复甚至

再结晶以及晶粒长大的过程,从而降低了纤维带状组织的密集程度。

2.2 热轧样品 EBSD 织构分析

图 2 为热轧样品的部分织构分布图,由于视场的限制,节选的分析区域为从上表面到中心的区域。从图 2 中可以看出,热轧样品从表层到中心层存在明显的组织梯度,次表层的主要织构为 (110) <001> 与 (110) <112>,同时也含有 (111) <112> 织构,而中心层则含有大量的 {001} <110> 与 {001} <100> 织构。

据相关文献[6-8],对于硅钢最为重要的高斯织构由于热轧大压下过程中轧辊对于轧件的剪切应力,在轧件的次表层产生,并继承到后续的工艺中。因此,热轧过程中高斯织构含量以及取向准确度就显得相当重要。

图 3 为两个样品的高斯织构取向偏差及含量,从分布来看,两种样品高斯织构主要分布在次表层,在靠中心层也有少量高斯织构。以 15° 的取向偏差角来统计,A 样品的高斯织构含量为 3% 而 B 的为 3.58%,两者比较接近,B 样品高斯织构含量略微高于 A 样品。但从织构的取向准确程度来看,A 样品的高斯织构主要在 10° 至 15° 取向偏差角范围内,相对而言 B 样品的高斯织构取向更加准确,这可能是由于 B 方案中给了样品更多的时间进行回复甚至再结晶以及晶粒长大,从而调整了样品的织构组成,使得高斯织构含量有略微增加并且取向精准度更高。

在轧制过程中,不同位向组分所具有的形变储能有所不同,依次为 {110} > {111} > {112} > {100}。当热轧板中含有 {100} 组分多时便不利于完善的二次再结晶发展,相反含有 {110} 组分较多

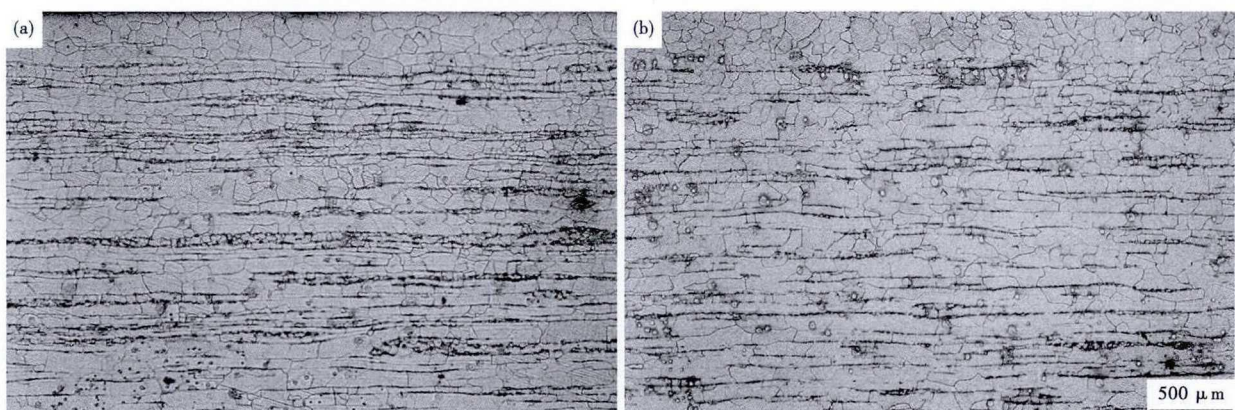


图 1 热轧 Hi-B 钢的组织形貌:(a) 轧后水冷;(b) 轧后水冷至 580 °C,空冷

Fig. 1 Morphology of structure in hot-rolled Hi-B steel: (a) water cooling after rolling; (b) water cooling to 580 °C, air cooling, after rolling

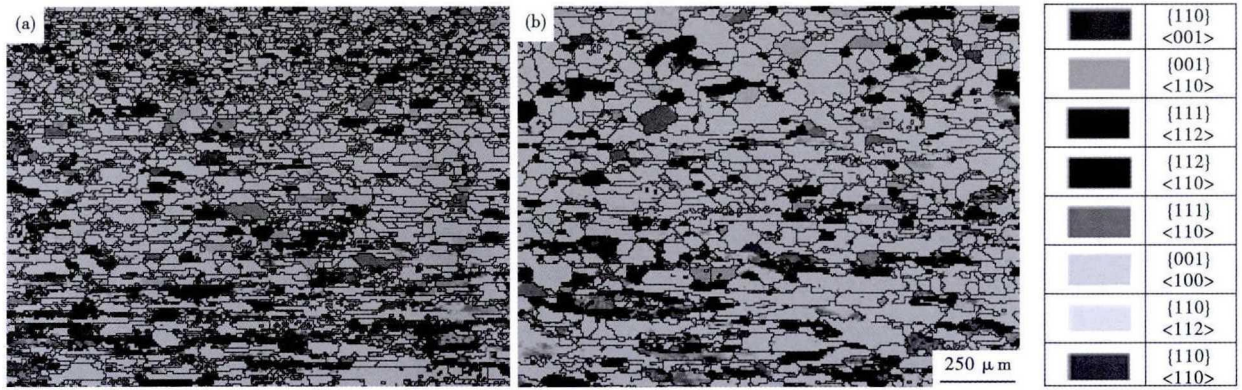


图 2 热轧 Hi-B 钢的织构分布:(a) 轧后水冷;(b) 轧后水冷至 580 °C, 空冷

Fig. 2 Distribution of texture in hot-rolled Hi-B steel: (a) water cooling after rolling; (b) water cooling to 580 °C, air cooling, after rolling

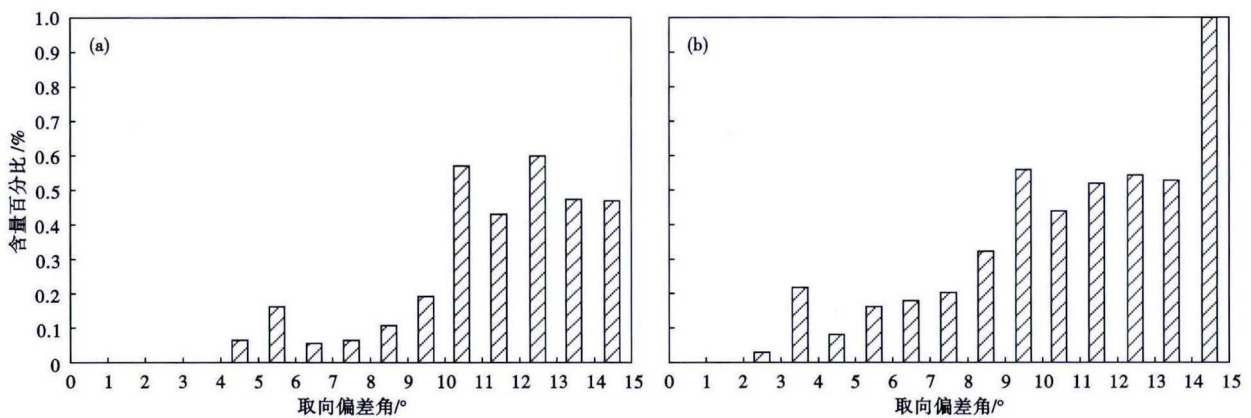


图 3 Hi-B 钢高斯织构取向偏差及含量:(a) 轧后水冷;(b) 轧后水冷至 580 °C, 空冷

Fig. 3 Orientation deviation and content of GOSS texture in Hi-B steel: (a) water cooling after rolling; (b) water cooling to 580 °C, air cooling, after rolling

时可以使初次晶粒中 {110} <001> 位向的晶粒增多,有利于提高材料性能^[9-10]。通常取向硅钢热轧样品沿厚度方向的中心处主要织构为 {100} <001> ~ <011>, 由于不同的晶粒间的位向差小于 10°, 且同时冷轧中心部位应变相对小, 储能低, 不利于退火时再结晶的发生; 而存在 (111) ~ (113) <001> 伸长晶粒时, 由于这些晶粒中容易形成小的胞状且复杂的位错, 位向差较大, 冷轧时应变量大, 储能也高, 因此退火时容易发生再结晶^[11-13]。因此, 通常在热轧过程中需要调整工艺来减小厚度方向中心部位的 (100) <001> ~ <011> 织构, 并增加 (111) ~ (113) <001> 织构所占的比例, 从而提高大角晶界比例, 促进二次再结晶长大, 以获得良好的成品组织性能。

表 2 为部分主要织构的含量百分比, 从表 2 中可以看出, B 样品中对后续工艺有利的 {111} <110> 织构含量比 A 样品高, {111} <112> 织构含量与 A 样品基本相同; 但与此同时, B 样品中对后

表 2 Hi-B 钢各主要织构含量百分比:(a) 轧后水冷;(b) 轧后水冷至 580 °C, 空冷

Table 2 Percentage of each main texture in Hi-B steel: (a) water cooling after rolling; (b) water cooling to 580 °C, air cooling, after rolling

织构	(a) /%	(b) /%
{110} <112>	3.75	1.17
{112} <110>	5.91	5.55
{001} <110>	7.65	8.39
{001} <100>	3.66	6.21
{111} <110>	2.66	4.55
{111} <112>	3.19	3.28
{110} <001>	3.00	3.58

续工艺有害的 {001} <110>、{001} <100> 织构含量均比 A 高, 从这个方面来看, 难以比较直接快速水冷至室温的工艺 A 与水冷到 580 °C 再空冷到室温的工艺 B 的优劣。

在 Hi-B 钢二次再结晶的过程中, {110} 取向织构能在高含量 H₂ 的退火气氛中获得最大的表面能, 从而促使高斯织构 {110} <001> 获得优于其他取向织构的生长能力逐步吞并其他晶粒以获得最终

的良好组织性能^[14-15]。 $\{110\} \langle 112 \rangle$ 织构又称黄铜织构,其与高斯织构同属 $\{110\}$ 取向,因此在二次再结晶过程中与高斯织构具有相同的表面能,形成竞争关系。故 $\{110\} \langle 112 \rangle$ 织构的含量增多会使得最终二次再结晶后高斯织构的比例下降,从而影响样品最终的磁性能。从表 2 中可以看出,B 样品的 $\{110\} \langle 112 \rangle$ 织构比例要明显比 A 样品低的多,在此方面水冷到 580 °C 再空冷到室温的 B 样品要优于直接快速水冷至室温的 A 样品。

综上所述,热轧后水冷到 580 °C 再空冷到室温的冷却方式有助于获得更高取向精准度的高斯织构、更低比例的黄铜织构以及其他合理的织构组成,因此较直接快速水冷至室温的冷却方式更加适合本实验钢种。

3 结论

(1) 热轧后的样品金相组织存在明显的梯度,

由最表层的再结晶区域、中间的过渡区以及中心的变形组织区组成,且热轧后水冷到 580 °C 再空冷的样品的纤维带状组织密度低于直接快速水冷至室温的样品。

(2) 热轧样品从表层到中心层存在明显的组织梯度,次表层的主要织构为 $(110) \langle 001 \rangle$ 与 $(110) \langle 112 \rangle$,同时也含有 $(111) \langle 112 \rangle$ 织构,而中心层则含有大量的 $\{001\} \langle 110 \rangle$ 与 $\{001\} \langle 100 \rangle$ 织构。

(3) 相较直接快速水冷至室温的冷却方式,热轧后水冷到 580 °C 再空冷到室温的冷却方式有助于获得更高取向精准度的高斯织构、更低比例的黄铜织构以及其他合理的织构组成,有利于本实验钢种最终获得良好组织性能。

2012 年国家自然科学基金项目资助(51274155)

参考文献

- [1] 仇圣桃,付兵,项利,等.磁感取向硅钢生产技术与工艺的研发进展及趋势[J].钢铁,2013,48(3):1-8.
- [2] 何忠治,赵宇,罗海文.电工钢[M].北京:冶金工业出版社,2012.
- [3] 仇圣桃,项利,岳尔斌,等.薄板坯连铸连轧流程生产取向硅钢技术分析[J].钢铁,2008,43(9):1-7.
- [4] Klaus G, Giuseppe A and Stefano F. Recent Technology Developments in Production of Grain-Oriented Electrical Steel [J]. Steel Research International, 2005, 76(6): 413-417.
- [5] Gyu Seung Choi, Chung San Lee and Jong Soo Woo. Method for Manufacturing Oriented Electrical Steel Sheet by Heating Slab at Low Temperature; US Patent, 1997-5653821 [P]. 1997.
- [6] 杨华. Fe-3% Si 硅钢带热轧和冷轧织构分析[D]. 沈阳: 东北大学, 2008.
- [7] Mykola Dzubinsky and Frantisek Kovac. Microstructure and Texture Development of Fe-3% Si GO Steel during High Temperature Annealing [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2003, 254-255: 388-390.
- [8] 董延亮,项利,岳尔斌,等. TSCR 流程试制取向硅钢的组织演变[J]. 钢铁研究学报, 2010, 22(7): 56-58.
- [9] 柳璞如,李福林. 高磁感单取向硅钢各工序织构的测定及最终再结晶织构的形成[J]. 武钢技术, 1981, 12(1): 46-54.
- [10] Sha Yuhui, Zhang Fang and Li Song, et al. Effects of Primary Annealing Condition on Recrystallization Texture in a Grain Oriented Steel [J]. Journal of Materials Science and Technology, 2004, 20(3): 253-256.
- [11] 张文康,毛卫民,王一德,等. 热轧工艺对无取向硅钢组织结构和磁性能的影响[J]. 钢铁, 2006, 41(4): 77-81.
- [12] Morawiec A. On Abnormal Growth of Goss Grain in Grain-Oriented Silicon Steel [J]. Scripta Materialia, 2011, 64(5): 466-470.
- [13] 张贞贞. 低温板坯加热取向 3% 硅钢热轧板研究[J]. 特殊钢, 2011, 32(1): 69-70.
- [14] Yan Mengqi, Qian Hao and Yang Ping, et al. Analysis of Micro-Texture during Secondary Recrystallization in a Hi-B Electrical Steel [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2011, 27(11): 1065-1071.
- [15] 王鑫. 取向硅钢初次再结晶织构控制研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2011.

余 冲(1987-),女,硕士,2010 年武汉科技大学(本科)毕业,金属压力加工组织与性能研究。

E-mail: 445681280@qq.com.

收稿日期: 2017-10-10