

# 热终轧温度对罐体材料用3104铝合金织构演变的影响<sup>①</sup>

赵千愉<sup>1,2</sup>, 叶凌英<sup>1,2</sup>, 韦卫昌<sup>1,2</sup>, 何海铜<sup>3,4,5</sup>, 刘晓滕<sup>3,4,5</sup>, 曹高辉<sup>3,4,5</sup>, 唐建国<sup>1,2</sup>

(1.中南大学材料科学与工程学院, 湖南长沙 410083; 2.中南大学有色金属材料科学与工程教育部重点实验室, 湖南长沙 410083; 3.宝山钢铁股份有限公司中央研究院宝武铝业技术中心, 上海 201999; 4.上海运输工具轻量化金属材料应用工程技术研究中心, 上海 201999; 5.宝武铝业科技有限公司, 河南三门峡 472000)

**摘要:** 研究了热终轧温度对3104铝合金“1+3”热连轧坯料及后续冷轧、中间退火过程中组织与织构演变的影响规律。结果表明,随着热终轧温度升高,热轧板再结晶程度增大,热轧板中立方Cube织构体积分数增加,Brass织构、S织构和Copper织构体积分数降低;中间退火板的平均晶粒尺寸随着热终轧温度升高而增大;中间退火前冷轧板中Cube织构体积分数随着热终轧温度升高而增加,不利于在退火后形成强的Cube织构,由此导致成品冷轧板中Cube织构体积分数降低。

**关键词:** 3104铝合金; 织构; 罐体材料; 深冲性能; 热轧; 终轧温度; 中间退火

中图分类号: TB302;TG335

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2025.03.037

文章编号: 0253-6099(2025)03-0218-06

## Effect of Finish Rolling Temperature on Texture Evolution of 3104 Aluminum Alloy for Tank Material

ZHAO Qianyu<sup>1,2</sup>, YE Lingying<sup>1,2</sup>, WEI Weichang<sup>1,2</sup>, HE Haitong<sup>3,4,5</sup>, LIU Xiaoteng<sup>3,4,5</sup>, CAO Gaohui<sup>3,4,5</sup>, TANG Jianguo<sup>1,2</sup>  
(1.School of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China; 2.Key Laboratory of Non-ferrous Metals Materials Science and Engineering, Ministry of Education, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China; 3.Baowu Aluminum Technical Center, Baosteel Central Research Institute, Baoshan Iron & Steel Co., Ltd., Shanghai 201999, China; 4.Shanghai Engineering Research Center of Lightweight Metals for Means of Transportation, Shanghai 201999, China; 5.Baowu Aluminum Industry Technology Co., Ltd., Sanmenxia 472000, Henan, China)

**Abstract:** The 3104 aluminum alloy treated by hot tandem mills at different finish rolling temperature (FRT) was taken as the samples in the experiment to investigate the effect of FRT on its microstructure and texture evolution during the subsequent cold rolling and intermediate annealing processes. It is found that as the FRT for the 3104 aluminum alloy sample rises, the hot-rolled sheet presents highly recrystallization level, with increased volume fraction of Cube texture and decreased volume fractions of Brass, S and Copper textures. Furthermore, as FRT rises, the average grain size of the intermediate annealed sheet increases, and also the volume fraction of Cube texture in the cold-rolled sheet before intermediate annealing process increases, which is unfavorable for the formation of a strong Cube texture after annealing. As a result, the volume fraction of Cube texture in the final cold-rolled sheet decreases.

**Key words:** 3104 aluminum alloy; texture; tank material; deep drawing process; hot rolling; finish rolling temperature; intermediate annealing

3104铝合金具备高强度、良好韧性、优异耐腐蚀性和深冲性能等优点,常被用作易拉罐的罐体材料。通常需要3104铝合金具有较强的Cube织构以平衡形变织构,降低板材的各向异性,从而降低深冲制耳率<sup>[1]</sup>。热轧是铝板生产过程的关键环节,影响后续冷

轧和退火过程中组织和织构演变,从而决定最终的成形性能<sup>[2-4]</sup>。为了降低深冲过程中罐体材料用3104铝合金的制耳率,研究人员开展了大量研究<sup>[5-8]</sup>,通过热轧、冷轧、中间退火过程调控合金织构。近年来,采用“1+4”(1架热粗轧机+4机架连轧热精轧机)和“1+5”

① 收稿日期: 2024-12-03

作者简介: 赵千愉(2000—),男,湖南湘潭人,硕士研究生,主要研究方向为金属材料织构调控。E-mail:zqy18173298016@163.com

(1架热粗轧机+5机架连轧热精轧机)罐体材料多机架热连轧技术,轧制变形量大,罐体材料可以发生卷取后“自退火”得到Cube织构。然而,热轧机架数量较少的“1+1”(1架热粗轧机+1机架热精轧机)、“1+2”(1架热粗轧机+2机架连轧热精轧机)和“1+3”(1架热粗轧机+3机架连轧热精轧机)技术由于热轧板厚度偏厚,冷轧变形量大,合金深冲制耳率偏高和伸长率偏低,需要增加中间退火来解决该问题。本文针对国内某工厂提供的“1+3”热连轧坯料开展热终轧温度对3104铝板后续冷轧及中间退火过程中组织、织构演变规律的影响研究,为3104铝板工业生产中热轧温度控制和冷轧退火工艺制定提供理论依据。

## 1 实验

实验样品为国内某工厂提供的3个批次的热终轧温度分别为280、300和360℃的热轧坯料(厚度5mm),在实验室采用工作辊径110mm的冷轧机将厚5mm的板材通过2个道次冷轧至2.1mm,然后将冷轧板材在电阻炉中进行350℃保温1h的中间退火,最后将退火板材采用同样的冷轧机冷轧至0.25mm。样品编号及状态见表1。

表1 样品编号及状态  
Table 1 Description of samples

样品编号	样品状态
HR280	热轧板,热终轧温度280℃,板厚5mm
HR300	热轧板,热终轧温度300℃,板厚5mm
HR360	热轧板,热终轧温度360℃,板厚5mm
CR280-58	将HR280冷轧至2.1mm,冷轧变形量58%
CR300-58	将HR300冷轧至2.1mm,冷轧变形量58%
CR360-58	将HR360冷轧至2.1mm,冷轧变形量58%
CR280A	将CR280进行350℃×1h的中间退火,水冷
CR300A	将CR300进行350℃×1h的中间退火,水冷
CR360A	将CR360进行350℃×1h的中间退火,水冷
CR280A-88	将CR280A冷轧至0.25mm,冷轧变形量88%
CR300A-88	将CR300A冷轧至0.25mm,冷轧变形量88%
CR360A-88	将CR360A冷轧至0.25mm,冷轧变形量88%

热轧样品的RD(轧制方向)-ND(板面法向)、RD-TD(横向)和TD-ND面经过机械抛光、电解抛光和阳极覆膜处理后,进行金相组织观察。电解抛光液为20mL高氯酸+180mL无水乙醇,电压20V,时间12s。阳极覆膜溶液为4mL氟硼酸+200mL蒸馏水,电压18V,时间4min。最后,利用DM2700M RL型金相显微镜进行观察。

从退火板中取测试面RD-ND面的样品进行机械抛光和电解抛光后,采用NordlysMax2电子背散射衍

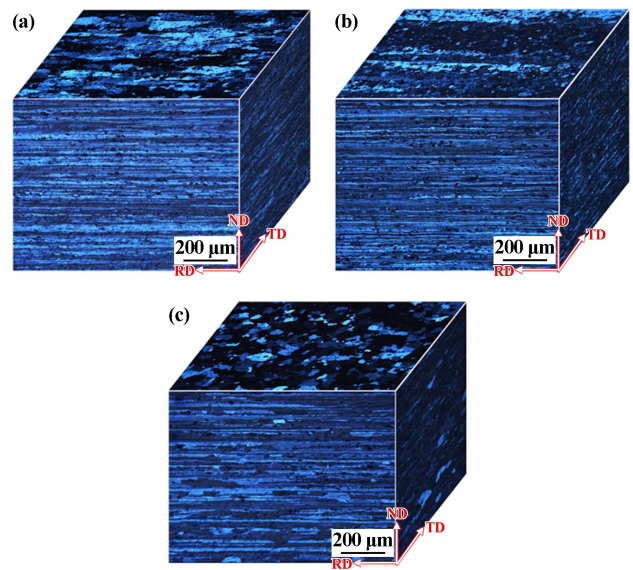
射仪进行EBSD数据采集,在AZtecCrystal软件上进行EBSD数据分析及处理。

对样品RD-TD面进行织构测试,先进行机械抛光,然后用30%氢氧化钠水溶液浸泡5min去除表面应力层后,清水冲洗,采用4%硝酸溶液除去残留的腐蚀产物,并再次进行清水冲洗。采用具有1/4尤拉环的Bruker D8 Discover X衍射仪测量{111}、{200}和{220}晶面的不完整极图。采用基于邦厄(Bunge)级数展开法( $l=22$ )的软件Texture Evaluation Program计算取向分布函数(ODF)展开系数( $C$ 系数)和反算完整极图,以计算出来的 $C$ 系数为输入参数,采用基于高斯函数拟合方法的Texture Calc软件分析计算织构组分和体积分数<sup>[9]</sup>。计算得到的织构组分与标准织构组分取向差小于15°的统计结果被视为对应的标准织构组分。

## 2 实验结果

### 2.1 热终轧温度对热轧板组织与织构的影响

经过“1+3”热连轧后不同终轧温度热轧板的三维金相组织如图1所示。由图1可见,热轧后晶粒沿RD方向拉长,呈现纤维状。热连轧终轧温度280℃时,几乎未观察到无畸变的再结晶晶粒,表明“1+3”热连轧卷取后未发生明显再结晶。热连轧终轧温度300℃时,板材表层和心部出现了细小的再结晶晶粒,表明在热轧卷取后发生了再结晶现象。热连轧终轧温度360℃时,再结晶晶粒进一步长大,板材再结晶程度增加。

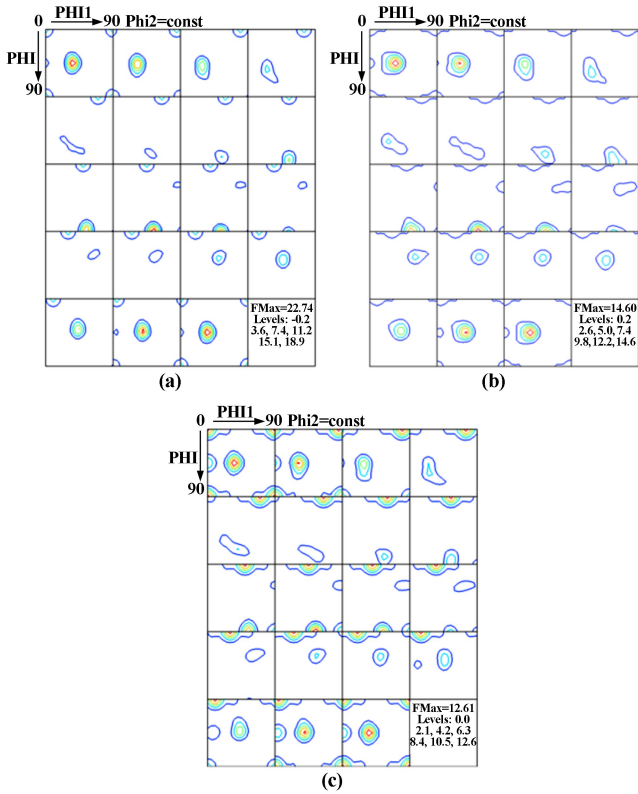


(a) HR280; (b) HR300; (c) HR360

图1 热轧板三维金相组织

Fig. 1 Three-dimensional images of metallographic structure of hot rolled sheets

热轧板样品的取向分布函数(ODF)如图2所示。由图2可见,提高热连轧终轧温度对板材结构类型没有显著影响,主要的结构为 Brass 结构(35°, 45°, 0°/90°),但提高热连轧终轧温度降低了结构的取向密度,取向密度最大值从 HR280 的 22.74 降至 HR300 的 14.60,再到 HR360 的 12.61。



(a) HR280; (b) HR300; (c) HR360

图2 热轧板取向分布函数图

Fig.2 ODFs of hot rolled sheets

从宏观 ODF 计算的样品主要结构体积分数如表 2 所示。从表 2 可以看出,提高热连轧终轧温度导致 Cube 结构(0°, 0°, 0°)和 Goss 结构(0°, 45°, 0°)体积分数增加,S 结构(59°, 37°, 63°)、Brass 结构和 Copper 结构(90°, 35°, 45°)体积分数下降。

2.2 热终轧温度对中间退火前冷轧结构的影响

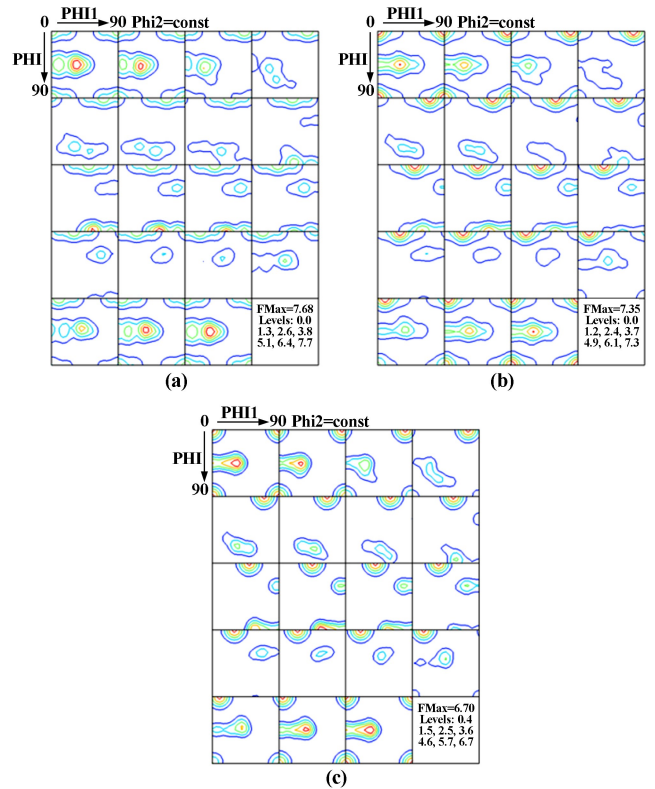
热轧板冷轧至 2.1 mm 后的 ODF 如图 3 所示。与热轧板相比,冷轧板的最大取向密度有所下降,CR280-58、CR300-58 和 CR360-58 取向密度最大值分别从 22.74、14.60、12.61 下降至 7.68、7.35、6.70;形变结构取向密度显著高于 Cube 结构取向密度。

由表 2 可以看出,冷轧后板中 Goss 结构和 Copper 结构体积分数增加,而 Cube 结构和 S 结构体积分数下降。此外,提高热终轧温度使得冷轧板材的 Copper 结构、Goss 结构和 Brass 结构体积分数降低,Cube 结构体积分数增加。

表 2 从宏观 ODF 计算的样品主要结构体积分数

Table 2 Volume fraction of main texture in components the sample calculated from macro-ODF

样品 编号	结构体积分数(%)				
	Cube	Brass	S	Copper	Goss
HR280	6.44	21.05	19.29	6.79	3.37
HR300	7.07	19.83	18.42	5.76	4.37
HR360	12.01	16.54	12.67	3.32	5.70
CR280-58	6.27	21.19	5.80	11.74	13.40
CR300-58	6.58	14.59	7.85	10.77	7.28
CR360-58	11.62	12.28	6.16	8.24	6.90
CR280A	16.21	6.44	0	2.23	7.29
CR300A	15.17	9.48	4.85	0	4.25
CR360A	14.58	10.69	2.82	0	4.01
CR280-88	11.10	19.59	11.74	10.35	11.07
CR300-88	9.30	18.55	20.97	7.44	14.60
CR360-88	7.10	18.74	14.82	5.75	4.60



(a) CR280-58; (b) CR300-58; (c) CR360-58

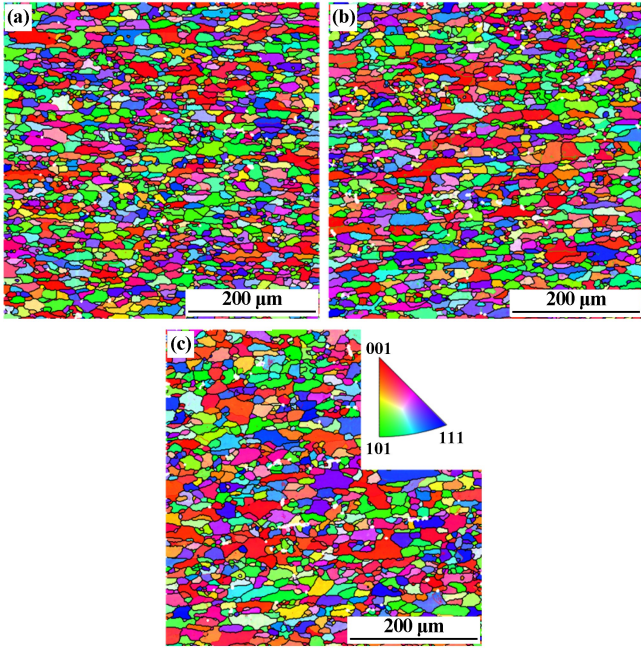
图3 冷轧至 2.1 mm 后板材的取向分布函数图

Fig.3 ODFs of cold-rolled sheets with thickness of 2.1 mm

2.3 热终轧温度对中间退火板组织与结构的影响

经过 350 °C × 1 h 中间退火后退火板的 IPF map 图如图 4 所示。从图 4 可以看出,CR280A、CR300A 和 CR360A 由近似等轴的再结晶晶粒组成,表明此时再结晶已完成。尽管最终 Cube 结构并不强,但从图 4 可以看出,3 个样品中大部分的立方取向晶粒都存在一定的聚集现象,孤立的立方取向晶粒非常少,说明立方

取向晶粒在再结晶过程中容易相互接触形成迁移率较低的晶界,不利于 Cube 结构进一步发展。CR280A 的平均晶粒直径为 10.3  $\mu\text{m}$ , CR300A 的平均晶粒直径为 11.1  $\mu\text{m}$ , CR360A 的平均晶粒直径为 12.7  $\mu\text{m}$ 。CR280A 的晶粒更细小,可能是较低的热轧温度使其在热轧时没有发生动态再结晶,导致冷轧后总的形变储能较大,经过冷轧和退火后再结晶晶粒更细小。



(a) CR280A; (b) CR300A; (c) CR360A

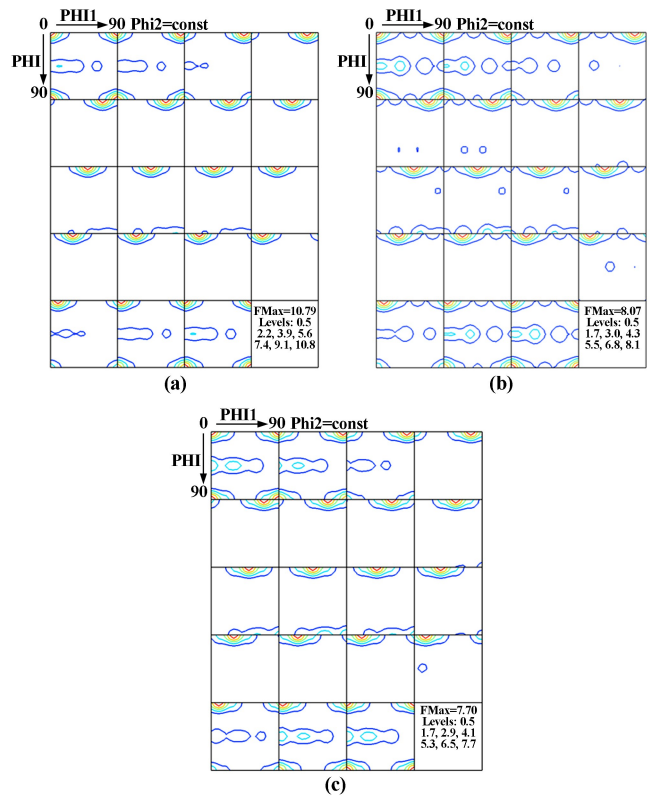
图4 中间退火板的 IPF map 图

Fig.4 Inverse pole figures of sheets after intermediate annealing

中间退火板的取向分布函数图 (ODF 图) 如图 5 所示。从图 5 可以看出,中间退火板 Copper 结构和 S 结构基本消失,仅有少量 Brass 结构和 Goss 结构,而 Cube 结构取向密度增大且大于典型的形变结构取向密度,表明冷轧板的再结晶过程已经完成。随着热连轧终轧温度升高,中间退火板 Cube 结构的取向密度逐渐降低。综合表 2 结果,相较于冷轧板,中间退火板的 Brass 结构、Copper 结构、S 结构和 Goss 结构体积分数下降, Cube 结构体积分数增加,低的热终轧温度有利于提高中间退火板的立方结构含量。

### 2.4 热终轧温度对成品冷轧板结构的影响

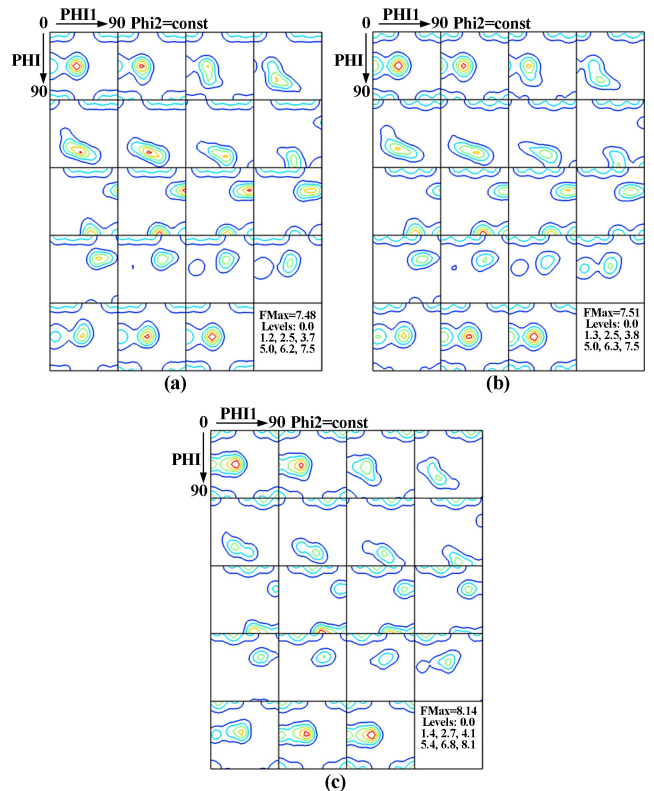
冷轧至 0.25 mm 的成品板 ODF 如图 6 所示。经历了大变形后,成品板形变结构取向密度相对于退火板有所增强,其中取向密度最大的结构组分由 Cube 结构转变为 Brass 结构,CR280-88、CR300-88 和 CR360-88 的 Brass 结构的取向密度分别为 7.48、7.51 和 8.14。根据表 2 结果,经过 88% 变形量的冷轧变形后, Cube 结



(a) CR280A; (b) CR300A; (c) CR360A

图5 中间退火板的取向分布函数图

Fig.5 ODFs of sheets after intermediate annealing



(a) CR280-88; (b) CR300-88; (c) CR360-88

图6 冷轧至 0.25 mm 的成品板取向分布函数图

Fig.6 ODFs of cold-rolled sheet products with thickness of 0.25 mm

构体积分数下降, Brass 织构、S 织构、Copper 织构和 Goss 织构体积分数增加。

### 3 分析和讨论

在塑性变形过程中, 晶粒取向会经历从离散区向零离散区的汇集、然后再转动至稳定聚集区的过程。在晶粒转动过程中, 可能会残留一部分未转动的晶粒, 当这部分未转动的晶粒连接两个取向不同的聚集区时, 就会形成过渡带, 从而使离散区取向密度降低, 零离散区和聚集区取向密度增强。在轧制变形过程中, Cube 取向位于离散区, Brass 取向位于聚集区; 在再结晶过程中, Cube 取向位于聚集区, Brass 取向位于离散区<sup>[10]</sup>。

作为典型的形变织构, Brass 织构、Copper 织构和 S 织构在轧制变形过程中具有高位错密度和形变储能。S 织构和 Copper 织构 Taylor 因子大, 形变储能高, 随着温度升高, 由于动态回复和再结晶, 这些织构会变得不稳定, 其体积分数会降低。相反, Brass 织构形变储能较低, 升高温度导致滑移量和滑移速率增加, 随机织构更容易转变为 Brass 织构<sup>[11]</sup>, 因此与冷轧板和退火板相比, 热轧板 Brass 织构取向密度更高。热终轧温度进一步升高时, 发生再结晶会导致 Cube 织构和 Goss 织构增强, 形变织构弱化, 导致 HR360 中 Brass 织构体积分数和取向密度低于 HR300 的值, 而 HR300 的值又低于 HR280 的值。相反, HR360 中 Goss 和 Cube 织构取向密度和体积分数高于 HR300 的值, HR300 的值又高于 HR280 的值。

Cube 取向是位于离散区域的亚稳态取向。在轧制变形中, Cube 取向晶粒受到轧向应力可以开动的滑移系为  $(\bar{1}\bar{1}1)[011]$ 、 $(1\bar{1}\bar{1})[011]$ 、 $(\bar{1}11)[01\bar{1}]$  和  $(111)[01\bar{1}]$ , 这 4 个滑移系的取向因子相等。因此, 当这 4 个滑移系同时开动时, Cube 取向晶粒能保持稳定而不发生转动, 冷轧后部分 Cube 织构能被保留下来。经过 58% 的冷轧变形后, Cube 织构取向密度降低。HR360 含有更多的 Cube 织构, 冷轧后保留的 Cube 织构更多, 因此 CR360-58 中 Cube 织构体积分数和取向密度高于 CR300-58 的值, 而 CR300-58 中 Cube 织构体积分数和取向密度又高于 CR280-58 的值。

经过中间退火后, CR280A 和 CR300A 中 Cube 织构取向密度大幅增加, 而 CR360A 的 Cube 织构取向密度增幅不大。这是因为冷轧后残留的 Cube 亚结构位错密度低, 更容易发展为再结晶晶核; Cube 取向再结晶晶核与形变织构 S 织构、Copper 织构和 Brass 织构之间构成迁移率更高的大角度晶界, 导致再结晶晶核

长大速度较快, 因此, Cube 取向再结晶晶粒在形核和长大两方面具有明显优势<sup>[12]</sup>, 在退火过程中, Cube 取向晶粒能吞噬其他取向晶粒, 导致其他形变织构取向密度降低, Cube 织构取向密度增加。因此经过中间退火后获得较强的 Cube 织构且形变织构明显弱化。相比之下, CR360-58 形变织构含量少于 CR280-58 和 CR300-58 的形变织构含量, 残留的 Cube 织构含量多, 因此在退火过程中 Cube 取向晶核更容易遇到取向相近的晶粒, 从而形成可动性差的小角度晶界, 发生取向钉扎而难以长大<sup>[13]</sup>, 因此退火后得到的 Cube 织构取向密度低。

### 4 结论

1) 热终轧温度从 280 °C 升高至 360 °C, 热轧板再结晶程度增大, Brass 织构、Copper 织构、S 织构的体积分数分别从 21.05%、6.79%、19.29% 降至 16.54%、3.32%、12.67%, Cube 织构体积分数从 6.44% 增至 12.01%。

2) 350 °C × 1 h 的中间退火能使板材发生完全再结晶, 中间退火板的平均晶粒尺寸随着热终轧温度提高而增大。热终轧温度从 280 °C 升高至 360 °C, 晶粒平均尺寸从 10.3 μm 增至 12.7 μm。

3) 经过中间退火后, 热终轧温度 280 °C 的板材中 Cube 织构的体积分数从 6.27% 增至 16.21%, 热终轧温度 360 °C 的板材中 Cube 织构体积分数从 11.62% 增至 14.58%, 热终轧温度 280 °C 的板材中 Cube 织构体积分数更高。

#### 参考文献(References):

- [1] ZHAO Z, MAO W, ROTERS F, et al. A texture optimization study for minimum earing in aluminium by use of a texture component crystal plasticity finite element method[J]. Acta Materialia, 2004, 52(4): 1003-1012.
- [2] 李大林, 朱鹏程, 张子豪, 等. 热轧与冷轧对 3104 铝合金微观组织演变和亚结构的影响[J]. 塑性工程学报, 2022, 29(11): 233-239. LI Dalin, ZHU Pengcheng, ZHANG Zihao, et al. Effect of hot rolling and cold rolling on microstructure evolution and substructure of 3104 aluminum alloy[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2022, 29(11): 233-239.
- [3] KUMAR R, GUPTA A, DANDEKAR T R, et al. Microstructure and texture development in AA3003 aluminium alloy[J]. Materials Today Communications, 2020, 24: 100965.
- [4] LIU F, LIU Z, JIA P, et al. Dynamic dissolution and texture evolution of an Al-Cu-Mg-Ag alloy during hot rolling[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 827: 154254.
- [5] ZHAO Q, ZHANG H, HUANG K, et al. Correlating oriented grain number density of recrystallisation in particle-containing aluminium alloys[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2018, 28(2):

- 220-225.
- [6] SHI Y, JIN H, WU P D. Analysis of cup earing for AA3104-H19 aluminum alloy sheet [J]. *European Journal of Mechanics-A/Solids*, 2018, 69: 1-11.
- [7] PAPAPOPOULOU S, GAVALAS E, VOURLAKOU C, et al. The influence of second phase particles on texture during rolling of Al 3104[J]. *International Journal of Material Forming*, 2022, 15(6): 1-14.
- [8] EVGENII A, KAWALLA R, VLADIMIR A, et al. Investigation of texture and structure evolution during hot rolling of 1070, 3104 and 8011 aluminum alloys in continuous mill[J]. *La Metallurgia Italiana*, 2017, 109(3): 11-21.
- [9] TANG J, ZHANG X, DENG Y, et al. Texture decomposition with particle swarm optimization method[J]. *Computational Materials Science*, 2006, 38(2): 395-399.
- [10] JIAO H, XU Y, ZHAO L, et al. Texture evolution in twin-roll strip cast non-oriented electrical steel with strong Cube and Goss texture[J]. *Acta Materialia*, 2020, 199: 311-325.
- [11] ZHAO Q, LIU Z, LI S, et al. Evolution of the Brass texture in an Al-Cu-Mg alloy during hot rolling[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, 691: 786-799.
- [12] AHL S R, SIMONS H, DETLEFS C, et al. Subgrain dynamics during recovery of partly recrystallized aluminum[J]. *Acta Materialia*, 2020, 185: 142-148.
- [13] HUANG K, LOGÉ R E. A review of dynamic recrystallization phenomena in metallic materials[J]. *Materials & Design*, 2016, 111: 548-574.
- 引用本文:** 赵千愉, 叶凌英, 韦卫昌, 等. 热终轧温度对罐体材料用3104铝合金织构演变的影响[J]. *矿冶工程*, 2025, 45(3): 218-223.
- ZHAO Qianyu, YE Lingying, WEI Weichang, et al. Effect of finish rolling temperature on texture evolution of 3104 aluminum alloy for tank material[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2025, 45(3): 218-223.

(上接第217页)

3) 经过预热、退火热处理后,奥氏体不锈钢熔覆层腐蚀电流降低,阻抗升高,点蚀坑区域Cr含量升高,且干摩擦及乳化液工况中熔覆层的摩擦因数和磨损率均明显下降,磨损表面更加光滑,归因于预热、退火过程熔覆层的微观组织转变及伴随的力学和耐磨抗蚀性能改善,尤其是退火热处理效果更为明显。

#### 参考文献(References):

- [1] 张津超,石世宏,龚燕琪,等. 激光熔覆技术研究进展[J]. *表面技术*, 2020, 49(10): 1-11.
- ZHANG Jinchao, SHI Shihong, GONG Yanqi, et al. Research progress of laser cladding technology[J]. *Surface Technology*, 2020, 49(10): 1-11.
- [2] LIU Y N, DING Y, YANG L J, et al. Research and progress of laser cladding on engineering alloys: A review[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, 66: 341-363.
- [3] 李聪玮,刘泽,王明,等. 铁基激光熔覆层的微观结构和摩擦磨损性能研究[J]. *矿冶工程*, 2021, 41(5): 149-152.
- LI Congwei, LIU Ze, WANG Ming, et al. Microstructure, friction and wear properties of iron-based laser cladding coating[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2021, 41(5): 149-152.
- [4] SHI D S, FABIJANIC D, BARR C, et al. In-situ quench and tempering for microstructure control and enhanced mechanical properties of laser cladded AISI 420 stainless steel powder on 300M steel substrates[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2018, 333: 210-219.
- [5] HALDAR B, SAHA P. Identifying defects and problems in laser cladding and suggestions of some remedies for the same[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2018, 5(5): 13090-13101.
- [6] 董会,郭鹏飞,徐龙,等. 热处理温度对高速激光熔覆 Ni/316L 涂层组织及摩擦磨损性能的影响[J]. *表面技术*, 2022, 51(5): 111-120.
- DONG Hui, GUO Pengfei, XU Long, et al. Effect of heat treatment temperature on microstructure and friction and wear properties of high-speed laser cladded Ni/316L coating[J]. *Surface Technology*, 2022, 51(5): 111-120.
- [7] 张海瑜. 液压支架油缸内壁熔覆层的组织与性能研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2022.
- ZHANG Haiyu. Study on microstructure and properties of cladding layer on inner wall of hydraulic support cylinder[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2022.
- [8] 贺天柱,吴喆,张成武,等. 扫描速度对车用316L不锈钢熔覆层组织及力学性能的影响[J]. *矿冶工程*, 2023, 43(5): 159-163.
- HE Tianzhu, WU Zhe, ZHANG Chengwu, et al. Effect of laser scanning speed on microstructure and hardness of laser cladded 316L coating[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2023, 43(5): 159-163.
- [9] 郭长辉,李聪玮,杨辉,等. 预热对27SiMn钢激光熔覆热影响区显微组织和力学性能的影响[J]. *矿冶工程*, 2023, 43(1): 145-149.
- GUO Changhui, LI Congwei, YANG Hui, et al. Effects of preheating on microstructures and mechanical properties of heat affected zone of 27SiMn steel after laser cladding process[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2023, 43(1): 145-149.
- [10] 刘东雨,徐鸿,杨昆,等. 贝氏体/马氏体复相组织对低碳合金钢强韧性的影响[J]. *金属学报*, 2004, 40(8): 882-886.
- LIU Dongyu, XU Hong, YANG Kun, et al. Effect of bainite/martensite mixed micro-structure on the strength and toughness of low carbon alloy steels[J]. *Acta Metallurgical Sinica*, 2004, 40(8): 882-886.
- 引用本文:** 吉效科,毛勇,李茂,等. 热处理对奥氏体不锈钢熔覆层微观组织、力学性能和服役性能的影响[J]. *矿冶工程*, 2025, 45(3): 212-217.
- Ji Xiaoke, MAO Yong, LI Mao, et al. Effect of heat treatment on microstructure, mechanical properties and service performance of cladded coating of austenitic stainless steel[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2025, 45(3): 212-217.