

铸轧黄铜薄带组织模拟与性能分析

孟 凯^{1,2} 黄华贵^{1,2} 季 策^{1,2}

(1.燕山大学机械工程学院; 2.燕山大学国家冷轧板带装备及工艺工程技术研究中心)

摘 要 利用 ProCAST 软件的 CAFE 模块,研究了工艺参数对铸轧黄铜薄带凝固组织的影响,并通过自制的双辊铸轧机制备了黄铜薄带,分析了黄铜薄带的组织、硬度与力学性能。结果表明,工艺参数通过影响 Kiss(凝固点)高度,来影响柱状晶晶粒尺寸与压下率,Kiss 点越高,压下率越大,柱状晶生长空间越大,晶粒尺寸越大。通过改变形核参数可获得较大的压下量与细小的凝固组织,提高板带品质;铸轧黄铜薄带的伸长率可达 33%,抗拉强度为 430 MPa,硬度(HV)为 140,退火后黄铜薄带的伸长率为 55%,抗拉强度为 340 MPa,硬度(HV)为 75。

关键词 双辊铸轧;黄铜薄带;CAFE 组织模拟;力学性能

中图分类号 TG146.1⁺1;TP311 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.01.013

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Microstructure Simulation and Property Analysis of Brass Strip by Twin-roll Strip Casting

Meng Kai^{1,2}, Huang Huagui^{1,2}, Ji Ce^{1,2}

(1.College of Mechanical Engineering, Yanshan University; 2.National Engineering Research Center for Equipment and Technology of Cold Strip Rolling, Yanshan University)

Abstract: The effects of process parameters on the solidification structure of cast rolled brass strip were investigated by CAFE module of ProCAST finite element software. The microstructure, hardness and mechanical properties of brass strip prepared by twin roll casting based on the self-developed rolling machine were analyzed. The results reveal that the process parameters affect the size and reduction rate of columnar grains by affecting the height of the Kiss point. The higher the Kiss point and the greater the reduction rate is, the larger the columnar grain growth space and the grain size is. By adjusting the nucleation parameters, a larger reduction amount and fine solidification structure can be obtained, which can improve the quality of the strip. The elongation of cast rolled brass strip can reach 33%, the tensile strength is 430 MPa, and the hardness is 140 HV. The elongation, the tensile strength and the hardness of annealed brass strip are 55%, 340 MPa and 75 HV, respectively.

Key Words: Twin-roll Casting, Brass Strip, CAFE Microstructure Simulation, Mechanical Properties

双辊薄带连铸技术利用两个反向旋转的水冷铸轧辊直接对液态金属进行冷却凝固与轧制变形,实现了带材的短流程、低成本、高效率生产。与传统生产工艺相比,具有节约资源和能源、环境友好等优点,此外,双辊铸轧的凝固速度快,生产的带材具有组织均匀、细小、成分偏析小等特点^[1~3]。

目前,双辊铸轧技术已经应用于铝带与带钢的工业生产中。薄带连铸技术于 20 世纪 50 年代才开始应用于工业生产^[4]。双辊铸轧带钢作为一种先进的带钢生产技术受到广泛关注,在 21 世纪初初步完成了工业化

示范性生产线的建设,2016 年美国的纽柯公司 Castrip 项目获得了中国与墨西哥的商业化生产线合同,并于 2018 年顺利投入工业化生产,极大推进了双辊铸轧薄带技术的发展^[5~7]。宝钢集团开发了 Baostrip 技术,并于 2016 年完成了工业化示范性生产线的建设^[2]。赵星梅^[8]、CHEN P 等^[9]研究了固液铸轧复合钢铜,制备出了钢铜复合板,证明了铸轧铜的可行性。黄铜带作为一种重要的工业材料,目前采用连续铸造黄铜板坯、铣削加工、多道次热轧、退火的工艺进行生产,与双辊连铸技术相比,传统的加工过程中能源和材料消耗高,而关于

收稿日期:2020-08-11;修改稿收到日期:2020-09-03
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51974278);河北省自然科学基金杰出青年基金资助项目(E2018203446)
第一作者简介:孟凯,男,1996 年出生,硕士研究生,河北秦皇岛(066004),E-mail:1821974440@qq.com
通信作者:黄华贵,男,1978 年出生,教授,河北秦皇岛(066004),E-mail:hhg@ysu.edu.cn
引用格式:孟凯,黄华贵,季策. 铸轧黄铜薄带组织模拟与性能分析[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(1):63-68.
MENG K, HUANG H G, JI C. Microstructure simulation and property analysis of brass strip by twin-roll strip casting[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(1):63-68.

双辊铸轧黄铜带的研究报道很少。

本课题利用 ProCAST 有限元软件的 CAFE 模块建立了热-流-组织耦合模型,研究工艺参数对双辊铸轧黄铜薄带凝固组织的影响,同时利用自制的双辊铸轧机制备了 1.5 mm 厚的黄铜薄带并进行了退火处理。利用光学显微镜、硬度仪、拉伸试验机研究了铸轧黄铜板带与退火黄铜板带的组织、硬度与力学性能。

1 模拟与试验

1.1 宏观数学模型

双辊铸轧过程中,金属液与铸轧辊及环境之间存在着复杂的传热过程,其凝固过程的温度场仿真主要是基于导热偏微分方程:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}(\lambda \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\lambda \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\lambda \frac{\partial T}{\partial z}) + Q \quad (1)$$

式中, ρ 为密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; c 为比热容, $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; T 为温度, K ; t 为时间, s ; λ 为热导率, $\text{K} \cdot \text{m}^{-1}$; Q 为内热源(凝固潜热)。

而铸轧流场分析中,金属液被看成不可压缩流体,采用质量守恒、动量守恒及能量守恒方程来描述其流动行为。

1.2 微观数学模型

1.2.1 异质形核模型

采用 RAPPAZ M 等^[10,11]提出的连续形核模型,认为形核密度的变化满足高斯分布,考虑了晶粒生长导致的固相率增大对形核位置的消减作用。

$$\frac{dn}{d(\Delta T)} = \frac{n_{\max}}{\sqrt{2\pi} \Delta T_{\sigma}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\Delta T - \Delta T_{\max}}{\Delta T_{\sigma}} \right)^2 \right] \quad (2)$$

式中, $\Delta T_{\max}$ 为平均形核过冷度, K ; ΔT_{σ} 为形核过冷度标准方差, K ; $n_{\max}$ 为最大形核密度。

1.2.2 枝晶生长动力学模型

KGT 模型是描述枝晶尖端生长过程的模型^[10,12]。在实际合金的凝固过程中,晶体的生长受到动力学过冷度 ΔT_k 、成分过冷度 ΔT_c 、热力学过冷度 ΔT_t 、固液界面曲率过冷度 ΔT_r 的影响。总过冷度 $\Delta T = \Delta T_k + \Delta T_c + \Delta T_t + \Delta T_r$ 。对于常见的绝大多数合金来说, ΔT_k 、 ΔT_t 、 ΔT_r 通常可以忽略,在此条件下可以用简化 KGT 模型来描述柱状晶粒和等轴晶粒的生长速度,在实际使用中对 KGT 模型进行了多项式拟合,得到晶粒生长速度公式,其中 $v(\Delta T) = a_2 \Delta T^2 + a_3 \Delta T^3$ 。 a_2 、 a_3 为晶粒生长系数; ΔT 为枝晶尖端过冷度, K 。

1.2.3 温度场与元胞耦合模型

由于元胞的尺寸比有限单元小很多,ProCAST 通

过在 FE 节点和 CA 元胞之间引入差值因子,将有限单元节点处的温度引入到元胞中,考虑了引入凝固潜热的影响,确保了微观组织是温度场的函数。通过节点处的温度就可以计算元胞处的温度。反之利用差值因子可以将枝晶形核和生长过程中释放的结晶潜热作用到节点上,更新节点处的温度。

1.3 数值分析模型

1.3.1 模型和网格

利用 ProCAST 软件建立的垂直式双辊铸轧工艺的网格模型见图 1,铸轧辊内部采用水冷却,由于模型具有对称性,为了降低计算量,采用二分之一模型,为了提高计算精度对铸轧区进行局部加密。铸轧辊的外径为 160 mm,内径为 110 mm,熔池高度为 30 mm。

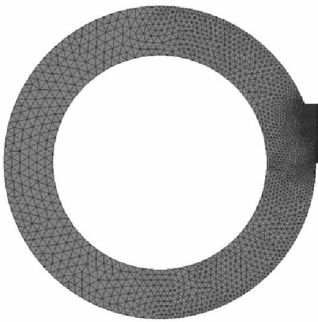


图 1 有限元模型网格
Fig.1 Finite element model mesh

1.3.2 边界条件和模拟参数

采用单变量分析法研究铸轧参数对铸轧板带微观组织的影响,包括浇注温度 T_{in} 、铸轧速度 v 、板带厚度 h_b 、熔池高度 L 以及辊-黄铜传热系数 h_t ,具体模拟参数见表 1^[13]。用于微观组织模拟的参数分别为晶粒生长系数 a_2 、 a_3 、体形核参数 $N_{\max}$ 、体形核平均过冷度 DT_m 、体形核过冷度方差 DT_s 、面形核参数 $G_{\max}$ 、面形核过冷度 dT_m 、面形核过冷度方差 dT_s 、元胞体积、晶粒尺寸。Gibbs-Thomson 系数 Γ 取 2×10^{-7} ,根据液相线斜率 m 、溶质再平衡系数 k 与固液相线温度,计算晶粒生长系数 a_2 、 a_3 ,微观组织的模拟参数见表 2^[14]。铸轧

表 1 边界条件参数^[13]

Tab.1 Parameters of boundary condition						
	$T_{in}/$ $^{\circ}\text{C}$	$v/(\text{cm} \cdot$ $\text{min}^{-1})$	$h_b/$ mm	$L/$ mm	$h_t/(\text{W} \cdot$ $\text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})$	$h_w/(\text{W} \cdot$ $\text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})$
基础值	950	1.5	2	30	8 000	8 000
范围	950~1 010	1.5~2.5	1~4	20~35	4 000~1 000	—
间隔	20	0.25	0.25	5	2 000	—

表 2 微观组织模拟参数^[14]

Tab.2 Microstructure simulation parameters							
Γ	$N_{\max}/$ (个 $\cdot$ m $^{-3}$)	$DT_{\text{m}}/$ K	$DT_{\text{s}}/$ K	$G_{\max}/$ (个 $\cdot$ m $^{-2}$)	$dT_{\text{m}}/$ K	$dT_{\text{s}}/$ K	晶胞体积/ μm^3
2×10^{-7}	1×10^{10}	4	0.1	5×10^7	2	0.2	50

区金属的流动和铸轧辊的运动,利用 ProCAST 软件提供的 User function 功能编写子函数来实现。

1.4 铸轧试验

基于自制的 $\phi 160\text{ mm}\times 150\text{ mm}$ 双辊铸轧机开展试验研究,原理图见图 2,浇注温度为 $1\,223\text{ K}$,熔池宽度为 110 mm ,辊缝宽度为 2 mm ,铸轧速度分别为 2 、 $2.5\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ 。H68 材料的化学成分及物性参数分别见表 3 与表 4^[15,16]。试验前需要对辊面进行清理、均匀的涂覆石墨、试验过程中对铸轧区连续充入氩气以防止黄铜氧化。

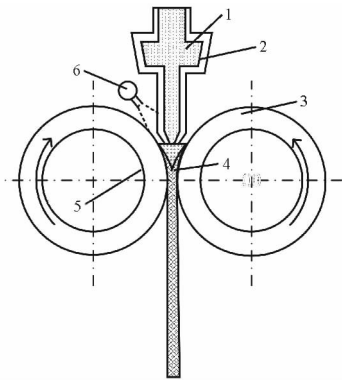


图 2 铸轧原理图

Fig.2 Principle diagram of casting rolling

1.铜液 2.布流器 3.铸轧辊 4.Kiss 点 5.冷却水 6.氩气

表 3 H68 黄铜的化学成分

Tab.3 Chemical composition of H68 brass %						
wt%						
Cu	Pb	P	Fe	Sb	Bi	Zn
68	0.03	0.01	0.1	0.005	0.005	余量

表 4 H68 黄铜的物性参数

Tab.4 Thermophysical parameters of the H68 brass			
状态	热导率/ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	比热容/ ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
固态	135	320	7 942
液态	85	614	7 165

2 模拟结果与分析

为了验证数值模型的准确性,采用紧急停止的方法获得熔池凝固组织,铸造速度为 $2\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$,板厚为 2 mm ,浇注温度为 $1\,223\text{ K}$,采用 $\text{FeCl}_3(10\text{ g})+\text{HCl}(10\text{ mL})+\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}(100\text{ mL})$ 腐蚀。试样仿真和试验的凝固组织对比见图 3。可以看出,试验的 Kiss 点高度与模拟 Kiss 点高度基本一致,验证了模型的传热边界条件的合理性。从图 3b 可以看出,沿着轧制方向位于小变形区的凝固组织变化不大,通过对比图 3c 与图 3d 可以看出,小变形区数值模拟凝固组织的晶粒分布、晶粒尺寸与试验凝固组织的晶粒分布、晶粒尺寸基本相符。

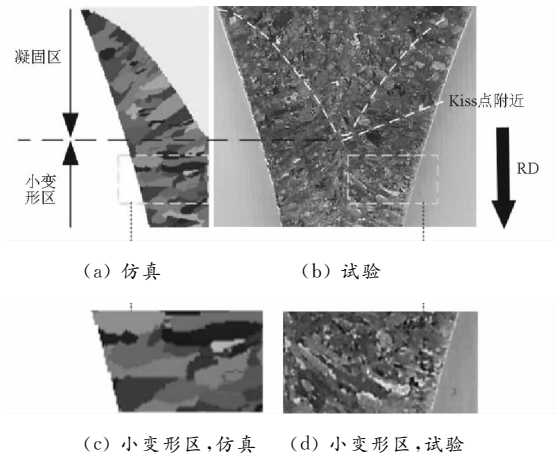


图 3 仿真与试验凝固组织对比

Fig.3 Comparison of solidification structure between simulation and experiment

双辊铸轧区分为液相区、固液两相区及固相区。在热-流-组织数值模拟中,首先以热流耦合模型计算铸轧区的温度场,然后将铸轧区的温度场结果作为初始条件,进行组织场仿真,实现间接热-流-组织耦合仿真计算。模拟结果中,整个固相区都会形成凝固组织,而实际铸轧的固相区是由凝固组织和轧制变形组织组成的,显然模拟的结果与实际存在差异,故而不能直接采用模拟的结果进行分析。因此,本课题结合铸轧过程金属凝固及变形规律,认为凝固组织在小变形下组织形态不发生改变,将 Kiss 点以下高度 2 mm 的固相区域定义为凝固区,见图 3a,用该区域的仿真结果,对组织形态、大小及分布进行统计分析。

2.1 工艺参数对微观组织的影响

图 4 为不同工艺参数对 Kiss 点高度、平均柱状晶面积、压下率与柱状晶分数的影响。由图 4a 可以看出,熔池高度从 25 mm 提升至 35 mm 时,Kiss 点高度从 17.0 mm 增至 34.8 mm ,压下率从 77.1% 增至 82.5% ,平均柱状晶粒面积从 1.23 mm^2 增至 1.92 mm^2 ,柱状晶分数从 71% 增至 81% 。伴随着熔池高度的提高,Kiss 点高度和压下率提高,柱状晶粒的生长空间变大,柱状晶粒变大,平均柱状晶粒面积变大,等轴晶粒变化不大,柱状晶粒占比提高。

由图 4b 可以看出,铸轧速度从 $1.0\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ 提升至 $2.5\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ 时,Kiss 点高度从 29.2 mm 降至 20.8 mm ,压下率从 80.9% 降至 72.1% ,平均柱状晶粒面积从 1.97 mm^2 降至 1.18 mm^2 ,柱状晶分数从 85% 降至 78% 。随着铸轧速度增大,Kiss 点高度和压下率降低,柱状晶粒的生长空间变小,柱状晶粒变小,平均柱状晶粒面积变小,等轴晶粒变化不大,柱状晶粒占比降低。

由图 4c 可以看出,浇注温度从 $1\,223\text{ K}$ 提升至 $1\,283\text{ K}$ 时,Kiss 点高度从 25.6 mm 下降至 20.4 mm ,

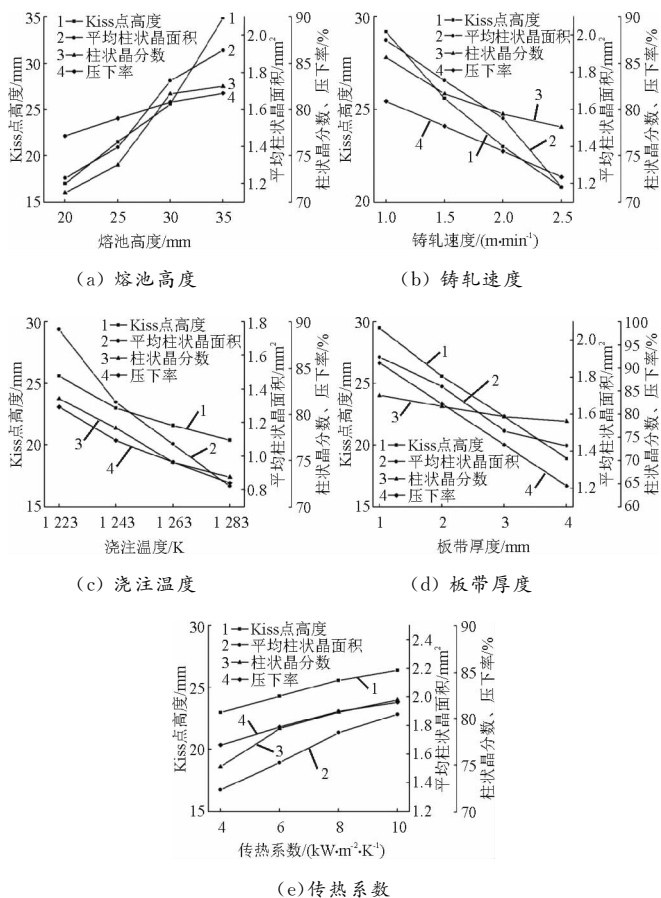


图 4 不同工艺参数对 Kiss 点高度、平均柱状晶面积、压下率、柱状晶分数的影响

Fig.4 Effects of different process parameters on Kiss point height, average columnar crystal area, reduction rate and columnar crystal percentage

压下率从 80.7% 下降至 73.2%，平均柱状晶粒面积从 1.75 mm² 下降至 0.82 mm²，柱状晶分数从 82% 下降至 73%。随着浇注温度提高，Kiss 点高度和压下率降低，柱状晶粒的生长空间变小，柱状晶粒变小，平均柱状晶粒面积变小，等轴晶粒变化不大，柱状晶粒占比降低。

由图 4d 可以看出，板带厚度从 1 mm 增加至 4 mm 时，Kiss 点高度从 29.5 mm 下降至 18.9 mm，压下率从 91.1% 下降至 64.5%，平均柱状晶粒面积从 1.75 mm² 下降至 1.43 mm²，柱状晶分数从 84% 下降至 78%。随着板带厚度增大，Kiss 点高度降低，压下率降低，柱状晶粒的生长空间变小，柱状晶粒变小，平均柱状晶粒面积变小，等轴晶粒变化不大，柱状晶粒占比降低。

由图 4e 可以看出，辊面与黄铜的传热系数从 4 kW · m⁻² · K⁻¹ 提升至 10 kW · m⁻² · K⁻¹ 时，Kiss 点高度从 23.1 mm 提升至 26.4 mm，压下率从 77.1% 提升至 81.7%，平均柱状晶粒面积从 1.35 mm² 上升至 1.88 mm²，柱状晶分数从 75% 上升至 82%。随着传热系数增大，Kiss 点高度提高，柱状晶粒的生长空间变大，柱

状晶粒变大，平均柱状晶粒面积变大，等轴晶粒变化不大，柱状晶粒占比提高。

图 5 为不同体形核率下铸轧区的微观组织。可以看出，随着体形核率的提高，柱状晶粒的尺寸明显减小，体形核率为 5 × 10⁹ 时铸轧凝固区由柱状晶粒构成，柱状晶粒的平均面积为 3.415 mm²；体形核率为 1 × 10¹⁰ 时铸轧凝固区为细小的柱状轴晶，晶粒的平均面积为 1.408 mm²；当体形核率达到 5 × 10¹⁰ 时铸轧凝固区的柱状晶粒被细小的等轴晶粒所取代，整个凝固区基本不存在柱状晶粒，晶粒的平均面积为 0.357 mm²。



图 5 不同体形核率下的微观组织

Fig.5 Microstructure under different nucleation rates

由于凝固过程中柱状晶的尺寸及比例对材料的力学性能与品质影响很大，粗大的柱状晶易导致铸坯中形成缩松和缩孔等缺陷，板带力学性能的降低，即使通过后续的轧制都无法完全消除缺陷以及粗大晶粒与缺陷对力学性能造成的影响，故而铸轧凝固过程中需要获得细小的柱状晶或细小的等轴晶，以提高板带坯的力学性能与品质。而后续的轧制变形可以促使凝固组织破碎，细化晶粒，对于消除凝固组织中的缩松及缩孔缺陷与力学性能的提高非常重要。为此，铸轧凝固过程中若获得细小的柱状晶或等轴晶，再配合一定的压下率即可获得力学性能与品质优异的带坯。然而，对铸轧速度、浇注温度、熔池高度、传热系数、形核率及带坯厚度等工艺参数的仿真结果表明，Kiss 点越高，压下率越大，柱状晶的生长空间越大，平均柱状晶粒的面积越大，导致压下率与柱状晶粒大小之间存在制约关系。

通过改变工艺参数无法同时获得较大的压下率与细小的柱状晶，最大限度地提升板带的力学性能与品质，因此改变材料形核参数是可行的方案。当形核参数足够大时，柱状晶粒就基本消失，铸轧凝固组织由细小的等轴晶构成，解除了压下率与晶粒大小之间存在的制约关系，可以同时降低晶粒尺寸与提高压下量，最大限度地提升了板带的力学性能与品质。

2.2 组织与力学性能

利用双辊铸轧机在铸轧速率为 2.0、2.5 m·min⁻¹ 下分别制备了黄铜板带,并分别从铸轧速度为 2 和 2.5 m·min⁻¹ 的铸轧黄铜带材取样,并将一半铸轧黄铜板带试样在 550 ℃ 下进行 1.5 h 退火处理。使用配比为 FeCl₃(10 g)+HCl(10 mL)+C₂H₅OH(100 mL)溶液分别对不同状态的黄铜板带进行金相腐蚀,腐蚀结果见图 6。可以看出,铸轧态的黄铜板带 α 与 β 相呈现层片状交替分布,退火后发生了再结晶,β 相均匀分布在 α 相中;用 HV-1000 硬度测量仪进行硬度测量,可知铸轧态和退火态的黄铜板带的硬度(HV)分别为 140 和 75。用线切割机取宽度为 2 mm,厚度为 1.5 mm,标距为 10 mm 的拉伸试样后,通过 Zwick 拉伸试验机进行拉伸试验,拉伸速率为 0.01 mm·s⁻¹。铸轧态与退火态的黄铜板带应力-应变曲线见图 7。铸轧态黄铜板带的抗拉强度可达 430 MPa、伸长率可达 33%;退火态的黄铜板带的抗拉强度可达 340 MPa,伸长率可达 55%。

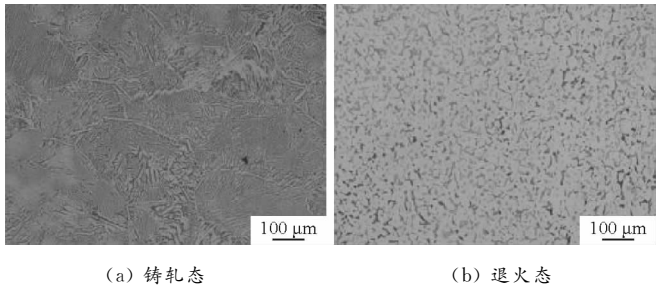


图 6 铸轧黄铜板带微观组织

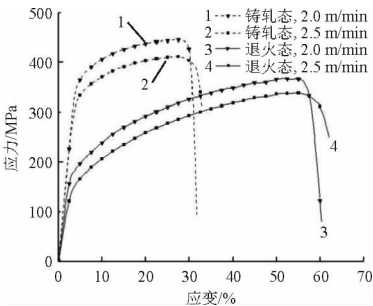


图 7 铸轧黄铜板带的应力-应变曲线

根据 ProCAST 模拟结果,可知当铸轧速度从 2.0 m·min⁻¹ 提升至 2.5 m·min⁻¹ 时,板带的压下量从 75.7% 下降至 72.1%,黄铜板带的压下量降低,轧制变形产生的晶粒细化与加工硬化降低,导致铸轧态的黄铜板带抗拉强度由 430 MPa 下降至 403 MPa,退火板带的抗拉强度分别为 368 MPa 与 338 MPa。压下量提高导致材料力学性能提高依旧存在。可以看出,在其他参数不改变时,铸轧速度 v 提高导致 Kiss 点高度降低,使铸轧板带的压下率降低,轧制变形产生的晶粒细化与

加工硬化减少,导致黄铜板带的抗拉强度降低。

3 结 论

(1)对于黄铜薄带,在不同的铸轧工艺参数下,表层等轴晶变化不大。工艺参数通过影响 Kiss 点影响黄铜板带的力学性能与品质,Kiss 点高度越高,压下率越大,轧制变形产生的晶粒细化越大,板带的力学性能越好;同时,柱状晶的生长空间越大,柱状晶粒的面积越大,对板带的力学性能有一定削弱。因此获得细小的组织与较大的压下率之间存在矛盾,通过提高形核参数,同时获得细小的组织与较大的压下率,提高黄铜板带的力学性能与品质。

(2)利用 $\phi 160$ mm×150 mm 双辊铸轧试验机制备了 H68 黄铜板带,铸轧态黄铜板带的抗拉强度可达 430 MPa,伸长率可达 33%,硬度(HV)为 140,退火态的铸轧黄铜板带的抗拉强度可达 340 MPa,伸长率可达 55%,硬度(HV)为 75。

参 考 文 献

[1] 王媛. 薄带连铸连轧技术在钢铁行业的发展[J]. 冶金经济与管理, 2018(4): 36-39.

[2] 方园, 张健. 双辊薄带连铸连轧技术的发展现状及未来[J]. 宝钢技术, 2018(4): 2-6.

[3] 邸洪双. 薄带连铸技术发展现状与展望[J]. 河南冶金, 2005(1): 3-7.

[4] 李国义, 蔡广, 李连智. 双辊连铸技术发展概述[J]. 冶金设备, 1993(2): 23-28.

[5] CHRIS R K, DANIEL G E, KRISTIN R C, et al. Recent product developments with ultra-thin cast strip products produced by the CASTRIP process[J]. Materials Science Forum, 2010, 654-656 (10):198-201.

[6] KILLMORE C R, CARPENTER K R, KAUL H R, et al. Development of low carbon microalloyed high strength ultra-thin cast strip products produced by the CASTRIP process with excellent strength-ductility properties[J]. Journal of Iron and Steel Research (International), 2011, 18(S1): 846-850.

[7] HOHENBICHLER G, TOLVE P, CAPOTOSTI R, et al. EUROSTRIP 不锈钢和带钢连铸技术[J]. 钢铁, 2003(6): 15-19.

[8] 赵星梅. 因瓦合金/铜双金属复合板固-液成形机理研究[D]. 河北秦皇岛:燕山大学, 2017.

[9] CHEN P, HUANG H G, JI C, et al. Bonding strength of Invar/Cu clad strips fabricated by twin-roll casting process[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2018, 28(12): 2 460-2 469.

[10] RAPPAZ M, GANDIN C A. Probabilistic modelling of microstructure formation in solidification processes[J]. Acta Metallurgica et Materialia, 1993, 41(2): 345-360.

[11] GANDIN C A, RAPPAZ M. A coupled finite element-cellular automaton model for the prediction of dendritic grain structures in solidification processes[J]. Acta Metallurgica et Materialia, 1994, 42(7): 2 233-2 246.

Y 对 Al-Zr 合金微观组织与性能的影响

陈保安^{1,2} 赵丽丽^{1,2} 张静媛^{1,2} 李 新^{1,2} 王瑞红³ 潘学东^{1,2} 祝志祥^{1,2}
丁 一^{1,2} 张 强^{1,2} 陈 新^{1,2} 韩 钰^{1,2} 杨长龙⁴ 谭 澈⁴

(1.全球能源互联网研究院有限公司先进输电技术国家重点实验室; 2.全球能源互联网研究院有限公司电工新材料研究所; 3.西安理工大学材料科学与工程学院; 4.国网辽宁省电力有限公司沈阳供电公司)

摘 要 研究了不同 Y 含量(0.02%, 0.05%, 0.10%)对 Al-0.16Zr 合金铸态、轧制态和时效态的微观组织、硬度和电导率的影响。结果表明, Y 含量为 0.05% 和 0.10% 时, 能显著的细化合金晶粒。随着 Y 含量增加, 晶粒细化效果逐渐增强。铸态 Al-0.16Zr 合金在 350 ℃时效过程中, Y 添加具有显著的时效强化效果, Y 含量越高, 达到峰值时效所需时间越短。但是由于共格 Al₃Zr 沉淀相的析出, 点阵失配畸变场的存在将导致合金电导率降低。而在轧制态合金的时效过程中, 位错密度的降低引起退火软化, 但是 Y 的添加仍明显提高了合金的硬度。综合考虑, 轧制态 Al-0.16Zr-0.10Y 合金经 350 ℃×30 h 时效后具有最优的硬度和电导率。

关键词 Al-Zr 合金; Y 添加; 微观组织; 硬度; 电导率

中图分类号 TG146.21 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.01.014

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Y Addition on the Microstructure and Properties of Al-Zr Alloy

Chen Baoan^{1,2}, Zhao Lili^{1,2}, Zhang Jingyuan^{1,2}, Li Xin^{1,2}, Wang Ruihong³, Pan Xuedong^{1,2},
Zhu Zhixiang^{1,2}, Ding Yi^{1,2}, Zhang Qiang^{1,2}, Chen Xin^{1,2}, Han Yu^{1,2}, Yang Changlong⁴, Tan Che⁴

(1.State Key Laboratory of Advanced Power Transmission Technology, Global Energy Interconnection Research Institute Co., Ltd.; 2.Department of Electrical Engineering New Materials, Global Energy Interconnection Research Institute Co., Ltd.; 3.School of Materials Science and Engineering, Xi'an University of Technology;
4.Shenyang Electric Power Supply Company, State Grid Liaoning Electric Power Supply Co., Ltd.)

Abstract: The effects of Y addition (0.02, 0.05, and 0.10%) on microstructure, mechanical properties, electrical properties of Al-0.16Zr alloy were investigated. The results indicate that 0.05% and 0.10% Y addition can remarkably refine the grain size, and within range of the Y addition, the refinement becomes more effective with Y addition increase. During the aging treatment of as-cast alloys at 350 ℃, the Y addition leads to obvious age hardening, and the higher Y addition is, the shorter the peakaging time is. However, the electrical conductivity is reduced due to existence of lattice mismatch distortion field, which is attributed to the accelerated precipitation of coherent Al₃Zr particles. Moreover, in the aging treatment of rolled alloys, hardness is still enhanced with Y addition, in spite of annealing softening caused by reduction of dislocation density. In comprehensive consideration, the rolled Al-0.16Zr-0.10Y alloy obtains the optimal hardness and electrical conductivity combination after aged at 350 ℃ for 30 h.

Key Words: Al-Zr Alloy, Y Addition, Microstructure, Hardness, Electrical Conductivity

收稿日期: 2020-09-09; **修改稿收到日期:** 2020-10-20
基金项目: 国家电网有限公司总部科技项目资助项目(SGGR0000DWJS1800175)
第一作者简介: 陈保安, 男, 1981 年出生, 高级工程师, 北京(102209), E-mail: dzcba@163.com
引用格式: 陈保安, 赵丽丽, 张静媛, 等. Y 对 Al-Zr 合金微观组织与性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(1): 68-72.
CHEN B A, ZHAO L L, ZHANG J Y, et al. Effects of Y addition on the microstructure and properties of Al-Zr alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(1): 68-72.

[12] RAPPAZ M, VOLLER V. Modeling of micro-macrosegregation in solidification processes[J]. Metallurgical Transactions, 1990, A21 (2): 749-753.

[13] 黄华贵, 季策, 董伊康, 等. Cu/Al 复合带固-液铸轧热-流耦合数值模拟及界面复合机理[J]. 中国有色金属学报, 2016, 26(3): 623-629.

[14] 张冬晓, 常庆明, 潘成刚, 等. 双辊薄带铸轧凝固组织数值模拟[J]. 特种铸造及有色合金, 2015, 35(6): 585-589.

[15] 刘明洋. H68 黄铜的晶粒细化及对组织和性能的影响[D]. 辽宁大连: 大连理工大学, 2016.

[16] 王文, 谌昀, 李夏雷, 等. 连续挤压及热处理对 H68 黄铜组织与性能的影响[J]. 热处理技术与装备, 2015, 36(6): 7-11.

(编辑: 刘晨辉)