



连铸工艺参数对纯铝管坯组织与力学性能的影响

王一笑¹, 刘新华^{1,2}, 谢建新^{1,2}, 田宇兴³, 郑志凯³, 毛晓东³

- (1. 北京科技大学 新材料技术研究院, 北京 100083;
2. 现代交通金属材料与加工技术北京实验室, 北京 100083;
3. 中铝材料应用研究院有限公司, 北京 102209)

摘要: 采用热冷组合铸型连铸制备 $d 70 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 纯铝管坯, 研究连铸工艺参数对纯铝管坯表面质量、微观组织和力学性能的影响。结果表明: 在铸造温度 $750 \text{ }^\circ\text{C}$ 、热型温度 $700 \sim 720 \text{ }^\circ\text{C}$ 、冷却水流量 1000 L/h 的条件下, 可连续稳定的制备出内外表面光滑的高质量管坯。当连铸速度为 $20 \sim 60 \text{ mm/min}$ 时, 铝管表面为强轴向取向柱状晶组织, 随连铸速度增大, 晶粒尺寸逐渐变小。当连铸速度为 $80 \sim 100 \text{ mm/min}$ 时, 铝管外表面组织由柱状晶向等轴晶转变。在热型温度 $720 \text{ }^\circ\text{C}$ 、速度 60 mm/min 的条件下制备的纯铝管坯具有较优的表面质量和力学性能, 内外表面粗糙度均小于 $1.6 \text{ } \mu\text{m}$, 管坯抗拉强度为 58.4 MPa , 屈服强度为 20.6 MPa , 断后伸长率为 28.9% , 无需进行铣面可直接进行后续冷加工, 有效缩短管材的制备工艺流程。

关键词: 纯铝管; 热冷组合铸型; 水平连铸; 柱状晶组织

文章编号: 1004-0609(2021)-09-2330-09

中图分类号: TG245

文献标志码: A

引文格式: 王一笑, 刘新华, 谢建新, 等. 连铸工艺参数对纯铝管坯组织与力学性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(9): 2330-2338. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-39345

WANG Yi-xiao, LIU Xin-hua, XIE Jian-xin, et al. Effect of process parameters of continuous casting on microstructure and mechanical properties of pure aluminum tube[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(9): 2330-2338. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-39345

高精度铝及铝合金管材具有密度小、耐腐蚀好、比强度高优点, 是航空航天、武器装备、交通运输等领域需要的轻量化结构材料^[1]。目前, 高精度铝及铝合金管材的传统生产方式为“半连续实心或空心铸锭-热挤压-二次挤压-冷轧-拉拔”。这种传统生产方式存在的主要问题是铸锭内部缺陷在后续加工难以消除, 导致成品管材表面质量降低^[2-3]。同时, 由于铝及铝合金的黏性较大, 传统挤压法制备管坯过程中, 常常会粘在模具的局部区域而造成管材内外表面产生各种缺陷, 导致挤压制得的管坯易产生起皮、内外表面擦伤、划痕缺陷等问题^[4-6]。为善管材内外表面质量, 通常采用改

进挤压方式、提高铣削精度、添加旋压工艺等措施, 通过工艺流程与能耗的增加, 满足质量需求。因此, 研发高效、节能、短流程, 满足高精度、自动化的加工技术已成为生产高精度薄壁铝管的关键。

近年来, 本课题组^[7-11]开发了一种热冷组合铸型(Heating-cooling combined mold, HCCM)水平连铸工艺, 该工艺通过控制温度梯度、连铸速度等工艺参数, 将固-液界面位置控制在由电磁感应加热的热型段与水冷铜套冷却的冷型段之间, 实现了晶粒的生长方向与热流方向平行, 获得沿管坯轴向取向的柱状晶组织。研究^[12-14]表明, 采用该工艺能够制备出良好表面质量、强轴向取向组织的铜及铜合

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFB0301404-01); 国家自然科学基金一辽宁联合基金资助项目(U1708251)

收稿日期: 2020-01-20; **修订日期:** 2020-12-20

通信作者: 刘新华, 研究员, 博士; 电话: 010-62333627; E-mail: Liuxinhua18@163.com

金管坯, 管坯不经铣面和中间退火, 可直接进行后续的冷轧和拉拔加工, 大大缩短了管材的生产工艺流程, 最终实现了不同直径与壁厚的铜及铜合金管材的短流程高效制备。已有的研究成果为铝及铝合金管坯的短流程高效制备提供了技术参考。与铜相比, 铝及铝合金液态热容和黏性较大, 制备高精度铝及铝合金管材更为困难。

本文通过模拟 HCCM 水平连铸过程中的稳态温度场, 结合 HCCM 水平连铸技术成功制备出了 $d 70 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 高精度纯铝管坯, 重点研究了关键工艺参数对 $d 70 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 纯铝管坯的表面质量、组织和力学性能的影响, 为发展铝及铝合金高精度管材短流程高效制备技术奠定理论及应用基础。

1 实验

1.1 实验设备及方法

实验采用工业纯铝(GB/T 3190)为原料, 其纯度不小于 99.60%。HCCM 水平连铸设备构造示意图见图 1。总体结构由熔化系统、保温系统热型加热系统、冷却系统和牵引机构组成。

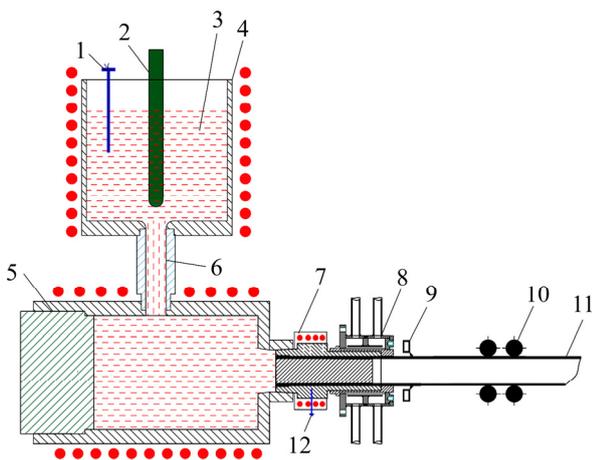


图 1 热冷组合铸型水平连铸原理图

Fig. 1 Schematic diagram of heating-cooling combined mold (HCCM) for horizontal continuous casting: 1, 12—Temperature measuring device; 2—Stopper; 3—Alloy melt; 4—Melting crucible; 5—Holding crucible; 6—Melted metal duct; 7—Mold heating device; 8—Water-cooled copper sleeve; 9—Secondary cooling water; 10—Traction device; 11—Tube

一方面, 本文对纯铝管坯 HCCM 水平连铸过程中温度梯度分布、固液界面位置和形状进行研究, 采用 ProCAST 软件, 建立管坯、铸型、芯棒和水冷铜套的三维几何模型^[15], 模拟不同热型温度与连铸速度条件下 $d 70 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 管坯连铸过程的稳态温度场和凝固行为。另一方面, 通过连铸试验对模拟结果进行验证。具体模拟和实验参数为: 熔化温度 $750 \text{ }^\circ\text{C}$, 保温温度 $750 \text{ }^\circ\text{C}$, 热型段加热温度分别为 $700 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $720 \text{ }^\circ\text{C}$, 冷型段冷却水流量 1000 L/h , 喷水二冷水流量 400 L/h , 连铸拉坯速度 $20 \sim 100 \text{ mm/min}$ 。

1.2 测试分析方法

连铸管坯经过酸洗、碱蚀后观察宏观组织; 采用线切割沿管坯轴线方向切取不同参数条件下制备的管坯试样, 管坯取样位置如图 2 所示。试样经过砂纸预磨、机械抛光后进行电解抛光和阳极覆膜。电解抛光液选用 $95 \text{ mLH}_2\text{O} + 5 \text{ mLHClO}_4$, 工作电压 27 V ; 覆膜液选用 $38 \text{ mL H}_2\text{SO}_4 + 43 \text{ mL H}_3\text{PO}_4 + 19 \text{ mL H}_2\text{O}$, 工作电压 10 V , 温度低于 $40 \text{ }^\circ\text{C}$ 。采用 Nikon ECLIPSE LV150 型金相显微镜通过偏振光对管坯上部、底部、侧部分别进行组织观察。

通过 Dektak150 表面轮廓仪测试管坯周向表面粗糙度; 按照 GB/T 228—2002《金属材料室温拉伸

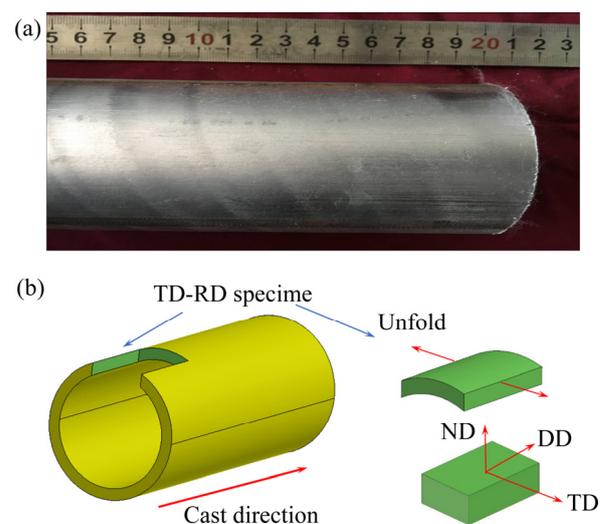


图 2 HCCM 连铸制备的纯铝管坯及其取样示意图

Fig. 2 Pure aluminum tube blank prepared by HCCM horizontal continuous casting (a) and schematic diagram of sampling position for specimens (b)

实验》，采用万能实验机对管坯试样进行室温拉伸测试，试样拉伸方向平行于管坯轴向，每组测试3个试样并取平均值。

2 实验结果

2.1 工艺参数对固液界面的影响

图3所示为不同拉坯速度条件下管坯的温度分布曲线。其中模拟参数为熔化温度750℃、保温温度750℃、热型段加热温度700℃、冷型段冷却水流量1000 L/h、二冷水流量400 L/h。当连铸速度为20 mm/min时，固-液界面位置在热型内部。当连铸速度为40~80 mm/min时，固-液界面位置在热型段与冷型段之间，随着拉坯速度的增加，固-液界面逐渐向冷型段移动，固液两相区的宽度逐渐增加，铸型出口的温度逐渐提高。当连铸速度为100 mm/min时，固-液界面进入冷型段，此时两相区宽度减小，铸型出口温度逐渐增加，总体变化低于100℃。

在温度与水流量参数不变的条件下，金属被热型段加热的热量与冷却水冷却带走的热量为定值。固-液界面处在热型段与冷型段之间，随着拉坯速度的提高，固-液界面向冷型移动，界面前沿温度升高，热型段与冷型段之间单位距离的温度梯度减小，导致两相区宽度增加。当固-液界面进入冷型后，冷型快速冷却金属液，固-液界面前沿温度梯度增大，导致两相区宽度减小。

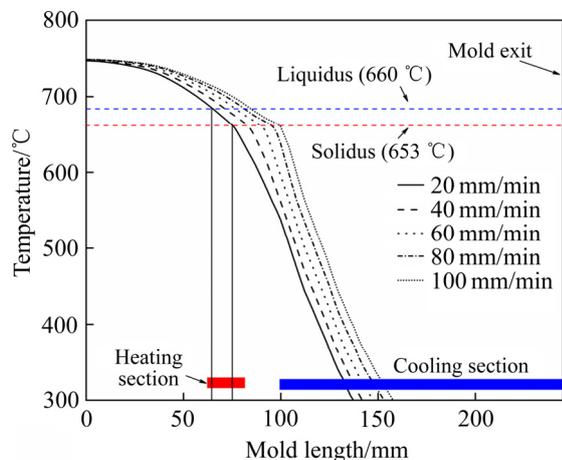


图3 连铸速度对管坯温度分布的影响

Fig. 3 Effect of continuous casting speeds on temperature distribution of tube blank

图4所示为不同热型温度条件下管坯温度分布曲线。其中，模拟拉坯速度为40 mm/min、熔化温度为750℃、保温温度为750℃、冷型段冷却水流量为1000 L/h、二冷水流量为400 L/h。随着热型温度从690℃升高到740℃，热型与冷型之间的温度梯度增大，固-液界面向铸型出口方向移动，但由于二冷水强制冷却的作用，管坯在冷型段出口处温度变化不大。

模拟结果表明，尽管连铸速度和热型温度对两相区的宽度都有一定的影响，但由于二冷水的强冷作用，使得铸型出口的温度变化较小，出口温度均小于100℃。HCCM水平连铸技术的关键工艺参数是管坯的固-液界面位置，使固-液界面位置保持在热型和冷型之间，一方面可以避免固-液界面靠近热型段而导致的横向裂纹，另一方面可以避免固-液界面靠近冷型段而导致纵向划痕的出现。其中，连铸速度主要影响管坯的固-液界面位置，热型温度主要影响热型段与冷型段之间的温度梯度，增大温度梯度有利于增大液体流动性，同时热型段与冷型段之间温度梯度的增加促进晶粒沿热流方向的择优生长，获得轴向柱状晶组织。

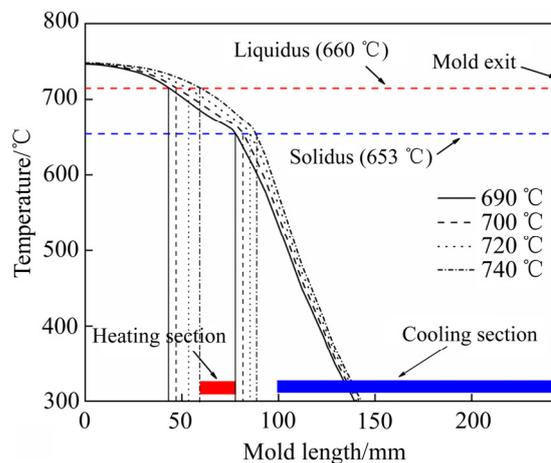


图4 热型加热温度对管坯温度分布的影响

Fig. 4 Effect of heating-mold temperature on temperature distribution of tube blank

2.2 工艺参数对管坯表面粗糙度的影响

管坯的表面粗糙度是衡量表面质量的重要指标。在连铸工艺中，影响表面粗糙度的因素主要是拉坯速率和热型温度。当热型加热温度分别为700℃和720℃时，不同连铸拉坯速度下连铸管坯

表面粗糙度的变化曲线如图5所示。管坯的内表面粗糙度随着拉坯速度的提高逐渐减小,而外表面粗糙度随着拉坯速度的提高先减小后增大。

当热型温度为700℃,拉坯速度为20 mm/min时,管坯内外表面粗糙度约为1.9 μm、2.2 μm;当拉坯速度增加到40 mm/min时,管坯内外表面粗糙度约为1.3 μm和1.8 μm;当拉坯速度为60 mm/min时,内外表面粗糙度减小到1.2 μm和1.3 μm;拉坯速度为80和100 mm/min时,内表面粗糙度进一步减小到0.9 μm和0.7 μm,外表面粗糙度为1.29 μm和1.52 μm。

当热型温度提高到720℃时,不同连铸拉坯速度下的管坯内外表面质量均得到了提高。拉坯速度为80 mm/min时,外表面粗糙度达到最小,约1.2 μm。当拉坯速度为100 mm/min时,内表面粗糙度最小,约0.54 μm。说明随热型温度的增加,铝管内外表面质量均得到了提高。外表面质量提高的原因在于,较高的温度梯度有利于晶体在铸型表面形核,铝管外表面凝固成壳,铝管与模具之间的摩擦越小,表面粗糙度越小。内表面质量提高的原因在于热型温度的提高使固液界面前移,铝管在模具的摩擦长度减小,内表面质量得到改善。

连铸工艺通常采用添加形核剂、改变模具结构、控制温度等方式控制凝固行为^[16-17]。本文作者通过HCCM连铸技术控制温度梯度有效地改善管坯表面质量,本实验获得的纯铝管坯内表面粗糙度

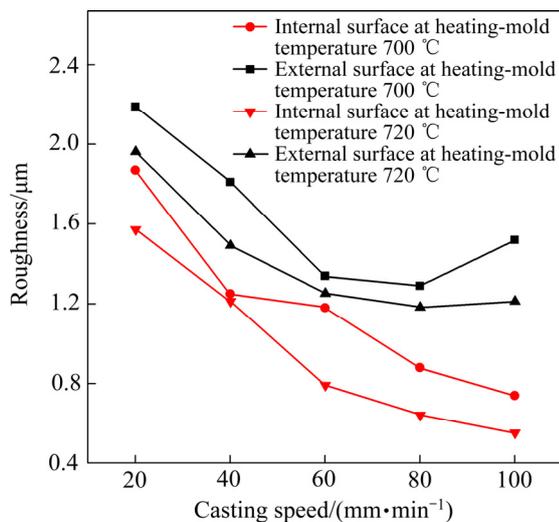


图5 热型温度对管坯表面粗糙度的影响

Fig. 5 Effect of heating-mold temperature on surface roughness

均小于1.8 μm,外表面粗糙度均小于3 μm,满足了后续冷加工变形的要求。

2.3 连铸速度对纯铝管坯组织的影响

图6为不同连铸速度下获得的管坯宏观组织照片。采用的热型温度为700℃、冷型冷却水流量为1000 L/h,二冷水流量为400 L/h。当连铸速度低于60 mm/min时,管坯形成了明显的柱状晶组织,柱状晶生长方向与管坯轴向呈一定夹角(θ),约为5°~42°,随着连铸速度的增加,管坯上部和侧部柱状晶尺寸减小,底部柱状晶尺寸增大,上部与底部组织形成的“V”字形夹角逐渐增大,侧部组织与轴向之间的夹角逐渐减小。当连铸速度增大至80 mm/min时,管坯表面出现一定比例的等轴晶,侧面的柱状晶区减小,上部和下部形成的等轴晶区较大。当连铸速度达到100 mm/min时,管坯表面均为等轴晶,等轴晶尺寸减小,管坯下部的晶粒尺寸最大。

HCCM水平连铸工艺通过将固-液界面控制在热型段与冷型段之间,并通过控制温度梯度获得柱状晶组织。受管坯自重和凝固收缩等因素的影响,管坯下部优先形核,上部与侧部凝固速率相对底部较低,优先生成晶粒,在较高的温度梯度下,晶粒沿着与热流相反的方向生长,形成柱状晶并长大^[14]。当连铸速度增加到80 mm/min时,液体凝固速度与管坯的连铸速度相差不大,管坯轴向温度梯度减小,晶粒发生柱状晶到等轴晶的转变。当连铸速度增大到100 mm/min时,管坯的凝固速度小于管坯的连铸速度,固-液界面的位置偏向冷型段,管坯沿周向温度梯度较大,管坯更多的组织沿周向散热方向由外向内生长,且在外表面为细小的等轴晶。

图7所示为铝液熔化温度750℃、冷型冷却水流量1000 L/h、连铸速度为60 mm/min时、不同热型温度条件下制备的管坯横截面显微组织图。由图7看出,随着热型温度从700℃升高到720℃,管坯外部凝固成壳,柱状晶沿着连铸方向生长的同时,柱状晶向内部成长,且柱状晶晶粒尺寸变小。柱状晶晶粒的生长受轴向温度梯度的影响,沿着与热流平行的方向优先生长,热型温度的增加,固-液界面位置靠近冷型段,从而导致管坯组织中的晶粒具有更强的轴向柱状晶组织。

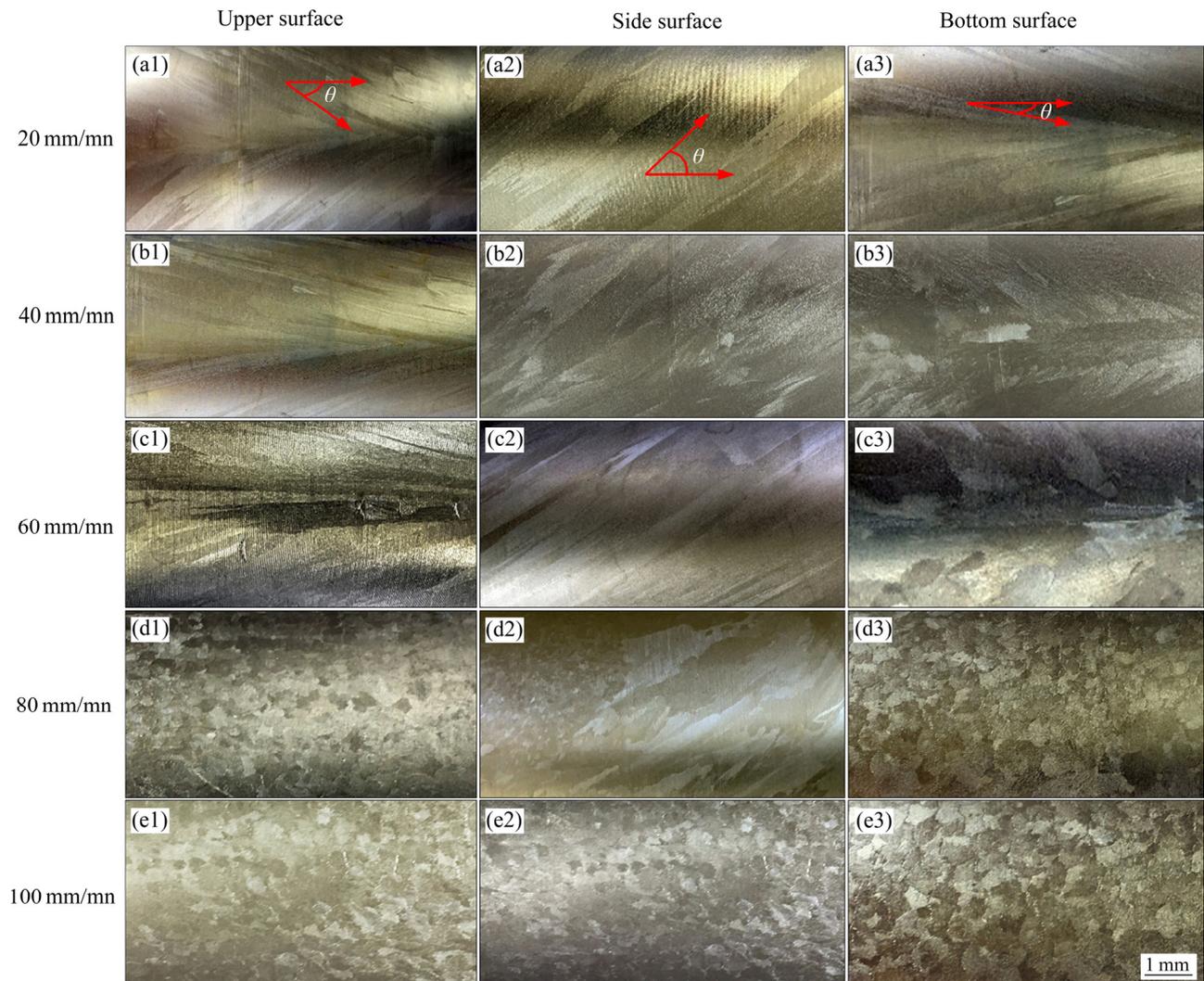


图6 不同连铸速度下纯铝管坯外表面晶粒形貌

Fig. 6 Grain morphologies on external surface of tube blanks obtained by HCCM horizontal continuous casting at various casting speeds

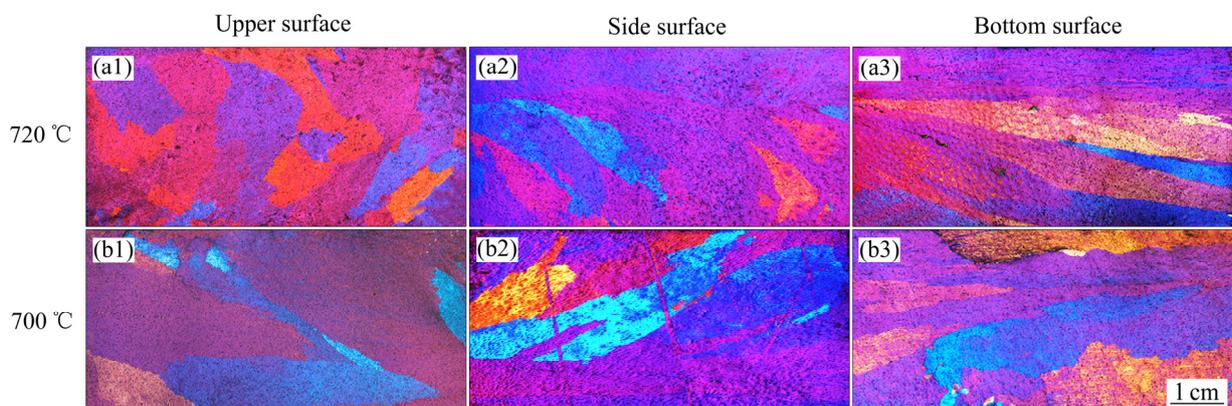


图7 不同热型温度下管坯沿连铸方向剖面金相组织

Fig. 7 Microstructures of pure aluminum tubes in casting direction at various heating-mold temperatures

采用 HCCM 水平连铸工艺制备纯铝管坯,管坯在外部凝固优先成壳,柱状晶晶粒沿着连铸方向由外部向内部生长。固液界面处在热型段与冷型段之间时,随着热型温度的提高,一方面,金属在铸型表面形核受到抑制;另一方面,固液界面前沿的温度梯度增大,保证组织具有更强的轴向取向性。

2.4 工艺参数对纯铝管坯力学性能的影响

图 8 所示为热型段加热温度为 700 °C、720 °C 时,不同连铸速度下纯铝管坯的室温抗拉强度、屈服强度和断后伸长率的变化曲线。随着连铸速度的增大,抗拉强度和屈服强度逐渐增大,伸长率先增大后减小。

当热型温度为 700 °C,连铸速度为 20 mm/min 时,抗拉强度为 47.5 MPa,屈服强度为 15.9 MPa,断裂伸长率为 23.5%。当连铸速度增加至 40 mm/min 时,抗拉强度为 51.5 MPa,屈服强度为 18.7 MPa,断裂伸长率为 25.3%。当连铸速度增加至 60 mm/min 时,抗拉强度为 56.5 MPa,屈服强度为 19.3 MPa,断裂伸长率为 26.1%。当连铸铝管坯的组织中有部分等轴晶组织存在或完全为等轴晶组织时,抗拉强度和屈服强度变化幅度不大,断裂伸长率略有增加。当速度达到 80 mm/min、100 mm/min 时,抗拉强度分别为 63 MPa、63.5 MPa,屈服强度分别为 21 MPa、21.7 MPa,断裂伸长率分别为 23%、19.1%。连铸铝管坯的组织能够影响力学性能的变化,柱状晶组织的管坯具有良好的伸长率,等轴晶

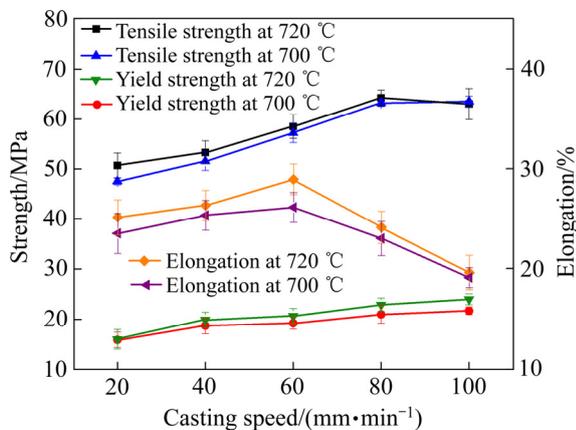


图 8 工艺参数对管坯力学性能的影响

Fig. 8 Effect of process parameters on mechanical properties

组织的管坯具有良好的抗拉强度和屈服强度。

由图 8 可知,热型段温度提高至 720 °C,管坯不同连铸速度下的管坯抗拉强度、屈服强度、断后伸长率均有所提高。热型温度为 720 °C、连铸速度为 60 mm/min 时,采用 HCCM 水平连铸技术制备的纯铝管坯具有较优的力学性能,抗拉强度为 58.4 MPa,屈服强度为 20.6 MPa,断后伸长率为 28.9%,为后续冷变形加工(轧制、拉拔)提供了高品质坯料。

3 分析与讨论

3.1 工艺参数对组织和表面质量的影响

采用 HCCM 水平连铸工艺制备铝管,受管坯自重和凝固收缩等因素影响,拉坯过程中管坯与结晶器之间会形成不均匀的气隙,且下部气隙小于上部气隙,从而会导致管坯凝固时管坯周向传热不均匀,管坯凝固传热不均匀导致管坯周向不同部位柱状晶形貌、尺寸方面存在明显的差异^[14],结果如图 6 所示。

铝管凝固过程中晶粒沿与垂直于固-液界面前沿的热流反方向生长,受管材周向传热行为的影响,管材上部凝固位置靠近冷型,而管材下部凝固位置靠近热型,管材下部的散热速率大于上部的散热速度,柱状晶晶粒方向与管材轴向呈一定的夹角($\theta=5^\circ\sim 42^\circ$)。由于水平连铸管材的对称性,所以管材上部和下部的凝固组织呈现“V”字形柱状晶分布如图 6(a)、(b)、(c)所示。当连铸拉坯速度提高,周向传热影响管材的轴向传热时,管材上部与底部表面附近形成较多的等轴晶,随着拉坯速度的提高,固-液界面前移,使周向散热增大,管材表面完全形成等轴晶^[18]。

当其他参数为定值时,连铸速度的增加使固-液界面由热型向冷型移动。 $v=20$ mm/min 时,固-液界面前沿的温度梯度最小, $v=60$ mm/min 时,固-液界面前沿的温度梯度最大,柱状晶生长方向与轴向的夹角逐渐减小,出现与轴向平行的柱状晶组织。连铸速度由 80 mm/min 增大到 100 mm/min 时,固-液界面进入到冷型段,金属液受到强制冷却,管材周向传热占主导,管材表面附近出现等轴晶。

热型温度的升高提高了固-液界面前沿的温度

梯度, 晶粒形核与长大速率增加, 柱状晶与等轴晶的尺寸增大。管材外部优先冷却, 然后逐渐向内部凝固成形, 当温度梯度增大时, 晶粒与轴向夹角增大。

随着连铸速度的增加和热型温度的提高, 固-液界面位置逐渐向冷型段移动。固-液界面前沿轴向温度梯度的提高一方面可以消除液相中的气孔、夹杂等缺陷进入金属管坯, 另一方面减小了管材与模具之间的摩擦, 因此可形成表面质量高、取向的柱状晶组织管材。

温度场模拟和连铸实验结果表明, 固-液界面位置控制在热型段和冷型段之间是柱状晶组织形成的关键。通过在热型段与冷型段之间建立较高的温度梯度, 使管材沿轴向传热, 可制备出具有高质量内外表面的管材。

3.2 工艺参数对管坯力学性能的影响

合理控制连铸工艺参数, HCCM 连铸技术可制备出组织为柱状晶或等轴晶的管坯。当连铸速度低于 60 mm/min 时, 管坯组织为与轴向呈一定夹角 ($\theta=5^\circ\sim 42^\circ$) 的柱状晶组织, 横向晶界较少, 随着连铸速度的增加, 管坯固液界面位置由热型逐渐向冷型移动, 柱状晶与轴向的夹角减小。管坯在后续的拉伸变形过程中, 拉伸方向与轴向平行, 柱状晶取向与拉伸方向存在一定的夹角, 两者之间的夹角越小, 材料横向晶界的有效面积越小, 管坯沿轴向拉伸时, 晶界对位错运动的阻碍就越小, 因此管坯可承受更大的拉伸变形。

当连铸速度增加至 80 mm/min 时, 管坯上部和下部均为等轴晶组织, 侧面为尺寸细小的柱状晶。当连铸速度达到 100 mm/min 时, 管坯表面为等轴晶组织, 横向晶界数量逐渐增加。材料在变形过程中, 位错运动受晶界面积的影响, 连铸速度的提高使晶粒由柱状晶向等轴晶转变, 晶界面积增加, 位错在晶界处发生塞积^[17], 使得管坯的抗拉强度和屈服强度增大, 断后伸长率降低。

4 结论

1) 在铝液铸造温度 750 °C、热型段加热温度 700~720 °C、冷却水流量 1000 L/h、连铸速度为

20~60 mm/min 的条件下, 可以制备出表面粗糙度低、具有沿拉坯方向强取向组织和优良力学性能纯铝管坯。

2) 随热型温度由 700 °C 升高至 720 °C, 管坯内外表面粗糙度降低, 而抗拉强度、屈服强度和断后伸长率有所提高。

3) 在热型温度 720 °C、速度 60 mm/min 的条件下制备的纯铝管坯具有较优的表面质量和力学性能, 内外表面粗糙度均小于 1.6 μm , 管坯抗拉强度为 58.4 MPa, 屈服强度为 20.6 MPa, 断后伸长率为 28.9%, 有利于后续冷加工。

REFERENCES

- [1] 廖健, 姚春明, 李伟萍, 等. 特种铝及铝合金型材和管材的发展现状与趋势[J]. 有色金属加工, 2017, 46(4): 13-16.
LIAO Jian, YAO Chun-ming, LI Wen-ping, et al. Present situation and tendency of special aluminum and aluminum alloy profiles and pipes[J]. Nonferrous Metals Processing, 2017, 46(4): 13-16.
- [2] 邓小民. 铝合金管材挤压时内表面擦伤的形式及危害[J]. 轻合金加工技术, 2000, 28(7): 20-21.
DENG Xiao-min. Study of spot in wall defect of aluminum alloy pipes during extrusion[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2000, 28(7): 20-21.
- [3] 刘静安, 谢水生, 赵云路. 几种铝加工新技术[J]. 轻合金加工技术. 2017, 45(3): 6-18.
LIU Jing-an, XIE Shui-sheng, ZHAO Yun-lu. New aluminum processing technology[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2017, 45(3): 6-18.
- [4] LI C, YANG H, ZHAN M, et al. Effects of process parameters on numerical control bending process for large diameter thin-walled aluminum alloy tubes[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2009, 19(3): 668-673.
- [5] ZHANG X, HUANG J, DENG K, et al. Solidification of horizontally continuous casting of super-thin slab in stable magnetic field and alternating current[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2011, 21(1): 196-201.
- [6] 何梅琼, 刘静安, 谢水生. 两种铝加工新技术的研发与应用[J]. 铝加工, 2016(6): 46-50.
HE Mei-qiong, LIU Jin-an, XIE Shui-sheng. Research and

- development and application of two kinds of aluminum processing technology[J]. *Aluminum Fabrication*, 2016(6): 46–50.
- [7] LIU Y, LIU X, FU H, et al. Effects of process parameters on surface quality, composition segregation, microstructure and properties of QSn6.5-0.1 alloy slabs fabricated by HCCM horizontal continuous casting[J]. *Journal of Iron and Steel Research International*, 2017, 24(3): 273–281.
- [8] MEI J, LIU X, JIANG Y, et al. Liquid-solid interface control of BFe10-1-1 cupronickel alloy tubes during HCCM horizontal continuous casting and its effect on the microstructure and properties[J]. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, 2013, 20(8): 748–758.
- [9] MEI J, LIU X, XIE J. Microstructure and mechanical properties of BFe10 cupronickel alloy tubes fabricated by a horizontal continuous casting with heating-cooling combined mold technology[J]. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, 2012, 19(4): 339–347.
- [10] 刘新华, 金建星, 谢建新. 制备参数对 HCCM 水平连铸纯铜板坯组织与力学性能的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2018, 28(2): 213–222.
- LIU Xin-hua, JIN Jian-xing, XIE Jian-xin. Effect of preparation parameters of HCCM horizontal continuous casting on microstructure and properties of pure copper slab[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2018, 28(2): 213–222.
- [11] 梅俊, 刘新华, 谢建新. BFe10 白铜管材热冷组合铸型水平连铸凝固温度场模拟[J]. *中国有色金属学报*, 2012, 22(5): 1430–1439.
- MEI Jun, LIU Xin-hua, XIE Jian-Xin. Solidification temperature field simulation of BFe10 cupronickel tube during heating-cooling combined mold continuous casting[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2012, 22(5): 1430–1439.
- [12] MAHMOUDI J, NABATI H. An experimental study on productivity and quality improvement of horizontal continuous casting process[J]. *International Journal of Green Energy*, 2006, 3: 185–199.
- [13] VERWIJS J P, WECKMAN D C. Influence of mold length and mold heat transfer on horizontal continuous casting of nonferrous alloy rods[J]. *Metallurgical Transactions B*, 1988, 19(2): 201–212.
- [14] WRÓBEL T, SZAJNAR J, BARTOCHA D, et al. The stand of horizontal continuous casting of Al and its alloys[J]. *Archives of Foundry Engineering*, 2013, 13(3): 113–118.
- [15] SU Y, LIU X, WU Y, et al. Numerical simulation of temperature field in horizontal core-filling continuous casting for copper cladding aluminum rods[J]. *International journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 2013, 20(7): 684–692.
- [16] WU L, KANG H, CHEN Z, et al. Horizontal continuous casting process under electromagnetic field for preparing AA3003/AA4045 clad composite hollow billets[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2015, 25(8): 2675–2685.
- [17] ZHANG X, ZHANG H, KONG X, et al. Microstructure and properties of Al-0.70Fe-0.24Cu alloy conductor prepared by horizontal continuous casting and subsequent continuous extrusion forming[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2015, 25(6): 1763–1769.
- [18] 姜雁斌, 刘贤钙, 张小军, 等. 冷型热阻角对 HCCM 水平连铸 BFe10-1-1 管材周向组织和力学性能均匀性的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2014, 24(9): 2322–2332.
- JIANG Yan-bin, LIU Xian-gai, ZHANG Xiao-jun, et al. Influences of thermal-resistance angle of cooling mold on microstructure and mechanical property homogeneity of BFe10-1-1 cupronickel tube produced by HCCM horizontal continuous casting[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2014(9): 2322–2332.

Effect of process parameters of continuous casting on microstructure and mechanical properties of pure aluminum tube

WANG Yi-xiao¹, LIU Xin-hua^{1,2}, XIE Jian-xin^{1,2}, TIAN Yu-xing³, ZHENG Zhi-kai³, MAO Xiao-dong³

(1. Institute for Advanced Materials and Technology, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2. Beijing Laboratory of Metallic Materials and Processing for Modern Transportation, Beijing 100083, China;

3. Chinalco Material Applications Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China)

Abstract: The pure aluminum tubes of d 70 mm \times 5mm were fabricated by heating-cooling combined mold (HCCM) continuous casting technology. The effect of process parameters on the surface quality, microstructure and mechanical properties of tubes were analyzed. The results show that pure aluminum tubes can be continuously and stably fabricated without defects on the internal and external surfaces, when casting temperature is 750 °C, mold heating temperature is 700–720 °C and cooling water flow rate is 1000 L/h. The microstructure of tubes have strong axial orientation columnar-grains on external surface when the continuous casting speed is 20–60 mm/min, and the grain size gradually decreases with the increasing of casting speed. When the continuous casting speed is 80–100 mm/min, the surface microstructure of tubes gradually transforms to equiaxed grains. When the heating-mold temperature and the casting speed are 720 °C and 60 mm/min, the surface roughness value of pure aluminum tubes fabricated is less than 1.6 μ m, the tensile strength is 58.4 MPa, the yield strength is 20.6 MPa, and the elongation is 28.9%. This shows that tubes can be directly cold machining without milling surface, which can significantly shorten the production process.

Key words: pure aluminum tube; heating-cooling combined mold; horizontal continuous casting; columnar crystals

Foundation item: Project(2016YFB0301404-01) supported by the National Key Research and Development Program of China; Project(U1708251) supported by the National Natural Science Foundation of China

Received date: 2020-01-20; **Accepted date:** 2020-12-20

Corresponding author: LIU Xin-hua; Tel: +86-10-62333627; E-mail: Liuxinhua18@163.com

(编辑 龙怀中)