

不同成分铝杆的辊模拉拔工艺设计

董建光^{1,2} 傅珠荣² 李 锋^{2,3} 沈月明² 陈国权³

(1.铜陵龙峰新材料有限公司; 2.绍兴市天龙锡材有限公司; 3.绍兴市力博科技有限公司)

摘 要 设计了拉拔不同成分铝线坯用二连式辊模孔型工艺参数,研究了铝线坯的宽展特征。结果表明,铝线坯呈现反张力导致线坯压圆宽展微小的特征,宽展随强度而发生明显变化。在拉力试验机上实测了辊模拉拔力与拉拔模拉拔力的差别,发现辊模拉拔力降幅大于28%,具有明显的节能潜力。改进辊模结构,采用与拉拔模相同的断面减缩率,在同一台水箱拉丝机上拉拔不同成分铝线材,就两者拉拔断线、电流、拉拔油等进行对比。结果表明,多个辊模组合可以连续拉拔不同成分的铝线材,加工硬化不影响拉拔效果,具有节能、环保性佳、辊模装配简单和机件磨损低的优势。

关键词 孔型设计;铝线宽展特性;拉拔力

中图分类号 TG339;TG146.21

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.06.017

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Roller Die Drawing Process of Aluminum Rods with Different Compositions

Dong Jianguang^{1,2}, Fu Zhurong², Li Feng^{2,3}, Shen Yueming², Chen Guoquan³

(1.Tongling Longfeng New Materials Co., Ltd.; 2.Shaoxing Tianlong Tin Materials Co., Ltd.;
3.Shaoxing LIBO Science and Technology Co., Ltd.)

Abstract: The drawing processing parameters of two-joint roller dies for aluminum alloy wires with different compositions were investigated. The spreading characteristics of aluminum wire was tested. The results indicate that the aluminum billet presents inverse tension, leading to the characteristics of tiny spreading, which varies obviously with the strength of the aluminum alloy. The difference of drawing force between drawing die and two-joint roller die was investigated on the tensile testing machine. The results reveal that drawing force of roll die is decreased by more than 28%, showing huge potential of saving energy. The structure of the roll die was modified, and the same section reduction rate as the drawing die was adopted to draw the aluminum wire with different compositions on the same water tank drawing machine. The drawing break line, current, and drawing oil of the two dies were compared systematically. The results demonstrate that aluminum alloy wires with different compositions can be continuously drawn by combination of roller dies, irrespective of the working hardening, which exhibits advantages of energy saving, easy assembling, environmental protection and low wear.

Key Words: Core Design, Aluminum Wire Spreading Characteristics, Drawing Force

辊模常用于金属拉拔加工^[1~3],其拉拔力小、节能,而反张力可减少宽展,提高减径效率,故应用日益广泛。铝线材大量用于电工、焊接、防腐喷涂、制作喷丸以及电容器用金属化薄膜和激光防伪膜的蒸镀源材料^[4~7]。为提高减径工效, $\phi 9.5\text{ mm}$ 以下的铝线材,宜用拉拔模在水箱拉丝机中连续拉拔,但水箱拉丝机不适用于加工硬化明显的铝合金。另外,铝合金拉拔过程一般需要退火处理,或减小拉拔变形量,工效低、能耗高,不符合铝及铝合金低能耗加工的发展趋势^[8]。

本课题研究了铝线材宽展特征,设计了适合拉拔不同铝合金成分的辊模孔型。在拉力试验机上实测了辊模拉拔力与拉拔模拉拔力的差别,发现辊模具有明显的节能效果。改进设计辊模结构,以适合水箱拉丝机使用。采用与拉拔模相同断面减缩率的辊模,在同一台水箱拉丝机上实现连续拉拔不同成分的铝线材,解决了水箱拉丝机无法连续拉拔加工硬化明显的铝合金线材难题,达到了节能、环保、辊模装配简单和机件磨损低的预期。

收稿日期:2020-12-29;修改稿收到日期:2021-03-09

第一作者简介:董建光,男,1978年出生,工程师,浙江绍兴(312000),E-mail: dongjianguang@damno.com

通信作者:傅珠荣,男,1973年出生,工程师,浙江绍兴(312000),E-mail: 527230703@qq.com

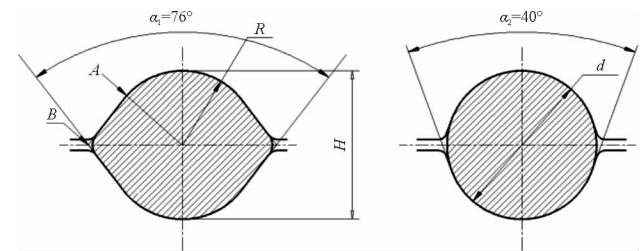
引用格式:董建光,傅珠荣,李锋,等.不同成分铝杆的辊模拉拔工艺设计[J].特种铸造及有色合金,2021,41(6):743-747.

DONG J G, FU Z R, LI F, et al. Roller die drawing process of aluminum rods with different compositions[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(6):743-747.

1 变形特征及拉拔模拉拔力的对比

1.1 适合铝线材辊模拉拔的孔型设计

根据文献[3],压椭圆和压圆拉辊孔型设计见图 1, α_1 值取 76° , α_2 值取 40° 。为简化设计, d 为出线坯标称线径, R 取 $d/2$, H 可视不同牌号铝线材的宽展要求进行调整。为适合后续与水箱拉丝机拉拔对比试验,单组辊模断面减缩率取 24%,与水箱拉丝机一致。首先进行单组辊模拉拔试验,测试其孔型设计的合理性。以原料铝杆作为进线坯,其标称直径为 $\phi 9.5\text{ mm}$,按断面减缩率为 24%的变形量,考虑到原料铝坯杆的尺寸变化较大,出线坯直径取 $\phi 8.33\text{ mm}$ 。结果表明,所设计的孔型辊模拉拔后,压椭圆和压圆均无耳子、飞边和毛刺等缺陷,可确保不同成分铝线材拉拔时的表面品质。



(a) 压椭圆孔型 (b) 压圆孔型

图 1 压椭圆和压圆拉辊孔型示意图

1.2 铝线材宽展特征

研究表明,宽展随拉拔力增加而降低^[9]。依据图 1 孔型,选取 1A99 合金坯杆(退火态 67.2 MPa)和 6101 合金坯杆(退火态 75.1 MPa)铝线坯作为拉拔材料,测试其压椭圆和压圆宽展变形特征。宽展特征按西斯公式^[10] $\Delta B = C' \times \Delta h$ 计算,其中 ΔB 为宽展, Δh 为压下量, C' 为宽展因素。铝线材变形尺寸参数见表 1,宽展特征见表 2,拉拔后线坯截面形状见图 2 和图 3。辊模压椭圆和压圆之间形成的反张力,可明显减小压圆线坯的宽展,有利于提高其断面减缩率。

表 1 1A99 和 6101 铝线材变形数据
Tab.1 Deformation data for 1A99 and 6101

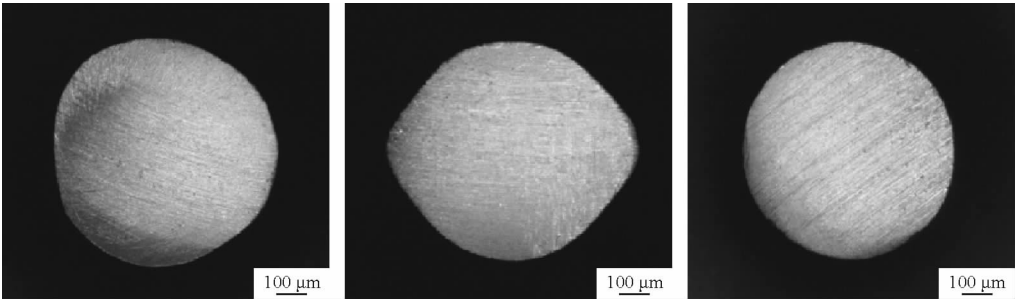
拉拔变形	aluminum wire		mm
	1A99	6101	
压椭圆	10.41(长轴)/8.21(短轴)	9.92(长轴)/8.29(短轴)	
压圆	8.34/8.35	8.36/8.33	

表 2 1A99 和 6101 铝线材宽展特征
Tab.2 Spreading factor of 1A99 and 6101 aluminum wire

变形特征	压下量 Δh		$\Delta B/C'$ (宽展/宽展因素)	
	1A99	6101	1A99	6101
压椭圆	1.29	1.21	0.91/0.705	0.42/0.347
压圆	2.07	1.56	0.13/0.063	0.04/0.026

变形数据和宽展特征表明,椭圆形线坯的长轴和短轴尺寸的比例合适,在辊模无导卫的情况下,线坯也不会发生翻转引起耳子缺陷。

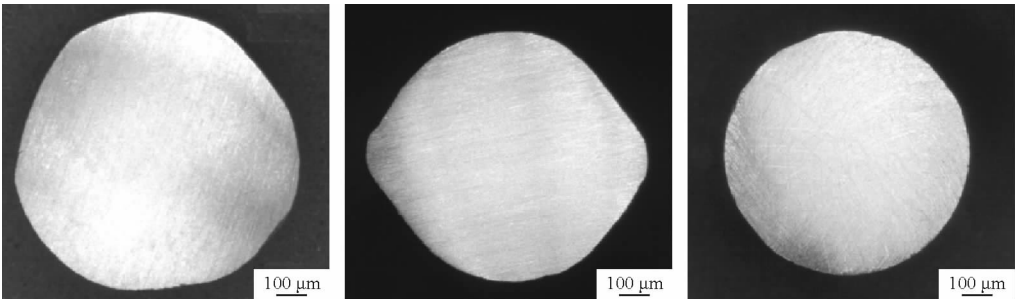
Fig.1 Schematic diagram of elliptic and circular groove



(a) 铝杆坯料 (b) 线材压椭圆 (c) 线材压圆

图 2 1A99 铝线材经拉拔线坯截面形状

Fig.2 Cross section shape of 1A99 aluminum wire after drawing



(a) 铝杆坯料 (b) 线材压椭圆 (c) 线材压圆

图 3 6101 铝线材经拉拔线坯截面形状

Fig.3 Cross section shape of 6101 aluminum wire after drawing

此外,还可发现铝线坯宽展随强度增加而明显减小。对比表 1 和表 2 可知,6101 合金具有更小的宽展特征。采用辊模拉拔 6101 合金的断面减缩率理论上可远超过 24%,但形成椭圆形线坯过大的长、短轴之比,是否容易造成拉拔翻转,需进一步研究。

1.3 拉拔力的对比测试

郭宝龙等^[11]计算了辊模拉拔钢、铜等拉拔力,其偏差为±(10%~12.5%),但未给出与拉拔模对比数据。因此,本课题采用 TY8000 伺服拉力试验机,设计了拉拔模测试夹具(见图 4),图 5 为测试拉拔力用辊模。实际使用的辊模质量和体积较大,不宜用作拉拔力测试,故设计辊径为 $\phi 80\text{ mm}$ 的专用拉拔力测试辊模。选用铝线材试样直径 $\phi 5.52\text{ mm}$,断面减缩率均为 24.0%,拉拔后线径为 $\phi 4.81\text{ mm}$,测试用辊模的结构和孔型形状与实用辊模一致。测试拉拔力的拉伸速度为 50 mm/min,拉拔模线材表面涂专用拉拔油,辊模则无润滑。测试数据见表 3,表明辊模拉拔应具有明显的节能效果。

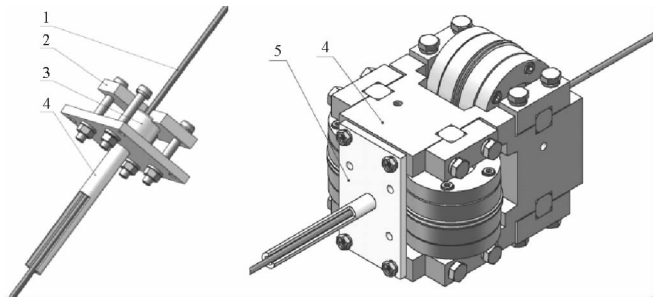


图 4 拉拔模拉力试验夹具
Fig.4 Fixture for die drawing test

1.测试件 2.固定拉拔模零件 3.聚晶拉拔模 4.夹持零件 5.测试辊模

表 3 拉拔力测试数据

Tab.3 Drawing force testing data

线材 牌号	测试前试件抗 拉强度/MPa	拉拔模最大 拉拔力/N	辊模最大拉 拔力/N	拉拔力 降幅/%
1A99	161.6	1 589.4	1 136.0	28.5
6101	246.7	2 080.5	1 225.4	41.1

2 辊模改进设计

2.1 辊模结构简化设计

常规辊模配装技术要求高、体积较大,不适合水箱拉丝机使用,采用简化设计,降低辊模配装技术要求。单组辊模结构见图 6。拉辊组件分压椭圆和压圆两种,其中 2 个压椭圆或压圆拉辊组件配为 1 对。拉辊组件结构见图 7,通过螺栓连接,将拉辊、轴承及其外圈隔套、压盖组合成一体。

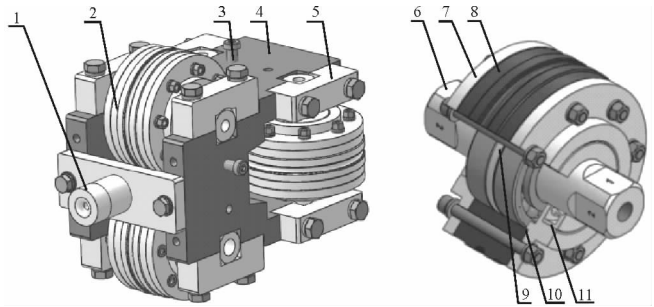


图 6 辊模示意图

Fig.6 Schematic diagram of the roll die

图 7 拉辊组件示意图

Fig.7 Schematic diagram of component of the drawing die

1.进线坯导向件 2.拉辊组件 3.轴向调节螺栓 4.辊模架 5.压紧盖 6.拉辊轴 7.轴承压盖 8.钨钴硬质合金拉辊 9.轴承隔套 10.轴承 11.骨架式密封圈

配装辊模调整拉辊孔型对中时,压椭圆拉辊组件插入一根待加工直径铝线材,用螺栓将压紧盖均匀压紧,拉辊组件孔型即自行对中。压圆拉辊组件中同样插入一根比该组辊模拉拔后标称直径大 0.3~0.5 mm 的铝线材,将压紧盖压紧,孔型即自行对中。

2.2 拉辊材质选用及表面处理

采用钨钴硬质合金作为拉辊材质,其硬度高、使用寿命长。硬质合金热膨胀系数为钢的 33%~50%^[12],尺寸稳定。为满足钨钴硬质合金配装要求,及减小辊模外形尺寸,轴承直接安装于拉辊内部,同时钨钴硬质合金拉辊内孔的尺寸精度提高到 H4,防止轴承外圈与钨钴硬质合金拉辊内孔间隙过大,又不至于将钨钴硬质合金撑裂。CVD 金刚石薄膜涂层常应用于拉拔模具领域^[13],钨钴硬质合金拉辊孔型表面增加 CVD 金刚石薄膜涂层,虽经 10 000 t 铝线材的拉拔使用,无磨损。而常规的 Cr12MoV 材质拉拔 3 000 t 铝线材($\phi 3.10\text{ mm}$)即需调整辊缝或重新磨修孔型。

3 辊模在水箱拉丝机的实际应用

3.1 水箱拉丝机的基本参数

改进设计后,在 LHD-400/9 型水箱拉丝机上进行辊模和拉拔模拉拔对比试验。主要技术参数如下:进线铝坯杆直径为 $\phi 9.5\text{ mm}$,出线直径为 $\phi 3.0\text{ mm}$,水箱拉丝机为 9 道次独立卷筒(其中最后一只是定速轮)、单电机驱动(110 kW),配用定速轮电机 45 kW,拉拔模正常拉拔出线速度为 9.1 m/s,空载电流为 31.5 A,在 10.0 m/s 时空载电流为 33.5 A。水箱拉丝机的各道次断面减缩率设计值为 24%,各组辊模同取 24%,拉拔线直径依次为 8.33、7.26、6.33、5.52、4.81、4.25、3.75、3.31、3.10 mm,辊模出线后加一道 $\phi 3.00\text{ mm}$ 拉拔模除油,辊模的拉辊直径为 $\phi 142\text{ mm}$ 。

3.2 拉拔过程断线情况及抗拉强度变化

试验表明,水箱拉丝机采用拉拔模拉拔,受 6101 铝线材加工硬化限制,频繁断线无法顺利拉拔。辊模拉拔 1A99 铝线材(原料坯杆 67.0 MPa)和 6101 铝线材(原料坯杆 75.0 MPa),最后 1 组辊模后经 $\phi 3.0$ mm 拉拔模清除润滑油收卷,期间均未见断线现象,表明辊模拉拔 6101 铝线材,可无需退火处理直接拉拔到 $\phi 3.10$ mm,解决了水箱拉丝机拉拔铝合金断线的问题,提高了拉拔效率。试验同时表明,6101 铝线材加工硬化明显,呈现先高后缓现象,抗拉强度变化见图 8。

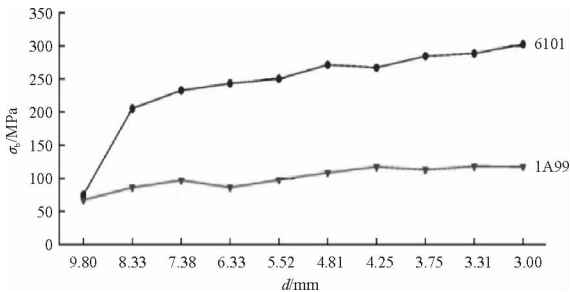


图 8 铝线材拉拔后的抗拉强度

Fig.8 Tensile strength of aluminum wires after drawing

3.3 拉拔总电流和功率对比

测试表明辊模拉拔力远小于拉拔模,将拉拔速度从 9.1 m/s 提高到 10 m/s,实测拉拔电机总电流和实测总功率数值见表 4。可见辊模拉拔 1A99 铝线材的电机实测总功率可降低 26.8% 左右,与测试的拉拔力降幅对比数据 28.5% 接近,如果考虑所提高的 10% 拉拔速度,单位产品电耗还可降低 10%。拉拔 6101 铝线坯,拉拔力降幅为 41.1%,因此推测,即便不考虑取消退火处理的能耗,仅拉拔的节能效果就非常明显。

表 4 实测总电流和实测功率数值

Tab.4 Actual measured total current and power

拉拔方式	拉拔总电流/A		电机实测总功率/kW	
	1A99	6101	1A99	6101
拉拔模	95.0	—	50	—
辊模	69.5	104.5	36.6	55

注:拉拔模无法拉拔 6101 铝线材,拉拔总电流和实测总功率为空

3.4 拉拔油使用情况

铝线材拉拔一般配专用非活性重负荷拉拔油,其运动粘度为 110~130 mm²/s,拉拔过程容易产生黑色粘稠油泥等杂物,难以从拉拔油中分离或过滤。寒冷天气启动时需将拉拔油预热,拉拔油配有循环冷却水系统,拉拔模拉拔产生的热量使拉拔油快速升温至 30 ℃,循环冷却水系统开启,后续运行时间较长。辊模拉拔发热量较小,拉拔油以冷却为主,循环冷却水系统运行时间大幅度缩短。所选油品运动粘度不超过 35 mm²/s,杂物易于分离和过滤,产生的拉丝废液明显减少,环保性佳。

3.5 粗铝线坯需矫直后导入辊模

粗铝杆呈退火态交货,搬运过程容易弯曲变形,建议第 1 组辊模增加导入兼拉拔模,直径比标称的粗铝杆坯小 0.10 mm,起到提高铝杆的圆度和矫直作用,否则弯曲铝线杆直接进入辊模容易形成单侧耳子缺陷,甚至拉断,见图 9。

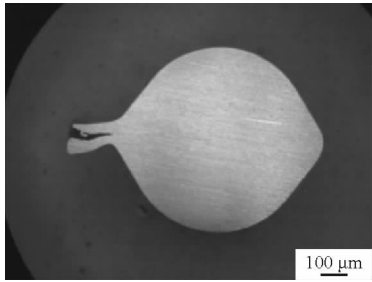


图 9 弯曲变形粗铝杆形成的单边耳子缺陷

Fig.9 Unilateral defect formed by bending deformed coarse aluminum rod

3.6 宽展对后续变形与线材精度的影响

辊模减径原理与轧制基本相同,宽展不影响后续变形,对线材表面品质也无影响。

不同成分的铝线材宽展随强度变化而变化。同一种成分铝线材,辊模连续拉拔时,线坯宽展也有微小变化,使线材圆度发生微小变化,但一般不超过 ± 0.05 mm。经水箱拉丝机最后一组辊模拉拔后,再经变形量为 0.1 mm 的拉拔模,提高线材直径的精度及清除拉拔油。辊模拉拔的线材,精度一般达不到成品铝线材的要求,后续还是需要经过 2~3 道次或更多拉拔模拉拔,方可达到尺寸精度和表面品质的要求。

4 结 论

(1) 设计了水箱拉丝机拉拔辊模工艺参数和结构,可连续拉拔不同成分的铝线材,不受加工硬化的影响,解决了加工硬化造成铝线材断线的难题。

(2) 铝合金硬度越高,宽展越小,反张力进一步缩小压圆线坯的宽展,说明硬度较高的铝线材可选取更大的变形量,但要考虑椭圆形线坯长、短轴长度比数值是否合适以及铝线材的直径尺寸。

(3) 辊模拉拔力远小于拉拔模,随着铝合金硬度增加而降幅更明显,具有明显的节能效果。

(4) 辊模拉拔的铝线坯,需经过 2~3 道或更多的拉拔模拉拔,方可达到尺寸精度和表面品质的要求。

(5) 在钨钴硬质合金拉拔孔型表面增加 CVD 金刚石薄膜涂层,可以大幅度延长拉辊的使用寿命。

(6) 可使用低粘度润滑油作为拉拔油,油泥杂物易于过滤和沉淀,废拉拔油排放减少,环保性佳。

高纯铝定向凝固过程温度场与成分分布研究

贾志宏¹ 唐 巍¹ 高 鹏¹ 符 浩¹ 李文昊¹ 景文祥¹ 鲁远勇² 纪嘉明²
(1.江苏大学材料科学与工程学院; 2.镇江汇通金属成型有限公司)

摘 要 基于 ProCAST 软件对高纯铝的定向凝固过程进行数值模拟研究,通过自建的模型成功模拟了高纯铝的定向凝固过程。结果发现,在凝固过程中特殊的流场和温度场会导致铸锭中段形成反常的溶质富集区,实际生产中应当在凝固中期适当加强搅拌消除。

关键词 高纯铝;定向凝固;数值模拟

中图分类号 TG311;TG146.21 文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.06.018 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Temperature Field and Composition Distribution of High Purity Aluminum during Directional Solidification

Jia Zhihong¹, Tang Wei¹, Gao Peng¹, Fu Hao¹, Li Wenhao¹, Jing Wenxiang¹, Lu Yuanyong², Ji Jiaming²
(1.School of Materials Science and Engineering, Jiangsu University;
2.Zhenjiang Huitong Metal Forming Co., Ltd.)

Abstract: A numerical simulation on the directional solidification process of high purity aluminum was conducted by finite element simulation software ProCAST. The directional solidification was successfully simulated by self-built model. The result reveal that during the solidification process, the special flow field and temperature field lead to the formation of the abnormal solute enrichment zone in the ingot, which should be eliminated through appropriate stirring in the middle of solidification during the actual production.

Key Words: High Purity Aluminum, Directional Solidification, Numerical Simulation

高纯 Al 是指纯度高于 99.996%(质量分数)的 Al,高纯 Al 相比原 Al 在很多方面具有显著优势,其在现代工业中应用广泛^[1]。目前高纯 Al 生产多采用三层电解法、偏析提纯法。其中,偏析法具有污染小、纯度高、效率高等特点^[2]。定向凝固法是目前应用较为广泛的一种偏析提纯方法^[3]。LEE D Y 等^[4]研究了提拉速

度对高纯 Al 的组织 and 偏析的影响,发现随着速度提升,Si 的偏析倾向减小。WAN H L 等^[5]研究了有效分配系数对提纯结果的影响,发现通过调整熔炼参数,使有效分配系数接近平衡分配系数时,杂质的分离效率显著提高。杨建^[6]对高纯 Al 定向凝固过程中 Al 熔体内 Al 原子与杂质原子之间的相互作用,以及杂质原子之

收稿日期:2020-11-23;修改稿收到日期:2021-01-06
第一作者简介:贾志宏,男,1976 年出生,副教授,江苏镇江(212013),E-mail:13775552323@163.com
引用格式:贾志宏,唐巍,高鹏,等. 高纯铝定向凝固过程温度场与成分分布研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(6): 747-750.
JIA Z H, TANG W, GAO P, et al. Temperature field and composition distribution of high purity aluminum during directional solidification [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(6): 747-750.

参 考 文 献

[1] 李勇,张玉新,钟毅,等. 辊模拉拔技术的分析与应用[J].金属材料研究, 2003, 29(4): 15-20.

[2] 郭丰伟,雷君相,高文静. 豆形截面钢丝辊模拉拔工艺数值模拟研究[J].有色金属材料与工程, 2017, 38(4): 229-233.

[3] 张小龙,李锋,邹平,等. 一种新型结构的辊拉模:中国专利, ZL201820731240.2[P]. 2018-12-28.

[4] GB/T 3955-2009. 电工圆铝线[R].

[5] GB/T 10858-2008. 铝及铝合金焊丝[R].

[6] GB/T 12608-2003. 热喷涂火焰和电弧喷涂用线材、棒材和芯材分类和供货技术条件[R].

[7] 黄伟东. 电容器用金属化聚丙烯薄膜制造工艺改进研究[J]. 电子元件与材料, 2017, 36(7): 52-61.

[8] 卢建. 铝加工不属于高能耗行业[J]. 轻合金加工技术, 2020, 48(11): 6-9.

[9] 周和敏,周积智. 三辊辊模拉拔的变形力学研究[J]. 钢铁研究学报, 1990, 2(S1): 113-120.

[10] 陈彦博,赵红亮,翁康荣. 有色金属轧制技术[M]. 北京:化学工业出版社, 2007.

[11] 郑宝龙,朱为昌,李自强. 辊模拔丝力能参数的计算[J]. 钢铁, 1996, 31(7): 36-39.

[12] 刘红卫,陈康华,吕海波. 稀土对硬质合金线胀系数及粘结相形态的影响[J]. 稀有金属与硬质合金, 1999, 38(9): 30-33.

[13] 张志明,沈荷生,孙方宏,等. CVD 金刚石涂层拉拔模的研制与应用[J]. 工具技术, 2000, 34(4): 13-15.

(编辑:栗万仲)