

基于温度场模拟的大型液芯钢锭制备研究

吴永强 王开坤
(北京科技大学材料科学与工程学院)

摘 要 在 Deform-3D 模拟软件中建立了钢锭带模凝固、超高温脱模过程的有限元模型,基于对凝固过程的模拟,分析了含有一定液芯率的钢锭。通过模拟得到了不同尺寸下锭型温度场的分布,其中固相区、液相区、固液两相区的大小区分以材料的固、液相线温度来确定。通过分析固相区、液相区、固液两相区的位置和大小,揭示了不同尺寸钢锭模对液芯大小和位置的影响。基于液芯钢锭凝固过程模拟分析,设计了一系列新的钢锭模,可为实际生产提供参考。

关键词 Deform-3D;带模凝固;温度场模拟;固液两相区

中图分类号 TP311;TG142 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.04.008

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Preparation of Large-scale Liquid Core Ingot Based on the Simulation of Temperature Field

Wu Yongqiang, Wang Kaikun

(School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology Beijing)

Abstract: The finite element models including solidification with mold and ultra-high temperature demoulding were established in DEFORM-3D simulation software. Ingots with a certain liquid core were prepared and analyzed based on the simulation of the solidification process. The distributions of the temperature field under various ingot molds were presented, where the solidus and liquidus temperature of the material were used to distinguish the dimension of the solid-phase region, the liquid-phase region and the solid-liquid two-phase region. The influence law of different ingot molds on the position and the dimension of those regions was revealed. Moreover, a series of new ingot molds were designed based on the simulation analysis of solidification process of liquid core ingot, providing theoretical reference for practical production.

Key Words: Deform-3D, Solidification with Mold, Temperature Field Simulation, Solid-liquid Two-phase Region

电力、石化、造船、军工、航空航天等领域机器设备的关键和核心部件对钢锭品质提出了更高的要求,大型锻件铸坯品质对经济建设、国防、出口创汇、工作母机制造以及材料加工业的进步具有重要的意义^[1,2]。凝固偏析、缩孔、缩松、裂纹等缺陷仍然是大型钢锭的主要缺陷^[3,4]。为改进大锻件传统生产工艺流程,提高内部成分组织均匀的大型锻件坯料制备的品质,王开坤等^[5,6]提出并在工程上实现了高均匀性大型锻件绿色短流程锻造成形工艺,即液芯锻造工艺。根据其工艺路线“冶炼—铸锭—超高温脱模—锻造”,免去了传统锻造工艺进行反复加热锻造的流程,节约了能源,满足了重大装备向高性能化、短流程以及绿色制造方向发展的要求。

对于在实际生产中经常使用的钢锭,钢水在钢锭模

中温度沿轴向方向上从水口端到冒口端逐渐升高,径向从表面到芯部逐渐升高。根据钢锭的凝固顺序,制备含有一定液芯率的钢锭需要获得其在凝固过程中形成液芯的大小及位置分布规律^[7~9]。由于钢锭模的锥度和高径比在很大程度上决定着钢水在钢锭模中的凝固顺序,优化钢锭模几何尺寸和生产工艺是制备含有一定液芯率钢锭的重要保证。随着数值模拟技术的发展,钢锭模形状及尺寸等工艺参数的设计可借助有限元分析软件 Deform-3D^[10]进行计算机辅助分析。本课题以 13 t 钢锭模为研究对象,采用数值模拟,以温度场的分布规律^[11]代替钢锭凝固过程中固相区、液相区、固液两相区的大小及分布规律,从而为液芯钢锭的制备工艺提供参考。

收稿日期:2020-11-26;修改稿收到日期:2020-12-14
基金项目:国家重点研发专项资助项目(2017YFB0701803)
第一作者简介:吴永强,男,1985 年出生,博士研究生,北京(100083),E-mail: xuwenqiang10@126.com
通信作者:王开坤,男,1968 年出生,教授,北京(100083),E-mail: kkwang@mater.ustb.edu.cn
引用格式:吴永强,王开坤. 基于温度场模拟的大型液芯钢锭制备研究[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(4):429-433.
WU Y Q, WANG K K. Preparation of large-scale liquid core ingot based on the simulation of temperature field[J]. Special Casting & Non-ferrous Alloys, 2021, 41(4):429-433.

1 模型的建立

1.1 ASSAB 718 模具钢及其热物性参数

模具材质为 ASSAB 718 模具钢^[12~14],其成分见表 1,具有良好的力学性能和可加工性,被广泛用于模具的加工生产,如大型长寿命塑胶注塑模、低表面粗糙度的塑胶制品模具吹塑模、塑胶模具中的滑块工具等。

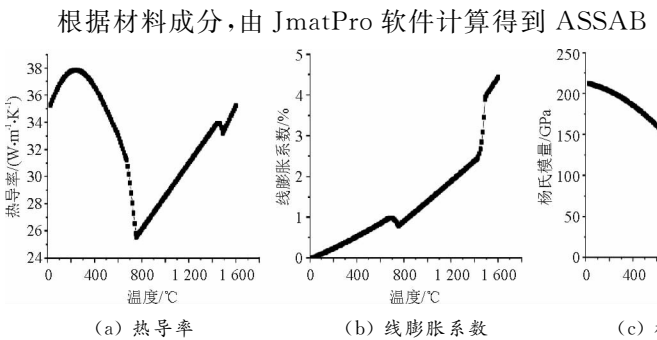


图 1 ASSAB 718 模具钢的热物性参数

Fig.1 Thermophysical parameters of ASSAB 718 tool steel

1.2 有限元模型

钢锭凝固过程有限元模拟通常需要建模的部位有:钢锭、冒口套、保温板、覆盖剂、发热剂、钢锭模、底盘等。为了提高计算效率,通常只考虑钢锭本体的凝固过程,将其他组件带来的影响转换成加载在钢锭本体上与之等价的边界条件。钢锭表面为自由表面,与环境、上下下砧之间发生热交换,钢锭在锻造过程中视为理想刚塑性体,不考虑弹性变形带来的体积变化。本课题以浇注 13 t 的 ASSAB 718 模具钢为例,浇注温度设定为 1 530 ℃。

钢锭的设计必须首先考虑其内部品质,而不能片面追求生产率和出品率。实际生产中为了提高出品率,通常冒容比要小一些,本体细长比要大一些,本体锥度要小些。但从提高内部品质考虑则希望冒容比大一些,本体细长比小一些,本体锥度大一些^[15~17]。钢锭锥度大小关系到钢锭凝固过程中结晶前沿是否始终朝向保温冒口开放,且保证补缩通道畅通。锥度过小,钢锭本体局部结晶容易产生搭桥,影响补缩效果而产生缩孔和缩松。锥度过大会增加偏析,还会加大压力加工时的工作量和增加变形的不均匀程度^[18],所以锭型设计要综合

表 1 ASSAB 718 模具钢的化学成分

Tab.1 Chemical composition of ASSAB 718 tool steel %								
ω _B								
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Fe
0.34~0.40	0.20~0.40	1.20~1.60	≤0.015	≤0.010	1.70~2.10	0.27~0.37	0.95~1.15	余量

718 模具钢热导率、比热容、液相率、杨氏模量、弹性模量。根据计算结果得到固、液相线的温度分别为 1 423 ℃和 1 487 ℃。热物性参数随温度变化的曲线见图 1。

考虑上述因素。根据上述原则设计了表 2 的 6 种尺寸的正八边形钢锭(梅花锭),并对其进行数值模拟以获得最佳工艺设计。

表 2 6 种 13 t 梅花锭的尺寸

Tab.2 The dimension of the regular octagonal ingots with 13 t				
方案	冒口高度/mm	冒口(大)端直径/mm	水口(小)端直径/mm	钢锭本体高度/mm
1	300	910	1 020	1 400
2	300	722	1 020	1 704
3	300	464	1 020	2 265
4	300	1 020	980	1 400
5	300	1 020	910	1 400
6	300	1 020	722	1 704

梅花锭锥度计算公式为^[18]:

$$a_{\text{锥}} = [(D_{\text{大}} - D_{\text{小}}) / 2H] \times 100\%$$

式中, $a_{\text{锥}}$ 为锥度; $D_{\text{大}}$ 为冒口端直径; $D_{\text{小}}$ 为水口端直径; H 为钢锭本体高度。

方案 1~3 属于上小下大锭型,方案 4~6 属于上大小下小锭型,根据式(1)计算得到方案 1~6 的锭型锥度分别为 -3.93%、-8.74%、-12.27%、1.43%、3.93%、8.74%。6 种锥度钢锭的有限元模型见图 2。

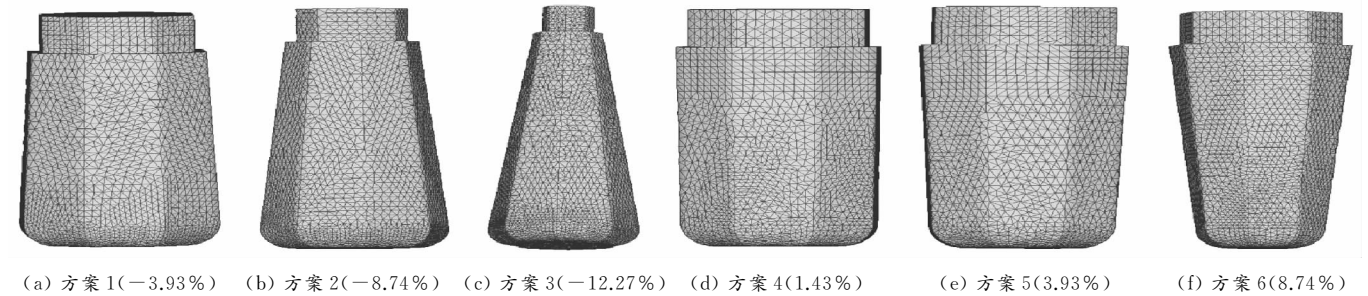


图 2 6 种锥度钢锭的有限元模型

Fig.2 Finite element model of steel ingot with different taper

为了获得形状因素对液芯钢锭制备过程的影响,研究了相同质量情况下,含有一定液芯率扁锭的制备过程,其具体尺寸见表3,建立的有限元模型见图3。

表3 13 t扁锭的尺寸

Tab.3 The dimension of flat ingot with 13 t			
尾宽×尾厚/mm	头宽×头厚/mm	高度/mm	本体高度/mm
1 810×520	1 792×420	1 688	1 500

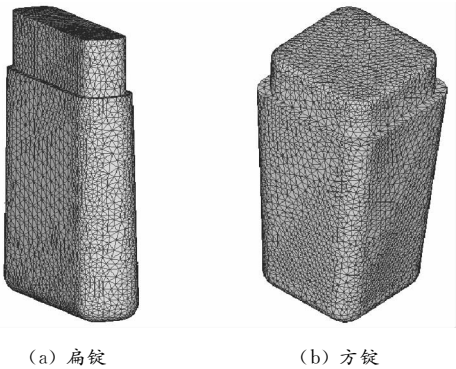


图3 不同形状钢锭有限元模型

Fig.3 Finite element model of the steel ingot with different shape

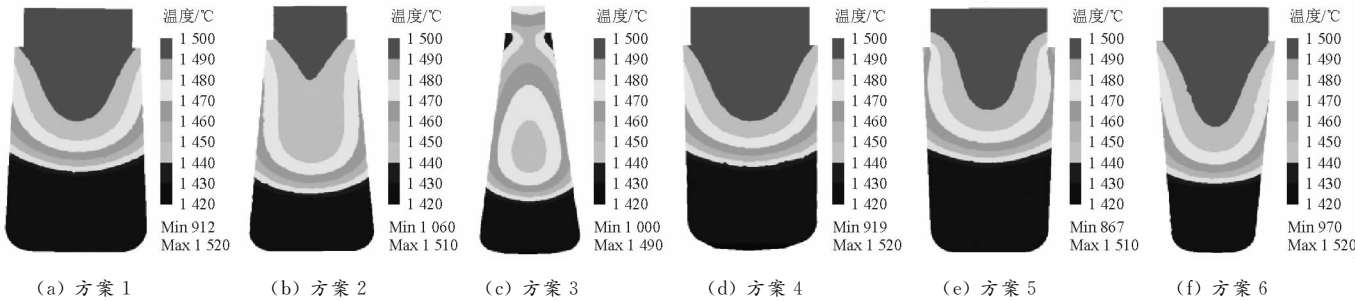


图4 不同锥度带模凝固后温度场分布

Fig.4 Distribution of temperature field after solidification with mold under different tapers

随锥度变化的曲线,见图5。从图5a可以看出,负锥度条件下,锥度的改变对钢锭固相区大小影响不明显,液相区随锥度的增大而减少。当锥度为-3.93%时固液两相区形状宽深度小,有利于钢水的补缩,锥度大时固液两相区形状窄深度大,不利于冒口钢水对其补缩。当钢锭锥度达到-12.27%时,即钢锭呈细长状,在其凝固过程中冒口附近出现了卡脖子现象,容易将液相区封锁在钢锭芯部,导致后续生产中发生漏钢事故。但钢锭冷却速度大,液芯率只有1.23%,固液两相区达到51.89%。在实际生产中应尽量避免使用锥度超过-10%的钢锭,如果采用大锥度钢锭生产,同时为了获得更多的液相区,在生产中只能缩短这种锭型的凝固时间。从图5b可以看出,在正锥度条件下,当锥度增大时,钢锭固相区减少,液相区随锥度的增大先减少后增加。当锥度为3.93%时获得的液相区最小,为21.58%,固液两相区占比随着锥度的增加而增加。当锥度为8.74%时,钢锭固相区、液相区、固液两相区占比相当,

本课题还研究了相同质量下含有一定液芯率的方锭制备过程,其具体尺寸见表4,有限元模型见图3b。

表4 13 t方锭的尺寸

Tab.4 The dimension of square ingot with 13 t			
冒口端边长/mm	水口端边长/mm	高度/mm	本体高度/mm
1 000	843	1 800	1 500

2 模拟结果与分析

2.1 带模凝固温度场分布

将熔炼完的钢水浇入锭模,凝固后得到6种锥度的梅花锭温度场分布见图4。可以看出,在6种锥度锭型设计方案中,钢水凝固过程的趋势基本一致,轴向温度由钢锭底部向顶部不断升高,径向上温度则是从钢锭模侧壁向中心不断升高。比较钢锭轴向和径向的散热速度,钢锭在凝固过程中的散热以侧壁为主,通过钢锭底部的散热则相对较弱;钢锭凝固后,其凝固过程温度场等温线分布情况呈U形分布。

带模凝固后得到固相区、液相区、固液两相区占比

分别为32.26%、35.03%、32.71%。

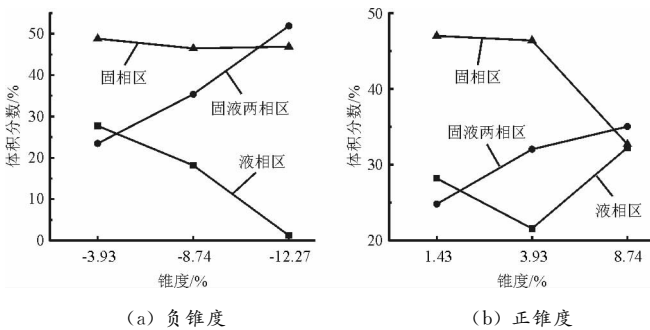


图5 负锥度和正锥度固、液相体积分数

Fig.5 Proportion of solid regions and liquid regions under negative taper and positive taper

将熔炼完成的钢液浇入扁锭模凝固,由于扁锭表面积大于梅花锭,其散热速度明显高于梅花锭,精确控制扁锭模带模凝固过程很重要,扁锭带模完全凝固后的温度模拟见图6a。为了制备含有一定液芯率的扁锭,将带模凝固时间减少35%,其温度场分布见图6b。钢锭

固相区、液相区、固液两相区占比相当,分别为 34.67%、31.99%、33.35%。其凝固过程温度场等温线分布也和梅花锭分布情况一样呈 U 形分布,高度方向上温度由钢锭底部向顶部不断升高,厚度方向上温度则是从钢锭模侧壁向中心不断升高。比较扁锭高度方向和厚度方向散热速度,发现钢锭在凝固过程中的散热以钢锭侧壁为主,通过钢锭底部的散热则相对较弱。

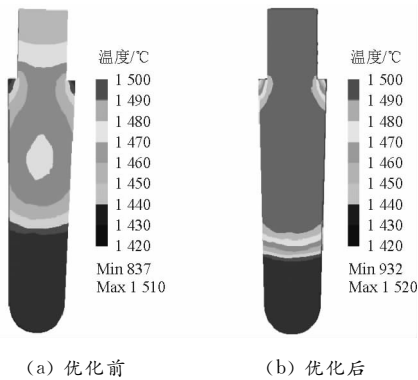


图 6 扁锭带模凝固后温度场分布

Fig.6 The temperature field distribution of flat ingots after solidification with mold

将熔炼完的钢水浇入方锭完全凝固后,钢锭固相区、液相区、固液两相区占比分别为 26.06%、30.90%、

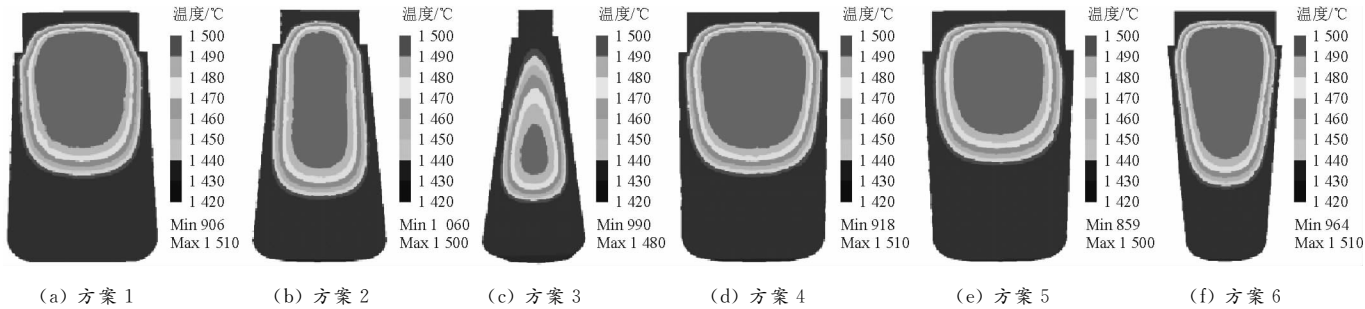


图 8 不同锥度超高温脱模冷却后温度场分布

Fig.8 Distributions of temperature field after ultra-high temperature demoulding under different tapers

表 5 为不同梅花锭在超高温脱模后液相区、固液两相区、固相区占比。可以看出超高温脱模后,对于上小下大的锭型,液相区和固液两相区的大小随着锥度的增长其区域面积减少。对于锥度为-12.27%的钢锭,芯部完全没有液相,采用该锥度锭型进行生产一定要减少

表 5 不同梅花锭在超高温脱模后液相区、固液两相区、固相区占比

Tab.5 Proportion of each district of various octagonal ingots after the ultra-high temperature demoulding			
锥度 / %	液相区 / %	固液两相区 / %	固相区 / %
-3.93	3.23	23.42	73.35
-8.74	1.76	22.17	76.07
-12.27	0	14.58	85.42
1.43	4.37	23.52	72.11
3.93	2.84	17.92	79.25
8.74	5.97	29.42	64.60

43.04%。其凝固过程温度场等温线分布也呈“U”形分布,见图 7。可以看出,高度方向上温度由钢锭底部向钢锭顶部不断升高,宽度方向上温度则是从钢锭模侧壁向钢锭中心不断升高。比较方锭高度方向和宽度方向散热速率,发现钢锭在凝固过程中的散热和扁锭相类似。

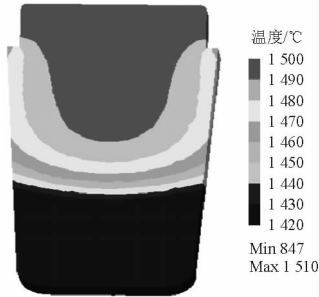


图 7 方锭带模凝固后温度场分布

Fig.7 The temperature field distribution of square ingots after solidification with mold

2.2 超高温脱模温度场分布

将方案 1~6 中具有一定液芯率的不同锥度梅花锭,进行超高温脱模后,不同锥度下的温度场分布见图 8。其中深色部分表示温度在固相线温度以下,钢锭完全凝固。

钢锭带模冷却时间及超高温脱模时间。对于上大下小的锭型,液相区和固液两相区大小随着锥度的变化规律不明显。

不同铸锭的温度场分布见图 9。将缩短凝固时间后的扁锭冒口经过超高温脱模后,温度场分布见图 9a,图 9b 为经过相同冷却工艺的梅花锭温度场分布。其中深色部分表示钢锭完全凝固。可以看出,在冷却速度相同的情况下,相同质量的扁锭还没有完全凝固,因此需要相应增加扁锭的冷却时间。图 9c 中扁锭液相区、固液两相区、固相区分别占 0.16%、17.81%、82.03%。

超高温脱模后得到的方锭温度场分布见图 10,方锭坯壳已经完全凝固,与梅花锭凝固效果相同。此时方锭液相区占 2.93%、固液两相区占 19.34%、固相区占 77.73%。

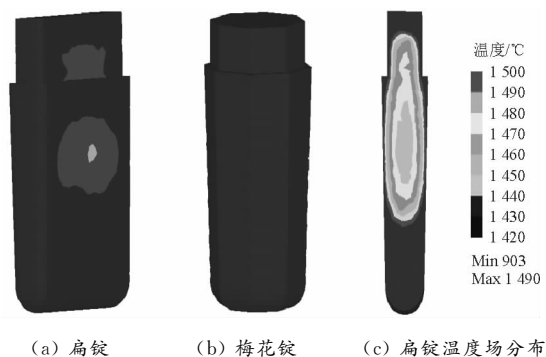


图 9 温度场分布比较

Fig.9 Comparison of temperature field distribution of different ingots

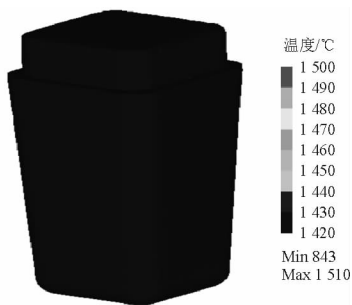


图 10 起高温脱模后方锭表面温度场分布

Fig.10 The distribution of the temperature field on the shell surface after ultra-high temperature demoulding

3 结 论

(1)通过对不同锥度相同质量的梅花锭进行数值模拟,可以得到当钢锭采用上小下大锭型时细长锭有利于液芯在芯部形成,但不利于冒口处钢水补缩,在实际生产时应采用锥度小于-10%的钢锭。

(2)采用相同冷却工艺制备含有一定液芯率的钢锭,当钢锭采用上小下大梅花锭时,液芯区占比随锥度的增加而减少;当钢锭采用上大下小梅花锭时,液芯区规律不明显。

(3)通过对相同质量的扁锭进行数值模拟,可以得到扁锭在制备液芯钢锭时需要缩短带模凝固时间和延长超高温脱模等待时间才能保证坯壳完全凝固并得到一定液芯率。

参 考 文 献

[1] 付强.大型轴类锻件锻造过程的数值模拟研究[D].上海:上海交通大学,2008.

[2] 郑会赛.大型船用曲轴曲拐锻造新工艺及工装研究[D].河北秦皇岛:燕山大学,2012.

[3] 刘助柏,倪利勇,张勇军,等.大型轴类锻件的特殊锻造法[J].中国机械工程,2006,17(8):877-879.

[4] 李军,夏明许,胡侨丹,等.大型铸锭均质化问题及其新解[J].金属学报,2018,54(5):773-788.

[5] 王开坤.甘肃省材料加工行业现状及思考[R].情系陇原——第15批博士服务团挂职成果[M].中共甘肃省委组织部,2015.

[6] 王开坤,付文,胡志强.一种大型金属构件高均匀性短流程成形方法,中国:CN201711262274.8[P].2017-12-04.

[7] 杨薇,赵俊学,宋书雅,等.大型钢锭充型和凝固过程的数值模拟[J].特种铸造及有色合金,2014,34(2):149-152.

[8] 张雪健,彭兴东,李静,等.锭重兼容式锭型设计对钢锭凝固质量影响的模拟[J].特种铸造及有色合金,2016,36(4):365-368.

[9] 程琪,万乐,于晓华,等.模铸法制备 GCr15 扁锭模拟与微观组织研究[J].特种铸造及有色合金,2017,37(8):834-837.

[10] 林新波. DEFORM-2D 和 DEFORM-3D CAE 软件在模拟金属塑性变形过程中的应用[J].模具技术,2000(3):75-80.

[11] 董洁.锻造用钢锭凝固过程温度场、应力场的数值模拟及其应用[D].西安:西安建筑科技大学,2005.

[12] 王生朝,孙斌.预硬化塑料模具钢 718 厚板的开发[J].特殊钢,2010,31(5):49-50.

[13] 臧喜民,邓鑫,李万明,等.抽锭电渣重熔 718 塑料模具钢板坯锭的新工艺[J].材料与冶金学报,2016,15(1):39-42.

[14] 何燕霖,高雯,李麟,等.热处理对 718 塑料模具钢加工性能的影响[J].金属热处理,2004,29(3):20-23.

[15] 徐亚东,沈原发,雷丙旺,等.基于凝固模拟的钢锭模锥度设计与验证[J].铸造,2014,63(3):249-251.

[16] 马忠存,王刘艳.5.55 t 双锥度方型钢锭模设计[J].大型铸锻件,2010(3):32-33.

[17] 邓向阳,邹文喜,刘绍康,等.50~100 t 真空浇注钢锭模的设计[J].大型铸锻件,2010(6):24-25.

[18] 胡林,李胜利,胡小东,等.钢锭设计原理[M].北京:冶金工业出版社,2015.

(编辑:刘晨辉)

新疆众和拟配股加码超高纯铝基 溅射靶坯等项目

据悉,新疆众和此前推出了配股方案,拟募投资向年产500 t 超高纯铝基溅射靶坯等项目,从而实现靶材原材料的批量供给。

据了解,超高纯铝靶坯是微电子行业的重要原材料,广泛应用于半导体芯片、平面显示器、太阳能电池等领域。作为国内一家可以规模生产超高纯铝基溅射靶材坯料公司,新疆众和投建此项目可谓契合行业热点,紧抓市场需求,有望提升公司的整体竞争实力。

随着微电子等高科技产业的高速发展,我国靶材市场日益扩大,超高纯铝基靶材靶坯的市场需求也在不断增长。目前,我国年进口芯片金额已超过原油,为第一大进口大宗商品,国内客户迫切希望溅射靶材能够尽快实现国产化。公司年产500 t 超高纯铝基溅射靶坯项目的实施,有助于国内芯片产业的进口替代。

目前,新疆众和超高纯铝基溅射靶材坯料、键合丝等产品实现了向有研亿金新材料有限公司、贺利氏(招远)贵金属材料有限公司等的批量供应,具备扩大生产规模的市场、技术条件。

(摘自上海证券报)