

ZL205A 合金凝固过程本构模型及其在筒形件中的应用

王明杰<sup>1,2</sup> 张建兵<sup>2</sup> 吴士平<sup>1</sup> 黄西西<sup>1</sup> 戴贵鑫<sup>1</sup> 张晓东<sup>1</sup> 慕岩<sup>1</sup> 史玉童<sup>1</sup>  
(1.哈尔滨工业大学材料科学与工程学院; 2.首都航天机械有限公司)

**摘 要** ZL205A 合金在凝固过程中极易产生热裂缺陷,由于其高温阶段本构模型的缺失,使铸件热裂的预测十分困难。借助 ProCAST 软件研究了适用于 ZL205A 合金的线弹性、弹塑性及粘弹塑性本构模型,在此基础上与热裂实际浇注试验进行对比分析,发现粘弹塑性本构模型更适合于 ZL205A 合金。将该模型应用于大型薄壁筒形件中,结果发现,应力主要集中在法兰与薄壁的交界处,当筋高由 19 mm 增加至 48 mm 时,能够有效地改善筒形件的变形情况。

**关键词** ZL205A 合金;粘弹塑性本构模型;薄壁筒形件

**中图分类号** TG21<sup>+</sup>3;TG245 **文献标志码** A

**DOI**:10.15980/j.tzzz.2021.05.010

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Constitutive Model of ZL205A Alloy During Solidification and Its Application  
in Cylindrical Component

Wang Mingjie<sup>1,2</sup>, Zhang Jianbing<sup>2</sup>, Wu Shiping<sup>1</sup>, Huang Xixi<sup>1</sup>, Dai Guixin<sup>1</sup>,  
Zhang Xiaodong<sup>1</sup>, Mu Yan<sup>1</sup>, Shi Yutong<sup>1</sup>

(1.School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology;  
2.Shoudu Space Machinery Company)

**Abstract:** The hot cracking occur easily in ZL205A alloy during solidification process. However, the lack of constitutive model in the high temperature makes it considerably difficult to predict hot cracking. The linear elastic, elasto-plastic and elasto-visco-plastic constitutive models which are suitable for the mushy alloy of ZL205A was evaluated by the simulation of ProCAST software, which was compared with the actual pouring test of hot crack on this basis. The results indicate that the elasto-visco-plastic constitutive model is more suitable for the mushy alloy of ZL205A, and the stress is mainly concentrated at the intersection of the flange and the thin-wall of large-sized thin-wall cylindrical component with the constitutive model. The deformation of cylindrical component is effectively improved when the height of tiepiece is increased from 19 mm to 48 mm.

**Key Words:** ZL205A Alloy, Visco-elasto-plastic Constitutive Model, Thin-wall Cylindrical Component

ZL205A 合金作为 Al-Cu 系高强铸造铝合金,由于其优异的性能,被广泛应用于航空航天、汽车工业、船舶装甲等诸多领域<sup>[1,2]</sup>。但其较宽的结晶温度范围和糊状凝固特性,使其极易在凝固过程中产生诸多缺陷,尤以热裂最为严重和难以预测<sup>[3,4]</sup>。而其在高温阶段应力-应变本构模型的缺失,给凝固过程中的应力控制和预测带来了相当大的挑战<sup>[5,6]</sup>。

材料的本构模型被用来表征材料基本力学性质,是描述材料应力-应变关系的方程组<sup>[7]</sup>。一般情况下,金属材料常被视为弹性体,用简单的线性关系本构模型来表征材料的力学行为<sup>[8]</sup>,但研究结果表明,高温阶段的

本构模型并不再是简单的线性关系<sup>[9~15]</sup>。JI C 等<sup>[16]</sup>基于物理方法修改了基于非线性的 Arrhenius 本构方程,使其更准确地预测高温高压下 GCr15 轴承钢的变形规律。

铸造成形涉及固液转变过程,特别是在固液共存区,合金表现出一种特殊的力学行为<sup>[9]</sup>。MOTOYAMA Y 等<sup>[17]</sup>将弹塑性蠕变模型应用于 ADC12 铝合金铸造过程中,发现其预测铸件中的残余应力的分布与实际情况非常接近,但该本构模型只适用于具有单轴热应力状态的简单铸件。近年来,铸造流变学的出现为解决糊状合金在凝固过程中的应力预测问

收稿日期:2020-10-20;修改稿收到日期:2021-01-12  
基金项目:国家自然科学基金资助项目(52075123)  
第一作者简介:王明杰,男,1995 年出生,硕士研究生,哈尔滨(150001),E-mail:mingjie\_12138@163.com  
通信作者:吴士平,男,1963 年出生,教授,哈尔滨(150001),E-mail:wushiping\_group@163.com  
引用格式:王明杰,张建兵,吴士平,等. ZL205A 合金凝固过程本构模型及其在筒形件中的应用[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(5): 570-574.  
WANG M J, ZHANG J B, WU S P, et al. Constitutive model of ZL205A alloy during solidification and its application in cylindrical component[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(5):570-574.

题,提供了一种全新的思路,使得凝固过程固液两相区的力学行为研究得到快速发展<sup>[9]</sup>。LI Q C<sup>[18]</sup>和程建国等<sup>[19]</sup>采用铸造流变学的相关原理,研究了 ZG35 等铸钢和部分铝合金的流变性能,发现固液两相区的性质可以采用五元件模型来表示。康进武等<sup>[20]</sup>采用五元件本构模型计算了 25 号钢凝固过程中的应力变化,发现热裂的产生与宾汉体的临界应变值有关。

ZL205A 作为热裂倾向最为严重的合金之一,关于其本构关系的研究并不充分,其热裂的预测和控制难以进行。本课题以 3 种基本的应力-应变本构模型为基础,针对 ZL205A 合金在凝固过程中特殊的力学条件,借助 ProCAST 软件将 3 种本构模型应用于热裂分析,并与实际浇注试验进行对比分析,确定最适用于 ZL205A 合金凝固过程的本构模型。随后将该本构模型应用于大型薄壁筒形件中,以改善筒形件在凝固过程中的应力和变形情况,为后续糊状合金薄壁类铸件变形控制提供参考,同时对提高铸造应力场模拟精度和实用化程度具有积极意义。

1 试验方法及力学参数

1.1 试验材料及方案

ZL205A 合金的化学成分见表 1<sup>[21,22]</sup>。利用 Pro-CAST 软件将 3 种应力-应变本构模型用于计算热裂模型在凝固过程中的应力变化。热裂试验采用铸造合金熔体凝固特性分析仪完成<sup>[23]</sup>。

表 1 ZL205A 合金的化学成分

| Tab.1 Chemical composition of ZL205A alloy % |         |           |           |            |           |          |    |
|----------------------------------------------|---------|-----------|-----------|------------|-----------|----------|----|
| wt%                                          |         |           |           |            |           |          |    |
| Cu                                           | Mn      | Ti        | Zr        | B          | Cd        | V        | Al |
| 4.6~5.3                                      | 0.3~0.5 | 0.15~0.35 | 0.05~0.20 | 0.005~0.06 | 0.15~0.25 | 0.05~0.3 | 余量 |

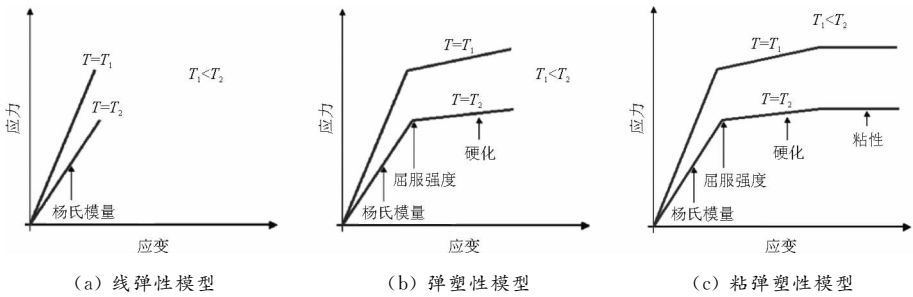


图 2 应力-应变本构模型曲线示意图<sup>[25]</sup>

Fig.2 Curve diagram of the stress-strain constitutive model

等,见图 2c<sup>[25]</sup>。

1.3 ZL205A 合金的力学性能参数

为描述准确的本构模型,需要更为精准的力学性能参数。3 种本构模型相关的力学性能参数有弹性模量、屈服强度、硬化系数、粘度  $\eta$  和粘性指数  $n$ 。其中弹性

1.2 应力-应变本构模型

图 1 为不同温度下 ZL205A 合金的拉伸曲线(拉伸速率为 2 mm/min)。可以看出,当变形温度较低时,ZL205A 合金仅表现出了弹塑性变形。随着变形温度不断升高,ZL205A 合金出现了第 3 个阶段,此时随着应变的不断增加,应力不再发生变化,这是典型的粘性特征。因此,高温下的 ZL205A 合金仅用弹塑性本构模型,并不能准确地表达应力-应变本构关系<sup>[24]</sup>。故将 3 种普适的本构模型:线弹性、弹塑性和粘弹塑性模型进行对比验证,分析其在 ZL205A 合金凝固过程中的优劣。

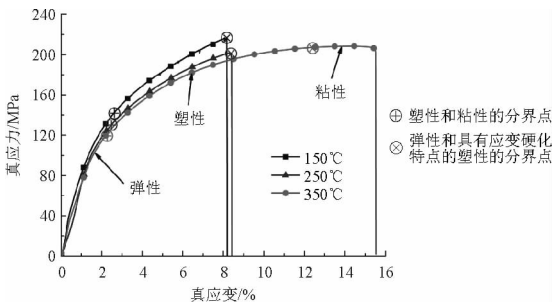


图 1 ZL205A 合金在不同温度下的拉伸曲线<sup>[24]</sup>

Fig.1 The tensile curves of ZL205A alloy at different temperatures

在 ProCAST 软件中应力-应变模型主要为线弹性模型、弹塑性模型和粘弹塑性模型,应力-应变曲线见图 2。线弹性模型认为材料完全是弹性体,应力-应变为线性关系,见图 2a,主要的力学参数为弹性模量、热膨胀系数和泊松比。弹塑性模型在线弹性模型的基础上,认为当应力超过一定值后,材料表现为塑性,见图 2b,要描述弹塑性模型需要了解屈服应力的临界值和硬化系数。而粘弹塑性考虑了固液转变过程中流体的力学性质,将其看做粘性体,表现为粘塑性,类似于橡胶、沥青

模量和硬化系数分别为弹性阶段和塑性阶段的斜率,而屈服强度是弹性阶段和塑性阶段的转折点。粘度和粘性指数的计算方法相对较为复杂,需要根据应力-应变曲线计算 $(\sigma-\sigma_y)/\sigma$  和  $d\epsilon/dt$  的对数曲线,在经历过渡阶段后,曲线趋于稳定值。在相同的温度下,不同应变

速率对应的每条应力-应变曲线都对应一个点,以  $\lg[(\sigma-\sigma_y)/\sigma^*]$  为横坐标、以  $\lg[de/dt]$  为纵坐标绘制并将其连成一条直线,纵截距即为  $\lg(1/\eta)$ ,斜率即为  $n^{[25]}$ 。

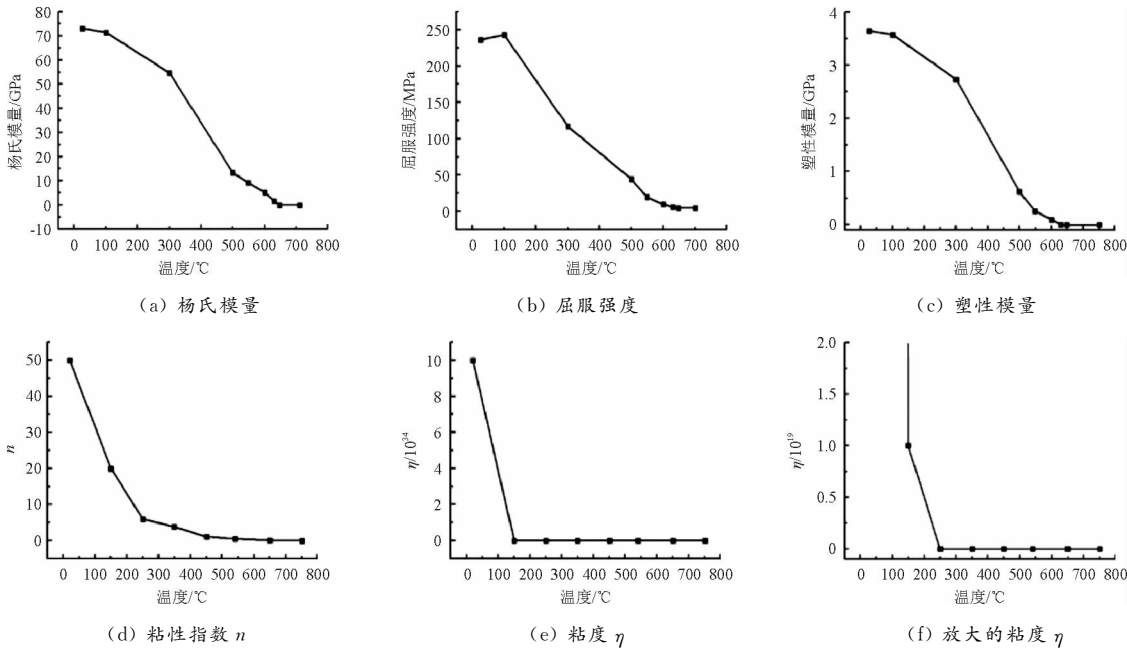


图 3 ZL205A 合金的力学性能参数

Fig.3 Mechanical property parameters of ZL205A alloy

2 结果分析与讨论

2.1 热裂模型验证 ZL205A 糊状合金本构模型

由于 ZL205A 糊状合金热裂倾向非常大,热裂发生的非常迅速,普通的热裂试样并不能准确测量其应力值。ProCAST 中并不能对热裂试样两侧进行约束,导致试样向内收缩过多,应力值存在偏差。因此,对现阶段热裂试样进行改进,图 4 为改进前后的热裂试样。将圆台长度由 7.5 mm 变为 60 mm,减缓热裂缺陷的发生。同时在细杆和粗杆的两端施加固定的圆环和冷铁,以获取准确的应力值,避免散热和潜热对试验结果的影响。

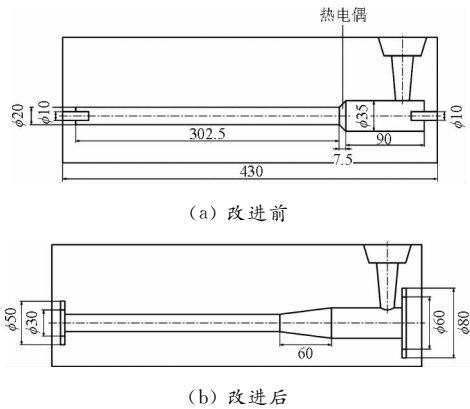


图 4 改进前后的热裂试样

Fig.4 Hot cracking specimens before and after modification

为准确获取上述各参数的数值,将 ZL205A 合金铸锭加工成标准的拉伸试样,分别在不同温度和应变速率下进行拉伸试验,再计算得到 ZL205A 合金的力学参数,见图 3。

响。

图 5 为 3 种本构模型计算热裂试样应力随时间的变化曲线与实际测量值的对比。可以看出,相较于弹塑性和粘弹塑性本构模型,线弹性本构模型与实际测量值相差最大,且曲线落差较大,严重偏离实际测量结果。而弹塑性和粘弹塑性本构模型整体并无明显区别,但从图 5b 中可以看出,在细节部位,粘弹塑性本构模型的计算结果要低于弹塑性本构模型的计算结果,即粘弹塑性本构模型计算结果好于弹塑性本构模型。但与实际情况相比,粘弹塑性和弹塑性本构模型在计算热裂发生的时间都要稍早于实际情况。分析原因在于实际情况中只有形成晶间搭桥结构才会产生相对于传感器的压力,

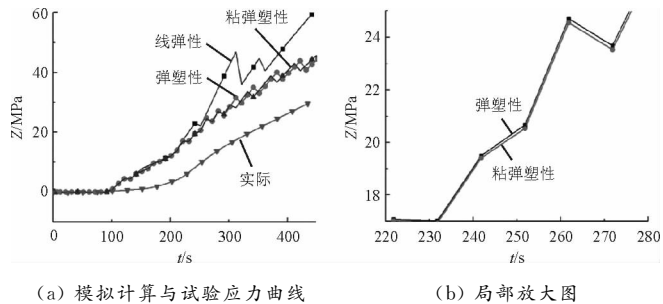


图 5 3 种本构模型计算和实际测量热裂试样的应力随时间变化曲线

Fig.5 Variation curves of calculated and actual stress of three constitutive models with time

而模拟的过程中出现固相即会引发局部应力,这使得模拟计算热裂产生的时间要早于实际情况。

2.2 粘弹塑性本构模型在筒形件中的应用

结合 ProCAST 软件中对热裂模型的计算结果和实际测量 ZL205A 合金凝固过程中应力随时间变化结果,发现粘弹塑性本构模型在描述 ZL205A 糊状合金在凝固过程中的力学行为方面要优于线弹性和弹塑性本构模型。因此,将粘弹塑性本构模型应用于大型薄壁筒形件中,并计算其在低压铸造凝固过程中应力场和铸件的变形情况。采用 ProCAST 软件对其进行网格剖分和边界条件设置,由于其为对称结构,为提高计算效率,仅取其 1/4 进行模拟计算。

图 6 为大型薄壁筒形件应力分布及 10 倍变形结果示意图。可以看出,筒形件中应力在重力方向上存在一个梯度变化,筒形件顶端应力最大,底部应力最小。这是因为铸件在凝固初期,温度梯度相对较大,筒形件自上而下开始凝固,导致筒形件顶部应力相对较大。除此之外,应力集中主要存在于拉筋、法兰与薄壁的交界处,尤其是法兰与薄壁的交界处,铸造应力并不会通过后期加工而消失。从图 6b 可见,铸件由中部向外凸,上下两部向内收,法兰向外张开,这与实际生产过程中的变形情况保持一致。

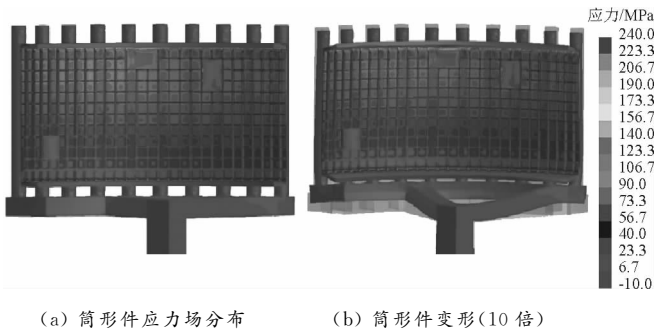


图 6 大型薄壁筒形件应力场和变形示意图  
Fig.6 The stress field distribution diagram of the cylindrical and deformation

为将法兰与薄壁之间的应力集中进行量化,见图 7,选取 A 点为左侧法兰与薄壁交界处内部的点, B 点

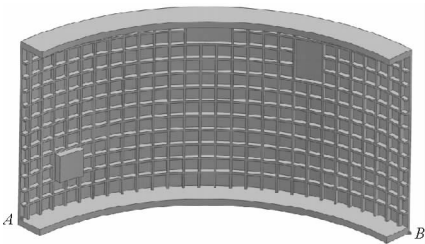


图 7 大型薄壁筒形件取样点示意图  
Fig.7 Schematic diagram of sampling point in cylindrical components

为右侧法兰和薄壁交界处外侧的点,分析其在不同筋高下 A、B 两点的变形曲线,以明确筒形件内部结构对铸件应力场的影响,优化筒形件内部结构,避免应力的集中产生。

图 8 为不同筋高下大型薄壁筒形件 A、B 两点位移量随时间变化的示意图。可以看出,法兰与薄壁交界内外两侧,位移变形量均控制在 1.5~2.5 mm 之间,相较于筒形件的直径而言,该变形量在允许的范围之内。但随着筋高增加,筒形件 A、B 两点最终的变形量逐渐降低,当筋高为 48 mm 时,筒形件在 8 000 s 时的变形量较筋高为 19 mm 时降低了约 1/4,这表明增加筒形件的筋高,能够有效改善薄壁筒形件的变形。

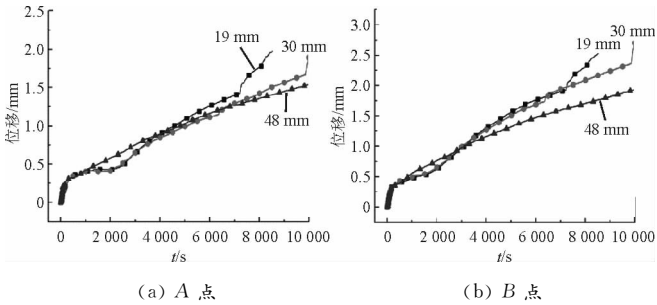


图 8 不同筋高大型薄壁筒形件 A、B 点的位移曲线  
Fig.8 Displacement curves of point A and B at the different height of the tiepiece

3 试验验证

为改善筒形件的变形问题,根据粘弹塑性本构模型的模拟结果,将筒形件的筋高调整到 48 mm,可以有效改善筒形件的变形。筒形件在实际生产过程中各部位的变形情况见表 2,筒形件的实际生产结果见图 9。可以看出,实际结果与模拟结果在误差允许的范围保持一一致,表明粘弹塑性本构模型在预测 ZL205A 合金铸件在凝固过程中应力及变形情况具有较高的可信度。

表 2 实际生产筒形件变形情况

| Tab.2 The actual deformation of cylindrical component % |       |       |
|---------------------------------------------------------|-------|-------|
| 筒形件尺寸类型                                                 | 实测变形量 | 模拟变形量 |
| 内径                                                      | 0.09  | 0.15  |
| 外径                                                      | 0.10  | 0.19  |



图 9 实际生产筒形件  
Fig.9 The actual production of cylindrical component

## 4 结 论

(1)结合热裂模型的数值模拟和实际浇注 ZL205A 合金试验表明,粘弹塑性本构模型比弹性模型和弹塑性模型更加适合 ZL205A 合金铸件凝固过程的变形计算。

(2)大型薄壁筒形件在凝固过程中应力集中部位主要在法兰和薄壁的交界处,通过调整筒形件的筋高,筒形件法兰与薄壁交界处的变形量得到有效改善,进而可以实现筒形件的变形控制。

### 参 考 文 献

- [1] WANG R J, WU S P, CHEN W. Effect of vibration on seepage feeding during low-pressure casting of ZL205A alloy[J]. China Foundry, 2019, 16(1): 40-45.
- [2] 李玉胜, 翟虎, 闫卫平, 等. ZL205A 合金壳体铸件线性偏析缺陷形成机理研究[J]. 铸造, 2006, 37(11): 1 170-1 173.
- [3] 王晔. ZL205A 筒形件低压铸造宏观偏析形成机制及补缩行为[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [4] 张海珍. ZL205A 高强度铝铜合金铸造性能及工艺技术研究[D]. 太原: 中北大学, 2010.
- [5] 武永红, 李永堂, 付建华, 等. 铸件热裂纹研究进展[J]. 中国铸造装备与技术, 2015(6): 7-13.
- [6] 蔡庆, 张晓波, 张亦杰, 等. 基于 ProCAST 数值模拟 ZL205A 热裂行为的研究[J]. 铸造技术, 2015, 36(6): 1 503-1 506.
- [7] 袁龙蔚. 流变力学[M]. 北京: 科学出版社, 1986.
- [8] 周光泉. 粘弹性理论[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1996.
- [9] 林柏年. 铸造流变学[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1991.
- [10] BEHBAHANI H, ZIARI H, KAMBOOZIA N. Evaluation of the visco-elasto-plastic behavior of glassphalt mixtures through generalized and classic Burger's models modification[J]. Construction and Building Materials, 2016, 118: 36-42.
- [11] ARABANI M, KAMBOOZIA N. New achievements in visco-elastoplastic constitutive model and temperature sensitivity of glassphalt[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2014, 15(9): 810-830.
- [12] ZHU H, SUN L. A viscoelastic-viscoplastic damage constitutive model for asphalt mixtures based on thermodynamics[J]. International Journal of Plasticity, 2013, 40: 81-100.
- [13] 吴道祥, 梁强, 王敬. 2024A 铝合金高温流变行为及本构关系研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2020, 40(3): 233-238.
- [14] 陈军, 纪兴华, 吕昕晖, 等. AZ80 镁合金热变形本构模型及动态再结晶行为研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2019, 39(10): 1 045-1 049.
- [15] 胡传凯, 陈强, 舒大禹, 等. 镁合金 Mg-Zn-Y-Zr 的高温变形及本构方程[J]. 特种铸造及有色合金, 2012, 32(3): 220-223.
- [16] JI C, WANG Z L, WU C H, et al. Constitutive modeling of the flow stress of GCr15 continuous casting bloom in the heavy reduction process[J]. Metallurgical And Materials Transactions, 2018, B49(2): 767-782.
- [17] MOTOYAMA Y, EBIHARA N, SHIGA H, et al. Thermal stress analysis of residual stress in a cylindrical aluminum casting

with cast-in GCI liner, taking recovery behavior effect into account[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2018, A49(11): 5 619-5 635.

- [18] LI Q C. Rheological behavior in solid-liquid coexistence zone and simulation of stress-strain and hot cracking of Al-Cu alloy during solidification[J]. Transactions of the American Foundrymen's Society, 1991, 85: 245-253.
- [19] 程建国, 康进武, 张家锋, 等. 从凝固过程的位移数值模拟结果中提取铸件的变形[J]. 铸造技术, 2008, 29(10): 1 322-1 326.
- [20] 康进武, 熊守美, 柳百成, 等. 基于流变学模型的铸钢试件凝固过程应力应变数值模拟[J]. 铸造技术, 1998(6): 20-22.
- [21] 袁成祺. 铸造铝合金镁合金标准手册[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1994.
- [22] 贾洋江, 陈邦峰. ZL205A 高强铸造铝合金的性能及应用[J]. 轻合金加工技术, 2009, 37(11): 10-12.
- [23] 王艳. 铜含量对 Al-Cu 合金凝固特性的影响[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2015.
- [24] 王汝佳, 吴士平, 陈伟. 一种拉伸剪切流变仪及利用拉伸剪切流变仪测试合金固液两相区流变学特性的方法: 中国, CN201611123980.X[P]. 2017-04-26.
- [25] 李日, 马军贤, 崔启玉. 铸造工艺仿真——ProCAST 从入门到精通[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.

(编辑: 栗万仲)

## 重庆大学与广东国研签订“固态镁基储氢材料开发与应用”项目合作协议

4月10日,重庆大学与广东省国研科技研究中心有限公司“固态镁基储氢材料及技术开发与应用”重大合作项目签约仪式在重庆大学举行。

根据合同约定,广东省国研科技研究中心有限公司将在5年内投入5亿元开展固态镁基储氢材料及技术的研发与产业化合作,其中,本次签约的“固态镁基储氢材料及技术开发与应用”的研发计划投入1.5亿元,同时,该项目还为重庆大学启动镁电池的研究和开发工作提供资金支持。

高效安全的储能技术是全球新能源开发与应用的重大技术瓶颈。氢能的安全高效储存和运输对国家氢能战略意义重大,特别是对燃料电池汽车、风能光能产业、电力行业、航空航天等领域有重要的直接应用价值。镁基储氢材料是金属固态储氢材料中储氢密度最高的材料,市场前景巨大,一旦大规模应用将根本上改变传统储能模式中效率低、成本高、安全性差等问题。该项目的合作启动对重庆大学学科发展和我国氢能产业发展具有重大意义。

(摘自中国有色网)