

文章编号: 1004 - 0609(2004)09 - 1539 - 06

半固态扩展挤压 A2017 合金过程中 金属流动的有限元分析^①

管仁国, 李英龙, 王顺成, 刘相华, 温景林

(东北大学 材料与冶金学院, 沈阳 110004)

摘 要: 应用有限元方法分析了半固态扩展挤压 A2017 合金过程中金属的流动规律。分析表明: 从中心区域向两边侧壁, 合金速度逐渐减少, 有时在从中心向两边侧壁的中间区域出现涡流过渡区; 不存在台阶 θ 时, 涡流区 θ 较小; 倾角越大, 涡流区域越小, 且死区较小; 定径带出口越宽, 出口流速越小, 涡流区越小, 死区也越小。设计无台阶且较小的倾角的扩展挤压模较为合理, 在定径带断面的长向与宽向上, 尺寸应尽量相等。

关键词: 半固态; 扩展挤压; A2017 合金; 有限元模拟; 流动; 成形

中图分类号: TG 111.4; TG 244.1

文献标识码: A

Finite element modelling analysis of metal flowing during process of extending extruding semisolid A2017 alloy

GUAN Ren-guo, LI Ying-long, WANG Shun-cheng, LIU Xiang-hua, WEN Jing-lin

(Material & Metallurgy School, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

Abstract: Finite element modelling method was adopted to analysis rule of metal flowing during the process of semisolid extending extrusion A2017 alloy. The results show that alloy velocity decreases gradually from the center to sides of mould wall. In the middle of the way from the center to the side of the mould, sometime, there is a transitional turbulence zone. Without step α , turbulence zone is smaller. When θ is larger, both the turbulence zone and die zone are smaller. When the exit is wide, the velocity, the turbulence zone and the die zone are smaller. Designing a mould with smaller θ and without step α is desirable. Two sides of forming zone of negative mould should be equal as possible.

Key words: semisolid; extending extrusion; A2017 alloy; finite element modelling; flow; forming

半固态加工技术是一种高效节能的近终形新技术, 从 20 世纪 70 年代以来, 就引起了世界各国的重视, 且已相继投资开展了大量的研究工作, 其应用已扩展到交通、机械、电器制造业^[1~9]。传统的半固态加工技术主要以半固态触变成形为主, 其工艺流程包括半固态制备、二次加热和半固态成形 3 个技术环节。将 3 个技术环节紧密结合起来, 以实现半固态连续成形是许多研究人员努力的方向之一。日本 Kiuchi 等^[10]首先提出单辊搅拌技术, 该技术

利用一个冷却/转动轧辊来制备半固态金属, 利用这种技术设备特点, 结合扩展挤压技术的模具结构设计, 可以实现二者的有机结合, 从而实现半固态金属扩展挤压成形。经过多年探索, 该技术具有很高的工业应用价值, 其特点是: 1) 实现半固态制浆与成形的一体化与连续化, 省缺了难于控制的铸造和二次加热等繁杂工序, 大大地节约了能耗, 降低了成本, 提高了成材率^[11~13]; 2) 半固态充模易于填充, 进行半固态扩展成形使产品组织性能好^[14]; 3)

① 基金项目: 国家自然科学基金和上海宝钢集团公司联合资助项目(50274020); 国家重点基础研究发展规划项目(G2000067208-4)
收稿日期: 2003-11-04; 修订日期: 2004-05-12
作者简介: 管仁国(1975-), 男, 副教授, 博士。
通讯作者: 管仁国, 电话: 024-83686459; E-mail: guanrenguo2004@hotmail.com

可生产铝合金大断面棒型材与大口径的管材。直径为 20 cm 以上的大口径导电管是超高压 22、50 万伏输电所需要的材料。目前,国内采用空心锭轧制-拉拔的生产方法,产品材料表面质量差,长度有限(仅为 9 m),而实际需要的材料每根为 27 m 长,因此,安装时必须进行焊接,但焊接又影响导电性能。而国外采用万吨超大型挤压机生产,生产价格昂贵,每吨约 12 万元。而采用半固态扩展成形的方法生产大口径管材,产品质量好,生产长度不受限制,且高效、节能,投资小、见效快。因此,研究半固态扩展挤压具有重要的理论意义与应用价值。本文作者根据自行设计的半固态扩展成形实验机,应用有限元方法分析了扩展挤压成形过程中的金属流动规律,为进一步的实验设计作指导。

1 基本原理与假设

半固态扩展挤压如图 1 所示,即半固态合金通过较小的充模口填充到扩展腔(焊合室),由于在扩展腔出口装配具有大尺寸的阴模,从而使合金以“小口填充,大口成形”的方式挤压成形。扩展腔为圆形截面,定径带截面为矩形,沿模子对称中心在水平与竖直方向上取两个合金平面为研究对象。半固态成形阴模的定径带断面尺寸为 14 mm × 25 mm,扩展腔入口直径为 10 mm。通过控制浇注温度使合金以半固态的形式充模成形,合金在扩展腔入口的温度为 640 °C。

在 A2017 合金的半固态扩展挤压过程中,合金处于半凝固状态,且合金固相率会随着温度降低而增大,但对不同温度下,不同固相率时合金的流体类型进行修正将会使问题复杂化。因此,为了简化问题,假定金属为不可压缩的粘性牛顿流体,通过修正合金比热来补偿合金结晶释放的潜热,即采用等价比热的方法进行计算^[15-17],并采用二维分析模型进行分析。忽略浇注时液态金属的泄漏,在浇注的开始与结束阶段,合金液发生瞬态的热交换过程,且随着连续浇注的进行,合金温度场逐渐处于稳定状态。本文作者考虑了处于稳定时金属的流动,不考虑由于浇注或其它扰动带来的金属冲击,假设合金处于连续、稳定状态,即合金液处于稳态的温度场状态。

半固态扩展挤压过程属典型的温度场、流场耦合过程,根据以上分析假设,可将热流耦合场的控制方程作进一步简化。

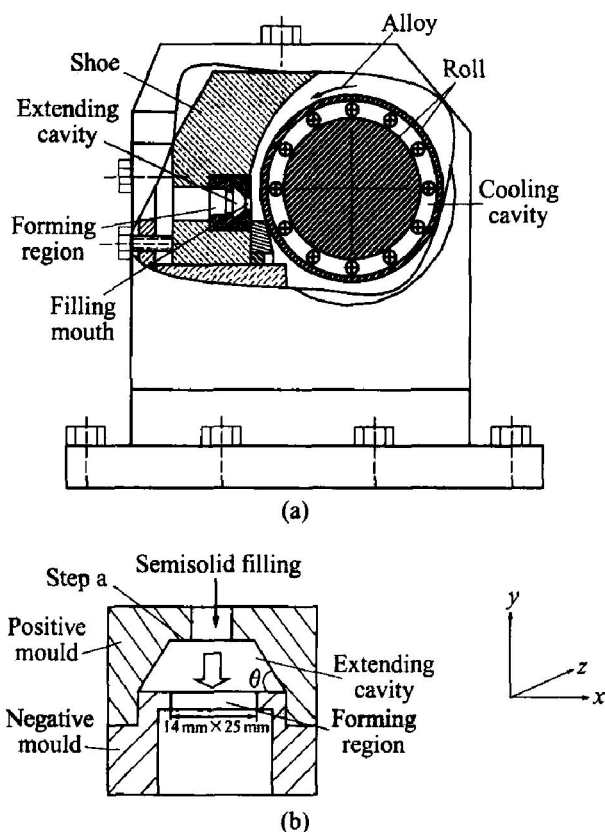


图 1 扩展挤压示意图

Fig. 1 Scheme of extending extrusion

(a) —Experimental setting;
(b) —Sketch of mold assembly

1.1 能量方程

各向同性的合金二维稳态传热时,温度不随时间发生变化,在笛卡尔坐标下,温度分布与 z 轴无关, $\frac{\partial T}{\partial t} = 0$, $\frac{\partial T}{\partial z} = 0$, 能量方程可表达为

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[k \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{\partial T}{\partial y} \right] + \rho \cdot Q = 0 \quad (1)$$

1.2 连续性方程

在二维平面坐标系下,连续性方程中的 $\frac{\partial(\rho \cdot w)}{\partial z} = 0$, 且不可压缩粘性流体的密度随时间不发生变化,即 $\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$, 连续性方程可表达为

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

1.3 运动方程

在二维不可压缩粘性流体运动方程中, z 坐标方向的偏导数均为 0, 运动方程可简化为

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial u}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial u}{\partial y} =$$

$$-\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \cdot \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right] \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial u}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \cdot \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right] \quad (4)$$

式中 ρ 为合金密度, 在一定温度变化范围内假设为常数; μ 为合金运动粘度。

2 边界条件

1) 温度恒定边界

处于稳定状态下, 合金充模口温度为定值: $T_0 = 640^\circ\text{C}$ 。

2) 速度恒定边界

合金冲模口合金速度恒定, 等于合金初始入口速度: $v_{x0} = 0$, $v_{y0} = -0.2 \text{ m/s}$, $v_{z0} = 0$; 合金与模子侧壁接触截面速度: $v_{x0} = v_{y0} = v_{z0} = 0$ 。

3) 热流密度边界条件

在合金与模子侧壁接触边界施加热流密度边界条件下, 该热流密度值由瞬态热交换计算得到, 且从入口到出口逐渐减少。

3 结果与分析

通过计算, 得到了不同设计尺寸时合金流场的分布, 主要考察了有无台阶 α , 倾角 θ 大小以及定径带的尺寸对合金流场的影响, 如图 2 所示。随着扩展挤压模尺寸形状的不同, 合金的流动规律也不尽相同。但是, 无论在何种参数下, 合金在中心的速度最大, 且逐渐向模子侧壁递减, 根据形状与尺寸的不同, 在中间出现过渡涡流区或不出现涡流区。在合金的流动过程中, 由于中心部位上下两处是合金的出入口, 合金的流动阻力很小, 流动阻力来自出入口处模子侧壁的摩擦力及在扩展区周围粘性合金的牵拽力, 这种作用力较小, 因此, 合金中心的速度最大。合金在扩展区发生扩展流动, 当扩展腔的壁面作用较大时, 合金在封闭的两个壁面处进行涡流运动; 当扩展腔壁面作用减小时, 涡流区也变小, 直至消失。同时, 在扩展腔底部两端, 合金的速度几乎为 0, 该处称为合金流动的死区, 且死区也不利于半固态挤压成形。涡流使合金流动不均匀, 容易造成合金偏析等缺陷, 因此, 应该尽量避免涡流与死区的产生。

3.1 台阶 α 对扩展过程中合金流动的影响

如图 2 所示, 台阶 α 对合金流动有较大影响, 不存在台阶时, 合金流动涡流区较小, 涡流不剧烈。图 3 是合金沿着路径 A、B 流动速度大小的变

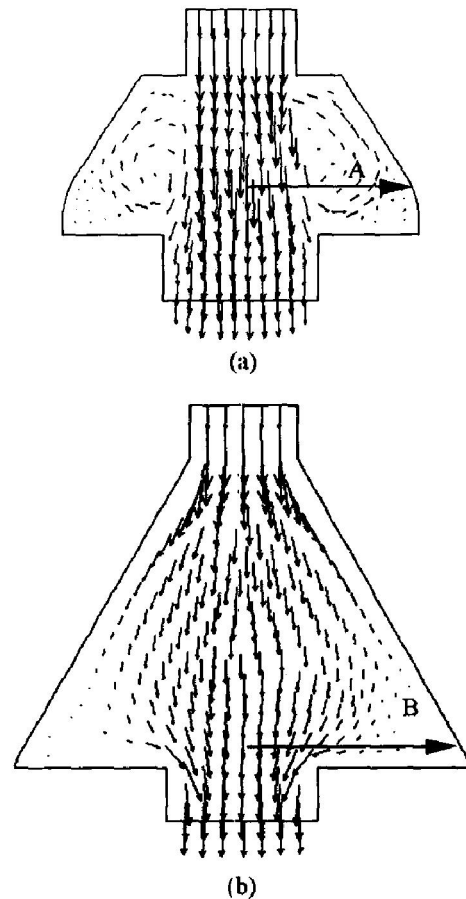


图 2 计算得到的合金流动分布

Fig. 2 Alloy flow-velocity distributions by calculation

(a) —Mould with step α ;

(b) —Mould without step α

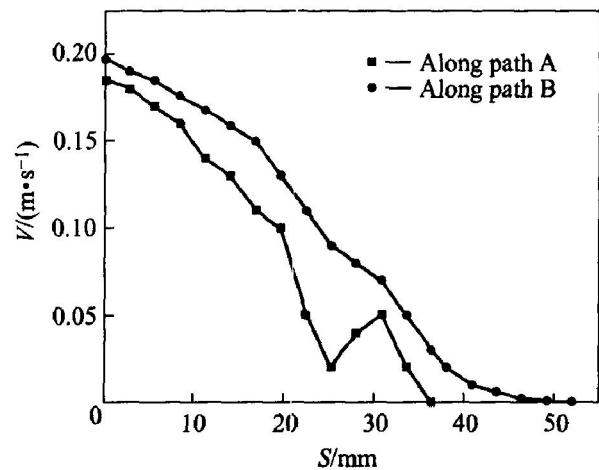


图 3 合金沿路径 A 和 B 速度大小变化

Fig. 3 Alloy velocity variation along paths A and B

化。可见,当存在台阶 α 时,合金沿路径B从扩展腔中心到侧壁的过程中,合金出现较大的涡流区,合金速度大小也发生较大变化,扩展腔的壁面作用强烈,合金的涡流运动非常明显;而不存在台阶 α 时,合金沿路径B基本上呈线性递减壁面作用相对较小,涡流不剧烈。因此,设计制造无台阶 α 的扩展模是合理的。

3.2 倾角 θ 对合金流场的影响

合金在扩展腔中扩展流动过程中具有一定的粘性,但合金的流动惯性力较粘性力作用大。在惯性力驱动下,合金沿初始流动路径发生运动,由于断面的扩展,合金流向也向两侧扩展,当遇到阻力较大的死区及扩展腔底部侧壁时,合金的流动方向又发生改变,流体在壁面作用下沿着扩展腔侧壁又发生回流运动,从而产生了涡流。如图4所示,倾角 θ

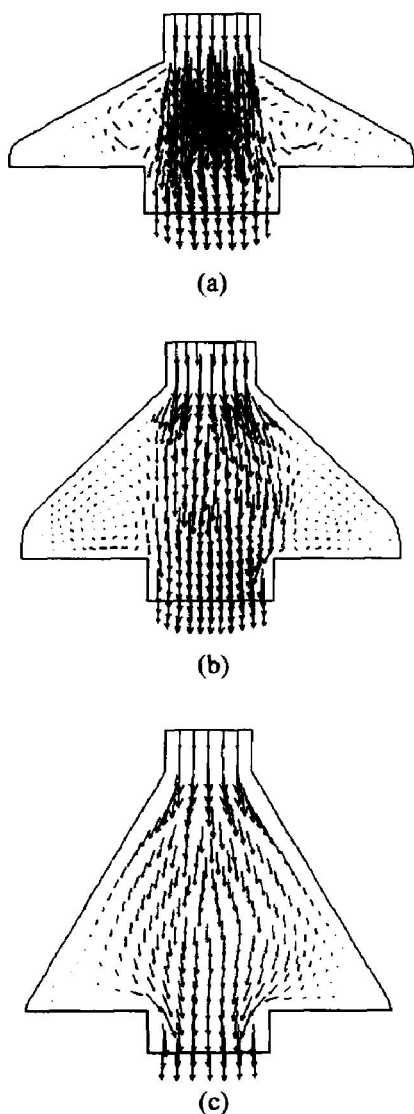


图4 倾角对合金流动的影响

Fig. 4 Effects of declining angle on alloy flowing

(a) $\theta = 30^\circ$; (b) $\theta = 45^\circ$; (c) $\theta = 60^\circ$

越大,侧壁作用越小,合金的流动可在较舒缓的空间发生运动,涡流区域就越小,涡流就越不剧烈,死区也就越小;当 θ 大于 45° 时,死区会变大。因此,可以设计较大倾角 θ 的模具,但不能太大,否则死区就太大,且 θ 越大,扩展流程越长,就越会影响挤压成形过程。

3.3 定径带尺寸对合金流场的影响

在稳定成形阶段,根据不可压缩流体的质量守恒定律:

$$v_0 s_0 = v_1 s_1 \text{ 即 } v_1 = v_0 s_0 / s_1$$

式中 v_0 、 v_1 为合金入口、出口速度; s_0 、 s_1 为合金入口、出口横截面面积。当扩展比 $s_1/s_0 > 1$ 时, $v_1 < v_0$; 当扩展比 $s_1/s_0 < 1$ 时, $v_1 > v_0$ 。

图5所示为计算得到的不同定径带尺寸时,合金中心出口速度 v 随扩展比 s_1/s_0 的变化曲线。可见,出口中心速度随扩展比 s_1/s_0 的增加成线性递减。定径带出口越宽,流速就越小;出口越窄,流速就越大。当 $s_0 > s_1$ 时,在出口处出现束流。因此,在三维状态下,在定径带矩形边横截面的两个边长方向上,合金的流动速度不均匀。因此,设计定径带时,应尽量使矩形横断面两个边长尽量相等。此外,定径带出口宽度越宽,扩展腔合金涡流区越小,流动越舒缓,死区也就越小。

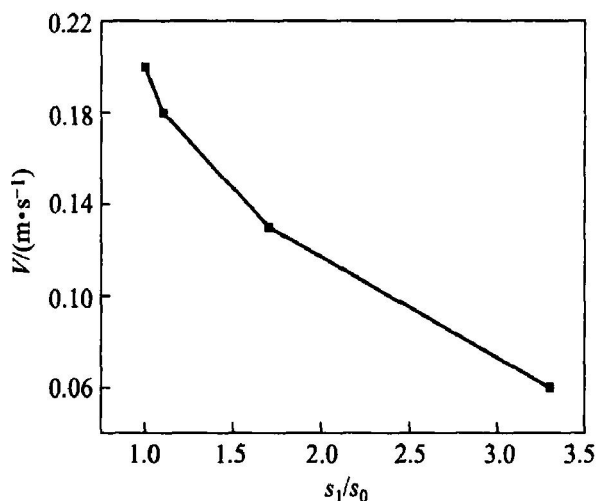


图5 出口速度随扩散比的变化

Fig. 5 Alloy velocity changing with s_1/s_0 at exit

通过实验中间停机的方法,取扩展腔内的合金试样,观察合金的流动规律。图6(a)是在扩展腔入口取样后的合金组织,由图可以看到合金扩展时的弯曲流线。图6(b)是扩展挤压腔横断面内合金流动宏观迹象。图6与模拟结果是相符合的。

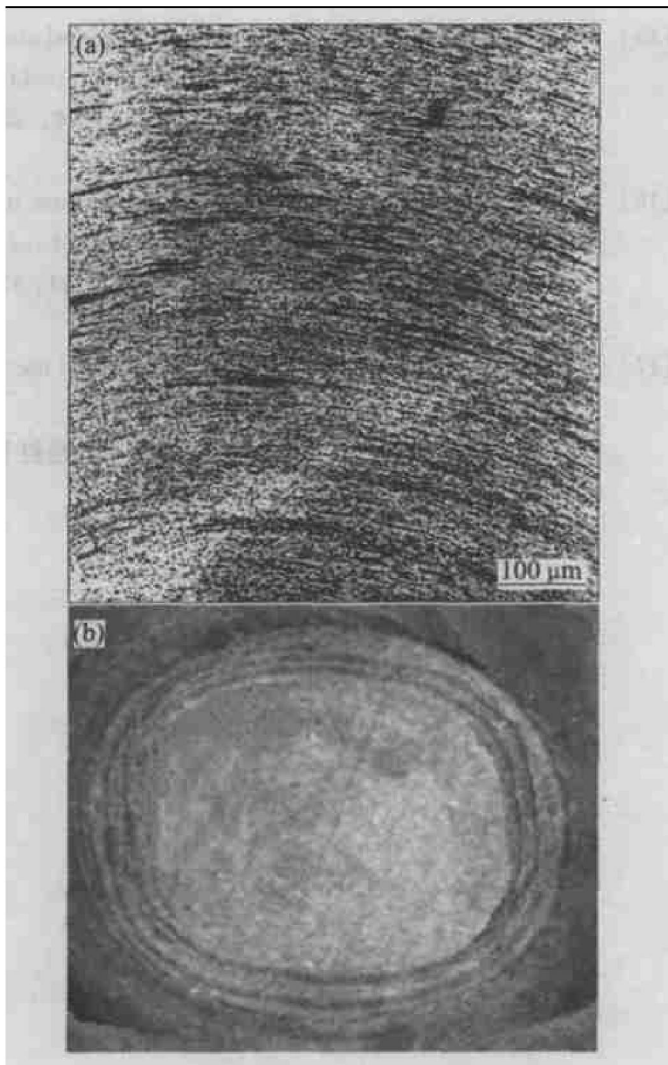


图 6 合金在扩展腔的流动迹线

Fig. 6 Alloy flowing line in extending cavity

(a) —Alloy flow trace at entrance of extending cavity;

(b) —Alloy flow macro-trace at transect
of extending cavity

4 结论

1) 根据有限元分析, 得出半固态扩展挤压 A2017 合金过程中合金的流动规律, 从中心区域向两边侧壁, 合金速度逐渐减少, 根据扩展腔尺寸形状的不同, 在从中心到侧壁的中间区域出现涡流过渡区。

2) 不存在台阶 α 时, 涡流区较小, 涡流不剧烈, 因此, 设计制造无台阶 α 的扩展模是合理的。

3) 倾角 θ 越小, 涡流区域越大, 涡流就越不剧烈, 死区也就越小, 因此, 设计较大倾角 θ 的模具是比较合理的。

4) 定径带出口越宽, 流速越小, 扩展腔合金涡流区越小, 流动越舒缓, 死区也就越小; 出口越窄, 流速越大。

REFERENCES

- [1] Kirkwood D H. Semisolid metal processing[J]. International Materials Reviews, 1994, 39(5): 173 - 176.
- [2] Kiuchi M, Sugiyama S, Arai K. Experimental study on mushy metal forming[J]. J of Japan Society for Technology of Plasticity, 2000, 11(3): 762 - 767.
- [3] Iiegbusi O J, Brown S. Mold filling of semisolid metal slurries[J]. JMEPEG, 1995, 4(4): 486 - 491.
- [4] Iiegbusi, Szekely J. Mathematical modeling of the electromagnetic stirring of molten metal solid suspensions[J]. Trans Iron Steel Inst, 1998, 28(11): 97 - 102.
- [5] Flemming M C. Behavior of metal and alloys in the semi-solid state[J]. Metal Trans, 1991, 22A(1): 957 - 961.
- [6] Vives C. Elaboration of semisolid alloys by means of new electromagnetic rheocasting process[J]. Metal Trans, 1992, 21B(4): 189 - 193.
- [7] Kirkwood D H, Kapranos P. Semi-solid processing of alloys[J]. Metals and Materials, 1989, 28(1): 16 - 26.
- [8] 罗守靖, 田文彤, 谢水生, 等. 半固态加工技术及应用[J]. 中国有色金属学报, 2000, 10(6): 765 - 773.
LUO Shou-jing, TIAN Wen-tong, XIE Shui-sheng, et al. Semisolid forming technology and application[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals[J]. 2000, 10(6): 765 - 773.
- [9] MAO Wei-min, CUI Cheng-lin, ZHAO Ai-min. Dynamical coarsening processing of microstructures in Non-dendritic Al-Si7Mg alloy remelted in semisolid state[J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2000, 10(1): 25 - 28.
- [10] Kiuchi M, Sugiyama S. A new process to manufacture semisolid alloys[J]. ISIJ International, 1995, 35(6): 790 - 797.
- [11] 张 斌, 李墨林, 王凤岗, 等. Castex 连续铸挤的侧向扩展挤压力计算[J]. 金属成形工艺, 1996, 14(4): 31 - 34.
ZHANG Bin, LI Mo-lin, WANG Feng-gang, et al. Calculation of extending extruding force on extending cavity sides[J]. Metal Forming Technology, 1996, 14(4): 31 - 34.
- [12] 管仁国, 温景林, 马宏声. SCR 半固态 LY11 触变机制与半固态挤压材性能的研究[A]. 2001 年铝型材技术论坛[C]. 广州: 广东省有色金属加工学术委员会, 2001. 161 - 164.
GUAN Ren-guo, WEN Jing-lin, MA Hong-sheng. Research on Property of Semisolid Extrusion Product and Thixoforining Mechanism of LY11 Semisolid Materials Manufactured by SCR Process[A]. The 2001 Symposium on Aluminum Extrusion Technology [C]. Guang zhou: Nonferrous-metals processing association of Guangdong Province, 2001. 161 -

- 164.
- [13] Guan R G, Wen J L, Liu X H. FEM analysis of aluminum AA2017 alloy thermal/ fluid multiple fields during a single-roll stirring process[J]. Mater Sci and Tech, 2003, 19(4): 503 - 508.
- [14] Guan R G, Wen J L, Liu X H, et al. Continuously extending extrusion forming of semisolid AA2017 alloy by SCR process[J]. Rare Metals, 2002, 12(4): 271 - 277.
- [15] Wang H, Kabanemi K K, Salloum G. Numerical and experimental studies on the ejection of injection-molded plastic products[J]. Polym Engi Sci, 2000, 23(3): 826 - 840.
- [16] Iiegbusi O J, Szekely J. Mathematical modeling of the electromagnetic stirring of molten metal solid suspensions[J]. Trans Iron Steel Inst, 1998, 28(1): 97 - 103.
- [17] Iiegbusi O J, Brown S. Mold filling of semisolid metal slurries[J]. Jmepeg, 1995, 4(4): 486 - 493.

(编辑 李艳红)