

特约专栏

## 铝合金型材等温快速挤压实时自动控制技术

李静媛<sup>1</sup>, 项胜前<sup>2</sup>, 周春荣<sup>2</sup>, 宋勇<sup>1</sup>, 胡水平<sup>1</sup>, 顾伟<sup>1</sup>, 谢建新<sup>1</sup>

(1. 北京科技大学, 北京 100083)

(2. 广东豪美铝业股份有限公司, 广东 广州 511540)

**摘要:** 介绍了国内外等温挤压技术的发展现状, 阐述了等温挤压的技术原理, 开发了一种新的等温快速挤压三重实时自动控制系统, 包括坯料梯度水冷系统、模具液氮在线冷却系统和挤压速度-出口温度闭环控制系统。研究发现, 采用有限差分离散求解坯料导热微分方程, 设定轴向温度梯度, 控制在线梯度水冷装置施加冷却, 可抵消挤压过程中部分温升; 通过出口温度数据回归获得温升模型, 控制液氮通入量, 可维持模具工作带温度恒定, 延长模具寿命, 并提高型材表面质量; 根据采集的模孔出口型材温度, 依据预测模糊控制模型, 进行闭环控制以调节挤压速度, 可提高型材温度控制精度。通过三重控制系统联动, 最终实现模孔出口型材温度恒定。此系统的应用有利于提高型材挤压速度, 可保证型材沿长度方向上尺寸精度与组织性能稳定。对于挤压速度较快的情形, 可控制模孔出口型材温度波动在 $\pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内, 对于挤压速度较慢的工业型材, 可控制模孔出口型材温度精度在 $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之内; 对于挤压性能好的合金, 挤压速度最高可提升30%以上。

**关键词:** 等温挤压; 梯度水冷; 在线冷却; 预测模糊控制

**中图分类号:** TG 376 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2013)05-0300-07

## Real-Time Automatic Control Technology of Rapid Isothermal Extrusion of Aluminum Alloy Profile

LI Jingyuan<sup>1</sup>, XIANG Shengqian<sup>2</sup>, ZHOU Chunrong<sup>2</sup>, SONG Yong<sup>1</sup>,  
HU Shuiping<sup>1</sup>, GU Wei<sup>1</sup>, XIE Jianxin<sup>1</sup>

(1. University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

(2. Haomei Aluminium Co. Ltd., Guangdong 511540, China)

**Abstract:** This paper introduces the research and progress of isothermal extrusion in the world, clarifies the control principle and method of this technology, and develops a new real-time automatic control system of rapid isothermal extrusion composed of the gradient water-cooling system of billets, the liquid nitrogen cooling system of mould and the closed loop control system of extrusion speed and outlet temperature. Studies have found that it can inhibit the temperature elevating of billet during extrusion through the gradient water-cooling device with the pre-produced axial temperature gradient of billet, which is controlled by the finite difference method and discretized heat conduction equation. Exit temperature regression model is adopted to control liquid nitrogen intake to cool the extrusion mold, which stabilizes the mold operating temperature, prolongs the mould life and improves the quality of profile surface. The temperature of the profile can be adjusted accurately by the predictive fuzzy model through adjusting extrusion speed using closed loop method. Consequently, the temperature of the profile at the extrusion exit would maintain constant due to the triple linkage control system. This system is also beneficial to improve the speed of extrusion, and ensure the accuracy of dimension and stability of microstructures and properties along the length direction of the profiles. For rapid extrusion, the fluctuations of profiles temperature at the exit can be limited within  $\pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , and for slow extrusion speed producing industrial profiles, the temperature accuracy of the exit profile can be contained within  $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , also the extrusion speed can increase by more than 30% for the extrusion alloy with good performance.

**Key words:** isothermal extrusion; gradient water-cooling; online cooling; predictive fuzzy control

收稿日期: 2013-02-03

基金项目: 广东省2011年产学研合作重点项目  
(2011A090200104)

第一作者及通讯作者: 李静媛, 女, 1970年生, 教授

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.2013.05.07

### 1 前言

近年来, 我国铝合金挤压型材的生产和应用得到迅速发展, 尤其在交通运输、航空航天、工业机械、电子

设备等领域的需求不断上升,对产品质量和性能的要求越来越高。在铝合金热挤压过程中,金属坯料在挤压筒内发生剧烈的塑性变形并与其内表面和模具表面发生强烈的摩擦,约90%~95%的塑性变形功和摩擦功转化为热量,最终导致模具模孔附近金属变形区的温度和模孔出口处型材温度不断升高。一方面,模孔出口处型材温度随挤压的进行不断升高,将造成型材头尾组织性能不一致;另一方面,为预防挤压后期模孔出口处型材温度过高,通常会对挤压速度加以限制,即采用较低的挤压速度生产,将直接影响挤压生产效率。采用等温挤压能减少,甚至消除这些缺陷和不足<sup>[1-3]</sup>。

等温挤压是指在挤压过程中控制铝型材模孔出口处温度恒定。其特点是在挤压过程中,模孔附近变形区金属的温度始终保持恒定,从而使金属变形抗力和流动均匀。而挤压型材的出口温度既是决定产品质量的关键因素,也是制约挤压速度的决定因素<sup>[4-5]</sup>。

自1990年代以来,国外一些大型铝加工企业不断研发出各种类型的等温挤压控制系统,如1995年之后爱尔兰 Optalex 公司推广其研制开发的 Optalex 恒温挤压控制系统,该系统是一套对模孔出口处型材温度实时监测反馈并调整挤压速度的温度-速度闭环控制系统。而丹麦阿卢马克公司(Alumac)开发的等温挤压系统,目前已在海外铝(Alcoa)、加铝(Alcan)和阿尔玛格(Almag)等一批世界顶级铝型材挤压生产厂商中安装和使用。据报道,该系统温度控制精度可达到 $\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,单台挤压机产量提高10%~20%,挤压时间缩短10%~30%,且废料减少2%~5%,大大地提高了生产效率和产品质量<sup>[6]</sup>。

国外实现等温挤压的方式各不相同,但主要有两种,即坯料梯度水冷和坯料梯度加热,其都是通过坯料上形成温度梯度的方式来达到等温挤压的目的。1999年,美国俄勒冈波特兰市的 Auodizing 公司安装了一套坯料梯度水冷设备,该设备安装在坯料进入挤压筒前。随后公布的有关数据中显示,使用该装置后挤压速度提高较大。对于单孔、多孔实心模可使得挤压速度由10.58~18.20 mm/s 英寸/分提高至13.97~22.65 mm/s,而对于空心模具则可由2.96~4.23 mm/s 提高至7.41~9.31 mm/s,挤压循环时间可平均缩短24%。2000年,德国伊塞隆市的一家生产感应加热炉、电阻加热炉及挤压筒的厂家 Inductions Anlagen Servies 公司(I. A. S)生产出一种名为 I. A. S Tem-Pro-Heater 的新型加热炉,该加热炉可使挤压锭的温度呈轴向分布,从而实现一定程度的等温挤压。而阿尔考 Hannover 挤压公司安装了一台加热炉,使用的坯料的半径为410 mm,

长度可达1400 mm,该炉有6个轴向排列的元件线圈,但相关耗电量、可实现的坯料温度梯度、挤压出口温度偏差等数据未见报道<sup>[7]</sup>。

目前国内普遍采用的是模拟等温挤压方式<sup>[8]</sup>,即根据坯料温度、尺寸和力学性能等参数制定出一个挤压速度规范(速度引导曲线),使实际挤压速度跟踪此规范以达到近似的等温挤压,速度的调节也基本采用人工手动调节。由于人为制定的速度规范往往精度不高,加之挤压过程中各种参数不断变化,因而实际应用效果较差。

## 2 等温快速挤压技术原理

实际挤压过程中,挤压温度和挤压速度相互关联,并受挤压机能力和挤压制品表面质量的制约。图1所示的挤压极限图描述了挤压温度( $T$ )、挤压速度( $v$ )、挤压能力( $P$ )与制品表面质量( $Q$ )四者之间的关系。从图1中可以看出,挤压温度过低或挤压速度过慢将导致挤压机能力不足,挤压难以实现;而当挤压速度过快或挤压温度过高时,制品表面将出现裂纹、粘接等缺陷。因此,图1中挤压能力曲线和挤压制品表面曲线之间的范围是可以实现挤压的  $T$ 、 $v$  区间。传统挤压由于无法精确控制温度,因此只能在低速范围内进行;而等温挤压自动控制技术可将型材温度控制在图1两曲线交叉点附近,最终实现最大挤压速度与最佳出口温度的结合<sup>[2,4-5]</sup>。

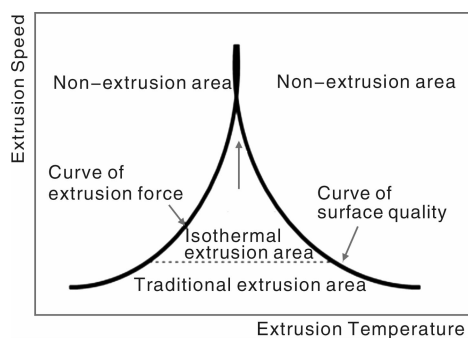


图1 挤压温度-速度极限图

Fig. 1 The relationship of extrusion temperature and velocity

目前,实现模孔出口处型材温度恒定的等温挤压方法主要有3种方式:①对坯料进行梯度加热或梯度冷却,通过头部温高尾部温低的温度梯度来补偿挤压后期的温升;②在挤压模具内通入冷却介质,直接且快速降低模孔附近金属变形区温度;③采用温度-速度闭环控制系统,通过模孔出口处型材温度的精确测量并实时反馈来控制主缸的挤压速度,实现等温挤压。而本研究的目的就是将这3种方式联合起来,实现挤压全过程精确

快速自动控制。如图 2 所示。

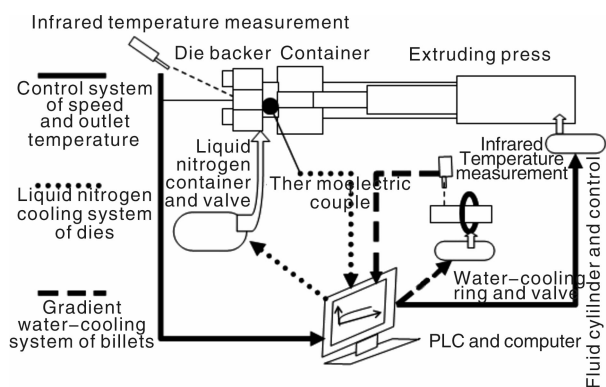


图 2 铝合金型材等温快速挤压三重实时自动控制系统

Fig. 2 The schematic diagram of real-time automatic control system of rapid isothermal extrusion in aluminum alloy profile

### 3 等温快速挤压系统数学模型

本文所述的铝合金型材等温快速挤压三重实时自动控制系统是将均匀加热的铝合金坯料热剪切后推入梯度水冷箱，通过调整喷水量及在线喷水时间使坯料在长度方向形成头部温度高、尾部温度低的温度梯度，再将其送入挤压筒<sup>[9]</sup>；在挤压进入稳定阶段后，用热电偶监测挤压模具温度，通过在特别设计有沟槽的模垫内通入液氮来调控模具温度，保持模具工作带温度基本恒定；与

此同时，红外测温仪采集模孔出口处型材温度并与预设温度进行对比，从而调整挤压速度，最终通过这三重控制实现在整个挤压生产工艺过程中模孔出口处型材温度恒定。

#### 3.1 坯料梯度冷却系统的差分计算模型<sup>[10]</sup>

本文研究采用的铝合金挤压坯料为一个实心圆柱。由于该模型为一个三维立体的传热体系，同时考虑时间因素，实际是四维体系，计算复杂且计算量非常大，因此需要对数学模型进行简化。圆柱体铝合金坯料在梯度水冷时，水冷环内侧均匀分布的矩形喷嘴将对坯料侧面圆周上均匀喷水，因此在喷水冷却过程中，实心圆柱内周向导热微弱。于是，忽略坯料的周向导热，可简化为二维热传导问题，即只需考虑热量在轴向和径向上的传导，如图 3 所示。

将坯料划分单元网格，并将节点划分为 5 类：表面、侧面、角部、内部和芯部，根据傅立叶热传导定律及能量守恒定律，分别建立适应于各类节点的热平衡方程，如公式(1)：

$$E_i + E_o = \Delta E \quad (1)$$

其中， $E_i$  和  $E_o$  分别是节点在单位时间内吸收和散失的热量； $\Delta E$  为节点在单位时间内的热量变化。根据坯料在这一时刻的温度场分布，通过求解式(1)，可以预测其下一时刻的温度分布。

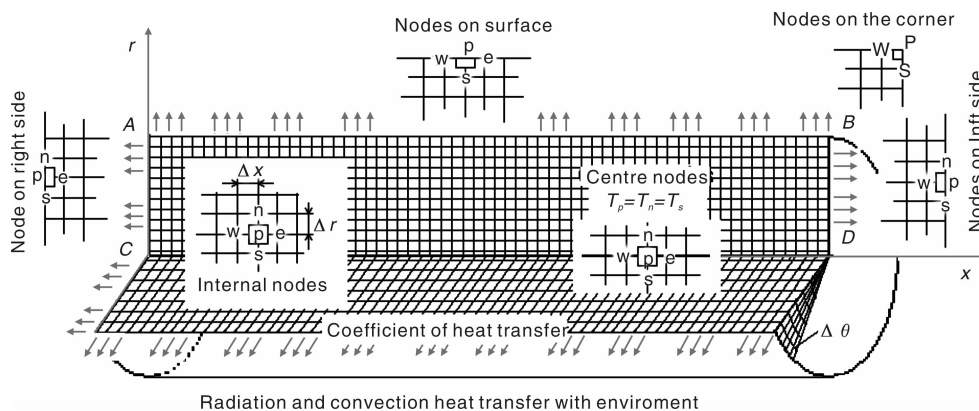


图 3 挤压坯料梯度水冷热传导模型示意图

Fig. 3 The sketch of a model for the gradient water-cooling conduction in extrusion billet

在某个瞬时，在圆柱坐标系下单元体内某个节点的导热微分方程的一般形式如公式(2)：

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q \quad (2)$$

根据式(2)的二维模型简化可知，内热源  $q_v = 0$ ，且周向温度梯度，可简化为公式(3)：

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (3)$$

对于坯料内部的单元，其导热方程可直接用式(3)表示。但是对于坯料的各边界（如表面、角部）而言，由于边界条件的复杂性（如水冷条件、空冷条件以及辐射等），需要分别推导其导热微分方程。

采用有限差分法对梯度水冷过程温度场进行求解，即将实际中连续的物理过程在时间和空间上离散化，近似地置换成一连串的阶跃过程，用函数在一些特定点的有限差商代替微商，建立与原微分方程相应的差分方程，

以便求解。差分方法计算温度场的基本原理就是根据所求点的4个相邻点的温度值来求得该点的温度值。经过有限差分法求解后获得各类节点的差分方程如下。

坯料内部各节点差分方程如公式(4)<sup>[9]</sup>:

$$T_{i,j}^{m+1} = T_{i,j}^m + \frac{\lambda}{c\rho}\Delta t \left[ \frac{1}{(\Delta x)^2}T_{i,j-1}^m + \left( \frac{1}{r\Delta r} + \frac{1}{(\Delta r)^2} \right)T_{i+1,j}^m + \frac{1}{(\Delta x)^2}T_{i,j+1}^m + \left( \frac{1}{(\Delta r)^2} \right)T_{i-1,j}^m - \left( \frac{2}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{r\Delta r} + \frac{2}{(\Delta r)^2} \right)T_{i,j}^m \right] \quad (4)$$

坯料表面各节点差分方程如公式(5):

$$T_{i,j}^{m+1} = T_{i,j}^m + \frac{\lambda}{c\rho}\Delta t \left[ \frac{1}{(\Delta x)^2}T_{i,j-1}^m + \frac{1}{(\Delta x)^2}T_{i,j+1}^m + \frac{1}{(\Delta r)^2}T_{i+1,j}^m - \left( \frac{2}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{(\Delta r)^2} \right)T_{i,j}^m + \frac{h_{\text{outx}}(T - T_{i,j}^m)}{\lambda\Delta r} \right] \quad (5)$$

坯料侧面各节点差分方程如公式(6):

$$T_{i,j}^{m+1} = T_{i,j}^m + \frac{\lambda}{c\rho}\Delta t \left[ \frac{1}{(\Delta r)^2}T_{i-1,j}^m + \frac{1}{(\Delta r)^2}T_{i+1,j}^m + \frac{1}{(\Delta x)^2}T_{i,j+1}^m - \left( \frac{2}{(\Delta r)^2} + \frac{1}{(\Delta x)^2} \right)T_{i,j}^m + \frac{h_{\text{outx}}(T - T_{i,j}^m)}{\lambda\Delta x} \right] \quad (6)$$

坯料角部各节点差分方程如公式(7):

$$T_{i,j}^{m+1} = T_{i,j}^m + \frac{\lambda}{c\rho}\Delta t \left[ \frac{1}{(\Delta x)^2}T_{i,j+1}^m + \frac{1}{(\Delta r)^2}T_{i+1,j}^m - \left( \frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{(\Delta r)^2} \right)T_{i,j}^m + \frac{h_{\text{outx}}(T - T_{i,j}^m)}{\lambda\Delta r} + \frac{h_{\text{outx}}(T - T_{i,j}^m)}{\lambda\Delta x} \right] \quad (7)$$

坯料芯部各节点差分方程如公式(8):

$$T_{i,j}^{m+1} = T_{i,j}^m + \frac{\lambda}{c\rho}\Delta t \left[ \frac{1}{(\Delta x)^2}T_{i,j-1}^m + \frac{2}{(\Delta r)^2}T_{i-1,j}^m + \frac{1}{(\Delta x)^2}T_{i,j+1}^m - 2 \left( \frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{(\Delta r)^2} \right)T_{i,j}^m \right] \quad (8)$$

针对表1所示的物性参数和水冷参数,制定了两种冷却工艺方案,利用有限元软件 DEFORM-3D,对上述有限差分预测模型的准确性进行了验证。方案1:5个环的换热系数分别为:1 250, 950, 650, 350, 150 W/m<sup>2</sup>·K,喷水10 s或18 s;方案2:5个环的换热系数均为1 000 W/m<sup>2</sup>·K,喷水时间分别为:10, 8, 6, 4, 2 s或18, 14, 10, 6, 2 s。

结果如图4所示,从图4中曲线发现,采用有限差分模型(FDM)计算结果与有限元(FEM)计算结果十分接近,两者差别最大处也仅为7℃。因此可以说明,本文所建立的梯度水冷温度场有限差分模型是合理的。但用有限差分模型编制程序的计算速度比 DEFORM 软件

快得多。因此在计算精度允许的范围内,该有限差分模型可用作在线控制模型。

表1 梯度水冷过程参数

Table 1 The parameters of Gradient water-cooling process

Physical properties and dimension of billet	6061 alloy
$\rho/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	$2.69 \times 10^3$
$C/\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$	888
$\lambda/\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$	180
Length/mm	500
Radius/mm	60
Starting temperature/ $^\circ\text{C}$	530
Numbers of water cooled ring	5

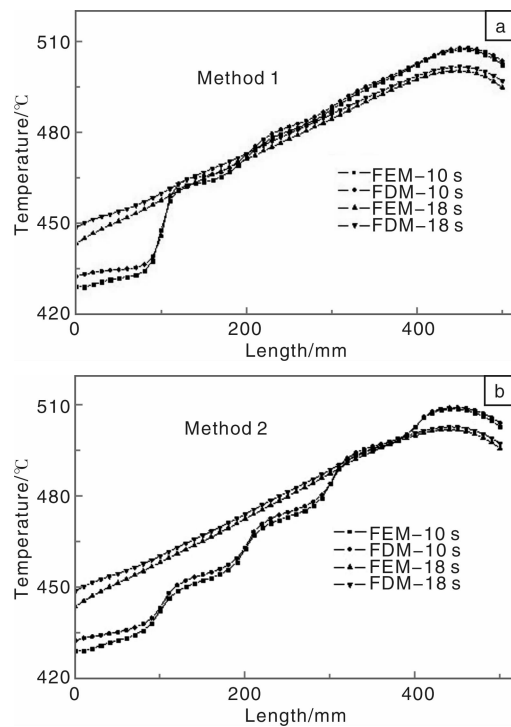


图4 在冷却10 s和18 s时坯料表面温度场分布预测结果

Fig. 4 The prediction results and actual values on billet surface temperature when cooling for 8 s and 10 s

### 3.2 模具在线液氮冷却模型

模具在线液氮冷却是指在模垫紧贴模具一侧开凹槽,凹槽围绕模孔一周,外连液氮管路,出口向内指向模孔,深度3~5 mm。从模具工作带附近引出热电偶测温仪,根据模具监测温度来调节液氮流量,使模具工作带温度恒定在预设值。液氮冷却降低模具温度,可延长模具使用寿命,同时在模孔出口处形成氮气保护气氛,还能避免型材表面的高温氧化,提高型材表面质量。

控制模孔附近局部温升可改善型材表面质量,大幅度提高挤压速度,有效抑制型材表面粗大组织(粗晶

环)的产生,显著延长模具使用寿命。控制液氮流量是模具在线冷却的关键。模具液氮冷却强度偏低达不到期望效果;而冷却强度过高则显著增加挤压力,甚至产生闷车(挤不动)现象。

式(9)为斯捷尔尼克温升模型:

$$\Delta T = \frac{Ap_0}{c\rho} \gamma - \Delta T_0 \left\{ 1 - \exp \left[ - \frac{8b_1}{\sqrt{\pi}(b_1 + b_2)} \cdot \sqrt{\frac{\eta}{P_e}} \right] \right\} \quad (9)$$

代入材料参数后,并经数学回归获得温升模型<sup>[11]</sup>,如公式(10):

$$\Delta T = 3.5 \times 10^{-6} p_0 r - \Delta T_0 [1 - \exp(A \sqrt{\frac{\eta}{P_e}} + B)] - [A_0 \ln(T) - B_0] \quad (10)$$

其中,

$$A = 0.0087v^2 - 0.1006v - 0.5606 \quad (11)$$

$$B = 0.0212v^2 - 0.3317v + 1.7513 \quad (12)$$

$$A_0 = 35.231v^2 - 467.96v + 1921.8 \quad (13)$$

$$B_0 = 218.16v^2 - 2897.7v + 11902 \quad (14)$$

$$p_0 = -0.1671P_e \ln\left(\frac{h}{D}\right) + 0.6873P_e - 11.4866 \ln\left(\frac{h}{D}\right) + 153.004 \quad (15)$$

式(9)~(15)中, $A$ 为热功当量; $p_0$ 为在塑性区断面上的单位挤压力; $c$ 为挤压金属的比热; $\rho$ 为挤压金属的密度; $\Delta T_0$ 为毛料和挤压筒的初始温差; $b_1$ 、 $b_2$ 分别为挤压筒和毛料金属的蓄热系数; $\gamma$ 取决于 $P_e$ 和 $\eta$ 值的系数; $\eta$ 为挤压轴行程长度与挤压筒内径的比值, $\eta = \sqrt{h/D}$ ;  $P_e$ 为彼克列准数, $P_e = v \cdot D/a$ ;  $v$ 为挤压速度, $a$ 为温度传导系数。

### 3.3 挤压速度 - 出口温度闭环控制模型<sup>[12]</sup>

挤压速度 - 出口温度闭环控制是指采用高精度的红外测温仪实时测量模孔出口处型材温度,并根据此出口温度及时调整挤压速度,从而保证型材温度恒定。由于在等温快速挤压过程中型材温度在整个挤压过程始终保持恒定,因此,可在挤压初始以较高的速度进行挤压,使型材温度迅速达到极限温度,然后保持出口温度恒定,最终获得高的挤压生产效率<sup>[13-14]</sup>。

挤压速度 - 出口温度闭环控制系统是将红外测温仪测量型材在模具出口处的温度传输到 PLC 可编程控制器中,若温度高于预定温度的上限则调低挤压速度;相反,若低于下限则调高挤压速度,而调整的幅度由 PLC 的内置程序控制。当测得的型材温度传入微分预测控制单元后,PLC 启动内置的预测算法估算下一采集点处的温度,并以此预测值作为该单元的输出;而模糊控制单元在获取上一单元(即微分预测单元)的预测输出值后,通过温

度偏差模糊数三角形隶属度函数和挤压速度柱形隶属度函数得到的结果进行加权平均,使得模糊化后的温度偏差转换为速度调整量,最后将此调整量输入挤压机控制系统调整挤压速度。

预测算法模型具体如下式(16)所示:

$$T_{pre} = T_m + k \cdot \Delta t \quad (16)$$

式中, $T_{pre}$ 为出口处下一温度采集点处的温度预测值; $T_m$ 、 $T_{m-1}$ 为出口处当前采集点和前一采集点型材的温度; $k$ 为温度预测微分系数,通常 $k = \frac{dT_i}{dt_i} = \frac{T_m - T_{m-1}}{t_m - t_{m-1}}$ ;  $\Delta t$ 为两个采集点之间的间隔周期。

模糊控制单元的输入温度偏差模糊数三角形隶属度函数、挤压速度调整量的柱形输出隶属度函数以及将温度偏差与速度调整量联系的加权平均法,其具体算式分别如下式(17)、(18)和(19)所示:

$$\mu_i^{in}(x) = \begin{cases} (x-a) \cdot \frac{1}{c-a} & a \leq x \leq c \\ (b-x) \cdot \frac{1}{b-c} & c \leq x \leq b \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (17)$$

$$\mu_i^{out}(x) = \begin{cases} \delta v & a \leq x \leq b \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (18)$$

$$\Delta u = \sum_{i=1}^n \frac{\mu_i^{in}(x) \cdot \mu_i^{out}(x)}{\mu_i^{in}(x)} \quad (19)$$

式中, $\mu_i^{in}(x)$ 、 $\mu_i^{out}(x)$ 分别为温度偏差值 $x$ 的输入和输出隶属度函数; $\delta v$ 为温度偏差值 $x$ 在区间 $[a, b]$ 上对应的速度调整量; $i$ 分别为大、中、小3个温度偏差模糊数; $n$ 为温度偏差模糊数总个数, $n=3$ ;  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 分别为 $\mu_i^{in}(x)$ 中的最小温度偏差值、顶点对应的温度偏差值和最大温度偏差值; $\Delta u$ 分别为最终从模糊控制单元输出,反馈至速度闭环的速度给定值处的精确的速度调整量。

## 4 实施效果

本文所论述的等温挤压三重实时控制技术联合了坯料在线梯度水冷、模具在线液氮冷却和挤压速度 - 出口温度闭环控制这3种相互关联影响而不重叠的控制方式。由于这3种控制方式涉及从坯料温度控制、模具的温度控制到最终的模孔出口处型材温度控制的挤压生产全流程,因此,最终等温挤压能以更快的速度进行,进而大幅提高生产效率。

在广东某厂开展了等温快速挤压试验,产品截面如图5所示合金为6063,挤压比为60,坯料直径为115 mm,长度为500 mm,挤压机吨位为800 t,平均挤压速度为10 mm/s。坯料的温度梯度设置为50℃,因

此控制梯度水冷箱中各水冷环的喷水量和喷水时间, 最终达到的实际温度梯度为  $53\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。模垫开槽后, 将置于挤压机旁的液氮储罐通过液氮专用管道连接到挤压模具内, 并在模具工作带外  $10\text{ mm}$  处插入热电偶。挤压过程中液氮阀门开口度在  $0\% \sim 70\%$  范围内变化, 根据反馈的实测模具温度对液氮流量进行调节。由于挤压工艺要求, 最终确定模具温度恒定在  $430\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。根据合金及型材性质, 确定型材的理想出口温度为  $540 \sim 560\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 型材出口处放置红外测温仪, 并与 PLC 连接, 挤压速度根据实测温度由 PLC 控制挤压机的液压系统来推动挤压进行调整。

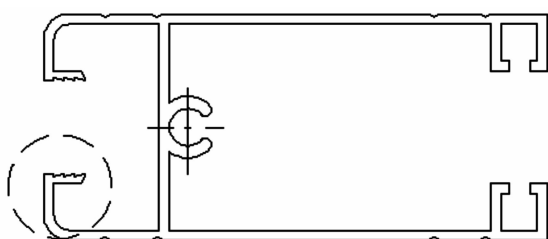


图5 等温快速挤压型材的断面图

Fig. 5 The aluminum profiles for the rapid isothermal extrusion test

从加热炉中取出 6063 铝合金坯料, 其温度为  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 初始挤压速度为  $11\text{ mm/s}$ 。系统操作人机界面图和模孔出口处型材温度实测曲线见图 6。热电偶接触式测温仪将挤压模具定径带处的温度数据实时传送到

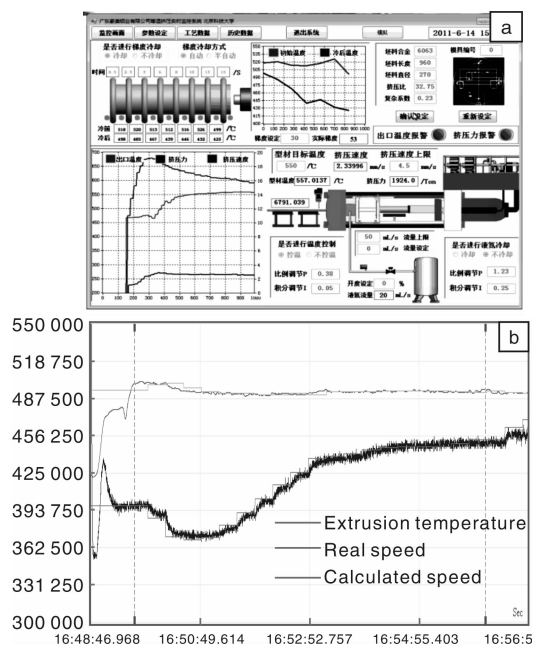


图6 等温快速挤压系统界面及实时监测温度-行程图

Fig. 6 (a) the show interface of the control system for rapid isothermal extrusion and (b) the real-time curve of the profile temperature and extrusion stroke

PLC, 调节相应的液氮流量和阀门开度, 液氮阀门开口度在  $5\% \sim 70\%$  变化。同时根据模孔出口处型材温度值实时调节挤压速度以保证出口温度的恒定。最终挤压模具温度控制在  $430\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 铝合金挤压模孔出口处型材温度控制在  $550 \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 而型材挤出速度大于  $50\text{ m/min}$ 。

## 5 结论

本文所研究的铝合金型材等温快速挤压三重实时自动控制技术提供了一种保持铝合金型材模孔出口处温度恒定, 进而实现高速挤压的自动控制方法。通过将挤压坯料梯度水冷、模具在线液氮冷却和挤压速度-出口温度闭环控制的三重实时控制技术进行集成, 最终实现对模孔出口处型材温度的精确控制。

(1) 系统能够精确控制挤压流程中影响型材温度的每个环节, 保证型材沿长度方向尺寸精度高和组织性能稳定, 且对挤压性能好的合金可大幅度提高挤压速度。

(2) 对合金坯料进行在线梯度冷却, 在坯料的长度方向上形成温度梯度, 此温度梯度一直保持到型材开始挤出模口, 因此可以抵消一部分挤压温升。

(3) 对模具进行液氮冷却可有效降低模孔出口处型材温升, 吸收合金变形热及摩擦热, 提高模具寿命。且由于液氮在冷却模具时在型材表面形成保护性气氛, 可降低型材表面的氧化, 提高型材表面质量。

(4) 采用挤压速度-出口温度闭环控制系统, 依据控制系统内部的预测模型和模糊控制模型, 可对挤压速度进行精确调节, 实现模孔出口处型材温度的恒定。

(5) 通过对坯料温度梯度、模具温度和模孔出口温度-挤压速度的三重控制, 对于挤压速度较快的情形, 可控制模孔出口处型材温度波动在  $\pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$  以内; 对于挤压速度较慢的工业型材, 可控制型材的模孔出口处温度精度在  $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$  之内; 对于挤压性能好的合金, 挤压速度最高可提升  $30\%$  以上。

## 参考文献 References

- [1] Amin F B, Trond A, Sverre B. Optimisation of Flow Balance and Isothermal Extrusion of Aluminium Using Finite-Element Simulations [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2011, 211(4): 650-667.
- [2] Huang Zetao (黄泽涛). Based on HyperXtrude Simulation of Isothermal Extrusion for 5A30 Aluminum Alloy Profile (基于 HyperXtrude 的 5A30 铝合金型材等温挤压研究) [D]. Guangdong: Guangdong University of Technology, 2012.
- [3] Deng Lei, Wang Xinyun, Xia Juchen, et al. Effect of Isothermal Extrusion Parameters on Mechanical Properties of Al-Si Eutectic

- alloy[J]. *Materials Science and Engineering*, 2011, 528(21): 6 504 – 6 509.
- [4] Yoneyama T. Isothermal Extrusion of Aluminum Alloys (2nd Part)[J]. *Alluminio E Leghe*, 2004: 141.
- [5] Bryant A J, Dixon W, Fielding R. Isothermal Extrusion[J]. *Light Metal Age*, 1999, 57(3): 8 – 36.
- [6] Wang Zhutang(王祝堂), Dong Yuntian(董云天), Wang Libo(王立波). 提高挤压铝材产量措施[J], *Ligh Alloy Fabrication Technology*(轻合金加工技术), 1999, 27(9): 1 – 4.
- [7] Leng Yan(冷艳), Jing Zuojun(景作军). 铝型材等温挤压技术综述[J]. *Journal of North China University of Technology* (北方工业大学学报), 2004, 16(1): 56 – 61.
- [8] Liang Yiqing(梁奕清), Wu Xikun(吴锡坤). *A Speed Control Method to Isothermal Extrusion Producing Industrial Aluminium Profiles of Transportation*(交通运输用工业铝型材调速等温挤压控制方法): China, CN200910210166.5 [P]. 2011 – 5 – 11.
- [9] Xie Jianxin(谢建新), Li Jingyuan(李静媛), Chen Yulai(陈雨来), et al. *An Equipment and Its Controlling System of Implementing Temperature Distribution Gradually on Extrusion Billets* (一种实现挤压坯料温度梯度分布的装置与控制系统): China, CN200910237523.7 [P]. 2010 – 6 – 9.
- [10] Lin Chunkun(林春坤). *Research on Mathematical Model of Aluminum Billet Gradient Cooling System* (铝锭坯梯度水冷数学模型的研究)[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2009.
- [11] Meng Fanwang(孟凡旺). *Research and Development of Aluminum Billet Gradient Cooling System* (铝合金铸锭梯度水冷系统研究与开发)[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2009.
- [12] Li Jingyuan(李静媛), Xie Jianxin(谢建新), Song Yong(宋勇), et al. *A Close-Loop System and Method of Isothermal Extrusion Controlled by Predictive Fuzzy Modelling for Aluminium Alloy and Magnesium Alloy*(铝镁合金预测模糊控制温度闭环等温挤压系统及方法): China, CN201110346836.3 [P]. 2012 – 3 – 28.
- [13] Zhou J, Li L, Duszczek J. Computer Simulated and Experimentally Verified Isothermal Extrusion of 7075 Aluminium Through Continuous Ram Speed Variation[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 146(2): 203 – 212.
- [14] Li Luoxing, Lou Yan. Ram Speed Profile Design for Isothermal Extrusion of AZ31 Magnesium Alloy by Using FEM Simulation [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2008 (18): 252 – 256.

## 德研制出“隐热”衣让热“弯曲”传导

利用特殊的超介质材料让光线、声音绕过物体传播,能达到隐形、隐身的效果。据物理学家组织网 2013 年 5 月 9 日(北京时间)报道,最近,德国卡尔斯鲁厄理工学院(KIT)研究人员成功演示了超材料同样也能影响热的传导。他们的“隐热”衣能让热力“弯曲”似的、绕过中央的隐藏区而传导。相关论文发表在最近的《物理评论快报》上。

这种“隐热”衣是用铜和硅制造的一个盘子,盘子虽能导热但其中心的圆形区域却不会受热力影响。“这两种材料必须排列得十分巧妙。”论文第一作者、KIT 的罗伯特·斯奇特尼解释说,铜是热的良导体,而所用的硅材料叫做 PDMS,是一种不良导体。“我们给一个薄铜盘制作了多重环形花纹的硅结构,使它能从多个方向,以不同的速度来传导热量,这样绕过一个隐藏目标所需的时间就能互相弥补。”

如果给一个简单的金属盘的左边加热,热量会一致地向右传导,盘子的温度从左到右会呈下降趋势。如果用这种铜硅超介质材料来做这个实验,也会表现出类似现象,但却只在盘子外圈呈现温度从左到右的下降,没有热量能穿透到内部,在内圈没有任何被加热的迹象。

“这些成果表明,变换光学的方法可以用在完全不同的热力学领域。”KIT 应用物理研究所所长马丁·维吉纳说。虽然光学和声学是基于波的传播,热只是原子的无序运动,但却可以用基本数学公式来计算影响“隐热”衣受热的结构。利用所谓的变换光学方法,能计算出描述热传播的坐标图的扭曲。这种虚拟的扭曲可以变成真实的超材料结构,让入射光沿着被隐形目标弯曲,就好像它不存在似的。

维吉纳还表示,希望他们的研究能成为一个基础,为热力学超材料领域的更多深入开发提供支持。在基础研究中,“隐热”衣还是相当新的领域。从长远考虑,它可以用在许多地方实现有效的热量管理,如微芯片、电动部件或机器上。

(来源:科技日报)