

特约专栏

金属连续铸挤技术研究进展与发展趋势

曹富荣, 温景林

(东北大学材料与冶金学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘要: 金属连续铸挤技术(CASTEX)是金属连续挤压技术(CONFORM)的进一步发展。较详细地介绍了国内外金属连续铸挤技术的发展历史、现状、趋势以及应用状况。介绍了金属连续铸挤原理及铸挤力能参数的计算公式,并指出连续铸挤过程所形成的金属动态结晶-半固态加工-挤压塑性变形3个阶段及内、外摩擦转换机制,使金属由铸态组织逐渐变为细小的变形组织;简述了连续铸挤机的结构及各部件的作用,并列出了国内外部分铸挤机设备的型号与参数,分析了连续铸挤过程铸挤温度、运转间隙、设备转速及冷却条件等工艺参数对实现连续铸挤工艺控制的影响;讨论了连续铸挤技术同常规挤压比较所具备的特点,实现了铝及其合金、锡及其合金的管、棒、型、线材等的连续铸挤加工成形,在工业生产上得到了应用;最后指出了连续铸挤新技术的发展方向。

关键词: 连续铸挤;铸挤原理;连续铸挤机;工艺控制

中图分类号: TG146, TG376 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2013)05-0283-09

Progress and Development Trend on the Study of Metallic Castex Technique

CAO Furong, WEN Jinglin

(College of Materials and Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: Continuous casting and extrusion (CASTEX) is a further development of the CONFORM. The developing history, status quo, developing trend and application status of CASTEX technique are introduced in detail throughout the world. The metallic CASTEX principle and the calculation formulae of CASTEX forces established are briefly described. Three stages such as metallic dynamic solidification, semisolid processing and extrusion plastic deformation and the conversion mechanism of internal and external friction to transform as-cast microstructure into fine grain deformation microstructure are pointed out. Technique, the structure of CASTEX machine and the role of various components are described, and the models and technical parameters of part of CASTEX machines at home and abroad are listed. The effect of process parameters such as temperature, gap, rotary speed and cooling condition on the CASTEX process control is analyzed. The characteristics of CASTEX technique as compared with conventional extrusion is introduced. The pipes, bars, profiles and wires of aluminum and its alloys, and tin and its alloys have been made by CASTEX forming and CASTEX technique obtains industrial application; finally, the developing direction of new CASTEX technique is discussed.

Key words: CASTEX; CASTEX principle; CASTEX machine; process control

1 前言

连续铸挤技术(Castex)是连续挤压技术(Conform)的进一步发展。1971年英国原子能管理局(United King-

dom Atomic Energy Authority, UKAEA)斯普林菲尔德金属成形开发组(Spring Fields Advanced Metal Forming Group, SAMFG)Derek Green首次提出连续挤压^[1-2],并于1976年得到工业应用^[3]。其基本原理是采用铝杆料或颗粒料为原料,由旋转的挤压轮依靠摩擦作用带动进入挤压型腔内,在挤压力和摩擦升温的作用下,将金属挤出模孔,获得连续长度的产品,可以生产实心 and 空心型材、线材及包覆材。挤压轮上有一个或二个进料槽。Conform连续挤压机和辅助加工设备构成了连续挤压生产线,辅助设备安装在挤压机的前后,辅助设备的

收稿日期: 2013-03-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(51034002, 50974038, 50274020)

第一作者: 曹富荣,男,1964年生,博士,副教授

通讯作者: 温景林,男,1939年生,教授,博士生导师

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.2013.05.05

多少和复杂程度取决于产品的技术要求。

Castex 连续铸挤技术起初源于英国霍尔顿 (Holton) 公司对 Conform 连续挤压机进行的改进, 采用液态金属作原料直接进入主机。铸挤轮与固定靴块形成挤压型腔, 液态金属在型腔内进行结晶与变形, 然后被挤出模孔成材, 形成铸造 (Casting) 与挤压 (Extrusion) 为一体的新型 Castex 挤压技术^[4]。该技术是霍尔顿机械设备公司等联合开发的成果, 由英国普尔市的 Alform 合金有限公司于 1983 年获得专利^[5]。连续铸挤是一种新型的挤压工艺^[6], 也属于金属半凝固加工技术范畴, 可以生产铝及铝合金管、棒、型、线材, 还可以连续铸挤铜材。鉴于该工艺所独有的优越性, 将为有色金属加工行业在熔铸、挤压的工艺技术和节能高效方面带来革命性的突破, 给社会带来可观的经济效益, 因而该工艺一经问世便受到冶金机械制造业、电线电缆行业及材料加工界的极大关注。

连续铸挤技术同常规生产同类产品的塑性加工方法相比较, 具有如下优点: ①流程短, 可连续生产各种断面的产品, 长度不受限制; ②节约能源约 40%、成品率高可达 95%, 降低成本约 30% 以上; ③产品质量优, 表面光洁精度高, 材料的密实度高, 晶粒细小均匀致密; ④可以实现液—固复合材料的生产; ⑤更换模具, 方便快捷, 安装维修方便; ⑥设备结构紧凑, 占地面积小, 设备投资小, 整条流水线实现电脑化智能控制; ⑦环境污染小。

20 世纪 70 ~ 80 年代英国霍尔顿 (Holton) 公司设计与制造了 C300H、C400H、C500H、C1000H 等型号的 Castex 连续铸挤机, 销售到英国一台、捷克一台、美国一台^[7]。1990 年美国 Ashok 等人^[8-9]获得铸挤半固态挤压的专利, 如图 1 所示。半固态金属从铸挤机入口进入经过轮槽在出口模子处挤压出来。

1993 年 Grandfield^[10]指出, 在挤压领域半连续铸造远不如连续铸挤为人们所接受, 特别是铸挤涉及小规模的重熔作业。文献[11]指出世界范围内专业掌握 Conform 技术的英国 Poole 的霍尔顿机械公司开发了把熔炼、铸造和挤压过程结合在一起的 Castex 过程, 获得了一个完全实现商业化运行的系统, 为铝挤压制造商节省数百万英镑的能源与材料成本。Castex 过程把废金属切屑熔化得到的铝液浇注进设备里得到梯形成形杆。连续铸挤的成形温度在 300 ~ 500 °C 之间, 经过旋转的轮槽从模子和张力控制系统中挤压出来。挤压型材经过淬火槽后缠绕到卷筒上。霍尔顿 1993 年正在进一步开发该工艺过程和原型系统以增加连续铸挤的工作效率。Nuss-

baum^[12]介绍了 1992 ~ 1993 年两年里霍尔顿机械公司 (一家位于英国 Dorset, Poole 的 Outokumpu Castform 公司) 开发了 Castex 挤压, 该方法作为挤压铝产品的 Conform 方法的替代方法。

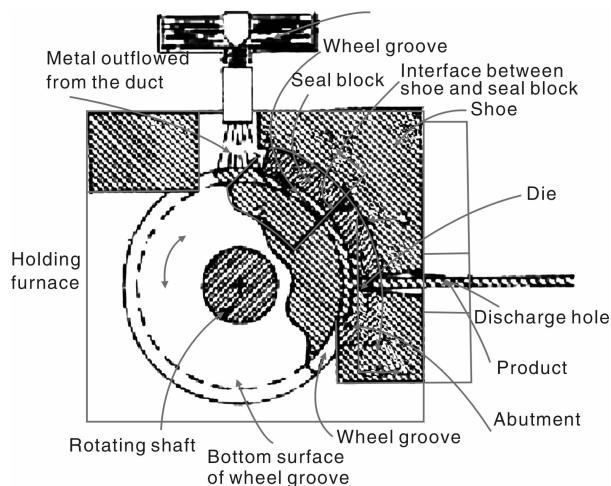


图 1 半固态挤压示意图^[8-9]

Fig. 1 Schematic diagram of Castex semisolid extrusion^[8-9]

霍尔顿机械公司 1995 年在加拿大取得 Castex 的正式名称。1995 年 3 月 16 日在美国专利与商标局取得 Castex 商标 (序列号 74647710) 注册。1992 ~ 1995 年 Castex 发明人 Maddock^[13-15]申请了连续铸挤专利。在美国专利 U. S 4601325 中对 Castex 进行了全面介绍。英国包含 Castex 技术的公司是 Luvata 霍尔顿有限公司, 该公司目前是 Maddock 等 3 位持股人拥有的私人公司, 位于英国 Middlesex, Brentford, 公司下设 Castex 开发有限公司。

2000 年 Thomas^[16]介绍了采用 Castex 的实践经历。人们认识到把 Conform 坯料换成液态金属 (铝液) 变成 Castex 可以实现能量和作业成本的大大节省, 该方法的局限性是挤压前金属凝固的接触长度相当短。一种替代办法是在 Conform 的上游为 Conform 机器提供连铸杆。把连铸与 Conform 结合起来, 可以满足 Conform 生产率的要求。在实验生产线取得成功之后, 在菲律宾已经安装了一条工业生产线。由于连铸杆出现裂纹的问题, 生产线的生产开始受到限制, 低于预期的生产率水平。分析缺陷确认裂纹属于经典的热裂, 是设备给连铸杆的机械扰动引起的。为了完全弄清热裂问题, 在牛津大学安装了一个模拟连续铸挤的实验设备。牛津大学的实验结果使得工业生产线的设计与运行得到许多改进, 这些工作带来了产品质量和铸造机生产率提高。

2000 ~ 2005 年 Castex 发明人 Maddock^[17-21]申请了

采用动态靴子定位的连续挤压专利, 该专利的思想是动态调整靴子的位置。同时配置在设备不停车的情况下检测轮子与工具之间的间隙的传感系统^[22]。

2006年成立的霍尔顿 Crest 公司把连续铸挤(Castex)、连续包覆(Conclad)和连续挤压(Conform)三项技术统称为连续旋转挤压(Continuous Rotary Extrusion)。动态靴子定位与间隙传感系统构成了第二代霍尔顿连续旋转挤压的最新技术。英国 Babcock 线材有限公司目前主要生产 Conform, Conclad 和冷焊设备。

霍尔顿 Crest 有限公司连续旋转挤压的产品包括铜、铝和其它金属。铜材包括无氧铜-ETP与含银的铍铜线。铝材包括1000、3000和6000系合金和中间合金(包括Al-Sr、Al-B和Al-Ti)。其它金属与合金包括金、泡沫合金、Al-Li和Al-Si合金。产品的应用按照实心材、管材和型材划分。实心材用于电缆导线、汇流排、避雷针、带材、杆和超导体。管材用于制冷、空调。型材用于磁性线、换向器、散热片、电动机、开关设备和用户要求的型材。连续旋转挤压机的类型分HC1100、HC2200和HC4000三种。HC1100为生产小断面产品或小体积生产产品而设计, 适合于小管、磁性线和小尺寸型材。HC2200为高压挤压的中等范围的加工而设计, 适合于高压力和高精度铜或铝型材和管材。HC4000是标志性设备, 适合于生产高精密产品, 具有高极限承载能力与高生产率相匹配的特点。

在国内, 对连续挤压与连续铸挤技术的研究起步较晚, 1986年国家计委将连续挤压技术列为“七五”攻关项目, 由原中南工业大学副校长, 现工程院院士左铁镛负责, 而连续铸挤技术研究是其中子项目, 由东北大学承担该项目的研究任务。1990年研制成功, 并将研究成果转化为生产力。1991~1995年间, 在辽宁省科委的支持下, 与鞍山合成金属材料有限公司合作, 建立了国内第一条连续铸挤生产线, 生产Al-Ti-B合金细化剂线材。在2000年前后, 又建立了不同型号3条连续铸挤生产线, 主要生产铝及铝合金线材。并在东北大学建立了一台DZJ-350型连续铸挤试验机, 先后试验研究了铝、锡、镁及其合金的管棒型线及复合材的连续铸挤成形, 均获得重要成果。目前设计与制造的连续铸挤机有DZJ-300型、DZJ-350型、DZJ-460型、DZJ-500型及DZJ-1100型等, 可以实现有色金属及其合金的连续铸挤^[23]。

此外, 清华大学、昆明理工大学、大连交通大学、北京科技大学、中南大学等院校对Conform连续挤压和Castex连续铸挤技术都进行了研究, 获得了重要的研究

成果, 发表了多篇论文与著作, 有力地推动了国内有色金属加工工业的发展^[24-28]。

2 铸挤原理

Castex连续铸挤机启动后, 挤压轮旋转, 液态金属被导入挤压轮的沟槽与槽封块形成的挤压型腔中, 在挤压轮槽与坯料之间摩擦作用下使料充满挤压型腔, 液态金属在挤压型腔中发生动态结晶-变形过程。

动态结晶过程中的液态金属进入旋转的轮槽空腔并且沿腔壁形成薄的结晶壳, 薄壳随着轮的旋转产生液体金属摩擦, 结晶薄壳与其液体金属在动态结晶与摩擦过程中使薄壳逐渐增厚, 凝固靴工作段出口附近呈现半固态挤压状态。

半固态挤压金属处在液固相共存的紊流状态下产生内摩擦, 使结晶出现不断形成又不断遭到破坏而再形成的过程。因此, 晶粒组织较铸态的细小。当金属料进入挤压靴入口附近时达到完全结晶, 随后在挤压靴内产生塑性变形。

凝固后的金属随着挤压轮的旋转由内摩擦转为外摩擦, 使金属发生塑性变形, 同时伴有动态再结晶的发生。当进入挤压腔后的金属在挤压力的作用下, 迫使金属挤出模孔, 获得所要求的制品。Castex连续铸挤机如图2所示, 铸挤时液态金属被导入铸挤轮的凹槽与槽封块构成的挤压型腔中, 在铸挤轮槽与坯料之间摩擦作用下, 使料充满型腔, 液压金属在挤压型腔中发生动态凝固-变形过程。东北大学经过多年的试验研究, 1995年指出连续铸挤过程可分为金属动态结晶-半固态加工-挤压塑性变形三个阶段及内、外摩擦转换机制, 金属的组织由铸态组织逐渐变为细小的变形组织。在挤压塑性变形阶段又可分为初始夹紧区和夹紧区, 建立挤压力, 并明确铸挤轮与靴包角 90° - 180° , 通过控制工艺参数均可实现金属连续铸挤成形过程^[29-30]。

3 铸挤力计算

由于连续铸挤是在连续挤压的基础上发展而来的, 坯料直接用高温液体取代, 加强了冷却, Castex连续铸挤是降温过程而Conform连续挤压是升温过程, 但不论降温还是升温过程而金属在挤压塑性阶段的变形温度是一致的。因此, 铸挤力的计算与连续挤压相类似。

连续铸挤力能研究对于设计铸挤设备与工模具和工艺优化具有重要的意义。清华大学、大连交通大学和东北大学等单位对铸挤力和功率做了理论推导与实验研究。

王真伟, 王祖唐等^[31]获得了连续铸挤槽轮切向力

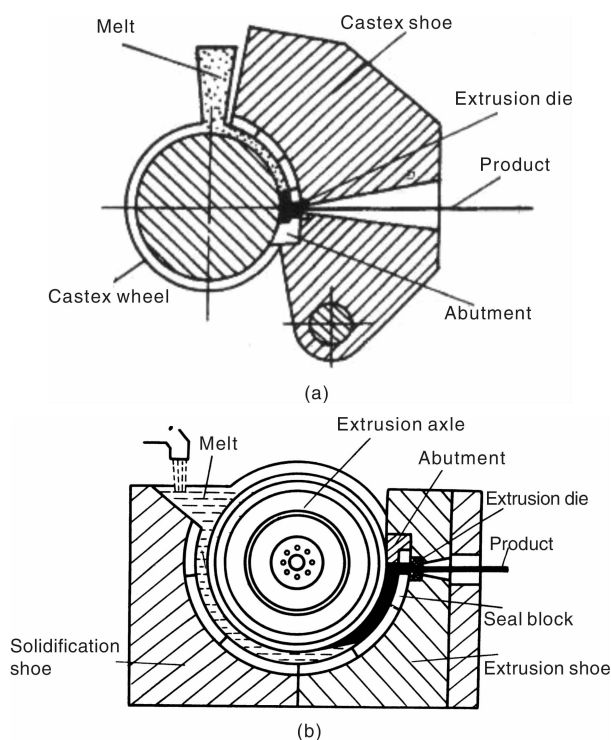


图 2 连续铸挤机示意图: (a) 90°连续铸挤机

Fig. 2 Schematic diagram of Castex machine: (a) Castex machine with 90° wrapping angle; (b) Castex machine with 180° wrapping angle

公式: $F_t = s_j [(1.5W + b)L_2 + 0.75WL_1 + 1.5WZ]$, 式中 σ_j 为挤压应力, W 为轮槽宽度或深度, b 为单侧飞边宽度, Z 为挡料块飞边长度, L_1 为初始夹紧区长度 ($L_1 = 2W$) 和 L_2 为夹紧区长度 ($L_2 = \sigma_j W / \sigma_s$, 式中 σ_s 为变形抗力)。作用在槽轮上的扭矩为: $M = 0.5D_0 F_t$, 式中 D_0 为槽轮名义尺寸。铸挤功率为: $P = \frac{\pi n}{30} M$, 式中 n 为槽轮转速。采用铝和铅的变形抗力模型进行了力能计算和实验扭矩测量, 计算与实验结果符合较好。

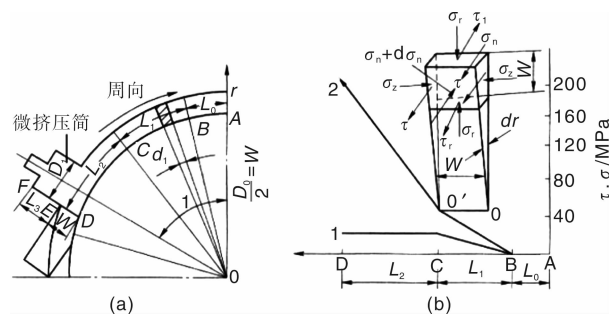
张俊生, 张斌等^[32] 对铝包钢线连续铸挤进行了理论推导和实验研究, 获得了槽轮切向力和径向力公式, 由于径向力公式中的 β 和 α 角度没有交代, 因而限制了应用。

曹富荣, 温景林等^[33] 建立了连续铸挤轮槽切向力和径向力公式, 连续铸挤过程分区与应力分布, 如图 3 所示。

切向力:

$$F_t = f\sigma_s (1.5WL_1 + 3WL_2 + 2bL_2 + 3WZ)$$

式中, f 为金属与轮槽摩擦系数, b 为单侧飞边宽度, Z 为挡料块与轮槽处泄漏引起的飞边长度, $L_1 = W/f$, $L_2 = n_s W$, $n_s = \sigma_j / \sigma_s$ 。

图 3 铸挤的分区与应力分布: (a) 铸挤的分区, (b) 轮槽内单位摩擦力与周向应力 σ_n 的分布Fig. 3 Division of deformation zones and stress distribution of Castex: (a) division of deformation zones and (b) distribution of unit friction force τ and tangential stress σ_n within the wheel groove

挤压应力:

$$\sigma_j = \sigma_s \left[(1 + \cot\alpha / \sqrt{3}) \ln\lambda + \frac{4f l_1}{d_1} + 4l_3 / \sqrt{3} D_i \right]$$

式中, σ_s 为变形抗力, α 为模角, λ 为挤压比, f 为定径带摩擦系数, l_1 为定径带长度, l_3 为微挤压筒 (位于挤压模前的进料孔) 的长度, D_i 为微挤压筒直径。

径向力:

$$F_r = \sqrt{F_x^2 + F_y^2},$$

$$F_x = N_1 \sin\beta_1 + (N_2 + N_3) \sin(\beta_1 + \beta_2) + N_4 \sin(\gamma + \beta_4) + N_5 \sin\gamma + T_1 \cos\beta_1 + (T_2 + T_3) \cos(\beta_1 + \beta_2) + T_4 (\gamma + \beta_4) + T_5 \cos\gamma$$

$$F_y = -N_1 \cos\beta_1 - (N_2 + N_3) \cos(\beta_1 + \beta_2) - N_4 \cos(\gamma + \beta_4) - N_5 \cos\gamma + T_1 \sin\beta_1 + (T_2 + T_3) \sin(\beta_1 + \beta_2) + T_4 \sin(\gamma + \beta_4) + T_5 \sin\gamma$$

式中, $N_1 = \frac{1}{2} \sigma_s W L_1$, $N_2 = \sigma_s W L_2$, $N_3 = 2b \sigma_s L_2$,

$$N_4 = 3\sigma_s W Z, N_5 = \frac{1}{4} (\sigma_j - \sigma_s) \pi D_i^2,$$

$$T_1 = f\sigma_s W L_1 + \frac{1}{2} f\sigma_s W L_1, T_2 = 3f\sigma_s W L_2,$$

$$T_3 = 2bf\sigma_s L_2, T_4 = 3f\sigma_s W Z, T_5 = fN_5,$$

$$\beta_1 = [\pi(0.5D_i - W) - L_1 - 2L_2 + D_i] / (D_i - 2W),$$

$$\beta_2 = (L_1 + L_2) / (D_i - 2W),$$

$$\beta_3 = (L_2 + Z) / (D_i - 2W),$$

$$\beta_4 = (D_i + Z) / (D_i - 2W), \gamma = \beta_1 + \beta_2 + \beta_3 + \beta_4, \gamma$$

为包角, rad, D_i 为铸挤轮直径。

徐亦公, 王祖唐等^[34-35] 采用平面变形滑移线场获得连续铸挤隐式挤压力加和公式, 进而得到平均单位挤压力, 确定了切向力表达式, 同时获得了铝管材连续铸挤功

率上限解。

曹富荣,温景林等^[36]采用上限法获得了连续铸挤驱动功率公式:

$$W = 2\sigma_s v W^2 \left\{ \begin{aligned} & \left[\frac{f(\alpha)}{d} + \frac{1}{2\sqrt{3}} m \cot \alpha \right] \ln \lambda + \\ & \frac{1}{\sqrt{3}} \left(1 + \frac{2mL_d}{d} + \frac{\alpha}{\sin^2 \alpha} - \cot \alpha \right) + \frac{1}{16W} \times \\ & \left[L_1 + 4L_2 + 4 \left(1 + \left(\frac{v'}{v} \right)^2 \right)^{1/2} D_t + \right. \\ & \left. 4Z + \frac{8L_2 b}{W} \right] + \frac{1}{8} \left(2 \frac{v'}{v} + \frac{D_t}{W} \right) + \frac{L_1}{D_t} \end{aligned} \right\}$$

式中, σ_s 为变形抗力, v 为铸挤轮线速度, W 为轮槽宽度, $f(\alpha)$ 为模角 α 的函数, $f(\alpha) = \frac{1}{\sin^2 \alpha} \left[1 - \cos \alpha \times \sqrt{1 - \frac{11}{12} \sin^2 \alpha} + \frac{1}{\sqrt{132}} \ln \frac{1 + \sqrt{11/12}}{\sqrt{11/12} \cos \alpha + \sqrt{1 - 11 \sin^2 \alpha / 12}} \right]$, d 为产品直径, m 为摩擦因子, λ 为挤压比, L_d 为定径带长度, L_1 为初始夹紧区长度, $L_1 = 2W$, L_2 为夹紧区长度, $L_2 = n_s W$, $n_s = \sigma_j / \sigma_s$, σ_j 为挤压应力, v' 为金属与挡料块的相对速度, $v' =$

$$4vW^2 / \left\{ \pi D_t^2 \left[1 - (\arccos \frac{W}{D_t}) / 90 \right] + 2W(D_t^2 - W^2)^{1/2} \right\},$$

Z 为挡块与轮槽处泄漏引起的飞边长度, b 为单侧飞边宽度, L_t 为微挤压筒中非变形区长度。

张斌,李墨林等^[37]对连续铸挤扩展挤压挤压力进行了研究,将变形区划分为挤压变形区、扩展变形区、水平正挤压区和侧向变形区,对常规挤压变形区采用了别尔林公式的处理,用铅做实验材料进行研究。

史志远,陈彦博等^[38-49]利用大变形弹塑性有限元理论,对连续铸挤铝包钢线的成形过程进行了模拟分析,得到了各个变形阶段的变形材料内部的应力与应变分布,以及连续铸挤铝包钢线复合工艺与机理的研究。

4 Castex 连续铸挤机的结构

目前,连续铸挤机的轮靴包角有 180° 与 90° , 根据挤压金属及冷却条件的不同,也有 $110^\circ \sim 130^\circ$ 包角。东北大学研制的连续铸挤机包角为 90° 、 120° 、 180° 三种形式,此设备结构紧凑,调整方便。图4为 DZJ-350 型靴旋转式连续铸挤机,其特点是 90° 和 120° 包角,铸挤靴的调整固定、主机的装卸均为液压控制,生产线的工艺参数采用计算机自动控制^[40]。

连续铸挤设备生产的产品范围基本与连续挤压设备相同,可以生产各种形式管、棒、型线材,它与连续挤压技术比较具有投资少,成材率高,节能效果更显著的

特点。



图4 DZJ-350 型靴旋转式连续铸挤机

Fig. 4 Model DZJ-350 Castex machine with a rotating shoe

连续挤压机与连续铸挤机也可以生产包覆材,如生产铝包钢丝、铝包电缆以及铝包光纤等复合材。

Castex 连续铸挤机主要由以下部件组成,(如图5所示):

(1) 带有冷却的铸挤轮。由电机和减速机通过驱动主轴带动旋转;主轴的结构与 Conform 连续挤压机主轴的结构类同,而所不同的是 Castex 连续机的主轴的部件的设计较为复杂些。

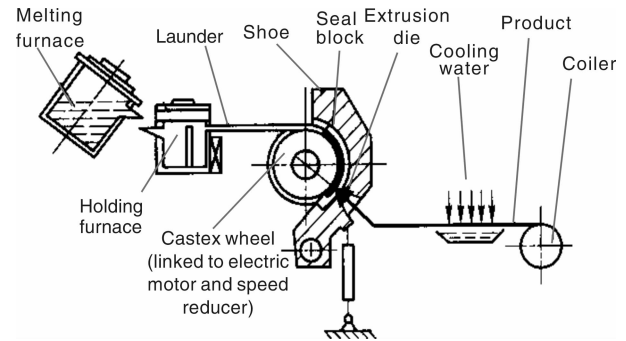


图5 连续铸挤设备的基本构成示意图

Fig. 5 Schematic diagram of essentially comprising of Castex equipment

(2) 固定式和旋转式挤压靴。它与铸挤轮接触部分为弓形的槽封块,槽封块与挤压轮的包角一般为 $90^\circ \sim 180^\circ$ 起封住铸挤轮凹槽的作用,构成挤压型腔,相当常规挤压机的挤压筒,不过这挤压筒为三面为旋转轮的凹槽壁,一面为固定的槽封块。

(3) 固定在铸挤型腔出口端的挡料块。其作用是将型腔出口端封住,迫使金属从模孔流出。

(4) 挤压模与连续挤压相同,模具安装在靴块与铸挤轮切向出线方向上,实行切向挤压,或安装在靴块与铸挤轮径向出线的方向上,实行径向挤压。

(5) 其他部分。如机架、传动轴、背压以及辅助装置等。

国内东北大学设计与制造的连续铸挤设备的形式及主要参数，见表 1。国外制造的连续铸挤设备的形式及主要参数，如表 2 所示。

表 1 国内东北大学设计与制造的 Castex 连续铸挤机
Table 1 Castex machines designed and made by Northeastern University in China

Models	DZJ-300	DZJ-350	DZJ-460	DZJ500	DZJ-1100
Castex diameter/mm	300	350	460	500	1100
Max. rotational speed/ $r \cdot \min^{-1}$	10	15	16	12	8
Motor power/kW	75	110 ~ 160	200	335	500
Current	Alternate	Direct	Direct	Direct	Direct
Al diameter /mm	6 ~ 40	9 ~ 50	9 ~ 60	9 ~ 80	20 ~ 200
Output / $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$					
Al-Ti-B、6063	100 ~ 200	200 ~ 250	250 ~ 300	300 ~ 400	500
Al	200 ~ 250	250 ~ 350	400 ~ 500	500 ~ 600	700 ~ 1 000

表 2 英国 HOLTON 制造的 Castex 连续铸挤设备的形式及主要参数
Table 2 Models and main parameters of Castex equipment made by Britain HOLTON

Models	C300H	C400H	C500H	C1000H
Diameter of extrusion wheel /mm	300	400	500	1000
Max. rotational speed / $r \cdot \text{mm}^{-1}$	20	15	10	5
Power/kW	130	180 ~ 250	300	500
Diameter of max. Expand shoe	90	150	200	420
mould /mm Normal shoe	50	85	100	250
Max. diameter of Expand shoe	50	75	100	200
wares/mm Nomal shoe	30	45	55	130
Max. output/ $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$ Al	300	550	800	300
6063	150	275	400	150

5 铸挤工艺

建立稳定的连续铸挤过程，取决于铸挤温度、铸挤轮转速以及运转间隙等工艺参数的控制^[41]。

运转间隙 运转间隙指挤压轮与靴的槽封块形成的间隙，运转间隙的实验结果如表 3 所示。

表 3 运转间隙对连续铸挤的影响
Table 3 Effect of gap on Castex

Gap	Test results
Over large	Friction large, leakage rate increased, motor torque enlarged
Over small	Tool surface worn seriously, scratch damaged, main engine out of order
More suitable	An Al-film in the tool surface, turning metal lubricant, main engine in order

运转间隙的调整通过挤压靴底部垫片，合理间隙可保证连续铸挤机正常运转。间隙过大，除成材率低之外，容易损伤传动系统部件；如果间隙过小，由于铸挤轮与槽封块受热后膨胀，容易出现轮面与槽封块间直接摩擦，损坏工具表面，甚至发生闷车影响主机正常运转。

试验结果表明，控制合理的运转间隙，要根据挤压

轮的转速、挤压温度、泄漏量大小等进行调整，以便维持稳定铸挤过程的进行。运转间隙通常控制在 1.0 mm 左右。

挤压温度 控制浇注温度与挤压温度。挤压温度过高，挤压制品易产生周期性裂纹，而温度过低，金属变形困难。控制好挤压温度是连续铸挤正常进行的必要条件。挤压开始阶段要使挤压工具升温，而稳定挤压阶段需要使工具冷却，不断维持稳定挤压的工艺条件。

稳定挤压条件建立阶段每次开机运转必须间断地向挤压轮槽的型腔内喂入长度不等的杆料，也可间断地浇注液体料，使挤压工具升温，挤压腔各点的温度达到稳定挤压的要求，从开机到稳定挤压条件建立一般需 50 min 左右的时间。稳定挤压条件建立阶段的挤压轮转速不要太快，以便使升温均匀，过程稳定。

在稳定挤压条件建立后，可进行稳定连续铸挤。为了保持稳定挤压条件，需要在挤压过程中对工具冷却，使挤压轮与槽封块间以及挤压内腔热量平衡。

根据试验结果表明：应根据挤压轮的转速、运转间隙、挤压比与冷却条件，严格地控制挤压温度。

挤压轮转速 在挤压比一定的情况下，挤压轮转速越高，单位时间内铝的变形量增大，产生的热量越多，

而高温金属的热量又来不及通过工具散热, 使整个系统温度比低速时高。为了保持稳定的挤压温度条件, 当挤压轮转速高时, 需加大冷却水流量, 当挤压轮转速低时, 则需减少冷却水流量, 应根据料的浇注温度, 挤压温度及冷却水的流量来确定挤压轮的转速。

挤压比 在挤压轮转速一定的情况下, 挤压比(指型腔的断面积与制品的断面积之比)大, 则金属变形热增加, 那么要保持稳定挤压时的温度条件, 需加大冷却水的流量。

包角 挤压轮槽的包角采用 90° 与 180° 两种形式, 试验结果表明: 两种形式均可实现连续铸挤, 制品的性能及表面质量基本相同。挤压轮槽的包角小, 可以减少摩擦, 电机的转矩变小, 但需严格控制工艺条件以保证合适的凝固区和塑性变形区; 挤压轮槽包角大, 工作区加长, 可分为凝固靴段与挤压靴段, 摩擦增大, 电机的转矩变大, 但是能比较好地控制工艺条件。

控制铸挤工艺参数, 实现了铝合金细化剂和变质剂、1000-6000 系列铝及其合金、电工铝合金等的连续铸挤^[42-46]。

6 应用与发展方向

液态连续铸挤设备生产的产品范围基本与连续挤压设备相同, 可以生产各种形式的管、棒、线、型材、复合材料及半固态材料, 应用前景广阔^[47-49]。

6.1 管、棒、线、型材的连续铸挤

Castex 连续铸挤产品主要是铝及其合金的管棒型材的生产, 特别适合生产细长的产品。采用扩展模挤压可以生产大型管材与型材, 如图 6 所示。

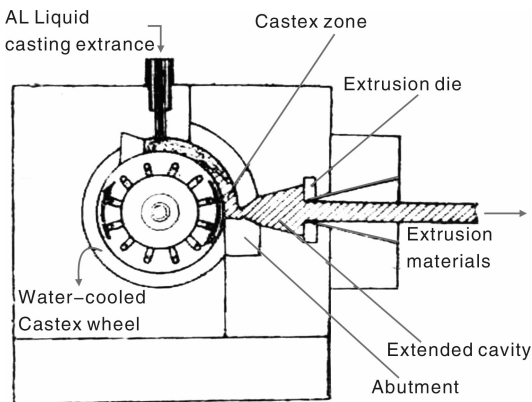


图 6 扩展模连续铸挤生产大型管材示意图

Fig. 6 Schematic diagram of large-sized pipe produced by Castex with an expansion chamber die

铜材连续铸挤正在研究之中, 较铝材连续铸挤的难度大。Castex 连续铸挤机的形式有单轮单槽及单轮

双槽二种。Castex 连续铸挤同连续铸轧一样对国民经济和行业发展具有重要意义。目前东北大学正在研究连续铸挤 $\phi 200\text{mm}$ 以上的大型导电管材以及连铸连挤技术。

6.2 铝包钢复合线的连续铸挤

铝包钢产品是发展电力、通讯广播及交通等工业的基础原料。目前国内采用固体作原料的 Conform 连续挤压法生产, 且只能生产部分产品, 研究采用液体金属作为原料的 Castex 连续铸挤法, 如图 7 所示, 它比 Conform 连续挤压法更为先进。

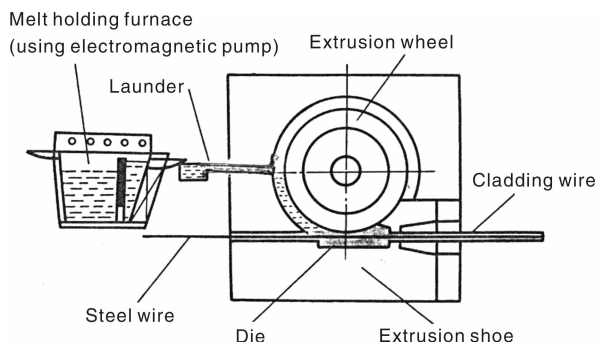


图 7 Castex 连续铸挤法生产包覆线示意图

Fig. 7 Schematic diagram of cladding wire using Castex

铝包钢复合线的主要用途:

(1) 作通讯广播线, 比镀锌架空线老产品具有强度高、耐腐蚀、传输频带宽的优点, 广泛用于有线广播、电话、电报及图文传真等应用领域。

(2) 作输电导线, 在电力工业中, 现用的钢芯铝绞线作为输电线或架空线, 其耐腐蚀性远不如铝包钢绞线, 在发达国家将铝包钢复合线或铝包钢绞线作为芯线, 外层用铝丝绞成的铝包钢芯铝绞线已成为钢芯铝绞线的换代产品。

(3) 用铝包钢绞线作大跨越导线, 采用铝包钢绞线作江河或高山之间无法立杆时的大跨越导线是一种其它材料难于替代的产品。

(4) 铝包钢绞线作良导体地线, 其优点为防雷击、过载能力强、瞬间过流时线路干扰小及屏蔽好。

(5) 铝包钢线还可作电气机车滑道线、防雷导线特殊用途导线。

6.3 新型连续铸挤机的开发

随着冶金工业的发展, 要不断的开发研究适合其他有色金属材料生产的新设备。目前连续铸挤机是一体机, 适合批量生产, 为满足大批量生产, 开发分体连续铸挤机, 即将连续铸造机与连续挤压机相连接, 连续铸造坯料直接进入连续挤压机, 实现连铸-连挤。

开发多种型号连续铸挤机, 如双轴与单轴双槽液

体与半固态铸挤机开发, 将 Conform 连续挤压机、Castex 连续铸挤机、Conclad 包覆机合为一体形成多功能连续铸挤机。

综上所述, 在冶金工业与电线电缆行业中, Castex 连续铸挤技术有广阔的应用前景, 是亟待开发研究的新课题。它将对国民经济和行业发展有重要的推动作用。

6.4 Castex 连续铸挤新技术开发

(1) 间隙传感系统研究与开发, 实现在机器运转的条件下自动调整间隙;

(2) 动态靴子定位技术的研究与开发;

(3) 连续铸挤扩大产品范围, 开发铝、镁高强度合金、铝合金复杂型材与管材及包覆材;

(4) 连续铸挤金属与合金的显微组织与力学性能研究;

(5) 新产品制造工艺过程的力学解析;

(6) 铜材连续铸挤工艺与半固态挤压技术的研发。

参考文献 References

- [1] Green D. *Improvements in or Relating to Extrusion*; UK, 1370894[P]. 1971-03-01.
- [2] Green D. Continuous Extrusion Forming of Wire Forming [J]. *Journal of the Institute of Metals*, 1972, 10 (10): 295-300.
- [3] Hunter E. *Continuous Extrusion by the Conform Process* [C]. Dearborn, Michigan: *Society of Manufacturing Engineers SME MF*-76-407, 1976.
- [4] Chen Yanbo (陈彦博), Wen Jinglin (温景林). 连续铸挤生产铝管的力学计算与分析研究[J]. *Light Alloy Fabrication Technology* (轻合金加工技术), 2002, 30(2): 27-29.
- [5] Wang Zhutang (王祝堂). Conform 挤压工艺及 Castex 铸挤工艺[J]. *Light Alloy Fabrication Technology* (轻合金加工技术), 1986, 24(4): 29-33.
- [6] Ni Manjiang (倪澧江). 连续挤压和连续铸挤概述[J]. *Light Metal* (轻金属), 1988(10): 52-55.
- [7] Peng Dashu (彭大署). 英国 Conform 连续挤压技术近期的发展[J]. *Light Alloy Fabrication Technology* (轻合金加工技术), 1990, 18(1): 33-39.
- [8] Ashok S, Cheskis H P, Tyler D E. *Extrusion of Metals*; US, 5015438A[P]. 1990-01-20.
- [9] Tyler D E, Ashok S, Cheskis H P. *Extrusion of Metals*; US, 5015439A[P]. 1990-11-03.
- [10] Grandfield J F. *DC Casting: Threats and Challenges* [C]. Melbourne, Victoria, Australia: Aluminum Cast House Technology: Theory & Practice, 1993: 351-357.
- [11] Anon O. Continuous Extrusion of Aluminium from Liquid Metal Promises Energy and Material Savings [J]. *Metallurgia (UK)*, 1993, 60(7): 231.
- [12] Nussbaum A I. Rebirth of the Castex Process [J]. *Light Metal Age (USA)*, 1994, 52(3-4): 36, 38.
- [13] Maddock B. *Method and Device for Continuous Casting and Extrusion*; WO, 1992/000156 [P]. 1992-05-13.
- [14] Maddock B. *Method and Device for Continuous Casting and Extrusion*; EP, 0536210 [P]. 1993-04-14.
- [15] Maddock B. *Method and Device for Continuous Casting and Extrusion*; US, 5377744 [P]. 1995-01-03.
- [16] Thomas P M. Practical Experience with Castex [C] // *ET 2000: Seventh International Aluminum Extrusion Technology Seminar; Shaping the Future of Aluminum Extrusion Technology*. Chicago, IL, USA: ET2000, 2000: 489-493.
- [17] Maddock B, Smith M J. *Continuous Extrusion Using Dynamic Shoe Positioning*; WO, 2000/029141 [P]. 2000-05-25.
- [18] Maddock B, Smith M J. *Continuous Extrusion Using Dynamic Shoe Positioning*; CN, 99802182[P]. 2001-03-21.
- [19] Maddock B, Smith M J. *Continuous Extrusion Using Dynamic Shoe Positioning*; US, 6634415 [P]. 2003-10-21.
- [20] Maddock B, Smith M J. *Continuous Extrusion Using Dynamic Shoe Positioning*; US, 20040045336 [P]. 2004-03-11.
- [21] Maddock B, Smith M J. *Continuous Extrusion Using Dynamic Shoe Positioning*; US, 6871522 [P]. 2005-05-29.
- [22] Khawaja K A, Smith M, Maddock B, et al. *Gap Measurement and Control in Conform Extrusion* [C]. Atlanta, GA, United States: Proceedings of the Annual Convention of the Wire Association International, 2001: 296-302.
- [23] Wen Jinglin (温景林), Ding Hua (丁桦), Cao Furong (曹富荣). *Extrusion and Drawing Technology of Nonferrous Metals (有色金属挤压与拉拔技术)* [M]. Beijing: Chemical Industrial Press, 2007.
- [24] Wang Zhenwei (王真伟), Wang Zutang (王祖唐). *R&D and Numerical Simulation of Technology and Equipment of Aluminum Profile Castex (铝型材连续铸挤新工艺及设备的开发研究和数值模拟)* [D]. Beijing: Tsinghua University (清华大学), 1989.
- [25] Zhong Yi (钟毅). *Conform Technology and its Application (连续挤压技术及其应用)* [M]. Beijing: Metallurgical Industrial Press, 2004.
- [26] Song Baoyun (宋宝蕴). 连续挤压和连续包覆技术理论研究与工程实践[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering* (中国机械工程), 1998, 9(8): 69.
- [27] Xie Jianxin (谢建新). *New Technologies and Processes of Materials Processing (材料加工新技术与新工艺)* [M]. Beijing: Metallurgical Industrial Press, 2006.
- [28] Yang Rubai (杨如柏), Zhang Shenghua (张胜华) Trans. *Collection of Translated Conform Literatures (连续挤压译文集)* [M]. Changsha: Central South University Press, 1989.
- [29] Wen Jinglin (温景林), Wu Qingling (吴庆令), Li Tibin (李体彬), et al. 铝材连续铸挤工艺的研究[J]. *Journal of*

- Northeastern University of Technology (东北工学院学报), 1992, 13(5): 435-439.
- [30] Cao Furong (曹富荣), Wen Jinglin (温景林). 铝钛硼线材连续铸挤的分区与显微组织[J]. *Light Metal* (轻金属), 1995(6): 51-54.
- [31] Wang Zhenwei (王真伟), Wang Zutang (王祖唐). 有色金属连续铸挤新工艺的研究[J]. *Light Alloy Fabrication Technology* (轻合金加工技术), 1991, 19(2): 13-18.
- [32] Zhang Junsheng (张俊生), Zhang Bin (张斌), Wang Fenggang (王凤岗), et al. 复合材料连铸连挤新工艺的研究[J]. *Journal of Dalian Institute of Railway* (大连铁道学院学报), 1992, 13(3): 43-50.
- [33] Cao Furong (曹富荣), Wen Jinglin (温景林), Meng Xianyun (孟宪云), et al. 连续铸挤力的分析与实验研究[J]. *Journal of Northeastern University of Technology (Natural Science Edition)* (东北大学学报: 自然科学版), 1994, 15(4): 368-373.
- [34] Xu Yigong (徐亦公), Wang Zutang (王祖唐). 连续铸挤新工艺的滑移线法力能分析与计算[J]. *Forging and Stamping Technique* (锻压技术), 1992, (6): 14-18.
- [35] Xu Yigong (徐亦公), Wang Zutang (王祖唐). 铝管材连续铸挤过程的计算分析[J]. *Light Alloy Fabrication Technology* (轻合金加工技术), 1994, 22(4): 23-29.
- [36] Cao Furong, Shi Zhiyuan, Wen Jinglin. Upper-Bound Approach Analysis of Driving Power of Wheel for CASTEX [J]. *Transactions of Nonferrous Metal Society of China*, 1999, 9(1): 99-104.
- [37] Zhang Bin (张斌), Li Molin (李墨林), Wang Fenggang (王凤岗), et al. CASTEX 连续铸挤的侧向挤压力计算[J]. *Metal Forming Technology* (金属成形工艺), 1996, 14(4): 31-34.
- [38] Chen Yanbo (陈彦博), Wen Jinglin (温景林). 铝材连续铸挤动态凝固过程有限元分析[J]. *Chinese Journal of Nonferrous Metals* (中国有色金属学报), 2001, 11(1): 16-17.
- [39] Shi Zhiyuan (史志远), Wen Jinglin (温景林). 连续铸挤凝固区的三维有限元分析[J]. *Chinese Journal of Nonferrous Metals* (中国有色金属学报), 2001, 11(2): 99-102.
- [40] Wen Jinglin (温景林), Li Tibin (李体彬), Zhu Jinghu (祝景祜), et al. *Aluminum Castex Machine* (铝材连续铸挤机): China, ZL95232318.4[P]. 1995-09-26.
- [41] Wen Jinglin (温景林), Xiao Yunzhen (孝云祯), Cao Furong (曹富荣). Al-Ti-B 线材连续铸挤工艺参数的研究[C] // *Proceedings of Sino-Russia Conference* (中俄会议论文集). Shenyang: Northeastern University press, 1993: 7.
- [42] Wen Jinglin (温景林), Wu Qingling (吴庆令), Li Tibin (李体彬), et al. Al-Ti-B 线材连续铸挤工艺的研究[J]. *Light Metal* (轻金属), 1992, (10): 56-58.
- [43] Wang Shuncheng (王顺成), Chen Yanbo (陈彦博), Wen Jinglin (温景林). 连续铸挤生产 Al-Sr 中间合金线材工艺研究[J]. *Light Alloy Fabrication Technology* (轻合金加工技术), 2003, 13(3): 9-22.
- [44] Chen Yanbo (陈彦博), Wen Jinglin (温景林). 铝材连续铸挤动态凝固过程有限元分析[J]. *Chinese Journal of Nonferrous Metals* (中国有色金属学报), 2001, 11(1): 15-17.
- [45] Zhang Xuefei (张雪飞), Shi Lu (石路), Li Junpeng (李俊鹏), et al. 连续铸挤 Al-Mg-Sc 合金线材工艺研究[J]. *Journal of Materials and Metallurgy* (材料与冶金学报), 2005, 4(4): 313-316.
- [46] Zhou Tianguo, Jiang Zhengyi, Wen Jinglin, et al. Analysis of the Process of AA-6201 Feedstock Using Continuous Casting and Extrusion [J]. *Key Engineering Materials*, 2007, 340-341: 713-718.
- [47] Guan Renguo, Zhang Luolian, Wang Chao, et al. Three-Dimensional Analysis of the Modified Sloping Cooling/Shearing Process [J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2007, 14(2): 146-150.
- [48] Shi Zhiyuan, Cao Furong, Chen Yanbo, et al. The Analysis and Study of the CASTEX Force of AS Wire [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1999, 86(1-3): 115-118.
- [49] Li Yinglong (李英龙), Wen Jinglin (温景林), Chen Yanbo (陈彦博), et al. SCR 技术制备 Al-5Ti-0.125C 合金的组织演化[J]. *Chinese Journal of Nonferrous Metals* (中国有色金属学报), 2004, 14(3): 445-449.