

特约专栏

金属挤压技术的发展现状与趋势

谢建新

(北京科技大学 材料先进制备技术教育部重点实验室, 北京 100083)

摘要: 介绍了金属挤压技术的发展概况以及我国近十几年来挤压工业, 尤其是重型和超重型挤压设备快速发展的状况。金属流动变形行为、分流模挤压焊接过程与焊合质量、组织性能演化与精确控制等基础理论研究, 是正确设计模具, 预防缺陷的产生, 提高产品质量, 提高挤压成材率和生产效率的重要基础, 一直受到研究人员的高度重视。模具的数字化设计与数字化制造、高性能难加工材料挤压、等温挤压、挤压成形-弯曲加工一体化、包芯挤压等挤压新技术和新工艺的开发应用, 是目前挤压制造技术的研究重点。总体而言, 未来挤压技术发展方向主要包括3个方面: 一是挤压产品组织性能与形状尺寸的精确控制; 二是高性能、难加工材料挤压工艺技术开发; 三是挤压生产的高效率化和低成本化。

关键词: 金属挤压; 基础理论; 新技术; 工模具; 发展趋势

中图分类号: TG37 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2013)05-0257-07

Current Situation and Development Trends of Metals Extrusion Technology

XIE Jianxin

(Key Laboratory for Advanced Materials Processing of Ministry of Education, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: The extrusion forming technology of metals and the rapid development in extrusion industry of China, especially, in the manufacture of heavy or ultra-heavy presses in recent decades are reviewed. The basic theories of extrusion technology such as metal flowing behavior, welding process and performance in porthole extrusion, the evolution and accurate control of microstructure and properties are the important foundations of die design, defect prevention and the improvement of product quality, extrusion yield and efficiency, still attracting great attention from researchers. The development and application of novel extrusion technologies are currently the research emphases, which include digitalized die design and manufacture, high performance difficult-to-work materials extrusion, isothermal extrusion, integration of bending and extrusion, clad extrusion, etc. In summary, the trends of extrusion technology in future include three aspects: accurate control of the microstructure and size of the products, difficult-to-work materials extrusion and low-cost and high-efficiency extrusion process.

Key words: metals extrusion; basic theory of extrusion; advanced process; extrusion tooling and die; development trend

1 前言

金属挤压具有基础理论性强、工艺技术性高、品种多样性好和生产灵活性大等许多重要特点, 是金属材料(管棒线型材)工业生产和各种复合材料、粉末材料、高性能难加工材料等新材料与新产品制备、加工的重要方法。经过200多年的发展, 金属挤压技术、工艺和装

备均取得了巨大的进步, 挤压产品已广泛应用于航空航天、舰船、交通运输、能源、冶金化工以及国防军工等非常广泛的领域。本文主要从发展概况、基础理论研究、工模具设计制造、高性能材料挤压、新技术和新工艺等几个方面, 介绍挤压技术的发展现状、最新进展与趋势。

2 发展概况^[1~3]

世界上第一台挤压机是1797年由英国人布拉曼(S. Braman)设计的机械式挤压机, 用于铅的挤压。1820年英国人托马斯(B. Thomas)设计制造了液压式铅管挤压

收稿日期: 2013-03-15

作者简介: 谢建新, 男, 1958年生, 工学博士, 教授

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.2013.05.01

机,具有现代管材挤压机的基本组成部分,包括挤压筒、可更换挤压模、装有垫片的挤压轴和通过螺纹连接在轴上的随动挤压针。1870年,英国人 Haines 发明了铅管反向挤压法,1879年法国的 Borel、德国的 Wesslau 先后开发了铅包覆电缆生产工艺,成为世界上采用挤压法制备复合材料的开端。1893年英国人 J. Robertson 发明了静液挤压法,但直到 1955 年才开始得以实际应用。1930年欧洲出现了钢的热挤压,但由于当时采用油脂、石墨等作润滑剂,其润滑性能差,存在挤压制品缺陷多、工模具寿命短等致命的弱点。钢的挤压真正得到较大发展并被用于工业生产,是在 1942 年发明了玻璃润滑剂之后。1971年英国人 D. Green 申请了 Conform 连续挤压专利,并于 1980 年代初实现了工业化应用。

金属挤压产品主要包括铝及铝合金、铜及铜合金、钛及钛合金、镁合金、钢铁等的各种断面形状和尺寸的型材、管材和棒材。其中,就挤压产量和品种数量而言,铝及铝合金挤压材料占绝大多数。以交通运输领域为例,由于轻量化、高速化和节能环保的要求,高速列车、地铁、轻轨、双层客车、豪华大巴、全铝卡车等运输工具越来越多采用铝合金车体和部件,挤压铝合金型材应用比例不断扩大。目前全世界由铝合金挤压品种 4 万个以上。2011 年美国挤压铝材的产量约为 150 万 t,日本约为 100 万 t,而我国已超过 1 000 万 t(其中挤压型材约 850 万 t,包括建筑型材约 650 万 t,工业型材约 200 万 t),成为全球超级挤压铝材生产国和消费大国。

近 10 多年来,由于航空航天、交通运输、国防军工等经济社会发展对高性能挤压加工材料的需求不断增长,对产品质量均匀性、一致性的要求不断提高,以及企业对提高生产效率、降低生产成本的追求,挤压流动变形行为与组织性能精确控制、缺陷形成机理与控制原理等基础研究,挤压新产品、新技术与新工艺、先进装备的开发与应用,受到国内外的广泛重视。第 9 届(美国佛罗里达州奥兰多市,2008 年)和第 10 届(美国佛罗里达州迈阿密市,2012 年)国际铝挤压技术研讨会,欧洲挤压及标准国际会议(德国多特蒙德,2009 年),参会人员踊跃,学术交流热烈,表明金属挤压加工仍是国际上的活跃研究领域。国内自 2001 年举办第一届“铝型材技术(国际)论坛暨展示”(广东)以来,每三年举办一届,聚焦铝合金熔铸、型材挤压、表面处理、模具制造、深加工等内容,每届参会交流论文在 200 篇以上,技术与产品展示展位每届 72 个。2013 年第五届会议将于 9 月在广州举行。

进入 21 世纪以来,我国挤压技术、装备、型材产量迅速发展。经过仅十多年的发展,高铁、国防军工等

领域用关键铝合金材料,尤其是大型和特大型铝合金型材生产实现了从无到有、从弱到强的跨越式发展,突破了国外的技术和产品封锁。挤压产品不断向着断面尺寸大型化、断面形状复杂化、高性能与高均匀化,挤压设备向着大型、超大型化发展。我国目前共有挤压机近 4 000 台,其中 5 000 t(50 MN)以上的大型和超大型挤压机 56 台,占全球大型挤压机总数的一半。我国现有有色金属大型和重型卧式挤压机包括 1.6 万 t、1.5 万 t 各 1 台,1.25 万 t 3 台,1 万 t 级 4 台,8 000 t 级 11 台。2.25 万 t 和 2.5 万 t 级超重型挤压机也在建设规划之中。黑色金属超重型立式挤压机包括 3.6 万 t、5 万 t 各 1 台,6.8 万 t 立式挤压机正在建设之中。

总之,从基础理论完善、工艺技术开发,到产品的高性能化与高质量化、生产的高效率化和低成本化,金属挤压理论与技术仍处在不断发展之中,相关研究开发工作仍然非常活跃。

3 金属挤压基础理论

3.1 金属流动变形行为

研究和把握金属在挤压过程中的流动变形行为,是正确设计模具,精确控制产品的组织性能、形状尺寸,预防缺陷的产生,提高挤压成材率和生产效率的基础。自从 1864 年 Tresca 通过铅管的挤压实验建立了 Tresca 屈服准则以来,迄今为止,关于金属挤压流动变形行为的研究已取得大量的成果,包括流动速度场、应力应变分布、温度场,组织与缺陷的形成机理与控制原理,挤压力学理论等^[1-3]。研究方法包括实验、理论解析法、数值模拟等多种方法。实验方法包括坐标网格法^[1]、视塑性法^[4]、高低倍组织法^[1,5]、云纹法^[6]、光塑性法^[7]等;理论解析法有初等解析法^[8]、滑移线法^[1]、上限法^[9-10];数值模拟法主要有基于能量原理的上限元法(UBET)^[11]、有限单元法^[12]和有限体积法^[13]。

但由于挤压时金属流动在近似于全密闭的空间(挤压筒、分流模)内进行,且该密闭空间常常伴有高温、高压、高摩擦等严酷、复杂的边界条件,精确把握真实的金属流动行为,其难度非常大,也一直是研究人员坚持不懈的努力方向^[14]。

数值模拟技术的快速发展和计算速度的迅速提高,促进了模拟分析在挤压过程金属流动变形行为研究中的应用^[12,15],在解决金属流动变形可视化、分析缺陷形成原因、指导模具设计等方面发挥了非常重要的作用^[12,16-17],图 1 为其数值模拟结果之一例。数值模拟精度主要取决于建模的正确性和边界条件的精确性,而正确建模和精确地确定边界条件,往往需要足够的实验

研究为基础。因此,模拟与实验相结合,是研究挤压过程金属流动变形最有效、最可靠的方法。在挤压新产品、新技术和新工艺的开发中,金属流动变形的实验研究仍然十分重要。

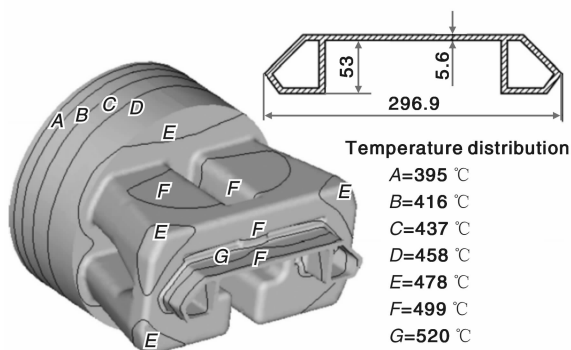


图1 空心型材分流模挤压温度分布数值模拟结果^[17]

Fig.1 FEM simulation temperature distribution of hollow profile porthole extrusion^[17]

3.2 焊合过程与焊缝质量

分流模挤压是铝合金管材和空心型材的最主要的加工方式,对于精密和复杂断面空心型材,甚至是唯一可行的加工方式。焊合是分流模挤压过程中最复杂的过程。焊合过程和焊缝质量是影响挤压产品质量和生产效率的关键因素,近年来成为金属挤压领域受关注的研究内容之一^[18-20]。

金属坯料经分流孔进入焊合腔后相互焊合并流出模孔的过程,显著受分流模的结构(如分流孔的形状、数目和布置等)和关键尺寸的影响,是影响挤压产品质量(包括平直、扭转、表面、焊缝)的关键因素。分析焊合过程金属流动特点,预测焊缝的形状与位置,可为模具设计的正确与否提供重要判据。

大多数空心型材断面复杂、对称性差,当焊合面 and 对称面位置不一致时,采用有限元方法模拟金属在焊合腔内的焊合过程所遇到的最大技术难题,是由于发生网格的分离或相互穿透现象,导致模拟计算自动终止。作者等人发明了解决这一技术难题的方法,实现了复杂断面空心型材分流模挤压从焊合开始到挤出模孔过程的有效模拟^[12,21]。

3.3 组织性能演化与精确控制

迄今为止,主要基于挤压流动变形不均匀的特点来研究挤压产品组织性能不均匀现象。实际上,由于变形热、坯料和工模具之间温差等原因导致的挤压过程中温度变化,是导致产品沿断面和长度方向组织性能不均匀的另一个重要因素。研究挤压过程中的变形、温度变化特点与组织性能演化规律,建立过程模型,是实现组织

性能精确控制的基础^[22]。

通过模具结构与尺寸优化设计、工艺方案与参数综合优化,改善金属流动均匀性,是改善挤压产品组织性能均匀性,预防和抑制产品缺陷的重要措施之一。

等温挤压通过模具冷却、坯料梯温加热或梯温冷却、挤压速度控制等措施,控制挤压产品流出模孔时的温度基本不变,获得沿长度方向组织性能均匀的挤压产品,近年来受到广泛重视,是未来挤压技术的重要发展方向之一^[23]。然而,对于大型、复杂断面的型材,由于流动速度、应变速度和温度分布等的不均匀,导致横断面内组织性能不均匀的现象是较为严重的,尚没有得到足够的重视,未见相关研究报道。

4 挤压工模具

4.1 挤压模具设计制造

模具的设计、制造和使用,是挤压生产的核心关键技术。然而,传统的模具设计制造方法采用典型的“试错法”,其特点可以概括为:经验设计-制造-试模(试挤压)-修模。根据设计者的知识水平与工作经验不同,修模的程度与“试模-修模”次数存在很大差别。一次试模合格率国外先进水平平均约为60%~70%、最高80%,国内平均约为40%~50%、最高60%。“试错法”设计制造给模具制造成本、挤压生产效率、挤压产品一致性带来一系列问题。

近年来,随着对挤压产品的质量和挤压生产效率要求的不断提高,模具数字化设计与制造技术受到高度重视。通过综合利用三维建模、数值计算、过程仿真(虚拟挤压)、数控加工等技术,实现模具结构、尺寸的优化设计和无纸化精确制造,即不需通过试模、修模等过程(“零试模”),直接制造出能生产合格型材产品的模具。发展“零试模”技术,有赖于以下3个方面技术的进步和完善:

数字化设计 数字化设计的优点主要包括两个方面:一是可采用三维设计软件进行可视化建模,直观、准确地分析模具结构尺寸-金属流动-产品质量之间的关系,校验模具强度条件,最终确定合理的模具结构与尺寸^[12,16-17];二是可将设计结果直接转化为CAM/CAE所需的数字信息。

数字化制造 直接应用数字化三维建模与设计结果,编制加工程序,采用基于CAM/CAE的数控加工系统,自动实现模具的“无纸化”、完全遵照设计的精确制造。

虚拟挤压技术 基于过程模型和系统仿真,模拟挤压生产过程,研究工艺参数和边界条件的非线性、时变

性特点对金属流动和产品质量的影响,进一步优化模具设计。

4.2 扁挤压筒

近年来,国内 5 000 t (50 MN) 以上的大型挤压机、1 万 t 以上的重型挤压机建设快速发展,2 万 t 以上的超重型卧式挤压机也在建设规划之中。为了充分发挥重型、超重型挤压机的吨位优势,生产出满足现代交通、航空航天、舰船用大型和超大型断面铝合金型材(图 2),尤其是高强度扁宽铝合金型材,扁挤压筒技术

具有不可替代的作用^[24]。

1990 年代后期,北京科技大学、西南铝业(集团)公司、北京有色金属研究总院和沈阳鑫光模具公司等单位开展联合攻关,在万吨级挤压机用大型扁挤压筒的强度理论、优化设计方法、设计软件与制造技术,生产应用技术等方面取得系列突破,开发了多种大型和特种型材,打破了国外垄断,支撑了我国高铁、地铁车辆研制和国产化、航空航天和国防军工等高新技术发展的急需。

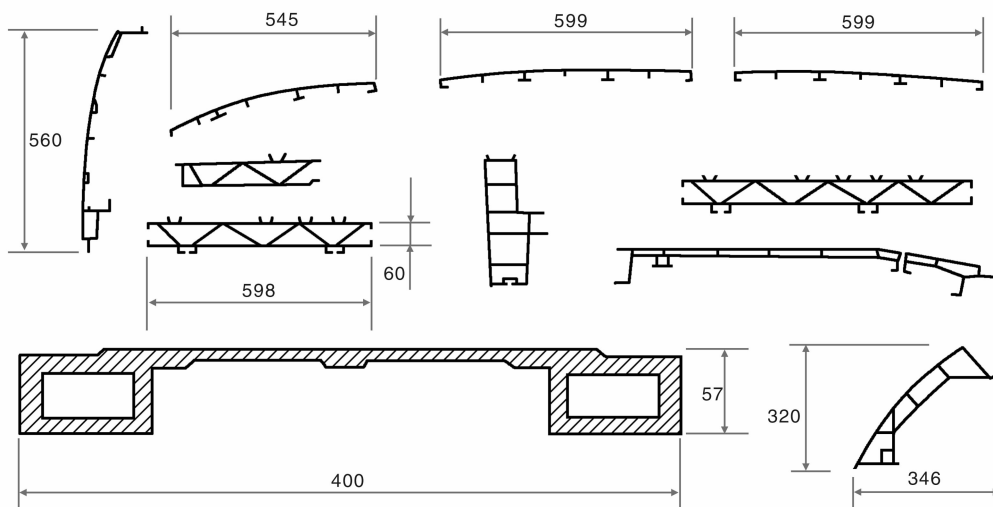


图 2 高速列车车身用大型扁宽铝合金型材

Fig. 2 Al-alloy profiles with large and flat section for high-speed trains body

5 挤压新技术新工艺开发

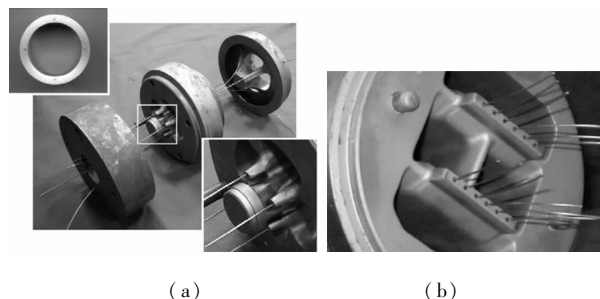
5.1 高性能难加工材料挤压

型材断面的大型复杂化与小型精密化,是 1980 年代以来挤压向高技术含量、产品向高性能化和高附加值化发展的两个主要特点。大型复杂化是结构整体化、高性能化、轻量化的重要措施;小型精密化则是仪器仪表多功能、高性能的重要需求。在今后较长时期内,大型复杂化与小型精密化仍然是挤压加工技术的重要发展方向。

除此之外,航空航天、能源、高速交通、国防军工等高新技术的快速发展,将对高强度铝合金(如 7050、7075)、各种高温合金、高性能粉末冶金材料、特殊结构层状(包覆材料)复合材料等难加工材料的挤压加工提出更大的需要和更高的要求^[25-27]。

图 3 所示为利用分流模的原理,挤压成形钢丝增强管材和“工”字断面型材(简称工字型材)的模具照片^[27]。由图可知,尽管工字型材是实心断面型材,因采用分流模进行挤压成形,在型材横断面上形成了焊

缝。为了使钢丝能顺利进入模孔,并精确控制钢丝位置,在分流桥下设置模芯,钢丝经模芯进入模孔,随铝合金一起流出。



(a)

(b)

图 3 钢丝增强管材(a)和工字型材挤压成形用分流模(b)^[27]

Fig. 3 Porthole dies for steel wire reinforced pipe extrusion (a) and H-shape profile extrusion (b)^[27]

5.2 等温挤压

挤压根据挤压轴运动方向与产品基础方向之间的相对关系,分为正挤压、反挤压、正反复合挤压、侧向挤压等多种^[3]。其中,正挤压是金属材料挤压生产的主要方式,为了克服挤压过程中温度变化导致的产品组织性

能变化, 提高挤压速度, 等温挤压工艺越来越受到重视。实现等温挤压的方法有坯料梯温加热/冷却、工模具控温、参数优化法、基于热力模型的速度控制、温度-速度在线检测闭环控制等^[23,28-30]。其中, 温度-速度在线检测闭环控制效果最好, 但其实现难度较大, 是等温挤压工艺的理想发展方向。

温度-速度闭环控制法是在挤压过程中在线测定模孔出口处产品温度的变化, 将测定结果进行反馈, 据此实时调整挤压速度, 达到实现等温挤压的目的。温度-速度闭环控制除可以获得出模孔处产品温度保持一定的效果之外, 与普通的等速挤压相比, 在许多情况下往往还因为挤压初期和中期的速度大幅度提高而显著缩短挤压时间, 从而提高生产效率, 如图4所示^[31]。但是, 由于挤压机的速度响应频率、挤压机速度输出非线性等特点, 往往难以获得如图4所示的理想控制效果, 因而开发多种方法联合控制的等温挤压技术受到企业关注(参考本专辑另一篇报道)。入带有凹腔(焊合腔)的挤压模内焊合成一体后再由模孔挤出, 以获得所需形状与

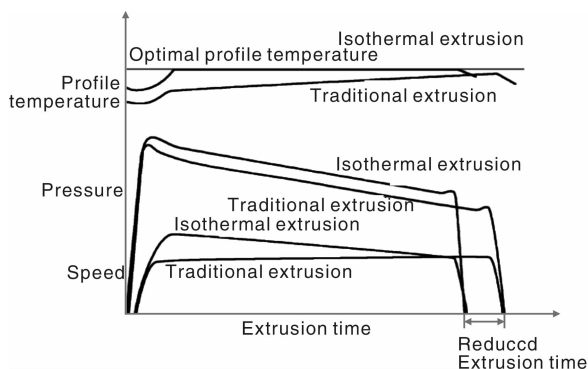


图4 等温挤压与普通挤压的比较^[31]

Fig. 4 Comparison of isothermal extrusion and traditional extrusion^[31]

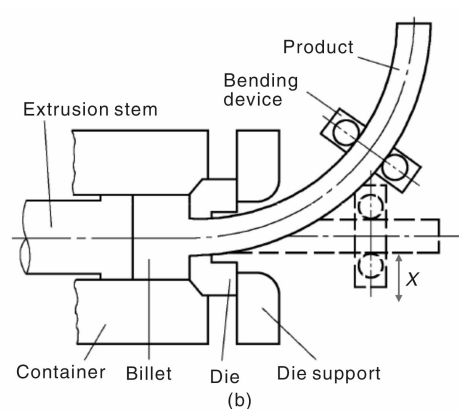
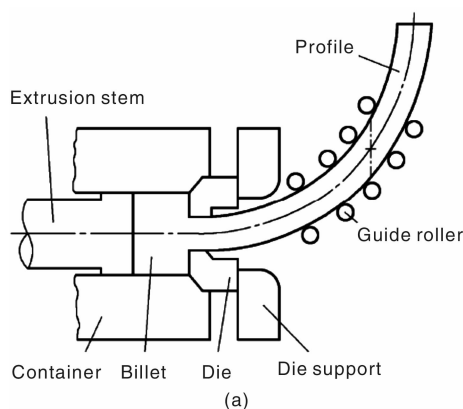


图6 弧形型材挤压成形示意图^[34]

Fig. 6 Schematic diagram of curved profiles extrusion^[34]: (a) unequal bearing band extrusion and (b) additional bending extrusion

尺寸的产品, 其基本原理如图5所示^[3,32-33]。通过采用特殊结构的挤压模, 控制金属的流动, 可以成形各种层状复合材料, 其中的一些层状复合材料是采用现有塑性加工方法难以乃至无法成形的, 如采用两种或多种材料来构成同一包覆层(即在圆周方向由不同材料焊合成一体的包覆层)、同时进行两层以上的包覆、多层复合管或空心型材、特种层状复合材料等。

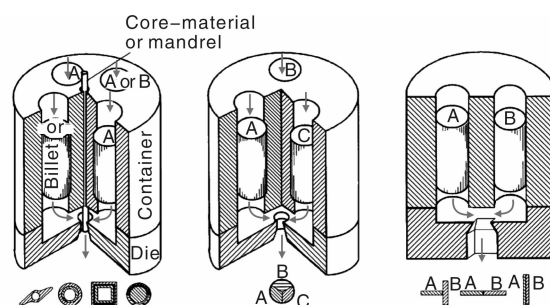


图5 多坯料挤压原理图^[3,32]

Fig. 5 Schematic diagram of multi-billet extrusion^[3,32]

5.3 弧形型材挤压

1980年代后期以来, 日本、美国、德国等国家先后开始了弧形型材挤压加工技术的开发研究。通过对挤出模孔时产品的流出方向施加强制控制, 直接获得具有C形曲线或其它曲线而非平直的产品^[34-36], 即实现挤压成形与后加工(如冷弯)一体化的技术, 是一个受到关注的研究方向, 具有潜在的发展前景。图6所示为实现弧形型材挤压的两种方法示意图^[34], 图6a为利用定径带长度调节型材流出模孔的速度, 获得具有所需弧形型材的方法; 图6b为在挤压机前机架出口处设置专用的弯曲变形装置, 对挤出型材施加强制弯曲变形形成弧形型材的方法。

5.4 多坯料挤压

多坯料挤压法不同于传统挤压中只使用一个坯料(单一金属坯料或复合坯料)的情形,而是根据需要在筒体上开设多个挤压筒孔,在各个筒孔内装入尺寸和材质相同或不同的坯料,然后同时进行挤压,使其流不等长定径带挤压法中,虽然也使用了导辊装置,但型材弧形的获得主要是通过定径带长度控制金属流出模孔时的流速来实现的,导辊只起辅助性的导向作用,用以改善型材的弧形半径和平面精度。而在附加弯曲挤压成形法中,弯曲变形装置既对型材的移动方向起到导向作用,并同时给挤出模孔后的型材施加弯曲变形,以得到所需的弧形型材。因此,附加弯曲挤压法实际上是一种挤压-弯曲联合加工法。对挤出型材施加强制弯曲变形的的方法有多种,装置的结构形式也多种多样。根据强制弯曲装置的种类和控制方式的不同,附加弯曲挤压法可以成形固定半径、变半径的平面弧形型材,也可以成形空间三维弧形型材^[35]。

5.5 包芯挤压

为了满足某些特殊用途的需要,如细长特钢、高温合金管材,铜包钢线材等,包芯挤压法是一种简单可行的方法,成形细长管材或空心型材的基本原理如图 7 所示^[3,37]。如将芯杆换为包覆线材的芯材,所得产品即为包覆线材。

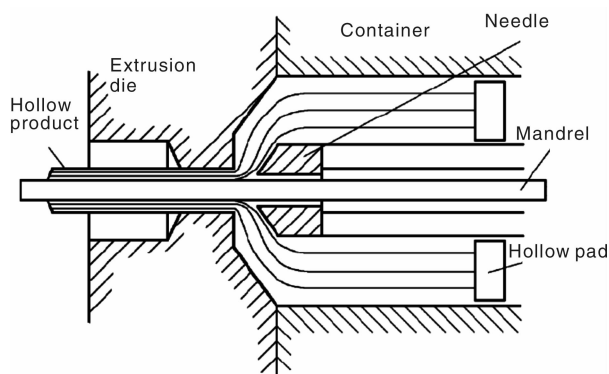


图 7 包芯挤压成形细长管材示意图

Fig. 7 Schematic diagram of clad extrusion for fine and long tube

包芯挤压的最大特点是在普通带独立穿孔系统的挤压机上即可实现,它是在结合了固定针挤压和随动针挤压两种方法的特点的基础上而发展起来的一种方法,芯棒(芯材)从挤压机后部,通过空心针支承和空心针进入模孔,在被挤压金属施加在芯棒(芯材)表面的摩擦力的带动下,与挤压产品同步流出模孔。空心管材或型材挤压的情形,在整个挤压过程中,芯棒不产生塑性变形,因而可在生产中循环使用,挤压结束后需要将芯棒从产品中拔出(抽芯)。包覆线材生产的情形,芯材可

以不产生塑性变形,也可产生一定的塑性变形。当包覆层的厚度很薄时,一般可在挤压机前端施加张力,以降低挤压力,减少能耗。

6 结 语

随着经济建设与高新技术的快速发展,金属挤压技术得到了快速发展。近十年来,我国在金属挤压产量、高端产品开发、重型和超重型挤压设备的国产化和生产线建设等方面,取得了举世瞩目的成就,发展成为全球第一挤压生产大国。未来金属挤压领域的主要发展方向,总体而言,可以概括为 3 个方面:一是挤压产品组织性能与形状尺寸的精确控制,实现高性能化与高质量化;二是高性能、难加工材料挤压工艺技术开发,支撑高新技术发展和重大工程建设;三是挤压生产的高效化和低成本化,提高行业竞争力。加强基础理论与工艺技术创新,是我国金属挤压领域可持续发展的根本保证。

参考文献 References

- [1] Laue K, Stenger H. *Extrusion: Processes, Machinery, Tooling* [M]. Ohio: American Society for Metals, 1981.
- [2] Japan Society for Technology of Plasticity. *Working Bases and Advanced Technologies of Extrusion* (押出し加工-基礎から先端技術まで) [M]. Tokyo: Corona Publishing Co. Ltd., 1992.
- [3] Xie Jianxin (谢建新), Liu Jingan (刘静安). *Theory and Technology of Metals Extrusion (2nd ed)* (金属挤压理论与技术(第 2 版)) [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2012.
- [4] Thomsen E G, Yang C T, Kobayashi S. *Mechanics of Plastic Deformation in Metal Processing* [M]. Madison: McMillan, 1965.
- [5] Xie J X, Ikeda K, Murakami T. Experimental Simulation of Metal Flow in Porthole Die Extrusion [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1995(49): 1-11.
- [6] Cao Qixiang (曹起襄), Xiao Ying (肖颖), Ye Shaoying (叶绍英), et al. 用光电扫描云纹法研究轴对称挤压 [J]. *Die Technology (模具技术)*, 1986, (3): 14-37.
- [7] Xie Jianxin (谢建新), Cao Naiguang (曹乃光). 三维光塑性法及其在挤压变形研究中的应用 [J]. *Journal of Central-South Institute of Mining and Metallurgy (中南矿冶学院学报)*, 1986, 51(5): 53-61.
- [8] Kudo H. *Plasticity* [M]. Tokyo: Morikita Publishing Co. Ltd., 1968.
- [9] Avitzur B. *Handbook of Metal-Forming Processes* [M]. New York: John Wiley & Sons Inc., 1983.
- [10] Peng Dashu (彭大暑), Xie Jianxin (谢建新). 穿孔针芯头几何形状和运动状态对管材挤压力的影响 [J]. *Journal of Central-South Institute of Mining and Metallurgy (中南矿冶学院学报)*, 1987, 18(1): 45-52.
- [11] Xie J X, Ikeda K, Murakami T. UBA Analysis of Pipe Extrusion Process through Porthole Die [J]. *Journal of Materials Pro-*

- cessing Technology, 1995(49): 371-385.
- [12] Huang D N, Zhang Z H, Li J Y, et al. FEM Analysis of Metal Flowing Behaviors in Porthole Die Extrusion Based on the Mesh Reconstruction Technology of the Welding Process[J]. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 2010(17): 763-769.
- [13] He Youfeng (和优锋), Xie Shuisheng (谢水生), Cheng Lei (程磊), et al. 蝶形模具挤压过程的数值模拟[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals* (中国有色金属学报), 2011, 21(5): 995-1002.
- [14] Jowett C, Parson N, Guay R, et al. *The Dynamics of Dead Zones in Hot Extrusion*[C]. Florida: Proceedings of 10th International Aluminum Extrusion Technology Seminar, 2012.
- [15] Biba N, Stebunov S, Lishnij A, et al. *Application of QForm Program for Improvement of the Die Design and Profile Extrusion Technology*[C]. Florida: Proceedings of 9th International Aluminum Extrusion Technology Seminar, 2008.
- [16] Huang Dongnan (黄东男), Zhang Zhihao (张志豪), Li Jingyuan (李静媛), et al. 焊合室深度及焊角对方形管分流模挤压成形质量的影响[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals* (中国有色金属学报), 2010, 20(5): 954-960.
- [17] Huang Dongnan (黄东男), Zhang Zhihao (张志豪), Li Jingyuan (李静媛), et al. 网格重构在铝合金空心型材分流模挤压过程数值模拟中的应用[J]. *Forging & Stamping Technology* (锻压技术), 2010, 35(6): 128-133.
- [18] Xie Jianxin (谢建新), Muraue Tadashi (村上紘), Iketa Keisuke (池田圭介), et al. ポートホールダイ押出しにおけるチャージ接合挙動[J]. *Placticity and Processing* (塑性和加工), 1995(411): 390-395.
- [19] Bakker A J D, Werkhoven R J, Sillekens W H, et al. Towards Predictive Control of Extrusion Weld Seams: an Integrated Approach[J]. *Key Engineering Materials*, 2010(424): 9-17.
- [20] Segatori A, Reggiani B, Donati L, et al. *Prediction of Position and Extent of Charge Welds in Hollow Profiles Extrusion*[C]. Florida: Proceedings of 10th International Aluminum Extrusion Technology Seminar, 2012.
- [21] Xie Jianxin (谢建新), Huang Dongnan (黄东男), Li Jingyuan (李静媛), et al. *A Numerical Simulation Technology for Porthole Die Extrusion Welding Process of Hollow Profiles* (一种空心型材分流模挤压焊合过程数值模拟技术): China, ZL200910088960. 7[P]. 2010-10-27.
- [22] Ockewitz A, Sun D Z, Andrieux F, et al. *Development of a Numerical Method for Simulation of Aluminum Extrusion Processes with Modeling of Microstructure*[C]. Florida: Proceedings of 10th International Aluminum Extrusion Technology Seminar, 2012.
- [23] Xie Jianxin (谢建新), Li Jingyuan (李静媛), Hu Shuiping (胡水平), et al. *An Equipment and Control System to Realize Temperature Gradient Distribution of the Extrusion Billet* (一种实现挤压坯料温度梯度分布的装置与控制系统): China, ZL200910237523. 7[P]. 2011-03-30.
- [24] Liu Jingan (刘静安), Xie Jianxin (谢建新). *Extrusion Technology and Die Optimization Design of Large Al-Alloy Profile* (大型铝合金型材挤压技术与工模具优化设计)[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2003.
- [25] Lesniak D, Richert J, Libura W, et al. *Weldability Testing of Hard Deformable Aluminum Alloys Intended for Extrusion through Porthole Dies*[C]. Florida: Proceedings of 10th International Aluminum Extrusion Technology Seminar, 2012.
- [26] Rekas A, Zasadzinski J, Richert J, et al. *Hot Extrusion of Al/SiC Powder through Porthole Die*[C]. Florida: Proceedings of 10th International Aluminum Extrusion Technology Seminar, 2012.
- [27] Chikorra M S, Schomacker M, Kloppenborg T, et al. *Simulation and Experimental Investigation of Composite Extrusion Processes*[C]. Florida: Proceedings of 9th International Aluminum Extrusion Technology Seminar, 2008.
- [28] Lin Chunkun (林春坤), Yang Guangtu (杨广图), Li Jingyuan (李静媛). 铝锭坯梯度水冷过程中温度场的数值模拟[J]. *Light Alloy Fabrication Technology*, 2010, 38(9): 29-31, 44.
- [29] Xie Jianxin (谢建新), Zhang Zhihao (张志豪), Hou Wenrong (侯文荣), et al. *A Isothermal-Extrusion Technology by Comprehensive Control of Process Parameters* (一种工艺参数综合控制等温挤压法): China, 201210088373. X[P]. 2012-03-29.
- [30] Mainetti E, Bertolotti M, Wallfish S, et al. *Significant Extrusion Speed Increase Using Liquid Nitrogen to Eliminate Overheating of Dies during Extrusion Process*[C]. Florida: Proceedings of 10th International Aluminum Extrusion Technology Seminar, 2012.
- [31] Barron B. *Automatic Closed-Loop Control Comes of Age for Aluminum Extrusion*[C]. Florida: Proceedings of 9th International Aluminum Extrusion Technology Seminar, 2008.
- [32] Xie Jianxin. *Research on Shape Processing of Hollow Profiles by Extrusion Method of Multi-billet* (多素材押出法による中空品の成形加工に関する研究)[D]. Sendai: Tohoku University, 1991.
- [33] Liu Binbin (刘彬彬), Xie Jianxin (谢建新). W-Cu 梯度功能材料的设计、制备与评价[J]. *Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy* (粉末冶金材料科学与工程), 2010, 15(5): 413-420.
- [34] Klaus A, Kleiner M. Developments in the Manufacture of Curved Extruded Profiles-Past, Present and Future[J]. *Light Metal Age*, 2004(62): 22-32.
- [35] Becker D, Schikorra M, Tekkaya A E. *Flexible Extrusion of 3-D Curved Profiles for Structural Components*[C]. Florida: Proceedings of 9th International Aluminum Extrusion Technology Seminar, 2008.
- [36] Selvaggio A, Chatti S, Khalifa N B, et al. *New Developments in Extrusion of Profiles with Variable Curvatures and Cross-Sections*[C]. Florida: Proceedings of 10th International Aluminum Extrusion Technology Seminar, 2012.
- [37] Li Mingsuo (李明锁), Zhang Leling (张乐林). *Hot Extrusion Technique for Hollow Steel* (中空钢热挤压法生产工艺): China, ZL02135367. 0[P]. 2007-05-23.