

综述

重型热挤压工艺与装备技术综述

雷丙旺¹, 张 磊², 周乐育³, 马庆贤²

(1. 内蒙古北方重工业集团有限公司, 内蒙古自治区 包头 014030; 2. 清华大学 机械工程学院, 北京 100084;
3. 中国机械总院集团北京机电研究所有限公司, 北京 100083)

摘要: 重型挤压成形的三向压应力状态, 使其在大规格难变形金属成形同步改性上具有独特的技术优势, 决定着重型挤压产业的竞争力, 是世界强国博弈的重要科技领域。从大规格、高性能难变形金属制件改性成形机理出发, 归纳总结了国内 3.6 万吨垂直挤压机立项以来重型挤压工艺与重型挤压装备技术进展, 包括重型挤压成形工艺技术、低塑性金属挤压成形工艺技术、重型挤压装备技术、典型产品开发与应用等, 分析了各技术现状和需要继续研究的方向, 旨在为关键领域核心制件的极端成形制造自主可控提供技术支撑。

关键词: 重型挤压工艺; 垂直挤压机; 难变形金属; 挤压成形机理; 大规格管材

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2025.03.001

中图分类号: TG37

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2025) 03-0001-13

Research progress on heavy-duty hot extrusion process and equipment technology

Lei Bingwang¹, Zhang Lei², Zhou Leyu³, Ma Qingxian²

(1. Inner Mongolia North Heavy Industries Group Corp. Ltd., Baotou 014030, China;

2. School of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

3. China Academy of Machinery Beijing Research Institute of Mechanical & Electrical Technology Co., Ltd., Beijing 100083, China)

Abstract: The triaxial compressive stress state of heavy extrusion forming provides unique technical advantages in the simultaneous modification of large-scale difficult-to-deform metals, determining the heavy-duty extrusion industrial competitiveness and serving as a crucial technological field in the global technological competition among leading nations. Starting from the modification and forming mechanism of large-scale, high-performance and difficult-to-deform metal components, the technological advancements in heavy extrusion process and equipment since the establishment of the domestic 360 MN vertical extrusion press project were summarized. These advancements included technologies for heavy-duty extrusion forming, low-plasticity metal extrusion forming, heavy-duty extrusion equipment and development and application of typical products. The current status of each technology and the directions for further research were analyzed, aiming to provide technical support for the independent control of extreme forming manufacturing of core components in critical fields.

Key words: heavy extrusion process; vertical extrusion equipment; difficult-to-deform metals; mechanism of extrusion forming; large-scale tubular

随着我国能源、航空及国防等领域的发展, 对大规格、高性能难变形金属制件的需求不断提升, 比如超超临界大口径厚壁耐热管件、四代钠冷堆核电大口径不锈钢管、航空大直径粉末高温合金棒件和超高强韧大口径火炮身管等, 其性能水平在一定程度上决定了装备所能够达到的性能水平以及装备的服役可靠性和寿命, 成为高端装备发展的核心

“卡脖子”问题。重型挤压成形的三向压应力状态, 可使难变形金属获得单道次大变形量, 在实现成形过程同步改性方面具有独到的技术优势。但重型挤压技术复杂, 1955 年美国 Wyman-Gordon 公司建成 3.15 万吨垂直挤压机, 独家垄断世界重型挤压技术, 并称之为其国家的核心技术。2003 年, 以师昌绪院士为组长的中国工程院《发展我国大型锻压装备研究》咨询报告中指出, “大型难变形金属挤压机在我国还是一个空白, 已经制约了相关武器装备尤其是军用先进航空发动机的发展”。

2006 年, 内蒙古北方重工业集团有限公司 (以下简称北方重工) 联合清华大学等国内 20 余家

收稿日期: 2025-03-14; 修订日期: 2025-03-16

基金项目: 国防基础科研计划 (JCKY2022208A002)

作者简介: 雷丙旺 (1966-), 男, 博士, 正高级工程师

E-mail: leibingwang@163.com

优势单位,开始自主研发世界最大的黑色金属垂直挤压机,并于 2009 年 7 月 13 日热调试一次成功,挤出了我国第一支大口径厚壁无缝钢管,实现了我国极端挤压技术从 0 到 1 的突破。从 2009 年以来,陆续突破大口径耐热钢厚壁管“改性成形”等核心工艺技术,为我国多项国家重大工程任务的完成做出了开创性贡献。本文分析了大规格、高性能、难变形金属重型挤压工艺与装备技术的发展现状和需要持续探索的方向,旨在为关键领域核心制件的极端成形制造自主可控提供技术支撑。

1 超大尺寸高强度难变形金属改性成形机理

难变形材料一般指加工过程中因强度高、塑性差、难以改变形状或尺寸的材料。难变形金属管材因其高强度、高耐腐蚀性等特性,在航空航天、石油化工、军工等领域具有广泛应用。然而,由于其难变形的特性,制造过程中需要关注材料选择、加工工艺及后续热处理等技术。高强度难变形金属的成形过程是个复杂系统的工程问题,除了塑性变形区连续介质力学以外,还需探讨微观组织演化机制、材料可加工特性及摩擦边界条件。

1.1 难变形材料微观组织演化机制

耐热钢、高强钢、钛合金、高温合金等典型难变形材料的热变形行为研究,是其热加工工艺设计优化的理论基础,国内外学者对此开展了大量研究。庞佳丽^[1]、王晋忠等^[2]、Xiao Y Z H 等^[3]、万志鹏^[4] 分别对 AerMet100 高强钢、TC4 双相钛合金、GH4720LI 高温合金等材料的热变形行为进行了研究,明确了其塑性变形特征和热变形区间,探讨了相变及再结晶组织演化机制。翟月雯等^[5] 构建了 P91 耐热钢复杂工艺路径下热变形条件与稳态晶粒尺寸的非线性函数关系,如图 1 所示,明确了 Z 参数表征的多机制动态晶粒演化区域,确定了粗晶、细晶控制条件,如图 2 所示,为复杂锻造工艺路径下的混晶组织控制提供了基础。

1.2 三向压应力对难变形材料可加工特性的影响

大尺寸制件极限制造过程中,难变形金属可加工特性的认识及塑性潜能的发掘是一个新的挑战,不同成形工艺应力状态对于材料塑性有重要影响。高温三向压应力状态可以消除孔隙性缺陷,使难变形金属性能得到改善,裂纹不易萌生或扩展,甚至脆性材料大理石和红砂石在非常大的三向压应力作

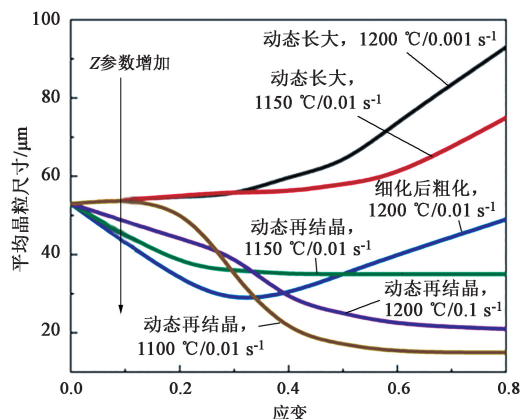


图 1 变形工艺与 P91 耐热钢晶粒演化路径及平均晶粒尺寸关系
Fig. 1 Correlation between deformation process and grain evolution path with average grain size in P91 heat-resistant steel

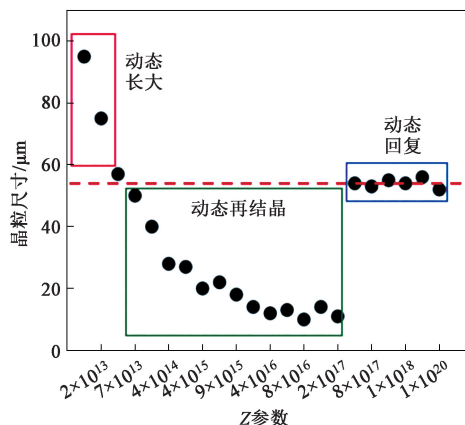


图 2 Z 参数与 P91 耐热钢稳态晶粒尺寸关系
Fig. 2 Correlation between Z parameter and steady grain size in P91 heat-resistant steel

用条件下也能够发生塑性变形。

三向压应力之所以可提高材料的塑性,是由于:(1) 三向压应力状态能遏制晶间相对移动,阻止晶间变形,从而提高了塑性;而拉应力会促进晶间变形,加速晶界的破坏;(2) 三向压应力状态有利于消除由于塑性变形所引起的各种破坏,能促使被破坏的晶内和晶间的联系得到恢复,这样,不仅使金属变得致密,而且还能使各种显微裂纹,甚至宏观破坏得到修复;(3) 三向压应力状态能使金属内某些夹杂物的危害程度大为降低,因金属内部夹杂物的存在,如同内部孔洞一样会产生应力集中而带来危害;(4) 三向压应力状态可以抵消或减小由于不均匀变形而引起的附加应力,从而减轻了附加拉应力所造成的破坏作用。

材料挤压过程中材料处于三向压应力状态,因此,充分利用合理的挤压工艺能够有效地提高材料

的变形能力, 能够使难变形材料, 甚至脆性材料、粉末材料等发生大塑性变形, 通过材料的再结晶实现材料内部的晶粒细化, 实现孔隙性缺陷的焊合, 消除内部缺陷, 提高材料的性能。

1.3 难变形材料挤压过程边界条件

润滑剂的优选及摩擦边界条件的构建是超大尺寸高强度难变形金属挤压成形过程的又一个复杂问题, 需在工件与模具表面之间形成长效连续润滑膜, 从而减小摩擦, 确保制件挤压过程稳定塑性变形。润滑剂在材料成形中的作用机理主要有以下几个方面。

(1) 减小表面粘附力: 润滑剂通过在表面形成一层润滑膜以减小表面粘附力, 从而降低材料的表面能量。

(2) 降低表面摩擦力: 润滑剂可以减少两个表面之间的接触点数量, 从而降低表面摩擦力。

(3) 降低表面热量: 润滑剂还可以降低表面的摩擦热量, 从而减小材料的温度。

对于部分挤压过程易开裂的热塑性较差的材料, 还需采用包套工艺。包套工艺不仅可改善温度均匀性对材料塑性的影响, 还可改善加工材料表面部分的拉应力状态, 同时可以改变模具与材料之间的润滑条件, 因而能够用于辅助加工许多正常条件下难以变形的材料。

2 重型挤压成形工艺

随着挤压制件尺寸的急剧增大, 使得坯料内部缺陷、模具尺寸及润滑控制稳定性居于极端状态, 科研工作者对超大尺寸制件重型挤压成形控制工艺、长寿命复合挤压模具、重型挤压玻璃态润滑等极端成形工艺技术开展了研究。

2.1 超大尺寸制件重型挤压成形控制工艺技术

在超大尺寸结构件重型挤压成形技术方面, 北方重工、中国机械总院集团北京机电研究所有限公司针对无缝管材挤压成形开展了系列研究。雷丙旺等^[6]针对国内 630 ℃ 超超临界机组锅炉管用 G115 耐热钢大口径厚壁无缝钢管的挤压工艺进行了研究, 将其挤压温度提升至 1240 ℃, 经热处理后其冲击韧性得到了显著提高。刘海江等^[7]利用有限元方法对大长径比管坯挤压过程进行模拟研究, 得出加热温度和挤压模角是挤压载荷的关键影响因素的结论, 并基于此对挤压工艺进行了优化, 于 360 MN 垂直挤压机实现一次挤压试制成功。

2.2 长寿命复合挤压模具技术

在挤压工艺过程中, 挤压筒需要承受周期性的高温高压与剧烈摩擦运动, 严苛的服役环境易使挤压筒出现疲劳失效, 导致挤压筒消耗成本较高。为提升挤压筒使用寿命, 多层组合挤压筒通过多层筒体间的过盈配合形成预紧力, 使得挤压筒受力均匀, 承载能力提高^[8-10]。多层挤压筒整体锻件制造成本较高, 工作过程中内壁处于较大拉应力状态, 易产生疲劳失效。由于挤压筒位于挤压机的机架内部, 多层挤压筒尺寸较大, 制造成本、装配成本较高, 对设备空间要求也较高。为了减小挤压筒外径, 减小设备整体尺寸并控制成本, 清华大学刘长勇等^[11]和吴任东等^[12]基于预应力缠绕技术, 针对重型挤压设备开发出预应力钢丝缠绕剖分-组合挤压筒, 如图 3 所示^[12], 通过合理的预紧系数设计, 在筒外施加外压使各层处于压应力状态, 采用剖分式外筒也可保证结构的稳定性。预应力钢丝缠绕挤压筒具有结构疲劳强度高、质量轻、制造难度低等优点^[13-14], 可以替代多层挤压筒, 降低挤压筒半径比, 进而有效缩小设备尺寸。另一方面, 剖分式结构采用铸件替代大型锻件, 可进一步降低成本。预应力钢丝缠绕剖分-组合挤压筒从尺寸、承载能力、使用寿命、制造成本等方面全面提升了重型挤压装备挤压筒的应用效果, 该结构在 360 MN 垂直挤压机中成功应用。

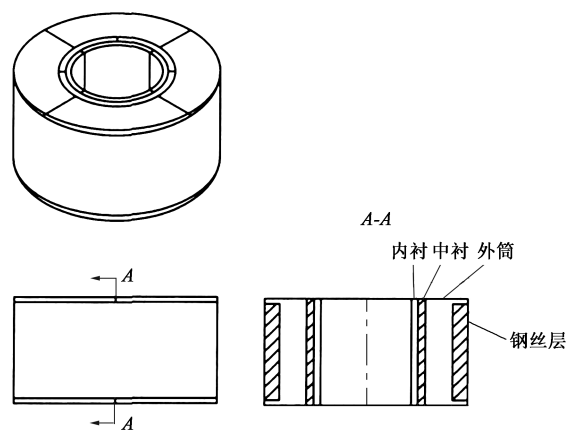


图3 预应力钢丝缠绕挤压筒结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of prestressed steel wire-wound extrusion container structure

2.3 重型挤压玻璃态润滑技术

挤压筒与高温金属直接接触, 易出现机械磨损与疲劳磨损, 因此, 摩擦润滑是挤压成形过程的关键问题之一。摩擦过大时, 坯料内外部金属流动不均匀, 易出现变形死区, 且容易导致挤压筒、芯棒

等的寿命下降。自 20 世纪 40 年代起, 欧美等国陆续将玻璃润滑剂用于热挤压过程的润滑^[14]。在挤压成形过程中玻璃润滑剂应涂敷在坯料的前端面(与模具间)、外表面(与挤压筒间)和内表面(与芯棒间)^[15], 保证挤压全流程坯料运动的稳定润滑。宝鸡钛业股份有限公司协同北京天力创玻璃科技开发有限公司^[16]对钛合金挤压用玻璃垫润滑效果进行了研究, 基于玻璃在高温下熔化随同热金属流动形成润滑膜层的原理, 在模具与坯料之间放置玻璃垫, 起到隔热、保护和润滑作用, 有效提升了 950 ℃ 钛合金挤压制品的表面质量。

挤压过程中玻璃润滑膜厚度对制品的表面质量有显著作用, 润滑膜厚度受玻璃润滑剂热扩散系数和粘度的影响。另一方面, 需要设计合适的挤压工艺控制膜厚度。Gupta A K 等^[17]针对玻璃润滑不锈钢挤压工艺对表面质量的影响进行了研究, 观察到润滑膜太厚时制品表面较粗糙且易出现磨痕; 无明显润滑膜附着的制品表面存在橘皮现象; 部分附着润滑膜的制品表面存在部分缺陷; 在较低的温度和挤压速率下, 表面均匀附着较薄润滑膜的制品表面较为光滑, 表面质量良好。马晓晖等^[18]针对大口径无缝钢管热挤压过程摩擦润滑边界条件进行了研究, 得出水基石墨+玻璃润滑剂复合润滑方式的摩擦因数为 0.03~0.05, 为大口径管材挤压成形工艺优化研究提供了参数依据。段素杰等^[19]基于玻璃润滑剂开发经验与热挤压试验数据, 给出了不锈钢挤压玻璃润滑剂的适宜粘度参数, 如表 1 所示。

表 1 不锈钢玻璃润滑剂的适宜参数

Table 1 Optimal parameters of glass-based lubricants for stainless steel

类型	粒度/目	工作温度区间/℃	适宜粘度范围/(Pa·s)
外涂粉	150	1170~1200	40~65
扩孔内涂粉	40~150	1180~1220	100~160
挤压内涂粉	40~150	1180~1200	200~255
玻璃垫	40~180	1170~1240	40~126

3 低塑性金属挤压成形工艺

随着航空发动机高涵道比、高推重比的发展, 粉末高温合金涡轮盘和钛铝金属间化合物叶片等热端部件的应用需求逐渐增加。受变形应力状态对粉末高温合金原始粉末颗粒边界裂纹演化的影响, 成形过程中表面开裂现象十分严重, 使得粉末高温合

金锭大变形挤压开坯成为涡轮盘制造核心“卡脖子”技术之一^[20~24]。

3.1 低塑性金属包套挤压成形技术

粉末高温合金、金属间化合物等低塑性金属挤压成形工艺是高温材料科学研究热点和焦点, 更是工程技术亟需突破的关键点。热挤压工艺会对粉末高温合金铸锭发生强烈的剪切变形, 形成再结晶组织, 从而达到晶粒细化和组织均匀的效果, 同时可以有效消除合金中原始颗粒边界, 破碎合金的非金属夹杂物^[25~26]。但由于挤压模口区域应力状态发生变化, 如图 4 所示, 其中, σ_r 为径向应力, σ_z 为轴向应力, σ_n 为法向应力, τ_n 为摩擦力, B 点温度较低且累积塑性变形大, 附加变形导致其处于双向拉应力状态, 极易诱发低塑性粉末高温合金多晶型相界 (Polymorphic Phase Boundary, PPB) 面开裂, 见图 5。

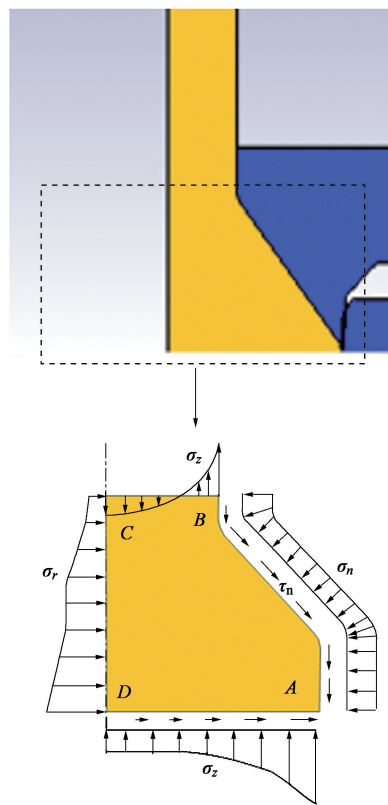


图 4 挤压模口区域应力状态

Fig. 4 Stress state in extrusion die orifice region

包套挤压是改善坯料温降和润滑的一种约束变形方式, 有利于避免挤压过程坯料开裂, 提升挤压成功率, 包套挤压示意图如图 6 所示。通过软硬复合包套, 一是控制了表面温降, 减小内外温差, 提高了极限应变, 二是降低合金锭表面拉应力, 进一步降低了坯料开裂倾向。在包套的基础上, 增加前

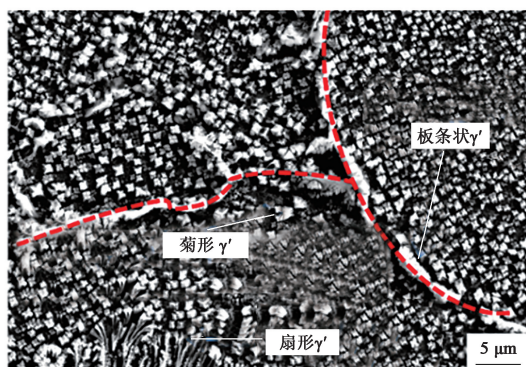


图5 高温合金 FGH4096 原始组织 PPB

Fig. 5 PPB in as-processed microstructure of superalloy FGH4096

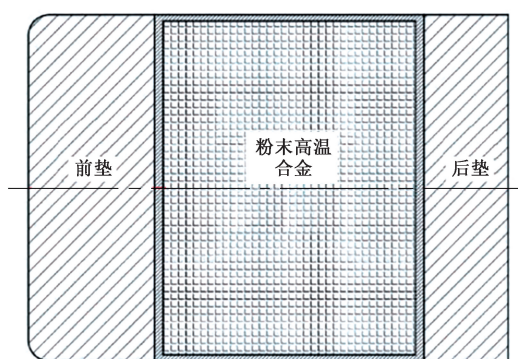


图6 粉末高温合金挤压锭坯示意图

Fig. 6 Schematic diagram of powder metallurgy superalloy extrusion billet

后垫块, 控制挤压过程金属流动, 可提升成品的材料利用率。

3.2 粉末高温合金包套挤压成形工艺

针对不同类型的低塑性难变形金属, 国内外学者做了诸多的尝试。早在 1971 年, 普惠公司利用挤压比为 6:1 的包套热挤压成形了直径约为 $\Phi 305$ mm 的棒材。GE 公司利用热挤压制备了大尺寸的细晶均质高性能的 René 95 合金, 其参数为挤压温度 1090~1100 °C, 挤压比 ≥ 6 ; René88DT 合金的挤压温度为 1070~1100 °C, 挤压比为 7~8, 棒材直径为 $\Phi 200 \sim \Phi 300$ mm^[27-28]。同时, NASA/GE/PW 这 3 家公司联合利用温度为 1010~1107 °C、挤压比为 3~6 的包套挤压工艺得到了细晶的 René 104 合金棒材, 此外 Rolls-Royce 和 SNECMA 等公司也制备了大尺寸的细晶包套挤压棒材^[24, 29-30]。

国内对于粉末高温合金的挤压工艺研究明显晚于国外, 主要研究机构有中国航发北京航空材料研究院、钢铁研究总院有限公司等单位^[31-33]。中国航发北京航空材料研究院联合北方重工, 利用 360 MN

垂直挤压机制备了直径 $\Phi 280 \sim \Phi 400$ mm 的 FGH4096 合金棒材, 晶粒度为 ASTM11 级, 成材率较之国外提升了约 20%^[20]。

3.3 金属间化合物包套挤压成形工艺

针对金属间化合物, 特别是 TiAl 合金, 其金属间化合物的本征脆性导致其热加工性能较差, 加之其具有复杂难控的相变过程, 使得热加工面临巨大的难度。包套挤压解决了合金在变形过程中明显的温降问题, 约束变形使得其应力分布更加均匀, 提升了其在变形过程中的成功率。

一般情况下, TiAl 合金会采取两种包套挤压的工艺进行组织和性能的提升: 一类是 $(\alpha + \gamma)$ 双相区或者 $(\alpha + \gamma + \beta)$ 三相区进行包套挤压, 工艺参数为挤压温度在 1250 °C 之下, 应变速率在 $0.01 \sim 0.1 \text{ s}^{-1}$ 区间内。该区间的挤压可以把组织细化, 将片层组织破碎, 促进较大程度的再结晶, 促使合金的强塑性同时提升, 但是其组织存在一定的不均匀性^[34-37]; 另一类工艺是采取在 α 单相区或者更高的温度区间进行包套挤压, 一步得到相应的近片层或者全片层组织, 工艺参数一般在 α 单相区的温度以上, 应变速率控制在 0.1 s^{-1} 以下。该工艺的特点是短流程进行特定组织的制备, 可以实现形性协同调控^[38-42], 有望获得有特定织构类型或者无织构均质的 TiAl 合金棒材。

4 重型挤压装备技术

重型热挤压装备是实现热挤压工艺的关键, 从美国 Wyman-gordon 建成 315 MN/126 MN 垂直热挤压机组以来, 一套重型热挤压机组均包括一台制坯机和一台挤压机两台重型压机。美国 Wyman-gordon 公司于 1955 年建成的 315 MN/126 MN 垂直挤压机组 (图 7a), 有效支撑了美国国防军工、核电等工业的发展, 形成独家垄断数十年的局面^[43]。进入 21 世纪后, 中国的重型热挤压开始快速发展。2009 年, 北方重工建成 360 MN/150 MN 垂直挤压机组 (图 7b), 成为当时全世界最大吨位的重型热挤压装备^[44]。此后, 2011 年, 河北宏润重工集团有限公司建造了 500 MN/160 MN 机组^[45-46], 2015 年, 青海中钛青锻装备制造有限公司采用模锻压机结构设计建造了 680 MN/260 MN 机组, 该设备具备挤压功能, 但应用受到一定限制^[47]。

重型垂直热挤压装备的研制涉及多项关键技术, 本文将主要阐述如下 3 个方面: (1) 重型装



图 7 典型的重型热挤压装备

(a) 美国 Wyman-Gordon 公司 (b) 内蒙古北方重工业集团有限公司

Fig. 7 Typical heavy-duty hot extrusion equipments

(a) Wyman-Gordon Company in the United States (b) Inner Mongolia North Heavy Industry Group Corp. Ltd.

备本体机架设计制造技术；(2) 超高压大流量液压动力系统设计、密封及控制技术；(3) 基础减振隔振技术。

4.1 重型挤压装备本体机架设计制造技术

重型挤压装备的本体机架是整台压机最为重

要的结构基础，设计需系统考虑承载能力、可制造性、使用安全性和寿命问题等多个因素，其结构构型和预紧设计对装备的整体性能、建造成本、施工周期和使用性能有决定性影响^[48]。图 8 为重型承载机架的结构演变过程，其中， F 为成形载荷。

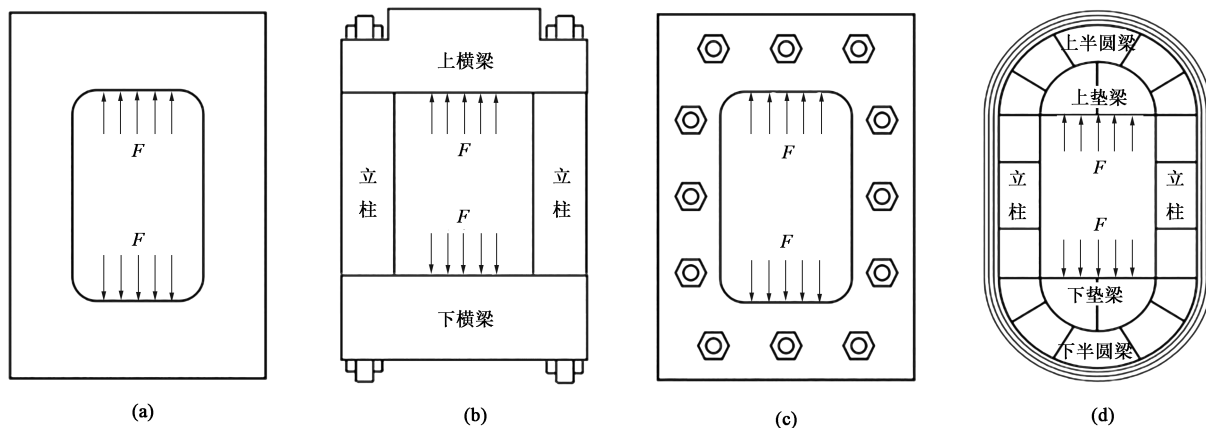


图 8 国内外典型重型热挤压装备重型承载机架的结构演变

(a) 整体铸造结构 (b) 梁柱分开式结构 (c) 板框组合结构 (d) 钢丝缠绕预紧结构

Fig. 8 Structural evolution of heavy-duty load-bearing frames of typical heavy-duty hot extrusions equipments at home and abroad

(a) Monolithic cast structure (b) Separated beam-column structure (c) Plate-frame composite structure (d) Steel wire-wound pre-stressed structure

从图 8 可以看到，重型承载机架经历了整体铸造结构→梁柱分开式结构→板框组合结构→梁柱套筒拉杆结构→钢丝预紧结构，从主承载方向无预应力保护到有预应力保护的发展历程^[48-50]。特别是在传统钢丝缠绕预紧机架基础上，将机架大型构件进一步剖分为若干个子件，对剖分面进行微结构处理，使用预应力钢丝将各个子件“捆”为一个整体，有效解决了巨型机架大型构件的制造难题并实现了机架的全面预应力保护^[51-54]。采用此类机架的全世界首套重型热挤压装备 360 MN/150 MN 机组，迄今为止已安全运行超过 15 年，技术的可行性和可靠性得

到充分验证。此项技术在我国后续多台重型装备中获得成功应用，如 400 MN 重型航空模锻压机、300 MN 等温锻造压机，以及 600 MN 重型航空模锻压机等。

4.2 超高压大流量液压动力系统设计、密封及控制技术

重型热挤压装备由液压缸提供挤压力。系统压力越高，则所需要的油缸活塞面积越小，可减少液压缸的体积和数量，便于靠近机架中心轴线布置，有利于改善装备的总体受力。图 9 为液压缸布置与动力传递示意图。

液压缸的密封，尤其是活塞与缸体之间的动密

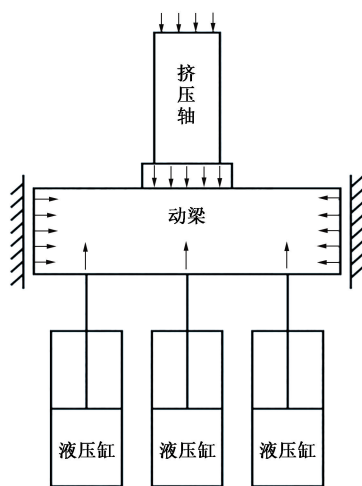


图9 挤压过程中的液压系统布置与动力传递

Fig. 9 Hydraulic system configuration and power transmission in extrusion process

封极为关键。当活塞和缸体相对运动时，密封圈在超高压液压油的作用下，容易被挤入活塞与缸体之间的间隙，导致密封失效。因此，超高压对密封件的材质和强度提出了更高的要求。当密封件的膨胀量无法补偿活塞与缸体之间的间隙时，可采用膨胀环技术^[49]。

重型热挤压装备庞大的超高压、大流量液压系统，分为阀控和泵控两种方式^[53]。阀控系统采用控制阀的开口度调节液压系统的流量和压机的运行速度，其优点是响应速度快、动态响应性好、控制精度较高，缺点是存在较为严重的溢流损失和能量损失。泵控系统则是通过改变泵的排量调节液压系统的流量和压机的运行速度，其优点是无溢流损失、效率高、能量损耗低，缺点是泵的排量调节速度较慢、动态响应性较阀控低。重型热挤压装备的液压系统功率极大，运行效率更为关键，因此，泵控系统是更为适合的控制方式。360 MN/150 MN 机组采用超高压、泵直传液压系统，系统压力超过 40 MPa。需要指出的是，目前，重型热挤压装备所使用的泵、阀、控制器等核心元器件仍然以国际供应商为主，如力士乐、PAHNKE、Oligear 等，国内同类产品与国外仍有较大差距，尤其是超高压、大排量的变量泵以及超高压、大通径的高精度比例阀等，超高压、大流量液压元器件的自主可控仍然是我国重型液压装备亟需解决的卡脖子问题^[55-59]。

4.3 基础减振隔振技术

对于重型热挤压装备而言，其振动问题不可忽略^[60-61]，振动产生的来源主要包括：(1) 挤压载荷的波动性；(2) 液压系统的脉动性；(3) 重型运动

部件的惯性力。

钢丝预应力缠绕压机质量大幅降低，加重了设备的冲击振动问题。360 MN/150 MN 热挤压机组首创了巨型液压机基础弹性阻尼隔振技术，即取消了传统的地脚螺栓，在压机和地基之间铺设弹性阻尼隔振体，减缓压机对基础的冲击振动，并防止压机产生位移^[59,62-64]。这一技术在随后的 400 MN 重型航空模锻压机、300 MN 等温锻造压机，以及 600 MN 重型航空模锻压机等多台重大装备中推广应用，工程可靠性得到充分验证。从已有的工程应用看，弹性阻尼模块隔振体具有安装简单、使用寿命长、成本低、设备稳定性好等优点，对于低频弱冲击性的液压锻造设备、液压冲压设备、热模锻设备等具有较好的隔振效果^[65-66]。

5 典型产品开发与应用

5.1 超超临界火电机组大口径厚壁无缝钢管

世界范围内，电站锅炉用大口径厚壁无缝钢管规格为 $\Phi 273 \text{ mm} \sim \Phi 1066 \text{ mm}$ 、壁厚为 20~130 mm。其中，除 $\Phi 711 \text{ mm}$ 以下的部分钢管可采用大皮尔格轧制工艺生产外，目前，世界上高压大口径厚壁无缝钢管主要采取 3 种工艺生产：快锻（Conventional Technology，即自由锻造式）、穿孔拉拔（Mannesmann Technology，即德国曼内斯曼式）和垂直挤压（Cameroon Technology，即美国喀麦隆式）。

北方重工于 2009 年 7 月 13 日完成 3.6 万吨挤压机首次热试车，代表中国成功挤出了第 1 支大口径厚壁无缝钢管。至 2010 年底，实现 SA106C、15CrMoG、P11、P12、P22、12Cr1MoVG、12Cr2MoG 等低合金大口径厚壁无缝钢管的批量生产。挤压生产的 P91 钢管用于华能左权煤电有限责任公司 60 万千瓦超临界四大管道，实现了超临界电站挤压四大管道应用零的突破。

2010 年 11 月，国家能源局确立南通两台 100 万千瓦超超临界机组四大管道国产化示范项目。2012 年 12 月 25 日，北方重工顺利完成 $\Phi 560 \text{ mm}$ （内径为 $\Phi 368 \text{ mm}$ ） $\times 96 \text{ mm}$ （壁厚）和 $\Phi 839 \text{ mm}$ （内径为 $\Phi 731 \text{ mm}$ ） $\times 54 \text{ mm}$ （壁厚）两种 P92 钢管的生产，代表电力用大口径管最高水平，百分百需要进口的大口径厚壁无缝钢管实现国产化“0”的突破。

2013 年，河北宏润核装备科技股份有限公司（以下简称为宏润核装）开发出 P92 耐热钢管，

2015 年通过了国家发电设备中心组织的 P92 钢管产品鉴定。但至今尚未纳入“五大六小”电力及中煤电力有限公司的合格供方及采购名单^[67]。

天津工业大学的陈俊豪等^[68]研究认为,提高 P92 钢高温性能的关键是生成足够的弥散分布的 MX 型碳氮化物,并在高温长时作用下保持组织稳定,采用形变热处理工艺进行生产是此类钢发展的主要方向。

北方重工与钢铁研究总院有限公司、宝武特种冶金有限公司等在 2016–2019 年开展了 G115 大口径厚壁无缝钢管的研制,通过低温优化制坯和高温挤压工艺,解决了大口径钢管冲击性能低的问题^[69]。2019–2021 年,开展攻关大口径管焊接显微缺陷问题,通过改进精炼工艺,创新性地解决该问题,解决了 G115 大口径厚壁无缝钢管工程化的两点关键问题。

5.2 大口径奥氏体不锈钢厚壁无缝钢管

对于大口径奥氏体不锈钢无缝钢管,一般采“次锻造开坯—热轧穿孔—冷轧或冷拔”的工艺流程生产,由于锭坯成分偏析与组织粗大严重,锻造开坯火次多,生产周期长,而且产品的最大壁厚受限制。

北方重工在 2011–2014 年开展 TP304、316LN、TP321、TP347 等大口径厚壁不锈钢钢管试制,取得技术突破。

2018 年,针对 650 °C 先进超超临界机组需求,开展瑞典山特维克公司 Sanicro25 奥氏体不锈钢大口径厚壁无缝钢管的开发,首创软包套挤压技术,挤压规格为 $\Phi 500\text{ mm}\times 335\text{ mm}$ 的钢管,力学性能和金相组织指标均超过了 Sanicro25 小口径无缝钢管的相关要求。

2019 年,针对国家四代核电的迫切需求,研制并批量生产 TP316H 超纯耐蚀不锈钢管,规格为 $\Phi 695\text{ mm}\times 57\text{ mm}$ (壁厚)、 $\Phi 920\text{ mm}\times 52\text{ mm}$ (壁厚)、 $\Phi 700\text{ mm}\times 70\text{ mm}$ (壁厚) 等钢管,解决了不锈钢管塑性低、难变形和晶粒细化的技术难题。

江苏武进不锈钢股份有限公司开展了高压临氢装置用大口径不锈钢无缝管的产品研发和工艺研究,通过热锻开坯+轧制+热穿孔+冷轧试制出了规格为 $\Phi 610\text{ mm}\times 59.54\text{ mm}$ 的大口径厚壁奥氏体不锈钢无缝管^[70]。

四川三洲特种钢管有限公司采用大口径离心浇铸坯为管坯,通过轧制开发出了 $\Phi 762\text{ mm}\times 44\text{ mm}$ 、 $\Phi 610\text{ mm}\times 20/38.39/32\text{ mm}$ 等系列规格 304L 大口径

不锈钢管产品^[71]。

攀钢集团成都钢钒有限公司采用离心浇铸制坯—皮尔格轧机轧管工艺,开发出规格为 $\Phi 355.6\text{ mm}\times 42.8\text{ mm}$ 大直径厚壁 TP347H 不锈钢管^[72]。

5.3 大口径钛合金厚壁无缝管材

钛合金具有比强度高、耐腐蚀性好等特点,被广泛应用于航天航空、海工装备、石油化工、能源发电、军事工业等领域,拥有“全能金属”、“海洋金属”、“现代金属”、“第三代金属”等美誉。但钛合金塑性低,为典型的难变形金属。

2012–2013 年,北方重工与宝鸡钛业股份有限公司、中国航发北京航空材料研究院合作,开展了“钛合金锻坯—制坯—挤压成形”工艺的试制,挤压出 $\Phi 500\text{ mm}\times \Phi 380\text{ mm}$ 规格 BTi431 钛合金厚壁管材和 $\Phi 300\text{ mm}$ 规格 Ti25V15Cr、Ti35V15Cr 阻燃钛合金棒材。

2017–2019 年,北方重工开展 TC4 钛合金锻坯和铸锭两种原料挤压大口径钛合金厚壁管材研究,完成规格为 $\Phi 615\text{ mm}\times \Phi 250\text{ mm}$ 和 $\Phi 595\text{ mm}\times \Phi 505\text{ mm}$ 钛合金无缝管的挤压,两种工艺路线管坯经环轧制备的典型机匣环件毛坯,各项指标均符合技术要求。

宝钛集团针对钛合金管材采用多火次锻造开坯+斜轧穿孔+热轧工艺生产出了 $\Phi 560\text{ mm}\times 25\text{ mm}$ 规格的 TC4 钛合金无缝管^[73]。

5.4 大直径粉末高温合金棒材

航空发动机粉末涡轮盘工作条件苛刻,组织性能要求高。美国在 20 世纪 60 年代开始采用热挤压技术制备粉末高温合金棒材,通过大变形量的热挤压开坯,有效破碎材料中的冶金缺陷(如夹杂物、原始颗粒边界等),实现粉末盘组织均匀,达到高性能、长寿命和高可靠性的目标。

北方重工从 2011 年与中国航发北京航空材料研究院开发大直径 FGH4096 棒材挤压开坯技术,通过工艺研究和生产试制,突破了近等温包套结构优化、等静压粉末合金锭镦粗近等温制坯、粉末锭坯快速高效润滑、包套粉末锭坯加热与防护和挤压粉末棒坯混晶控制、棒坯表面质量和直线度控制等关键技术,棒材质量达到国外同等水平,经后续等温锻造工艺制备的粉末高温合金涡轮盘已应用于多种型号发动机,使我国成为继美国之后第 2 个挤压高温合金大直径棒材实现装机应用的国家。

随着后续大型挤压设备的建造,我国 $\Phi 300\text{ mm}$ 级粉末高温合金棒材的挤压技术得到进一步发展,

国内目前具备较大吨位挤压机并开展大尺寸粉末高温合金热挤压研发的厂家还有青海中钛青锻装备制造有限公司和河北宏润重工集团有限公司^[74]。

5.5 大口径高温合金厚壁管材

镍基高温合金是 700 ℃ 发电技术高温蒸汽管道材料, 欧美日等国在镍基合金开发上做了大量工作, 按强化机理分为固溶强化型、析出强化型和复合强化型 3 大类。固溶强化型镍基合金主要有: Inconel617、Inconel617B (CCA617)、Inconel625、Haynes230、HR6W 等; 析出强化型镍基合金主要有: Inconel740、Inconel740H、Haynes282; 复合强化型镍基合金主要有: Nimonic263 等。

2012 年, 北方重工与钢铁研究总院有限公司合作, 成功试制 $\Phi 460\text{ mm} \times 80\text{ mm} \times 4000\text{ mm}$ 的 C-HRA-3 © (CCA617) 镍基合金管材, 实现了我国超大规格镍基管材“零的突破”。该成果验证了固溶强化型合金的工艺可行性, 成功解决了镍基合金高温变形抗力大、表面塑性差和热加工窗口窄 (1050~1150 ℃) 等技术难题。

陈正宗等^[75]研究了固溶处理工艺对 CN617 耐热合金组织和硬度的影响, 结果显示: 在 1125~1200 ℃ 温度范围内对合金进行固溶处理时, 晶粒正常长大, 晶粒平均尺寸从 31 μm 增长到 206 μm ; 固溶温度超过 1175 ℃ 时, 富 Cr 和 Mo 碳化物基本回溶。

2019~2024 年北方重工与钢铁研究总院有限公司、中国科学院金属研究所、宝武特种冶金有限公司等, 陆续完成析出强化型 Inconel 740H 镍基合金、C-HRA-2 © 镍基合金、GH984G 铁镍基合金、USN N06617 镍基合金等大口径管的试制研发试制, 材料性能全面达到 ASME SA-213^[76] 要求, 部分参数超越欧盟 EN 10305-6^[77] 要求, 镍基耐热合金大口径厚壁管材挤压技术居国际领先水平。

2020 年, 北方重工与西安热工研究院有限公司合作, 针对 650 ℃ 等级超超临界燃煤机组需求, 开展 HT700P 铁镍基合金大口径管的试制研发, 开发出 $\Phi 480\text{ mm} \times 70\text{ mm}$ 、 $\Phi 559\text{ mm} \times 80\text{ mm}$ 、 $\Phi 559\text{ mm} \times 90\text{ mm}$ 、 $\Phi 508\text{ mm} \times 85\text{ mm}$ 、 $\Phi 508\text{ mm} \times 65\text{ mm}$ 等规格的大口径厚壁管。2021 年 12 月 24 日, 北方重工发布了第 1 版 HT700P 合金企业标准, 并于 2024 年 8 月完成了该标准的纳标工作。

6 结语

本文综述了重型热挤压工艺与装备技术在大尺

寸难变形金属制件制造中的研究进展, 重点探讨了改性成形机理、挤压成形工艺、重型挤压装备技术以及典型产品应用。研究表明, 三向压应力在提升材料塑性方面具有显著优势, 而优化的挤压工艺和装备技术为高性能难变形金属制件的高效生产提供了重要保障。尽管如此, 当前技术仍面临复杂工况下微观组织调控、极端尺寸制件的高精度成形以及高性能润滑技术研发等挑战。未来的研究应聚焦于多学科交叉融合, 结合智能工艺优化、智能装备监控与故障预测等人工智能技术, 进一步提升工艺与装备能力。随着航空航天、能源、军工等领域对大尺寸高性能构件需求的持续增长, 重型热挤压技术在高性能难变形合金成形、智能化制造以及绿色生产方面的应用前景广阔。期待通过持续创新, 推动该技术迈向更高水平, 为高端装备制造的自主可控发展提供更强有力的技术支撑。

参考文献:

- [1] 庞佳丽. AerMet100 钢热变形及晶粒演化行为研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2024.
Pang J L. Study of Thermal Deformation and Grain Evolution Behavior of AerMet100 Steel [D]. Chongqing: Chongqing University, 2024.
- [2] 王晋忠, 王惠梅, 王永飞, 等. 变形态 TC4 钛合金热压缩本构方程及热加工图研究 [J]. 热加工工艺, 2023 (23): 100-104, 108.
Wang J Z, Wang H M, Wang Y F, et al. Study on constitutive equation and thermal processing map of deformed TC4 titanium alloy under hot compression [J]. Hot Working Technology, 2023 (23): 100-104, 108.
- [3] Xiao Y Z H, Deng Y C, An Y X, et al. Homogenization forging and deformation mechanism of near β titanium alloy in $\alpha+\beta$ region [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2024: 431239.
- [4] 万志鹏. GH4720LI 镍基合金高温变形行为及组织性能控制研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
Wan Z P. Hot Deformation Behavior and Microstructure & Properties Control of Ni-based Alloy GH4720LI [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [5] 翟月雯, 钟志平, 金泉林. P91 合金钢热变形力学行为的实验 [J]. 塑性工程学报, 2012, 19 (3): 88-93.
Zhai Y W, Zhong Z P, Jin Q L. Experimental research on mechanical property of P91 under high temperature thermal deformation [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2012, 19 (3): 88-93.
- [6] 雷丙旺, 李永清, 庞海平, 等. 新型马氏体耐热钢 G115 大口径厚壁无缝钢管制造技术 [J]. 金属功能材料, 2020, 27 (5): 14-19.
Lei B W, Li Y Q, Pang H P, et al. Manufacturing technology of

- novel heat resistant steel G115 large diameter heavy wall seamless pipe [J]. *Metallic Functional Materials*, 2020, 27 (5): 14–19.
- [7] 刘海江, 雷丙旺, 胡永平, 等. 大长径比管坯挤压工艺数值模拟及试制 [J]. *塑性工程学报*, 2023, 30 (12): 24–30.
- Liu H J, Lei B W, Hu Y P, et al. Numerical simulation and trial production of extrusion technology for pipe billet with large length to diameter ratio [J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2023, 30 (12): 24–30.
- [8] 陈庆. 挤压参数对 2A70 (2D70) 大规格挤压材细晶的影响 [J]. *铝加工*, 2010 (4): 22–26.
- Chen Q. Effect of extrusion parameters on grain refinement in 2A70(2D70) large scale extruded products [J]. *Aluminium Fabrication*, 2010 (4): 22–26.
- [9] 李浩, 裴楨, 王燕. 6061 棒材晶粒度大、粗晶环严重工艺研究 [J]. *铝加工*, 2013 (3): 20–22.
- Li H, Qiu Z, Wang Y. Research on large grain size and coarse grain ring of 6061 bar [J]. *Aluminium Fabrication*, 2013 (3): 20–22.
- [10] 赵云路, 刘静安. 第一讲 挤压筒的优化设计 (1) [J]. *轻合金加工技术*, 1996 (6): 34–41.
- Zhao Y L, Liu J A. Lecture 1: Optimal design of extrusion containers (1) [J]. *Light Alloy Fabrication Technology*, 1996 (6): 34–41.
- [11] 刘长勇, 张人佺, 颜永年, 等. 预应力钢丝缠绕剖分-组合大型挤压筒的热应力分析 [J]. *工程力学*, 2011 (5): 207–211.
- Liu C Y, Zhang R J, Yan Y N, et al. Thermal stress analysis on wire wound subdivided combined large extrusion container [J]. *Engineering Mechanics*, 2011 (5): 207–211.
- [12] 吴任东, 王雪凤, 张磊. 预应力钢丝缠绕剖分-组合挤压筒 [J]. *清华大学学报 (自然科学版)*, 2010, 50 (7): 974–979.
- Wu R D, Wang X F, Zhang L. Prestressed steel-wire winding split-assembled extrusion cylinder [J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2010, 50 (7): 974–979.
- [13] 林峰, 林智琳, 张磊, 等. 预应力钢丝缠绕技术在锻造/挤压压机上的应用 [J]. *锻压装备与制造技术*, 2010, 45 (1): 37–42.
- Lin F, Lin Z L, Zhang L, et al. The application of pre-stressed wire wound technique on the forge/extrusion presses [J]. *China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology*, 2010, 45 (1): 37–42.
- [14] Sejourmet J. Origin of the invention of steel extrusion by glass lubrication [J]. *Journal of the Franklin Institute*, 1956, 261 (3): 315–318.
- [15] 王宝顺, 林奔, 罗坤杰, 等. 玻璃润滑剂在钢热挤压工艺中的应用 [J]. *世界钢铁*, 2010, 10 (3): 44–50.
- Wang B S, Lin B, Luo K J, et al. Application of glass lubricant for hot extrusion of steel [J]. *World Iron & Steel*, 2010, 10 (3): 44–50.
- [16] 徐哲, 段素杰, 佟学文, 等. 玻璃垫在钛合金型材挤压中的应用 [J]. *中国材料进展*, 2008 (11): 37–40.
- Xu Z, Duan S J, Tong X W, et al. The application of glass pad in titanium section extruding [J]. *Materials China*, 2008 (11): 37–40.
- [17] Gupta A K, Hughes K E, Sellars C M. Glass-lubricated hot extrusion of stainless steel [J]. *Metals Technology*, 1980, 7 (1): 323–331.
- [18] 马晓晖, 边翊, 彭冲, 等. P91 无缝钢管立式热挤压工艺的边界条件 [J]. *锻压技术*, 2011, 36 (4): 119–122.
- Ma X H, Bian Y, Peng C, et al. Boundary conditions during vertical hot extrusion of thick wall seamless steel tube [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2011, 36 (4): 119–122.
- [19] 段素杰, 邹丰. 新型无缝钢管热挤压用玻璃润滑剂的应用 [A]. 第十二届全国塑性工程学术年会第四届全球华人塑性加工技术研讨会 [C]. 重庆, 2011.
- Duan S J, Zou F. Application of novel glass-based lubricant in hot extrusion of seamless steel tubes [A]. *The 12th National Annual Conference on Plasticity Engineering & the 4th Global Chinese Symposium on Plastic Processing Technology* [C]. Chongqing, 2011.
- [20] 石英男, 孙少斌, 曲敬龙, 等. 粉末高温合金热挤压工艺研究进展 [J]. *粉末冶金工业*, 2024, 34 (1): 124–133.
- Shi Y N, Sun S B, Qu J L, et al. Research progress on hot extrusion process of P/M superalloy [J]. *Powder Metallurgy Industry*, 2024, 34 (1): 124–133.
- [21] 张明, 刘国权, 胡本美, 等. 新型镍基粉末高温合金热挤压工艺有限元模拟与实验验证 [J]. *粉末冶金技术*, 2018, 36 (3): 223–229.
- Zhang M, Liu G Q, Hu B F, et al. Finite element simulation and experimental verification on hot extrusion of a novel nickel-base P/M superalloy [J]. *Powder Metallurgy Technology*, 2018, 36 (3): 223–229.
- [22] 刘趁意, 李付国, 王玉凤, 等. FGH96 合金挤压变形工艺数值模拟 [J]. *锻压装备与制造技术*, 2008, 43 (6): 83–86.
- Liu C Y, Li F G, Wang Y F, et al. The numerical simulation of FGH96 alloy extrusion process [J]. *China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology*, 2008, 43 (6): 83–86.
- [23] 刘光旭, 王晓峰, 杨杰, 等. 不锈钢包覆层对挤压态 FGH96 合金表层组织的影响 [J]. *热加工工艺*, 2022, 51 (5): 37–40.
- Liu G X, Wang X F, Yang J, et al. Effect of stainless steel coating on surface microstructure of hot-extruded FGH96 alloy [J]. *Hot Working Technology*, 2022, 51 (5): 37–40.
- [24] 贾建, 陶宇, 张义文, 等. 第三代粉末冶金高温合金 Ren6104 的研究进展 [J]. *粉末冶金工业*, 2007 (3): 36–43.
- Jia J, Tao Y, Zhang Y W, et al. Recent development of third generation P/M superalloy Ren6104 [J]. *Powder Metallurgy Industry*, 2007 (3): 36–43.
- [25] Banik A, Green K A. The mechanical property response of turbine disks produced using advanced PM processing techniques [J]. *Superalloys*, 2000: 69–74.
- [26] 王锦永, 郑磊, 陈辉, 等. GH625 镍基高温合金热挤压缺陷

- 原因探讨与分析 [J]. 金属加工 (热加工), 2023 (10): 119-122.
- Wang J Y, Zheng L, Chen H, et al. Discussion and analysis of the causes of hot extrusion defects in GH625 nickel-based superalloy [J]. MW Metal Forming, 2023 (10): 119-122.
- [27] Chang D R, Krueger D D, Sprague R A. Superalloy powder processing, properties, and turbine disk applications [J]. Superalloys, 1984; 245-273.
- [28] Barker J F, Vandermolen E H. Effect of processing variables on powder-metallurgy Rene'95 [J]. Superalloys, 1972; 1-23.
- [29] Guedou J Y, Lautridou J C, Honnorat Y. Powder metallurgy superalloy for disks development and applications [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 1993, 2 (4): 551-556.
- [30] Powell A, Bain K, Wessman A, et al. Advanced supersolvus nickel powder disk alloy doe chemistry, properties, phase formations and thermal stability [J]. Superalloys, 2016; 138678955.
- [31] 党利. Inconel 625 合金大型厚壁管挤压变形宏微观规律研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2016.
- Dang L. Study on the Macro-micro Deformation Rules During the Extrusion of Large-scale Thick-walled Inconel 625 Pipe [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2016.
- [32] 聂龙飞. FGH96 粉末高温合金热变形及动态再结晶演化研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
- Nie L F. Study on the Hot Deformation Behavior and Dynamic Recrystallization Behavior of FGH96 P/M Superalloy [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014.
- [33] 宋晓俊, 王超渊, 汪煜, 等. 挤压参数对镍基粉末冶金高温合金微观组织影响研究 [J]. 铸造技术, 2020, 41 (11): 1024-1029.
- Song X J, Wang C Y, Wang Y, et al. Effect of extrusion parameters on microstructure of Ni-based P/M superalloy [J]. Foundry Technology, 2020, 41 (11): 1024-1029.
- [34] 刘先锋, 刘冬, 刘仁慈, 等. Ti-43.5Al-4Nb-1Mo-0.1B 合金的包套热挤压组织与拉伸性能 [J]. 金属学报, 2020, 56 (7): 979-987.
- Liu X F, Liu D, Liu R C, et al. Microstructure and tensile properties of Ti-43.5Al-4Nb-1Mo-0.1B alloy processed by hot canned extrusion [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2020, 56 (7): 979-987.
- [35] 刘仁慈, 王震, 刘冬, 等. Ti-45.5Al-2Cr-2Nb-0.15B 合金热挤压组织与拉伸性能研究 [J]. 金属学报, 2013, 49 (6): 641-648.
- Liu R C, Wang Z, Liu D, et al. Microstructure and tensile properties of Ti-45.5Al-2Cr-2Nb-0.15B alloy processed by hot extrusion [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2013, 49 (6): 641-648.
- [36] 刘亮亮, 刘冬, 刘仁慈, 等. 热处理对 TiAl 合金挤压方棒组织与拉伸性能的影响 [J]. 稀有金属材料与工程, 2017, 46 (S1): 95-98.
- Liu L L, Liu D, Liu R C, et al. Effect of heat treatments on microstructure and tensile properties of TiAl alloy extruded below T_α [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2017, 46 (S1): 95-98.
- [37] Zheng G M, Tang B, Zhao S K, et al. Evading the strength-ductility trade-off at room temperature and achieving ultrahigh plasticity at 800 °C in a TiAl alloy [J]. Acta Materialia, 2022, 225 (1-2): 117585.
- [38] Yang G, Xu X J, Sun T L, et al. A refined fully lamellar TiAl alloy extruded at α -phase region: Microstructure and mechanical properties [J]. Materials Science and Engineering: A, 2023, 888: 145804.
- [39] 强凤鸣. TiAl 合金高温 α 相的变形行为及组织演化 [D]. 西安: 西北工业大学, 2022.
- Qiang F M. Deformation behavior and microstructural evolution of high-temperature α phase in TiAl alloys [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2022.
- [40] 强凤鸣, 寇宏超, 贾梦宇, 等. β 型 γ -TiAl 合金热变形过程中组织演化及动态再结晶行为研究现状 [J]. 精密成形工程, 2022, 14 (1): 11-18.
- Qiang F M, Kou H C, Jia M Y, et al. Microstructure evolution and dynamic recrystallization behavior in β -solidifying γ -TiAl during thermomechanical processing [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2022, 14 (1): 11-18.
- [41] 李金山, 张铁邦, 常辉, 等. TiAl 基金属间化合物的研究现状与发展趋势 [J]. 中国材料进展, 2010, 29 (3): 1-5.
- Li J S, Zhang T B, Chang H, et al. Recent achievements and future directions of TiAl based intermetallic compounds [J]. Materials China, 2010, 29 (3): 1-5.
- [42] 林均品, 张来启, 宋西平, 等. 轻质 γ -TiAl 金属间化合物的研究进展 [J]. 中国材料进展, 2010, 29 (2): 1-8.
- Lin J P, Zhang L Q, Song X P, et al. Status of research and development of light-weight γ -TiAl intermetallic based compounds [J]. Materials China, 2010, 29 (2): 1-8.
- [43] Li W Z, Sun T, Hu Y C, et al. Research on constant velocity extruding process control for 36,000-ton vertical extrusion press [J]. Journal of Dynamic Systems Measurement and Control, 2013, 135 (4): 041009.
- [44] 宋阳. 3.6 万吨黑色金属重型挤压技术打破国外垄断解决我国高端电力管道自主供应难题 [J]. 中国设备工程, 2016 (4): 10.
- Song Y. 36000-ton heavy-duty ferrous metal extrusion technology breaks foreign monopoly, resolving China's critical challenge in achieving self-reliant supply of high-end power pipeline components [J]. China Plant Engineering, 2016 (4): 10.
- [45] Jia L, Li Y T, Zhang Y. A characterization for the deformation behavior of as-cast P91 alloy steel and utilization in hot extrusion process [J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2017: 6582739.
- [46] 刘强, 曹铜壁, 李文亮. 500 MN 大吨位垂直热挤压钢管机组产品应用分析 [J]. 金属加工 (热加工), 2014 (1): 77-79.
- Liu Q, Cao T B, Li W L. Application analysis of 500 MN heavy-duty vertical hot extrusion system for steel pipe production [J]. MW Metal Forming, 2014 (1): 77-79.
- [47] 张君, 郭晓锋, 杨建, 等. 中国重型锻压装备现状及发展趋势

- 势思考 [J]. 中国重型装备, 2024 (2): 1-5, 11.
- Zhang J, Guo X F, Yang J, et al. Current situation and development trend reflection of heavy forging and pressing equipment in China [J]. China Heavy Equipment, 2024 (2): 1-5, 11.
- [48] 林峰, 颜永年, 吴任东, 等. 重型模锻液压机承载结构的发展 [J]. 锻压装备与制造技术, 2007 (5): 27-31.
- Lin F, Yan Y N, Wu R D, et al. Development of bearing structure for heavy duty forging hydraulic press [J]. China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology, 2007 (5): 27-31.
- [49] 林峰, 颜永年, 吴任东, 等. 现代重型模锻液压机的关键技术 [J]. 机械工程学报, 2006 (3): 9-14.
- Lin F, Yan Y N, Wu R D, et al. Key technologies of modern heavy die forging press [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2006 (3): 9-14.
- [50] 高璐, 崔明亮, 赵石岩, 等. 800 MN 模锻液压机组合预紧机架危险点分析 [J]. 重型机械, 2012 (3): 51-54.
- Gao L, Cui M L, Zhao S Y, et al. Analysis on dangerous points of pre-tightened assembled frame of 800 MN die-forging hydraulic press [J]. Heavy Machinery, 2012 (3): 51-54.
- [51] 彭俊斌, 颜永年, 张人佶, 等. 机械结构预应力坎合连接的原理 [J]. 清华大学学报 (自然科学版), 2007 (8): 1274-1277.
- Peng J B, Yan Y N, Zhang R J, et al. Pre-stressed bumpy ridge joining method for mechanical structures [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2007 (8): 1274-1277.
- [52] 邓晨曦, 吴任东, 颜永年, 等. 大型承载框架钢丝预应力缠绕技术研究 [J]. 新技术新工艺, 2008 (2): 52-54, 3.
- Deng C X, Wu R D, Yan Y N, et al. The research of wire winding on the ultra-heavy prestressed frame [J]. New Technology & New Process, 2008 (2): 52-54, 3.
- [53] 彭俊斌, 颜永年, 张人佶, 等. 预应力钢丝缠绕机架坎合梁的整体性分析 [J]. 机械工程学报, 2008, 44 (12): 308-313.
- Peng J B, Yan Y N, Zhang R J, et al. Integrity analysis of bumpy-ridge beam in the pre-stressed wire winded framework [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44 (12): 308-313.
- [54] 彭俊斌, 颜永年, 张人佶, 等. 重型机械领域中的预应力坎合连接原理及应用 [J]. 机械工程学报, 2008 (6): 107-113.
- Peng J B, Yan Y N, Zhang R J, et al. Principle and application of pre-stressed bumpy-ridge in field of heavy mechanism [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2008 (6): 107-113.
- [55] Wang W J, Lin F, Zhang L, et al. Analysis on the winding process of pre-stressed wire wound orthogonal preload frame on the basis of finite element [A]. Proceedings of the 4th International Conference on Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering [C]. Hangzhou, 2015.
- [56] Strano M, Monno M, Rossi A. Optimized design of press frames with respect to energy efficiency [J]. Journal of Cleaner Production, 2013 (41): 140-149.
- [57] Wang W J, Zhang L, Lin F. Stiffness ratio calculation method research for prestressed wire-wound orthogonal preload frame [J]. Engineering Mechanics, 2016, 33 (3): 214-221.
- [58] Liu H X, Yan Y N, Zeng P, et al. Pillar and arched girder totally bumpy ridge joining frame with steel wire wound [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47 (4): 82-87.
- [59] Li J Q, Zheng D Y, Zhang Z, et al. Simulation analysis of cylinder winding prestress based on Ansys [A]. Proceedings of 2021 International Conference on Advanced Technologies and Applications of Modern Industry [C]. Wuhan, 2021.
- [60] 姚静, 曹晓明, 沙桐, 等. 重型锻造液压机流控新技术 [J]. 液压与气动, 2019 (12): 1-14.
- Yao J, Cao X M, Sha T, et al. New technology for heavy-duty forging hydraulic press [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2019 (12): 1-14.
- [61] 汪飞雪, 姚静, 胡福泰, 等. 锻造液压机振动特性机-液联合仿真 [J]. 中国机械工程, 2020, 31 (10): 1175-1189.
- Wang F X, Yao J, Hu F T, et al. Mechanical-hydraulic co-simulation of vibration characteristics for forging hydraulic presses [J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31 (10): 1175-1189.
- [62] Wang W, Lin F, Zhang L, et al. Experimental study and finite element analysis on the frame of multi-directional forging press [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2017, 231 (12): 2112-2122.
- [63] Zhang Y, Wang X, Wan Y. Numerical calculation of a 20 MN heavy duty hydraulic press for analyzing the double frame pre-stressed steel wire winding [J]. Frontiers in Mechanical Engineering, 2023, 8: 1086124.
- [64] Zhang X, Wang X, Zhang Z, et al. Research on a double frame hydraulic press with PTS using winding steel wires [J]. Journal of Vibroengineering, 2023, 25 (4): 811-824.
- [65] Ganeshan R. Optimization of Tool Life and Performance in Cold Forging by Pre-stress Design [D]. Columbus: The Ohio State University, 2005.
- [66] Vadolia G, Singh K P, Gupta M K, et al. Introduction to isostatic pressing and its optimization [J]. Modeling and Optimization in Manufacturing, 2021: 157-192.
- [67] 余娜. 打破耐热材料垄断 火电管道国产化发展提速 [N]. 中国工业报, 2024-11-04 (007).
- Yu N. Breaking the international monopoly of heat-resistant materials and accelerating the localization development of thermal power pipelines [N]. China Industry News, 2024-11-04 (007).
- [68] 陈俊豪, 宁保群. P92 钢高温蠕变过程中显微组织演变研究现状及强化途径 [J]. 材料导报, 2014, 28 (17): 53-59.
- Chen J H, Ning B Q. Research status of microstructure evolution and strengthening methods of P92 steel in the process of high temperature creep [J]. Materials Reports, 2014, 28 (17): 53-59.
- [69] 内蒙古北方重工集团有限公司. 630 ℃ 超超临界机组 G115 大口径厚壁无缝钢管制造方法 [P]. 中国: CN115074504B, 2023-07-14.
- Inner Mongolia North Heavy Industry Group Corp. Ltd. Manufacturing method of G115 large-diameter thick walled seamless steel pipe for 630 ℃ ultra supercritical unit [P]. China:

- CN115074504B, 2023-07-14.
- [70] 高虹, 翟丽丽, 何周苏秦, 等. 石化高压临氢装置用大口径厚壁不锈钢无缝管的试制生产 [J]. 现代冶金, 2020 (48): 45-49.
- Gao H, Zhai L L, He Z S Q, et al. Trial production of large-diameter thick walled stainless steel seamless pipes for petrochemical high-pressure hydrogenation units [J]. Modern Transportation and Metallurgical Materials, 2020 (48): 45-49.
- [71] 陈勇, 刘珂, 周贵禄, 等. 超大口径厚壁不锈钢无缝钢管生产工艺 [R]. 四川省, 四川三洲特种钢管有限公司, 2011-12-01.
- Chen Y, Liu K, Zhou G L, et al. Production process of ultra large caliber thick walled seamless stainless steel pipes [R]. Sichuan, Sichuan Sanzhou Special Steel Pipe Co., Ltd., 2011-12-01.
- [72] 伊人洁, 王婀娜, 边华川, 等. 大直径厚壁 TP347H 不锈钢管的研制与开发 [J]. 钢管, 2009 (38): 34-37.
- Yi R J, Wang E N, Bian H C, et al. Research and development of large-sized heavy-wall TP347H stainless steel pipe [J]. Steel Pipe, 2009 (38): 34-37.
- [73] 刘立鑫. 钛合金无缝管材热轧及热处理工艺研究 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2024.
- Liu L X. Research on Hot Rolling and Heat Treatment Process of Titanium Alloy Seamless [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2024.
- [74] 石英男, 孙少斌, 曲敬龙, 等. 粉末高温合金热挤压工艺研究进展 [J]. 粉末冶金工业, 2024, 34 (1): 124-133.
- Shi Y N, Sun S B, Qu J L, et al. Research progress on hot extrusion process of P/M superalloy [J]. Powder Metallurgy Industry, 2024, 34 (1): 124-133.
- [75] 陈正宗, 刘正东, 包汉生. 固溶处理对 CN617 耐热合金组织和硬度的影响 [J]. 金属热处理, 2014, 39 (12): 27-30.
- Chen Z Z, Liu Z D, Bao H S. Effects of solution treatment on microstructure and hardness of heat-resistant alloy CN617 [J]. Heat Treatment of Metals, 2014, 39 (12): 27-30.
- [76] ASME SA-213, 锅炉、过热器和换热器用铁素体和奥氏体合金无缝钢管规范 [S].
- ASME SA-213, Specification for seamless ferritic and austenitic alloy—Steel boiler, superheater and stainless steel heat exchanger tubes [S].
- [77] EN 10305-6, 精密应用用钢管 交货技术条件 第6部分: 液压和气动动力系统用焊接冷拉管材 [S].
- EN 10305-6, Steel tubes for precision applications—Technical delivery conditions Part 6: Welded cold drawn tubes for hydraulic and pneumatic power systems [S].

欢迎订阅《锻压技术》杂志 (月刊)

国内外公开发行, 全国各地邮局均可订阅, 逾期未订上者可与编辑部联系邮购

《锻压技术》杂志 1958 年创刊, 中国机械工业联合会主管、中国机械总院集团北京机电研究所有限公司和中国机械工程学会塑性工程分会主办。本刊是全国锻压行业会刊, 全国中文核心期刊, 被国内外多个著名检索系统收录。突出技术内容, 注重技术和信息相结合, 全面反映锻压行业的技术进步和发展趋势。

主要栏目: 综述、锻造、板料成形、管材成形、特种成形、装备与成套技术、模具、摩擦与润滑、加热与热处理、测试技术、节能技术、材料与成形性能、理论与实验研究、计算机应用、技术交流、标准化、行业信息等。

读者对象: 大专院校的师生, 金属塑性成形(锻压)领域的科研、设计、生产部门的工程技术人员以及中等以上文化程度的工人等。

本刊为月刊, 每月 25 日出版, 大 16 开本, 256 页。统一刊号: CN11-1942/TG。邮发代号: 2-322。

(一) 购买期刊: ● 每册定价: 25.00 元; ● 年定价: 300.00 元。

(二) 购买合订本: ● 1991-2011 年合订本 (每本包含全年 1-6 期杂志): 110 元/本;

● 2012-2013 年合订本 (每本包含全年 1-6 期杂志): 140 元/本;

● 2014-2018 年合订本 (上册) (包含上半年 1-6 期杂志)、2014-2018 年合订本 (下册) (包含下半年 7-12 期杂志): 180 元/本。

直接通过编辑部订阅者, 请与杂志发行部负责人林玉彤联系。并按编辑部地址汇款, 款到后我们会定期寄给您刊物。

邮局汇款信息:

地址: 北京市海淀区学清路 18 号北京机电研究所有限公司 709 室

收款人: 《锻压技术》编辑部

联系人: 林玉彤 电话: 010-62920652-801

邮编: 100083

附言处: 请注明“订阅《锻压技术》”

E-mail: fst_linyutong@163.com

《锻压技术》编辑部