

我国钛及钛合金塑性加工技术研究进展与应用现状

王磊¹, 王尧¹, 李晓峰¹, 吴艺伟¹, 丁楠¹, 王宁波², 辛晓航², 苏宝龙³

(1. 西安庄信新材料科技有限公司, 陕西 西安 710299)

(2. 西部金属材料股份有限公司, 陕西 西安 710201)

(3. 宝钛集团有限公司, 陕西 宝鸡 721014)

摘要: 塑性加工是一种重要的钛及钛合金加工技术, 可满足不同应用领域对钛及钛合金构件形状与性能等方面要求的差异。为此, 梳理了我国钛及钛合金传统塑性加工技术(锻造、轧制和挤压)与新型塑性加工技术(超塑性成形、超塑性成形/扩散连接和增量成形技术)的工艺特点和研究现状, 同时对塑性加工技术的发展趋势进行了展望, 对于通过选择合适的塑性加工方法, 提升钛及钛合金产品质量具有重要参考价值。

关键词: 钛及钛合金; 锻造; 轧制; 挤压; 超塑性成形

中图分类号: TG306; TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1009-9964(2025)05-043-06

Research Progress and Application Status of Plastic Processing Technologies of Titanium and Titanium Alloys in China

Wang Lei¹, Wang Yao¹, Li Xiaofeng¹, Wu Yiwei¹, Ding Nan¹, Wang Ningbo², Xin Xiaohang², Su Baolong³

(1. Xi'an JoinXin New Material Technology Co., Ltd., Xi'an 710299, China)

(2. Western Metal Materials Co., Ltd., Xi'an 710201, China)

(3. Baoti Group Co., Ltd., Baoji 721014, China)

Abstract: Plastic processing is an important technique for manufacturing titanium and its alloys, as it can meet the requirements for the shape and performance of titanium components in various application fields. This paper reviews the process characteristics and research progress of both traditional plastic processing technologies (forging, rolling and extrusion) and new processing technologies (superplastic forming, superplastic forming/diffusion connection and incremental forming) in China. Furthermore, it discusses the development trends of plastic processing technology, which offers valuable insights for choosing suitable plastic processing methods and improving the quality of titanium and its alloy products.

Keywords: titanium and titanium alloys; forging; rolling; extrusion; superplastic forming

钛及钛合金具有密度小、比强度高、耐腐蚀、生物相容性佳等众多优异性能, 在航空航天、石油化工、生物医药、国防军工等领域得到广泛应用^[1-2]。经过长期的技术引进、自主研发与应用推广, 我国钛工业现已进入高速发展期, 产量稳步攀升, 成为世界钛工业大国^[3]。近年来, 钛及钛合金的需求量持续增加, 使用环境更为多样, 成形工艺愈发复杂, 对材料性能指标的要求不断提升。

塑性加工是借助外力使材料发生塑性变形, 进而

得到所需形状、组织结构及性能的一种加工技术。常用的塑性加工技术有锻造、轧制、挤压、拉伸、旋压等^[1]。然而, 钛及钛合金塑性变形时强度和硬度升高, 塑性和韧性降低, 且加工过程中易出现表面裂纹、氧化、粗糙度超标等问题, 会影响构件的力学性能、耐腐蚀性及后续装配精度。为此, 这些年来新兴的超塑性成形技术得到了广泛应用, 极大改善了钛合金难以成形的问题。

现阶段, 塑性加工技术包括传统塑性加工技术及新型塑性加工技术, 选择合适的塑性加工方法对于提升钛及钛合金产品质量具有重要意义。为此, 梳理了

收稿日期: 2025-07-22

通信作者: 王磊(1989—), 男, 工程师。

钛及钛合金主要塑性加工技术（锻造、轧制、挤压等）的研究进展与应用现状，同时对塑性加工技术的发展趋势进行了展望。

1 传统塑性加工技术

1.1 锻造

锻造是常见的金属零部件加工方式，其通过施加压力使材料产生塑性变形，进而获得所需形状与组织结构的构件^[4]。由于钛合金的晶体结构特性，其产品对锻造工艺参数（如温度、变形量）极为敏感，因此必须严格控制锻造工艺。在锻造过程中，钛及钛合金晶粒发生重组变得更加致密，内部杂质和气泡得以消除，内应力在一定程度上得到释放，进而材料的均匀度、纯净度和机械性能等得以改善，表面质量提高^[5]。但其缺点也较为明显：生产效率较低，工艺控制难度较大，且难以加工复杂形状的零件。根据锻造温度的不同，锻造工艺可分为冷锻、热锻^[6-8]；根据加工方式的不同，可分为自由锻、模锻^[9-11]和胎模锻^[12]。

通常情况下，室温下的锻造为冷锻，高于金属再结晶温度的锻造为热锻^[13]。一般而言，冷锻精度高，用于制造高强度、高精密的零部件；热锻可改善金属的塑性和变形能力，适用于制造大型和复杂形状的工件^[7]。马利华等^[14]对 TB17 钛合金进行冷锻发现，合金抗拉强度随着变形量的增大而提高，当变形量为 60% 时，变形组织中出现剪切带结构。韩兴言^[15]对 Ti-9Al 合金进行冷锻发现，当变形量为 20% 时，基体中的小角度晶界比例约为固溶处理后的 3 倍，且随着变形量增大，合金仍能保持一定塑性。张起等^[16]对 Ti-662 合金坯料的热锻工艺进行了研究，发现通过优化锻造工艺可获得均匀的双态组织，从而提高棒材的组织均匀性和拉伸性能，降低超声波检测杂波水平。由此可

见，不同的锻造工艺对钛及钛合金的组织均匀性、力学性能等有着不同的影响^[17-18]。但无论采用何种锻造工艺，应综合考虑材料的性能和零部件的制造成本等。

自由锻是一种生产高性能锻件的重要方式，可按照零部件的形状尺寸或机械性能需求锻造金属。自由锻工艺过程一般包括下料、加热、锻造、打磨或机加工。按锻造方式，自由锻分为机器锻造和手工锻造，其中机器锻造占主导，又可分为水压机自由锻（用于大型锻件）和锤锻自由锻（用于小型锻件）^[19]。经过多年发展，我国钛及钛合金自由锻造技术水平不断提高，已能较好满足工程机械、能源电力、航天航空等行业的产品需求，但部分锻件仍需依赖操作者经验，如何实现高效稳定生产仍是行业发展中亟待解决的问题。为此，研究人员开发了计算机辅助工艺设计（computer aided process planning, CAPP 系统）^[20]，该工艺是一种基于计算机技术实现产品工艺自动化编程的智能系统。张闯^[21]对自由锻 CAPP 系统进行了优化升级，其一般流程如图 1 所示。该系统对于不同类型的锻件均能生成准确合理的锻造工艺卡片，且生成时间缩短了 50% 以上，工艺准确率高，生产效率得到极大提高。张朝朝等^[22]开发出一种航空航天环形锻件 CAPP 系统，该系统具有良好的工艺设计能力，可显著提高工艺设计效率和产品一致性。可见，CAPP 系统有助于提升工艺质量、解放人力、推动智能锻造的发展。模锻和自由锻的工序大致相同，但工况不同，多采用等温模锻。等温模锻成形的钛合金锻件具有低倍组织均匀、流线分布合理、材料消耗少等优点。采用多曲面分模方式对复杂模锻件进行模具设计^[23]，可有效提升锻件性能及材料利用率。此外，为了降低成本，还出现了热模锻成形技术^[24]，该技术相比等温模锻生产效率更高。

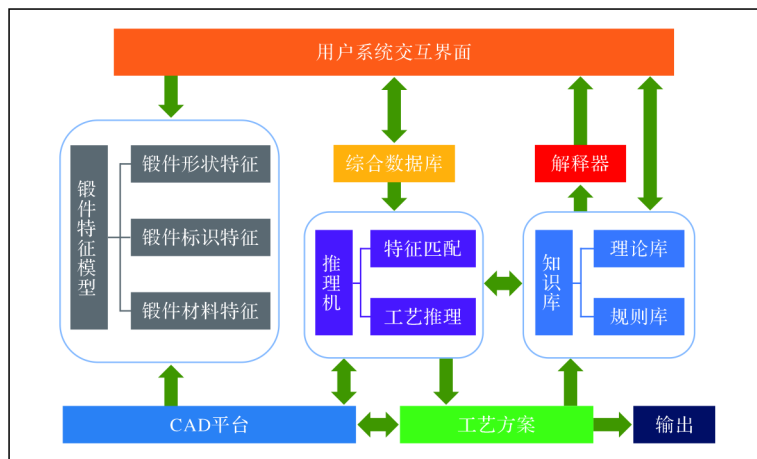


图 1 自由锻 CAPP 系统的一般流程图^[21]

Fig.1 General process diagram of free forging CAPP system

1.2 轧制

轧制工艺因成本低、操作方便而备受青睐。金属材料在轧制过程中会发生剧烈变形,通过调整工艺参数即可改变材料的微观组织和力学性能^[25]。按照加工温度的不同,轧制可分为热轧和冷轧。热轧为高温轧制,可消除坯料中的缺陷,且工件变形较大,其中大变形区组织会发生动态回复和再结晶。冷轧通常无法使材料组织发生回复和再结晶,但可提高材料的强度和表面质量,一般作为板材、带材制备的后端工序。此外,根据需要,可在轧制过程中配合退火工艺来控制变形,或直接对弯曲变形进行矫正。李勃勃等^[26]采用电子束冷床炉熔炼的一次扁锭,通过热轧结合退火工艺,在 β 相变点附近或高于 β 相变点的高温区热轧,有效破碎了铸坯粗大组织,使得铸坯热轧塑性变形能力得以改善,实现了中强高韧钛合金板材的制备。韩盈等^[27]围绕TA1钛带冷轧后表面形貌的演变规律开展探究,发现减小冷轧后续道次压下率、改善润滑条件和降低工作辊表面粗糙度,能够有效改善鳞片状形貌,进而提升TA1钛带的表面质量。

近年来,我国轧制技术发展迅速,已成为板材、棒材、管材等钛及钛合金加工材的重要成形手段。相比锻造,轧制效率高,获得的产品精度也较高,生产成本大幅降低,因此常用于钛合金低成本制备^[28]。板材按厚度分为厚板($>4.76\text{ mm}$)和薄板($\leq 4.76\text{ mm}$),前者经热轧至成品尺寸,后者可选择热轧后冷轧,或采用效率更高的包套叠轧、热轧叠轧或卷带式生产方式^[29-30]。棒材则主要采用大变形量加工技术制备,如研究人员针对Ti-8LC和Ti-12LC合金,采用道次变形量约为70%的步进轧制制备的棒材晶粒比普通轧制和旋锻的棒材更细小,强度也稍高^[31]。陕西天成航空材料股份有限公司采用“以轧代锻”的全连轧工艺^[28],通过大变形量、控温、控速、自动化控制、高精度轧制,实现了高性能钛合金棒材的工业化生产。该技术有效避免了传统锻造工艺打磨次数多、无形损耗大、成本高等问题。国内管材制备多采用室温轧制,道次变形量小,轧制过程中通常需要进行真空退火以减少残余应力。随着管材加工技术发展,出现了钛合金无缝管材短流程化加工技术^[32],即在传统生产线基础上增加用于加热钛管坯的加热炉,实现控温轧制。综上所述,通过优化轧制工艺参数,改进加工设备,可实现钛及钛合金型材的高精度、高性能制备。

1.3 挤压

挤压成形通过施加三向压应力,可实现较大的塑性变形,提高产品的综合性能^[33],具有应用范围广、生产效率高、工艺流程简单等优势,是制备钛合金管

材、棒材的常用方法。根据金属流动方向与凸模运动方向的关系,挤压成形可分为正向挤压(直接挤压)、反向挤压(间接挤压)、复合挤压和径向挤压^[34]。由于钛及钛合金回弹严重,其挤压变形过程较其他合金更为复杂,故挤压温度与工艺尤为重要。图2为钛及钛合金热挤压成形工艺流程图^[35]。

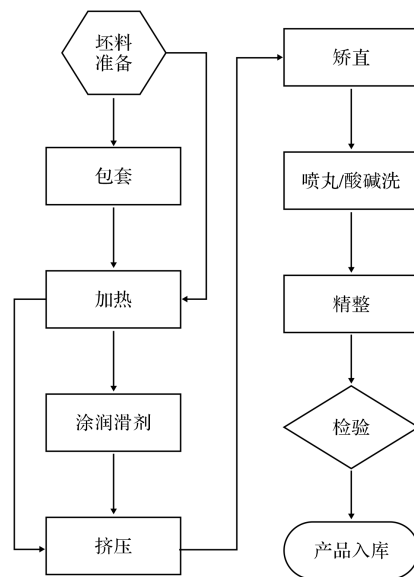


图2 钛及钛合金热挤压成形工艺流程图^[35]

Fig.2 Hot extrusion process flow chart of titanium and titanium alloy

相比锻造、轧制等方式,挤压更易实现低塑性金属变形和异种金属连接,且无需成本较高的整套孔型设计制造,加工效率高、生产灵活^[36]。但由于钛合金理化性能特殊,挤压过程中会出现温度升高、变形阻力增大、粘模等问题。选择合适的润滑方式和润滑剂可有效降低挤压力、延长模具寿命、提高产品质量,已成为钛合金挤压生产的关键技术之一^[33]。铜包套及玻璃润滑剂均可以起到缓解管坯挤压时粘结的作用,其中,以 SiO_2 、 B_2O_3 为主要成分的硅酸盐玻璃润滑剂润滑防护效果好,应用极为广泛。研究表明^[37],钛合金挤压时有效润滑黏度为 $10^3\sim 10^5\text{ Pa}\cdot\text{s}$,但已有的玻璃润滑剂很难保证不同温度下黏度均在此范围内。为此,金峰等^[38]研发了以磷酸盐玻璃、 SiO_2 和 NaCl 为主要成分的新型玻璃润滑剂,并通过实验获得了不同组成比润滑剂的黏度-温度曲线。

此外,挤压模具、挤压工艺等因素均会影响钛合金型材的质量,关键参数有挤压比(λ)、坯料加热温度、挤压速度等^[39]。其中,挤压比与合金种类、挤压方法、产品性能、挤压机能力等因素相关。玻璃润滑剂能够在加热过程中有效保护坯料,并在挤压时发挥

润滑作用。此外，挤压速度不仅影响工件性能和表面质量，还影响挤压力，速度过快会导致金属流动不均，适宜的挤压速度一般在 200 mm/s 以下。常见钛及钛合金棒材挤压参数如表 1 所示^[40]。

表 1 钛及钛合金棒材的挤压参数^[40]

Table 1 Extrusion parameters of titanium and titanium alloy rods				
Grade	Heating temperature/°C	Extrusion ratio	Lubrication method	Squeeze speed/mm·s ⁻¹
TA1	700–800	4–30	Copper cover	25–150
TC4	900–1000	5–15	Glass lubrication	90–120
TA7	950–1200	5–15	Glass lubrication	90–120

早期，我国钛及钛合金生产所使用的挤压机以 31.5 MN、45 MN 等为主，吨位较小且多为国外引进，无法满足大尺寸高品质钛合金管材、棒材的加工需求^[35]。2009 年，宝钢特钢有限公司引进了 6000T 挤压机^[40]。2016 年，清华大学和青海中钛青锻装备制造有限公司联合开发了 680 MN 多功能挤压/模锻机，集模锻与挤压功能于一体，可制备大口径厚壁无缝钢管，也可制备钛管材^[41]。2022 年，中国重型机械研究院和宝鸡钛业股份有限公司合作开发了 63 MN 正向双动钛合金

专用挤压机^[42]，可挤制最大外径 325 mm，最大截面积 5000 mm² 的钛合金无缝管材。据报道，该设备为目前国内最大的钛及钛合金挤压机。国内主流挤压机产品规格如表 2 所示^[35]。钛及钛合金挤压机的发展经历了由国外引进到自主研发的历程，标志着我国钛材挤压技术不断迈上新台阶，也为钛及钛合金装备制造业的发展奠定了坚实基础。但我国在高品质、大规格钛及钛合金挤压型材的自主生产方面，仍有较大的提升空间。

表 2 国内主流挤压机产品规格对比^[35]

Table 2 Comparison of product specifications of domestic mainstream extruders							
Device name	Rated squeezing pressure/MN	Inner diameter of extrusion cylinder/mm	Blank length/mm	Outer diameter of pipe/mm	Sectional area of profile/mm ²	Product length/m	Equipment origin
Single-action reverse extruder	31.5	≤300	≤800	≤280	≤2700	≤20	Germany
45 MN double-action reverse	45	≤360	≤900	45–275	≤3500	≤20	Germany
63 MN hydraulic double-action horizontal titanium alloy extruder	63	≤438	≤1000	60–325	≤5000	≤30	China

2 新型塑性加工技术

钛及钛合金具有热变形抗力大、成形过程组织演变复杂等特点，常规塑性加工工艺如锻造、轧制和挤压等难以实现复杂形状的成形。超塑性成形（super plastic forming, SPF）技术可有效解决这一问题，是一种高效的零部件制造技术^[43]，适用于在特定内在和外在条件下具有超塑性的材料^[44]，比如钛合金。采用 SPF 工艺制造零部件，不仅可以降低制造成本，还能显著提高成形效率，已成为钛合金加工的重要方式，且被广泛应用于航空航天领域。SPF 主要方式有超塑性拉伸成形、超塑性模锻成形、超塑性挤压成形以及超塑性气胀成形等^[45]，具有大变形、无缩颈、小应力和易成形等优点^[46]。研究发现^[47]，晶粒尺寸、微观结构等是影响钛合金超塑性的重要因素。细化晶粒可明显改善材料的强度和韧性，于是剧烈塑性变形技术（severe plastic

deformation, SPD）应运而生，即通过引入大应变而产生更大的塑性变形，从而制备出超细晶材料^[48]。SPD 可改善材料的强度和韧性，实现综合性能的提高，主要方法有高压扭转、搅拌摩擦焊接、等通道转角挤压、累积叠轧和多向锻造等^[49]。此外，为满足不同服役环境对材料的苛刻要求，研究人员将超塑性成形与锻造、轧制、挤压、拉拔等传统塑性加工技术相结合，开发出多种复合变形技术，并进行了大量研究^[35,48]。近年来，SPF 的研究范围不断扩展，但研究纵深不够，许多工作仅停留在理论研究和试验阶段，应进一步探索钛及钛合金超塑性成形的内在机理和加工规律，改进加工方法和工艺设备，提高构件质量和生产效率，扩大超塑性成形钛合金的应用范围。

扩散连接（diffusion bonding, DB）又称为扩散焊，是在一定温度和压力下使材料表面接触，经过长时间原子扩散以达到紧密结合的一种固态焊接技术^[50]，可

实现无残余应力的大面积连接。当材料的超塑性温度与其扩散连接温度相近时,可在一次加热加压中完成超塑性成形和扩散连接,制成局部或整体加强的结构件或更复杂的整体结构件,并由此发展为超塑性成形和扩散连接复合(SPF/DB)工艺^[51]。SPF/DB技术在航空领域得到广泛的研究与应用^[52],其优点有:①一次加热即可将多个零件成形为整体结构件,降低成本;②材料变形量大且无开裂,无残余应力,成形精度高;③结构件整体性能好,抗疲劳和抗腐蚀性增强。为精确分析 SPF/DB 工艺过程,研究人员^[52-53]采用有限元数值模拟的方法对钛合金的 SPF/DB 过程进行数值模拟。门向南等^[54]对 TC4 钛合金进行了 SPF/DB 工艺试验,利用有限元模拟获得的压力曲线作为实际成形压力的加载依据,得到了 SPF/DB 工艺的最佳温度、压力及时间等参数。张鹏等^[55]研究证实,SPF/DB 工艺制备的钛合金构件能够满足空空导弹飞行速度、机动过载和减轻结构重量的高标准要求,验证了 SPF/DB 技术在先进空空导弹上应用的可行性。综上可知,我国虽然在 SPF/DB 方面的研发工作起步较晚,但通过对 SPF/DB 技术的不断研究,已取得了一定成果和较大进展^[52]。

当前航空航天、汽车和高新技术产业对零件加工的要求是轻量化、强韧化、精密化、高效化、绿色化。多数精密塑性成形需专用模具,能耗较大,增量成形技术则能克服传统精密成形模具专用性强、能耗高的弊端,因而备受关注。权成等^[56]基于 ABAQUS/Explicit 建立了管端增量成形的仿真模型,通过数值模拟的方法验证了长锥管增量成形扩口改进工艺的可行性和成形件的可靠性,极大地缩短了生产周期,并节约了成本。侯晓莉等^[57]通过研究实现了变角度增量翻边成形技术在 T2 紫铜管材方面的应用,并使制件的破裂得到有效预测和控制。这种无模(或柔模)无约束、局部加载的增量成形技术,结合计算机辅助设计和制造(CAD/CAM)、数控与金属塑性成形技术,可控制金属的流动,加工复杂形状零件,节约成本。但目前关于钛合金增量成形的相关研究报道较少,现有工艺存在易产生成形缺陷、成形稳定性较差且设备复杂昂贵等缺点。莫非等^[58]对比了三重轻质合金板材热增量成形的可加工性,发现 Ti6Al4V 合金在室温下壁面倾斜角的可加工极限为 20°,热增量成形后最大可达 45°,但拉伸斜角增加时表面质量变差,且板材两侧会出现差异。该研究为钛合金的增量成形工艺研究奠定了基础。

3 结 语

钛及钛合金塑性加工方法较多,各有优缺点,应

根据具体要求选择适用的工艺,通常的原则有:工艺可靠,操作简单;满足产品的性能需求;工艺成本低。随着钛及钛合金应用领域的不断扩展,高效、高品质、低成本的高新技术新工艺(超塑性成形、超塑性成形和扩散连接复合工艺、复合增量成形技术等)也在不断开发与研究。随着人们对钛及钛合金加工新技术、新工艺的深入研究,产品质量与竞争力将不断提升。

参考文献 References

- [1] 郭鲤,何伟霞,周鹏,等.我国钛及钛合金产品的研究现状及发展前景[J].热加工工艺,2020,49(22):22-28.
- [2] 赵永庆,葛鹏,辛社伟.近五年钛合金材料研发进展[J].中国材料展,2020,39(S1):527-534+557.
- [3] 申晨.我国钛工业技术进展及趋势[J].中国金属通报,2022(9):1-3.
- [4] 张金.中国锻造行业主要共性技术发展回顾与展望[J].锻造与冲压,2022(1):48-51.
- [5] 张鹏.TC4 钛合金丝材热加工过程中组织演化及再结晶行为研究[D].西安:西安建筑科技大学,2024.
- [6] 陈学文,陈军,赵震,等.冷锻技术的发展现状与趋势[J].金属成形工艺,2003,21(5):9-11+22.
- [7] 张天伟.金属材料成形及其加工工艺浅析[J].锻压装备与制造技术,2023,58(5):131-133.
- [8] 顾艳红,马慧娟,陈玲玲,等.Ti6Al4V 钛合金超声波冷锻/微弧氧化涂层的制备及耐磨性能[J].中国表面工程,2016,29(1):87-95.
- [9] 徐新生,闫俊霞,何雪明,等.TC4 钛合金自由锻过程相变模拟与工艺分析[J].轻工机械,2022,40(3):43-49.
- [10] 杨智皓,路晓辉,兰箭,等.环件轧制多尺度数值模拟研究进展[J].塑性工程学报,2022,29(3):1-12.
- [11] 高亚男,郑镭,张全逾.多向锻造对汽车用钛合金组织及性能影响分析[J].钢铁钒钛,2023,44(1):78-83.
- [12] 胡世刚,贾栓孝,何书林.飞机用大型 TC4 钛合金锻件锻造工艺初探[J].稀有金属快报,2008,27(10):41-43.
- [13] 中国机械工程学会锻压学会.锻压手册,第1卷:锻造[M].北京:机械工业出版社,1993.
- [14] 马利华,尚霞,何光辉.冷锻变形量对 TB17 钛合金显微组织和拉伸性能的影响[J].热加工工艺,2020,49(19):118-121.
- [15] 韩兴言.变形量对车用冷锻变形 Ti-9Al 钛合金组织和拉伸性能的影响[J].锻压技术,2019,44(4):157-161.
- [16] 张起,杨娜,张明玉,等.锻造工艺对 Ti-662 钛合金棒材组织和性能的影响[J].金属加工(热加工),2023(5):104-107.
- [17] 李瑞,段晓辉,岳旭,等.锻造工艺对 Ti-6Al-4V 合金大规格方坯组织与性能的影响[J].钛工业进展,2018,35(5):33-37.
- [18] 程帅朋,苏娟华,陈学文,等.锻造工艺对 TA10 钛合金组

- 织性能的影响[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2017, 38(3): 6-9+3.
- [19] 杨雯. 基于区块链的自由锻供应链溯源与预测研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2021.
- [20] 查光成, 史翔, 孔凡新, 等. 台阶轴自由锻 CAPP 系统开发[J]. 机械制造与自动化, 2015, 44(6): 46-48.
- [21] 张闯. 中等规模自由锻企业锻造工艺及 CAPP 系统的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2024.
- [22] 张朝朝, 叶蕾, 曹志勇, 等. 基于 WEB 的航空航天环形锻件 CAPP 系统开发[J]. 精密成形工程, 2023, 15(5): 164-175.
- [23] 林剑, 王哲, 冯恩艳, 等. 基于多曲面分模设计的钛合金模锻件[J]. 有色金属加工, 2022, 51(6): 26-29+54.
- [24] 洪权, 郭萍, 周伟. 钛合金成形技术与应用[J]. 钛工业进展, 2022, 39(5): 27-32.
- [25] 韩盈, 余伟, 董恩涛, 等. 轧制工艺对 TC4 合金板材织构演变及组织和性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2021, 50(10): 3585-3590.
- [26] 李渤渤, 王哲, 张强, 等. 中强高韧钛合金 EB 熔炼及板材制备[J]. 材料开发与应用, 2024, 39(4): 53-58+82.
- [27] 韩盈, 刘思涵, 余伟, 等. 冷轧 TA1 钛带表面形貌演变分析[J]. 钛工业进展, 2025, 42(4): 14-19.
- [28] 赵秦阳, 陈永楠, 徐义库, 等. 钛合金材料低成本化制备技术进展与展望[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(11): 3127-3140.
- [29] 张智鑫, 樊江昆, 李瑞锋, 等. 钛合金板材制备技术的现状及展望(上)—薄板制备技术[J]. 航空制造技术, 2023, 66(10): 22-33.
- [30] 张智鑫, 唐斌, 李瑞锋, 等. 钛合金板材制备技术的现状及展望(下)—中厚板制备技术[J]. 航空制造技术, 2023, 66(16): 14-28.
- [31] Zhao Y Q, Wu W L, Chang H, et al. Research on low cost titanium alloys and semi-solid oxidation and deformation behavior of Ti14 alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2006, 35(S1): 97-101.
- [32] 北京科技大学. 一种钛合金无缝管短流程加工方法: CN201910426027.X[P]. 2019-05-21.
- [33] 谢建新, 刘静安. 金属挤压理论与技术[M]. 2 版. 北京: 冶金工业出版社, 2002.
- [34] 王强, 薛勇, 于建民, 等. 基于挤压的剧烈塑性变形技术与发展[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2022, 43(1): 1-10+18.
- [35] 李正利, 荆云海, 高朋昌, 等. 63 MN 钛合金正向双动挤压机的设计与应用[J]. 重型机械, 2022(5): 89-93.
- [36] 蔡海娇, 叶文君, 惠松晓, 等. 热挤压工艺对 Ti-6Al-4V 钛合金组织与性能的影响[J]. 北京科技大学学报, 2013, 35(7): 895-900.
- [37] 柏春光, 徐东生, 雷家峰, 等. 钛合金型材挤压玻璃润滑工艺的有限元模拟[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(S1): 857-861.
- [38] 金峰, 倪嘉, 张志豪, 等. 钛合金挤压用含 NaCl 新型玻璃润滑剂的黏-温特性、热腐蚀及热障性能[J]. 工程科学学报, 2018, 40(6): 721-728.
- [39] 张少丹, 代春, 冯红超, 等. 钛合金挤压型材制备工艺技术研究[J]. 科技创新与应用, 2021, 11(21): 134-136.
- [40] 贾如雷, 计波. 钛材热挤压成形技术发展和应用现状[J]. 世界有色金属, 2010(11): 48-50.
- [41] 袁志鹏, 吴任东, 袁朝龙, 等. 680 MN 多功能模锻挤压机动梁设计[J]. 锻压技术, 2016, 41(4): 68-73.
- [42] 宝钛股份 6300 t 钛合金挤压生产线热负荷试车成功[J]. 钛工业进展, 2022, 39(3): 6.
- [43] 张磊, 郭萍, 王欢, 等. 细晶 TC4 合金板材超塑性行为及组织演变研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2024, 53(12): 3422-3427.
- [44] 谢文玲, 周顺勇, 郭翠霞, 等. 金属材料超塑性的研究进展[J]. 热加工工艺, 2014, 43(20): 15-18.
- [45] 于博. 超塑性气胀成形对 TC4 钛合金板材疲劳性能影响研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.
- [46] 卢坤林. 超塑性成形对 TC4 钛合金板材力学性能影响研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.
- [47] 余飞龙. 深冷轧制 Ti-6Al-4V 钛合金薄板组织与性能研究[D]. 长沙: 中南大学, 2022.
- [48] 倪颂, 廖晓舟, 朱运田. 剧烈塑性变形对块体纳米金属材料结构和力学性能的影响[J]. 金属学报, 2014, 50(2): 156-168.
- [49] 张文井, 丁桦, 王凯. 钛及钛合金剧烈塑性变形研究进展[J]. 钛工业进展, 2017, 34(3): 1-8.
- [50] 李志强, 郭和平. 超塑成形/扩散连接技术的应用进展和发展趋势[J]. 航空制造技术, 2010(8): 32-35.
- [51] 黄钢华. 钛合金超塑性成形/扩散连接的数值模拟及工艺研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009.
- [52] 王石川. 四层 TC4 舵面 SPF/DB 工艺研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
- [53] 周凌华, 沈中伟, 许涛. Ti-55 钛合金双层板的超塑成形/扩散连接数值模拟及工艺试验[J]. 锻压技术, 2022, 47(8): 76-82.
- [54] 门向南, 童国权, 徐雪峰, 等. TC4 钛合金双层板结构超塑成型扩散连接工艺[J]. 机械工程材料, 2010, 34(5): 86-90.
- [55] 张鹏, 刘献伟, 廖金华, 等. 钛合金超塑成形扩散连接空心结构在空导导弹舵翼面上的应用[J]. 航空制造技术, 2014(3): 95-97.
- [56] 权成, 肖继明. 长锥管增量成形扩口工艺研究[J]. 塑性工程学报, 2021, 28(4): 52-59.
- [57] 侯晓莉, 李言, 邱旭, 等. 铜管变角度增量翻边成形极限的试验研究[J]. 锻压技术, 2022, 47(10): 162-168.
- [58] 莫非, 张志明, 陈秦. 浅析轻质合金板材热增量成形的可加工性[J]. 现代工业经济和信息化, 2015, 5(24): 69-70.