

引用格式: 张贵福, 辛社伟, 孙花梅, 等. 钛合金无缝管制备技术研究现状与进展[J]. 中国材料进展, 2026, 45(1): 1-13.
ZHANG G F, XIN S W, SUN H M, *et al.* Research Status and Progress of Preparation Technology for Titanium Alloy Seamless Pipes[J]. Materials China, 2026, 45(1): 1-13.

钛合金无缝管制备技术研究现状与进展

张贵福^{1,2}, 辛社伟², 孙花梅², 蔡建华², 南 榕²

(1. 东北大学材料科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

(2. 西北有色金属研究院, 陕西 西安 710016)

摘要: 钛合金无缝管因具有优异的综合性能而在航空航天、船舶、石油化工等领域得到重要应用。目前, 钛合金管材产量已占据钛产品产量的20%, 在我国需求用量也越来越大, 在钛及钛合金市场中占据重要的地位。然而, 钛合金无缝管的制备对设备要求高、工艺复杂, 不同类型钛合金无缝管的制备具有不同的工艺路线和工艺参数。重点对采用挤压和斜轧穿孔制备不同类型钛合金无缝管坯, 以及对管坯进一步轧制、旋压、特种锻造加工制备成品管材的方法和研究进展进行了归纳和评述, 以期制备钛合金无缝管选择合适的方法提供参考。

关键词: 钛合金; 无缝管; 挤压; 斜轧穿孔; 轧制; 旋压; 特种锻造

中图分类号: TG146.23 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2026)01-0001-13

Research Status and Progress of Preparation Technology for Titanium Alloy Seamless Pipes

ZHANG Guifu^{1,2}, XIN Shewei², SUN Huamei², CAI Jianhua², NAN Rong²

(1. School of Materials Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

(2. Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, China)

Abstract: Titanium alloy seamless pipes have been widely used in aerospace, shipping, petrochemistry and other fields due to their excellent comprehensive performance. At present, the output of titanium alloy pipes accounts for 20% of the total output of titanium products, and the demand in China is also increasing, occupying an important position in the titanium and titanium alloy markets. However, the preparation of titanium alloy seamless pipes has high equipment requirements and complex processes. The preparation of different types of titanium alloy seamless pipes has different process routes and parameters. Focus in this review is placed on summarizing and reviewing the preparation methods and research progress of seamless pipe blanks of different titanium alloy by extrusion and rotary piercing, and further preparing finished pipes by rolling, spinning and special forging, which can provide some reference for selecting appropriate methods when preparing titanium alloy seamless pipes.

Key words: titanium alloy; seamless pipe; extrusion; rotary piercing; rolling; spinning; special forging

1 前言

钛合金具有密度小、比强度高、耐腐蚀、焊接性能

优良等特点, 广泛应用于石油化工、航空航天、生物医疗、海洋工程等领域^[1-3]。目前, 我国钛及钛合金年产量已突破10万吨, 其中近20%钛产品为管材^[4]。钛合金无缝管相对钢管、铜管、铝管等有很多优点, 比如, 种类多, 可满足各个领域的使用; 比强度高, 在保证结构强度和稳定性的同时, 还可以减重; 耐腐蚀性能好, 尤其是耐生物腐蚀和耐海水腐蚀^[5]。因此, 钛合金无缝管在飞机管路系统、船舶用热交换器管和天线管、石油化工用传输管道等特种行业得到重要应用。近年来, 钛合金无缝管在我国的需求量也越来越大, 在钛及钛合金市场中占据重要的地位。

收稿日期: 2024-05-30 修回日期: 2024-07-24

基金项目: 陕西省财政厅功能材料专项(0501YC2311); 国防科工局“十四五”规划项目(****-145-GH-001); 陕西省创新能力支撑计划项目(2021CXZX-01)

第一作者: 张贵福, 男, 1998年生, 硕士研究生

通讯作者: 辛社伟, 男, 1978年生, 教授, 博士生导师,

Email: nwpu_xsw@126.com

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.202405027

制备钛合金无缝管需先通过挤压或斜轧穿孔制备管坯,然后将管坯进行轧制、旋压、特种锻造等以进一步加工为成品管材,进一步的加工可根据应用需求改变管材的规格,并提高尺寸精度和性能。不同的管材制备方法有不同的工艺特点,不同牌号的钛合金塑性成形指标也相差较大,因此制备不同类型钛合金的管材具有不同的工艺路线和工艺参数。由于钛合金无缝管的制备对设备要求高,工艺复杂且成本高,这使得我国钛合金无缝管的应用受到一定的限制,如何低成本、短流程制备出性能优异、满足使用要求的钛合金无缝管也已然成为相关研究人员关注的重点问题。本文重点对不同钛合金无缝管的制备方法和研究现状进行了介绍和归纳,以期制备钛合金管材时选择合适的方法提供一定的参考。

2 钛合金无缝管制备技术

2.1 挤压

挤压是利用挤压杆将挤压筒内的坯料从模腔中挤出,从而得到所需规格管坯的方法。根据挤压筒内坯料的润滑状态、挤压方向、挤压温度等的不同,挤压的分类方法也不同^[6]。按坯料温度的不同可分为冷挤压、温挤压、热挤压。其中,热挤压是钛合金无缝管坯最传统、最成熟和最重要的制备方法,热挤压过程如图 1 所示^[7],挤压比、挤压速度、挤压温度和润滑方式都是热挤压过程中非常重要的工艺参数。

工业纯钛因成本低、塑性好、冷加工变形量可达 80%、易于生产,是我国目前应用最多的一类钛管,占钛管材的 60%^[8,9]。各国纯钛管的生产主要采用二次熔炼铸锭-锻造-挤压(斜轧穿孔)-冷轧工艺,但是这种传统工艺工序复杂、成品率低。宝鸡有色金属加工厂提出了对纯钛铸锭直接热挤压生产钛管坯,将 $\Phi 220$ mm 铸锭在挤压比为 15.8~26.4、冷轧变形量为 31%~70%、退火温度为 600~

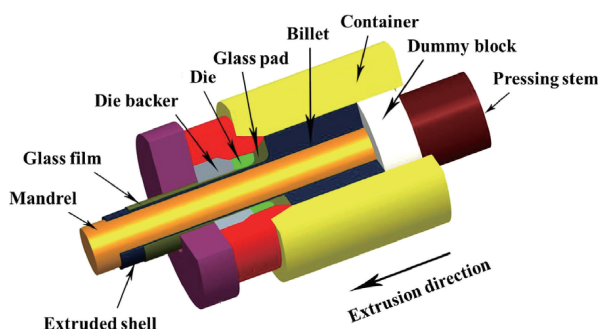


图 1 热挤压示意图^[7]

Fig. 1 Schematic diagram of hot extrusion process^[7]

650 °C (1 h/AC) 下制备出了组织均匀、各项性能可达到国际标准要求的外径为 26~41 mm 和壁厚为 1~3 mm 的纯钛管材,同锻造-挤压工艺相比,该工艺成品率提高了 18%,成本下降了 18.2%^[10]。这大大提高了纯钛无缝管的生产经济效益。值得注意的是,采用热挤压法制备钛管坯时,由于在挤压过程中钛锭容易粘结挤压工具,导致加工出来的钛管坯容易出现如图 2 所示的系列质量问题^[11]。但是通过选择合适的润滑方式或者改善润滑条件便可以避免这些问题,使管坯获得良好的表面质量。目前,钛管坯热挤压通常采用玻璃润滑或包套润滑。其中,玻璃润滑工艺在我国尚未成熟,采用玻璃润滑时选择合适的玻璃润滑剂是挤压管坯表面获得良好质量的关键;包套润滑虽说比较成熟,得到的管坯表面质量也较好,但需消耗大量的包套材料,处理工序也比较多,导致挤压成本增加^[12]。对于纯钛管坯的挤压润滑,一般采用紫铜包套加热+油基石墨润滑,但是当挤压比从 14.2 升高至 22.9 后,在挤压过程中由于钛强烈粘结挤压模具而使获得的管坯表面质量很差。为此,郭玲等^[11]改用 0.5 mm 更薄壁厚的铜板制作外包套,并使用一种新型水基润滑剂改善润滑条件,不但获得了内外表面质量良好的管坯,而且经济效益显著。

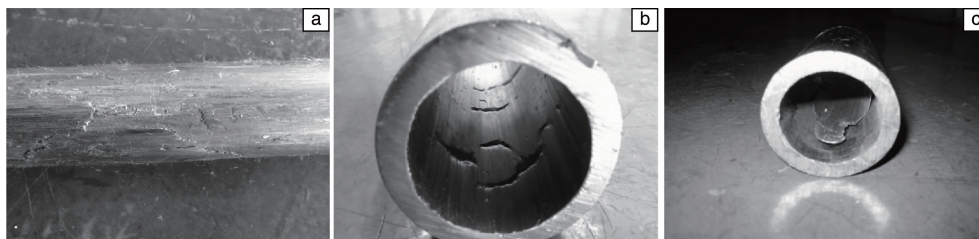


图 2 纯钛挤压管坯的系列质量问题^[11]: (a) 挤压针粘铜粘钛, (b) 管坯内表面凹坑, (c) 管坯内表面铜包套破损

Fig. 2 A series of quality problems of pure titanium extruded tube blanks^[11]: (a) copper and titanium sticking on the extrusion needle, (b) pitting on the inner surface of the tube blank, (c) the damaged copper cladding on the inner surface of the tube blank

热挤压除了适用于纯钛管坯的制备,在其它类型钛合金管坯的制备中也有报道。如 TA15 (Ti-6Al-2Zr-1Mo-1V) 合金,是前苏联在 20 世纪 60 年代中期研制的一种近

α 型钛合金。我国对该合金棒材、板材的加工技术已较成熟,但该合金管材加工仍有待研究,尚秀丽等^[13]探索了热挤压制备 TA15 钛管的可行性,选择挤压温度为 950 °C、

挤压比为 10.2, 同时进行 800~850 °C/1~2 h/AC 退火, 使得 TA15 钛管获得较好的组织性能匹配, 管材质量也能满足相关技术标准。此外还有众多科研工作者通过热挤压制备出了 Ti6321 (Ti-6Al-3Nb-2Zr-1Mo)、TA18 (Ti-3Al-2.5V)、TA21 (Ti-1Al-1Mn) 等近 α 型钛合金管坯^[14-16]。TC4 (Ti-6Al-4V) 合金是典型的 $\alpha+\beta$ 型钛合金, 该合金管材的用量并不大, 只有在需要高强度时才会使用。而且由于 TC4 合金变形抗力大、加工硬化强烈、易开裂, 导致 TC4 合金管材制备难度大^[17]。张永强等^[18]对 TC4 合金管材热挤压成形工艺进行了探索。控制挤压比在 3~10、挤压速度在 50~120 m/s, 选用玻璃粉润滑剂, 成功制备出了合格的直径×壁厚为 47 mm×3 mm 的 TC4 管坯, 这为 TC4 钛管的工业化生产提供了可行的工艺。目前, 热挤压也应用在 TC2 (Ti-4Al-1.5Mn)、Gr. 38 (Ti-4Al-2.5V-1.5Fe-0.25O)、TC11 (Ti-6.5Al-3.5Mo-1.5Zr-0.3Si)、Ti-6Al-3Mo-2Zr-2Fe 等 $\alpha+\beta$ 型钛合金管坯的制备上^[19-22]。然而由于我国对高强度钛合金管材加工工艺的研究起步较晚, 目前对热挤压制备高强 β 钛合金管坯的研究鲜有报道。孙花梅等^[23]对 Ti-B25 合金管材的热挤压成形进行了数值模拟, 并在应变速率为 0.1 s⁻¹ 和变形温度为 900 °C 时成功挤出了表面质量良好的 $\Phi 62$ mm×12 mm 的 Ti-B25 合金管坯。戚运莲等^[24]则在 2500 t 卧式挤压机中将 $\Phi 105$ mm 的 Ti-1300 合金锻棒分

别在 820 °C 和 920 °C 下挤出了 $\Phi 45$ mm×36 mm 的管坯, 并发现在两相区挤压得到的管坯综合力学性能比在单相区挤压得到的好, 管坯抗拉强度和延伸率分别可达到 1300 MPa 和 15%, 具有良好的强塑性匹配。

热挤压通常需要在合金相变点之下进行, 以保证合金的塑性, 从而使挤压顺利进行, 热挤压过程中变形量大, 可制备壁厚较薄且均匀的管坯, 适用于所有类型钛合金管坯的制备。但是热挤压需要在大吨位挤压机中进行, 设备投资大, 挤压坯料还需要进行掏孔、包套、润滑等处理, 材料利用率低, 这些因素使得挤压成本高。

2.2 斜轧穿孔

斜轧穿孔是将实心圆坯在倾斜布置的轧辊带动下旋转前进, 通过顶头穿制成毛管的加工方法^[25], 过程如图 3 所示^[26]。斜轧穿孔可分为两辊斜轧穿孔和三辊斜轧穿孔, 两辊斜轧穿孔技术已经比较成熟, 但制备的钛管坯内外表面易出现缺陷, 尺寸精度差, 从而无法制备高质量的管坯; 而基于两辊斜轧穿孔发展起来的三辊斜轧弥补了两辊斜轧的不足, 可制备直径和壁厚之比大于 10 的薄壁管坯, 并可提高生产效率, 但在实际生产过程中经常出现轧卡的问题^[27]。在斜轧穿孔过程中, 温度和变形量是影响管坯表面质量的主要因素, 制备的管坯质量直接影响着后续的加工工序, 进而影响最终成品的质量。

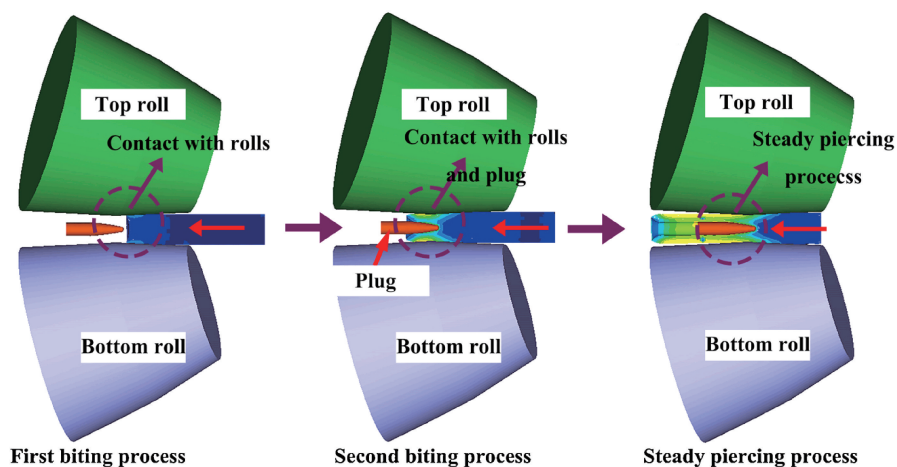


图 3 斜轧穿孔示意图^[26]

Fig. 3 Schematic diagram of rotary piercing process^[26]

目前工业生产钛管坯虽然主要采用挤压, 但是斜轧穿孔因相对挤压有一定的成本优势从而也逐渐得到了应用。马小菊等^[28]使用两辊斜轧穿孔机将 $\Phi 73$ mm 纯钛 (Gr. 2) 棒坯在 β 相区一火穿成 $\Phi 75$ mm×8 mm 的管坯, 但管坯内表面粗糙, 存在细小微裂纹, 进一步在两辊轧制成品管时将镗孔设计在中间轧制过程中并且使相对减量与相对减径量的比值 (Q 值) 小于 1.877, 不但可以

有效去除内表面微裂纹, 还能保证成品管质量。

对于 α 型钛合金, 由于是密排六方结构, 滑移系少, 对称性差, 导致较难成形。因此斜轧穿孔时选择合适的穿孔温度非常重要, 温度偏低时材料变形抗力大, 穿制的管坯偏心较大, 甚至容易出现轧卡现象而不能穿透管坯; 而温度偏高时管坯的显微组织通常是塑性较差的魏氏组织, 性能不均匀, 导致管坯内表面质量差^[29, 30]。苏

航标等^[31]在高于 Ti-75 (Ti-3Al-2Mo-2Zr) 合金相变点 50 °C 时采用斜轧穿孔制备了直径大于 130 mm 的 Ti-75 合金管坯, 该管坯延伸率高达 20%, 具有良好的塑性, 直接进行冷扩后, 制得的管材表面良好且壁厚尺寸偏差小, 可满足生产需求。目前国内制备 TA18 合金无缝管普遍采用挤压-轧制工艺, 为了简化管坯制备流程, 提高成材率和降低成本, 李永林等^[32]提出了采用三辊斜轧穿孔制备 TA18 合金管坯, 将 $\Phi 85$ mm TA18 合金棒坯一火穿制成了 $\Phi 94$ mm \times 12 mm 管坯, 管坯经过 700 °C/1 h/FC 退火后室温拉伸性能良好, 可进行后续轧制。工业应用的钛合金无缝管通常是将熔炼的钛合金铸坯先经过多次锻造再进行管坯的制备, 而张浩泽等^[33]对 $\Phi 500$ mm 的 TA31 (Ti-6Al-3Nb-2Zr-1Mo) 合金铸坯直接两辊斜轧穿孔制备了 $\Phi 538$ mm \times 30 mm 的大口径无缝管, 与传统工序相比, 其流程短、成本低, 制备的管材也满足使用要求, 是生产大规格钛管可采取的方法。

目前斜轧穿孔制备 $\alpha+\beta$ 型钛合金管坯的报道主要集中在 TC4 合金。TC4 合金无缝管的制备通常采用挤压-机加工、挤压-冷轧-退火等工艺, 但肖雅静等^[34]使用两辊斜轧穿孔机将 $\Phi 100$ mm 的 TC4 棒坯一火穿制出了 $\Phi 102$ mm \times 11 mm 的 TC4 管坯, 管坯表面质量好且尺寸公差小, 其组织虽然是塑性较差的魏氏组织, 但是由于变形量大, 片状 α 较细且没有明显的晶界, α , β 晶粒也较小, 因此管坯仍然具有较好的综合性能。余伟等^[35]也采用热穿孔工艺将 $\Phi 180$ mm 的 TC4 圆坯制备成 $\Phi 160$ mm \times 8 mm 的大口径无缝管坯, 管坯外径壁厚比高达 20, 相比于传统工艺所制备的钛管长度多在 10 m 以内, 该方法制备的单根钛管长度可达 12 m, 具有明显的优势。热穿孔工艺制备的 TC4 管材组织虽由魏氏组织和少量网篮组织组成, 但延伸率仍可达 16% 以上。虽然斜轧穿孔具有材料利用率高、

流程短和能耗低等优点, 然而, 斜轧穿孔制备 TC4 管坯经常出现后卡现象, 且魏氏组织塑性差, 不利于管坯后续的加工, 为此, 研究人员通过大量的有限元模拟得到了可避免后卡现象发生并能获得具有理想双态组织的 TC4 管坯的斜轧穿孔工艺参数^[36-38]。目前在斜轧穿孔制备 β 钛合金管坯的研究中, 赵恒章等^[39]针对 Ti-26 (Ti-15V-3Al-3Cr-3Sn-1Nb-1Zr) 合金进行了斜轧穿孔制备管坯试验。在此之前, 西北有色金属研究院对 Ti-26 进行了管材挤压试验, 但由于润滑效果不好等原因使得挤压过程中经常出现挤压针断裂、闷车等问题, 导致难以正常挤压。进一步采用斜轧穿孔法, 将 $\Phi 106$ mm 的 Ti-26 棒坯在 1050 °C 下一火穿制成了质量良好的 $\Phi 108$ mm \times 10 mm 管坯, 并且该管坯不用热处理便可直接进行轧制。西北有色金属研究院对该管坯直接开坯轧制成功轧出了管材, 这为斜轧穿孔制备高强钛合金管坯提供了一定的参考。

相比热挤压, 斜轧穿孔不需要包套、润滑等, 设备投入少, 材料利用率高, 具有高效、短流程、低成本的优势。但是斜轧穿孔穿孔温度高, 对坯料要求严格, 坯料需具备良好的塑性。另外, 斜轧穿孔不能制备壁厚较薄的钛合金管坯, 制备的管坯壁厚通常大于 10 mm, 壁厚均匀度相对于热挤压制备的稍差, 长度也受到限制。

2.3 轧制

轧制是将管坯经辊轧管机辊压轧制成一定规格的管材, 轧制过程如图 4 所示^[40]。轧制按坯温的不同可分为冷轧、温轧、热轧; 按轧机所具有的轧辊、轧槽的结构形式不同可分为两辊轧制和多辊轧制, 两辊轧制多用于开坯, 多辊轧制则用于定径和精整, 通常情况下两者会结合使用^[41]。变形量、 Q 值、轧制道次、送进量等是轧制过程中的主要工艺参数。

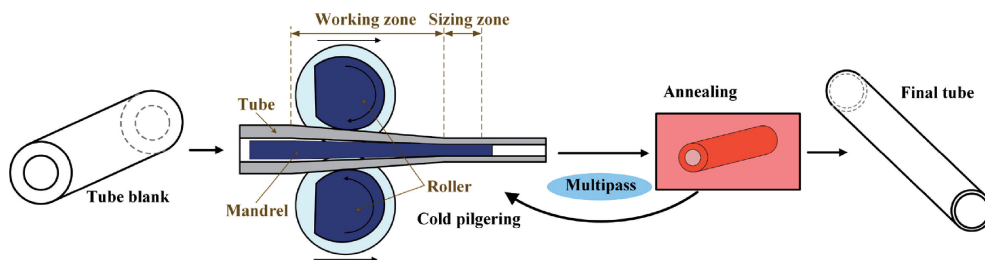


图 4 轧制示意图^[40]

Fig. 4 Schematic diagram of rolling process^[40]

轧制是制备精密、薄壁钛管的主要方法。工业纯钛 TA2 因塑性好可通过不同的加工工艺制备成各种规格的管材。邢健等^[42]将包套挤压得到的 $\Phi 45$ mm \times 5.5 mm TA2 管坯分别通过轧制和轧制-拉拔 2 种工艺加工成 $\Phi 12$ mm \times 1.25 mm 成品管材, 对比发现采用轧制-拉

拔工艺制备的 TA2 管材的工艺性能、力学性能 (表 1) 和内表面质量 (图 5) 均优于通过轧制工艺制备的 TA2 管材。因此, 不同加工工艺得到的管材性能、质量会有所差异, 在实际生产中需进行综合考虑选择合适的加工工艺。

表 1 2 种不同加工工艺制备的 TA2 管材的力学性能^[42]Table 1 Mechanical properties of TA2 pipes produced by two different processes^[42]

Technology	R_m /MPa		$R_{p0.2}$ /MPa		A/%	
	Initial state	Annealed state	Initial state	Annealed state	Initial state	Annealed state
Rolling	555.82	313.12	494.32	165.94	20.00	52.00
Rolling-drawing	650.45	425.13	632.19	289.71	10.00	33.00

Notes: R_m represents tensile strength, $R_{p0.2}$ represents yield strength, A represents elongation

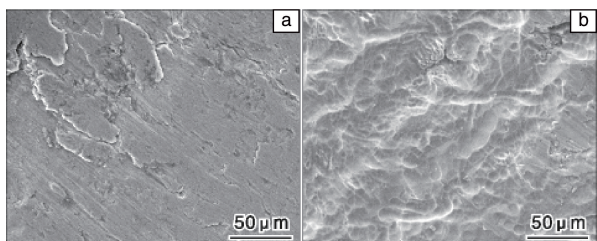


图 5 2 种不同加工工艺制备的 TA2 管材的内表面形貌^[42]: (a) 轧制, (b) 轧制-拉拔

Fig. 5 Inner surface morphologies of TA2 pipes produced by two different processes^[42]: (a) rolling, (b) rolling-drawing

轧制在制备近 α 型钛管中也运用得比较多。其中, TA18 合金由于具有良好的比强度、冷加工成形性能以及室温和高温强度, 得到了广泛的应用^[43, 44], 是近 α 型轧制钛管中运用最多的一种。目前有大量文献对 TA18 钛管的冷轧工艺进行了研究报道^[45-48]。此外, 冷轧同样也适用于 TA16(Ti-2Al-2.5Zr)、TA22(Ti-3Al-1Mo-1Zr-0.6N)、TA36(Ti-1Al-1.2Fe)、Gr.9(Ti-3Al-2.5V)、Gr12(Ti-0.7Ni-0.2Mo)、CT20(Ti-Al-Zr-Mo 系)等近 α 型钛管的制备^[49-55]。TC2、TC4 等 $\alpha+\beta$ 型合金由于冷变形能力不佳, 管材冷轧加工困难, 目前主要采用热加工方式生产。羊玉兰等^[56]对 TC2 钛管两辊温轧开坯、多辊冷轧出成品的轧制工艺进行了研究, 控制温轧和冷轧道次变形量在 40% 和 30%、温轧温度在 550~650 °C、退火温度在 850~900 °C 时, 可轧制出各项性能指标满足技术标准要求的 TC2 钛管。李凯玥^[41]也对斜轧穿孔制备的壁厚为 5.5 mm 的 TC4 管坯进行了冷轧工艺的探索, 发现当 Q 值在 0.02~1.31 时可以通过轧制得到表面质量良好的管材。李宝霞等^[57]采用斜轧穿孔+热轧制备出了表面质量好、尺寸精度高的 $\Phi 560$ mm \times 25 mm 大规格 TC4 无缝管材, 该工艺和挤压+机加相比, 可节约 80% 坯料, 生产效率也得到了提高。

跟 $\alpha+\beta$ 型钛合金一样, 目前关于采用轧制制备 β 型钛合金管材的报道也比较少。高莹等^[58]采用斜轧穿孔+冷轧工艺成功将截面为 55 mm \times 55 mm 的 TB2 合金棒材制备成了 $\Phi 43$ mm \times 8 mm 薄壁管。薛海龙^[59]根据有限元模拟优化后的工艺参数进行实际轧制, 成功制备了壁厚均

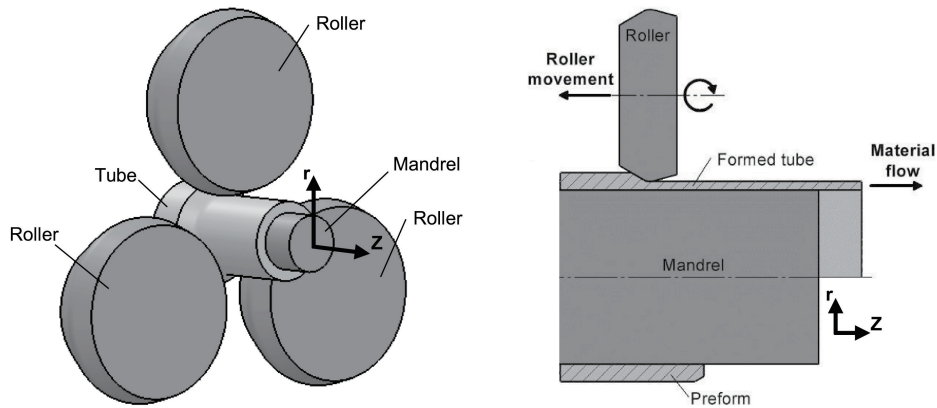
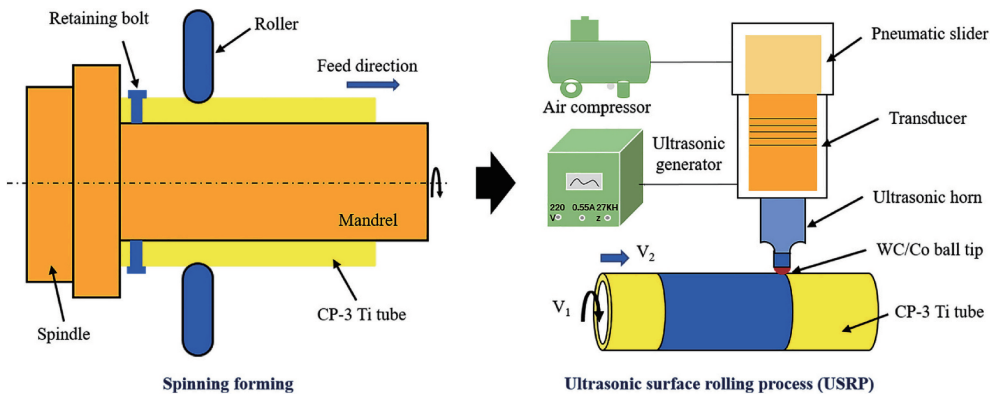
匀、表面光滑的 Ti-5563 合金成品管材。车永平^[60]采用冷轧的方法对 $\Phi 8.0$ mm \times 1.0 mm 的 Ti-25Nb-3Zr-3Mo-2Sn(TLM) 合金管坯进行多道次中间轧制, 结合中间退火, 控制变形量在较低的范围, 成功制备出了规格为 $\Phi 4.0$ mm \times 0.3 mm 的 TLM 合金细径薄壁管材。

对于钛合金无缝管坯的轧制加工技术, 目前低合金化、低强度的钛合金均采用冷轧, 而中、高强钛合金虽有采用温轧和热轧的报道, 但主要也还是采用冷轧。轧制既可减径又可减壁, 相比挤压或锻造等方法制备的钛管, 轧制制备的钛管表面质量及尺寸精度更高, 该方法适用于各种规格的小直径薄壁管的加工, 且制得的成品管材长度受限较小, 生产效率高, 适合大批量生产^[61]。

2.4 旋压

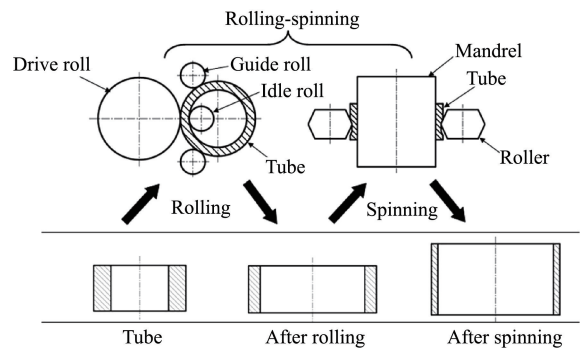
旋压是旋轮从端头开始旋转挤压被顶杆固定于旋压机模具上的管坯, 使其逐点连续发生塑性变形成为所需空心零件的先进加工方法^[62], 旋压过程如图 6 所示^[63]。旋压工艺按坯料变形程度不同可分为普通旋压和强力旋压; 按旋轮进给方向与坯料流动方向的不同关系可分为正旋和反旋; 按旋压时成形温度不同可以分为冷旋和热旋^[64, 65]。旋压的主要工艺参数包括旋压速度、旋压温度、进给速度、减薄率、旋轮角等。

旋压一般用来制造长度较小但直径与壁厚比值相当大的超薄钛合金无缝管(筒形件)^[66]。目前对于采用旋压制备纯钛管材, Zhang 等^[67]提出了旋压-超声表面滚压复合成形制造高性能纯钛薄壁管的方法(图 7), 这一方法使材料表面形成梯度纳米结构, 降低了管材表面粗糙度, 实现了良好的强度-塑性协同效应。TA15 合金是近 α 型钛合金中采用旋压法制备管材最多的一种, 有大量文献对 TA15 合金薄壁管材热旋成形技术进行了研究^[68-70], 发现 TA15 合金薄壁筒形件热旋成形的关键是保证金属旋压时变形流动的均匀性, 这又直接受热旋加热方式、旋压工艺参数和成形模具等因素的影响, 并且大型薄壁筒形件的热旋与小筒形件的热旋在工艺上还存在较大的差别, 成形难度要大得多。此外, 郭靖^[71]对 TA15 合金薄壁筒形构件轧制-旋压连续成形进行了研究, 轧制-旋压连续成形(图 8)^[72]是融合了环轧和旋压技术优势的一

图 6 旋压示意图^[63]Fig. 6 Schematic diagram of spinning process^[63]图 7 旋压-超声表面滚压复合成形示意图^[67]Fig. 7 Schematic diagram of spinning-ultrasonic surface rolling process combined forming technique^[67]

种薄壁筒形件的先进成形技术。通过研究获得了 TA15 合金薄壁筒形构件轧制-旋压成形的最优工艺参数：旋压温度为 850 °C、4 旋压道次、旋轮进给比为 1.5 mm/r、旋轮圆角半径为 25 mm。此工艺制备的 TA15 合金管材的成形极限可提高到 86.7%，减薄率大大增加的同时还避免了缺陷的产生。这为提高钛合金薄壁筒形件轧制-旋压连续成形极限奠定了重要基础。张富平等^[73]对 TA16 合金变径管的滚珠旋压成形工艺进行了研究，当旋压临界工作角为 20°、旋轮进给比为 0.08~0.15 mm/r 时，成功将 $\Phi 8 \text{ mm} \times 1.5 \text{ mm}$ TA16 钛合金管坯加工成了表面质量良好的 $\Phi 7.85 \text{ mm} \times 2.85 \text{ mm}$ 变径管。 $\alpha+\beta$ 型钛合金薄壁管材的旋压成形研究主要集中于 TC4 合金。TC4 合金热导率低，对变形温度十分敏感，使得该合金薄壁管材的热旋成形难度很大；同时，TC4 合金室温下加工硬化强烈，易开裂，这也造成其冷旋成形非常困难。汪发春等^[74]对 TC4 合金薄壁筒形件开展热旋成形工艺及优化研究，在加热温度为 600~750 °C、旋轮进给比为 0.8~1.2 mm/r、道次减薄率在 20%~30% 时可稳定旋压成形 TC4 合金薄壁筒形件。胡宗式^[75]则对 TC4 合金管材的冷旋成形工艺

进行了研究，发现选择合适的旋轮，控制转速在 320 r/s，进给比在 0.2~1.2 mm/r，并使用大量的机油进行冷却和润滑，可成功冷旋制备 TC4 合金管材。为了提高旋压钛合金管材的环向强度，Yang 等^[76]提出了一种新的管材旋压成形方法——交叉旋压（图 9），与传统单向旋压制备的 TC4 钛管相比，交叉旋压制备的 TC4 钛管的轴向强度略微增加的同时环向强度显著提高。这为提高钛合金管材的环向强度提供了一种有效的方法。

图 8 轧制-旋压示意图^[72]Fig. 8 Schematic diagram of rolling-spinning process^[72]

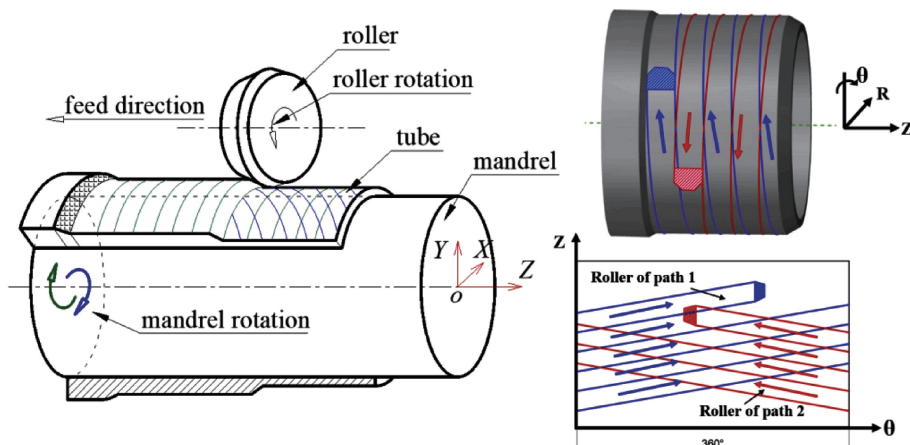


图 9 交叉旋压示意图^[76]

Fig. 9 Schematic diagram of cross spinning process^[76]

旋压制备 β 型钛合金管材也有一些报道，目前已经进行了 TB6 (Ti-10V-2Fe-3Al) 合金旋压成形筒形件的数值模拟^[77]；也进行了 Ti55531 (Ti-5Al-5V-5Mo-3Cr-1Zr) 合金一定变形条件下筒形件热旋压成形的可行性实验研究^[78]。为了解决 Ti-1300 合金筒形件成形难题和提高铸造管坯的力学性能，杨延涛等^[79]探索了 Ti-1300 合金筒形件的旋压成形工艺，发现在 800~900 °C 旋压能避免旋压缺陷的产生，开坯旋压采用 0.5~0.8 mm/r 的小进给比，终道次旋压采用 1.2~2.0 mm/r 的大进给比，开坯旋压道次减薄率不超过 30%，可旋压成形高质量的 Ti-1300 合金筒形件。Xu 等^[80]则借助 McClintock 模型预测和实际实验发现，旋压制备 Ti-15-3 (Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al) 合金管材时，减薄率较低 (18%) 或较高 (42.3%) 时都会使管材内表面产生裂纹，但采用中等减薄率 (27%~33%) 且在旋压道次间进行固溶处理时，可成功避免 Ti-15-3 合金管材旋压过程中裂纹的产生。

旋压成形技术已成为加工薄壁空心钛合金回转体零

件的首选方法^[78]。基于旋压制备钛管过程中采用较小的旋压力就可获得很大的变形应力，有利于薄壁钛合金无缝管的制备^[61]。也正是这个特点，相比通过轧制、锻造工艺制备的钛管，采用旋压方法制备的钛管表面光洁度更高，尺寸公差更小。然而，采用旋压制备钛管生产率较低，劳动强度大，不适于大批量生产。

2.5 特种锻造

特种锻造是管坯在锻压机械的作用下产生塑性变形从而获得一定形状和尺寸的管材，是一种少切削、材料利用率高的管材制备方法^[81, 82]。其中，径向锻造 (图 10)^[82]和旋转锻造 (图 11)^[83]是钛管制备中用得比较多的 2 种锻造方法。目前特种锻造方法在 TC4 钛管制备中报道得较多。熊庆华等^[84]采用 DEFORM 模拟分析了 TC4 管材径向锻造成形工艺并得到了优化的成形工艺参数。谢仁沛等^[81]通过进一步的实际实验探究了 TC4 厚壁管的径向锻造工艺，发现径向锻造制备的 TC4 厚壁管成品率高、表面质量好，与挤压制备的厚壁管相比，组织更细、综合

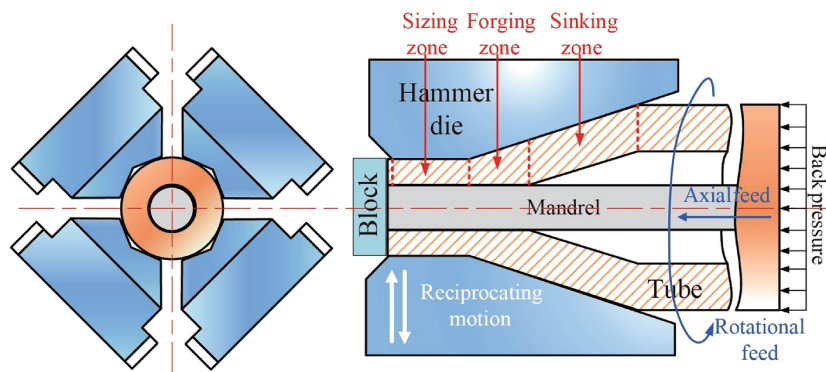
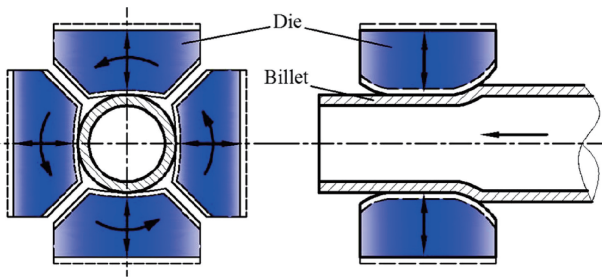


图 10 径向锻造示意图^[82]

Fig. 10 Schematic diagram of the radial forging process^[82]

图 11 旋转锻造示意图^[83]Fig. 11 Schematic diagram of the rotary swaging process^[83]

力学性能(表 2)也更好^[81]。值得注意的是, 径向锻造可使管材壁厚增加和长度延伸, 而且也能提高管材强度, 但是随着径向锻造加工率的增加, 内壁起皱量随之增大, 同时壁厚均匀性变差^[85]。此外, Yuan 等^[86]通过研究发现, 使用冷旋锻可以制备晶粒细化和具有较强径向织构的薄壁 TC4 无缝管材。在冷旋锻过程中, 随着横截面变形量的增加, 管材的晶粒细化程度增加, 冷旋锻后的管材具有良好的强度和塑性, 抗拉强度和延伸率分别可达到 1251 MPa 和 12.2%。

表 2 2 种不同加工工艺制备的 TC4 合金厚壁管经 750 °C/1 h 热处理后的力学性能^[81]Table 2 Mechanical properties of TC4 alloy thick-wall pipe prepared by two different processes after heat treatment at 750 °C for 1 hour^[81]

Preparation technology	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A /%	Z /%
Radial forging	1010	925	14	39
Extrusion	950	905	16	39

Note: Z represents reduction of area

特种锻造在制备钛管过程中不仅能有效细化晶粒, 还能使残余应力均匀化, 显著提高钛管的力学性能^[87]。该制备方法既能制备大规格厚壁钛管, 又能制备小规格薄壁钛管, 但相比轧制、旋压制备的管材, 特种锻造制备的管材表面质量及尺寸公差较差。

3 钛合金无缝管的其他制备方法

根据目前已报道的制备钛合金无缝管材的文献, 以上几种制备钛合金无缝管材的方法、可加工的钛合金材料种类以及可加工的管材规格分别如图 12 和表 3^[10, 16, 28, 57, 60, 70, 73, 75, 81, 88-98]所示。由图 12 可以看出, 目前在制备钛合金无缝管坯时主要还是采用挤压多一些, 而管坯的后续加工则大部分采用轧制。对于纯钛、 α 型和 $\alpha+\beta$ 型钛合金无缝管的制备, 这几种方法均适用, 而对于 β 型钛合金无缝管, 目前尚未有采用特种锻造制备的报道。此外, 由表 3 可知, 挤压、斜轧穿孔、轧制等方法既可制备小规格钛合金无缝管, 又能制备大规格钛合金无缝管。其中, 相对于其他几种方法而言, 旋压制备的管材长度和壁厚相对较小。这些方法能制备多大规格的管材主要还是依赖于加工设备的规格。在实际制备钛合金无缝管时, 需综合考虑材料特性、管材产品质量和性能要求、加工成本等因素选择合适的制备方法。

除了以上几种传统、常用的钛合金无缝管材的制备方法外, 近年来, 在国家相关项目的支持下, 相关科研单位通过参考钢管的连轧工艺及设备, 提出了“斜轧穿孔+热连轧+定径轧”一步法连续制备中大口径厚壁钛合金无缝管这一新的方法。西北有色金属研究院使用该法制备出了 TC4、TC18 (Ti-5Al-5Mo-5V-1Cr-1Fe) 等合金的中大口径厚壁钛管, 管材单根长度可达 25 m 以上, 综

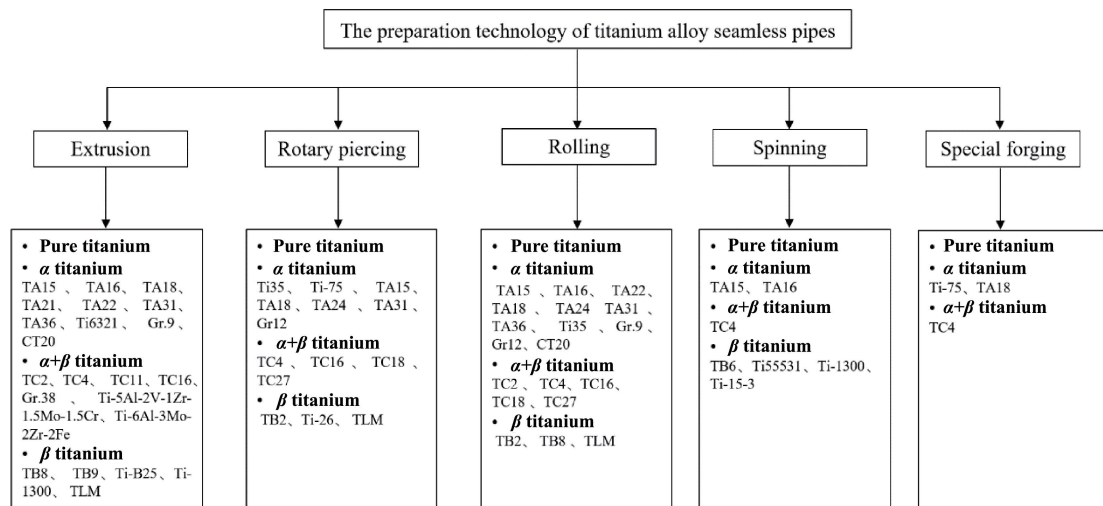


图 12 钛合金无缝管制备方法及可加工的钛合金材料种类

Fig. 12 Preparation technology of titanium alloy seamless pipes and related titanium alloy material types

表 3 钛合金无缝管制备方法可加工的管材规格

Table 3 The pipe specifications processed by the different preparation technologies of titanium alloy seamless pipes

Preparation technology	Blank specification/mm	Pipe diameter/mm	Pipe wall thickness/mm	Pipe length/mm	References
Extrusion	$\Phi 94.5 \sim \Phi 1800$	17~1305	1~65.5	500~12 000	[10, 16, 88, 89]
Rotary piercing	$\Phi 73 \sim \Phi 600$	70~630	6~154	2010~12 000	[28, 90~93]
Rolling	$\Phi 8 \times 1.0 \sim \Phi 580 \times 80$	4~560	0.3~55	5000~38 000	[57, 60, 91, 92, 94, 95]
Spinning	$\Phi 8 \times 1.5 \sim \Phi 346 \times 19$	7.85~150	1.5~5.5	800~1740	[70, 73, 75, 96]
Special forging	$\Phi 21 \times 1.8 \sim \Phi 820 \times 210$	15~510	0.6~107.5	1000~6000	[81, 89, 97, 98]

合成本降低 40%，管材不同位置的尺寸精度、组织性能完全满足相应的使用标准^[4, 95]。虽然该技术已经取得突破，但由于目前钛合金应用市场对尺寸固定单一的厚壁钛管需求不足从而无法实现工业化生产。然而，该技术具备低成本、短流程、高效的优势，未来有很大潜力成为钛合金厚壁管材制备的主流工艺。

王长江^[99]也提出了一种短流程低成本制备高强韧钛合金无缝管的新方法，采用电子束枪或者等离子枪融化原材料直接生产管坯，避免了传统的熔炼、锻造、穿孔等工序，然后进行 3 次径向锻造改良管坯的组织，再依次通过双重退火和机加工得到合格的成品管。相比于传统无缝管材制备技术，该方法加工周期大大缩短，材料利用率高，使得加工成本大大降低，有利于工业化生产，有望实现高强韧钛合金无缝管的批量生产。

4 结 语

钛合金无缝管因其优异的综合性能而在航空航天、船舶、石油化工等领域得到重要应用。挤压和斜轧穿孔是制备钛合金管坯最重要的 2 种方法，而轧制、旋压、特种锻造是管坯进一步加工成成品管材最常用的几种方法。斜轧穿孔虽然成本低，但是由于对坯料要求严格，穿轧温度高，适用的合金类型较挤压少，所以目前还是采用挤压制备钛合金管坯多些。轧制既可减径又可减壁，成品管材长度受限较小，可生产各种规格小直径薄壁钛合金无缝管；旋压则一般用来制造长度较小但直径与壁厚比值相当大的超薄钛合金无缝管；特种锻造既能制备大规格厚壁钛合金无缝管，又能制备小规格薄壁钛合金无缝管，但管材表面质量及尺寸公差相比轧制、旋压制备的管材要差。近年来，我国相关科研单位也在不断探索可高效、短流程、低成本制备钛合金无缝管的新方法。

参考文献 References

[1] LEI L, ZHAO Y Q, ZHAO Q Y, *et al.* Materials Science and Engineering A[J], 2021, 801: 140411.
 [2] JIANG S H, DI J N, XU Z D, *et al.* Rare Metal Materials and En-

gineering[J], 2025, 54(9): 2211-2219.

- [3] LI Z X, ZHAN M, GUO K, *et al.* Rare Metal Materials and Engineering[J], 2017, 46(11): 3169-3175.
 [4] 辛社伟, 刘向宏, 张思远, 等. 稀有金属材料与工程[J], 2023, 52(11): 3971-3980.
 XIN S W, LIU X H, ZHANG S Y, *et al.* Rare Metal Materials and Engineering[J], 2023, 52(11): 3971-3980.
 [5] 余志远, 于振涛, 刘汉源, 等. 热加工工艺[J], 2018, 47(9): 6-9.
 YU Z Y, YU Z T, LIU H Y, *et al.* Hot Working Technology[J], 2018, 47(9): 6-9.
 [6] 孙振铎. TiNi 合金管反挤压工艺研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2010.
 SUN Z D. The Study of Backward Extrusion Process for Ti-Ni Alloy Tube[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2010.
 [7] JIANG H, LI L H, DONG J X, *et al.* Progress in Natural Science: Materials International[J], 2018, 28(3): 391-398.
 [8] 马小菊, 杨亚社, 母果路, 等. 热加工工艺[J], 2014, 43(20): 177-178.
 MA X J, YANG Y S, MU G L, *et al.* Hot Working Technology[J], 2014, 43(20): 177-178.
 [9] 戚运莲, 蔡建华, 辛社伟, 等. 稀有金属与硬质合金[J], 2023, 51(4): 82-91.
 QI Y L, CAI J H, XIN S W, *et al.* Rare Metals and Cemented Carbides[J], 2023, 51(4): 82-91.
 [10] 吴宝科, 卢其超. 稀有金属合金加工[J], 1981(5): 5-10.
 WU B K, LU Q C. Processing of Rare Metal Alloys[J], 1981(5): 5-10.
 [11] 郭玲, 谢珊珊. 机械制造[J], 2015, 53(6): 71-73.
 GUO L, XIE C B. Machinery[J], 2015, 53(6): 71-73.
 [12] 朱洪志, 秦建平, 王召林, 等. 机械工程与自动化[J], 2013(6): 221-222.
 ZHU H Z, QIN J P, WANG Z L, *et al.* Mechanical Engineering & Automation[J], 2013(6): 221-222.
 [13] 尚秀丽, 佟学文, 晏小兵, 等. 中国有色金属学报[J], 2010, 20(S1): 765-769.
 SHANG X L, TONG X W, YAN X B, *et al.* The Chinese Journal of Nonferrous Metals[J], 2010, 20(S1): 765-769.

- [14] 陈睿博, 刘勇. 热加工工艺[J], 2018, 47(21): 152-153.
CHEN R B, LIU Y. Hot Working Technology[J], 2018, 47(21): 152-153.
- [15] 张旺峰, 李艳, 王玉会, 等. 材料导报[J], 2011, 25(23): 133-137.
ZHANG W F, LI Y, WANG Y H, *et al.* Materials Review[J], 2011, 25(23): 133-137.
- [16] 李长江. TA21 钛合金管材研制[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2006.
LI C J. Study and Manufacture of the TA21 Titanium Alloy Tube Product[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2006.
- [17] 韩明臣, 倪沛彤, 谢翀博, 等. 钛工业进展[J], 2014, 31(5): 19-22.
HAN M C, NI P T, XIE C B, *et al.* Titanium Industry Progress[J], 2014, 31(5): 19-22.
- [18] 张永强, 冯永琦, 李渭清, 等. 稀有金属快报[J], 2006(10): 27-29.
ZHANG Y Q, FENG Y Q, LI W Q, *et al.* Rare Metals Letters[J], 2006(10): 27-29.
- [19] 羊玉兰, 佟学文, 杨隄林. 钛工业进展[J], 2005(3): 22-24.
YANG Y L, TONG X W, YANG L L. Titanium Industry Progress[J], 2005(3): 22-24.
- [20] 李永林, 曾卫东, 李修勇, 等. 特种铸造及有色合金[J], 2017, 37(9): 940-943.
LI Y L, ZENG W D, LI X Y, *et al.* Special Casting & Nonferrous Alloys[J], 2017, 37(9): 940-943.
- [21] 代春, 朱栓平, 凤伟中, 等. 科技创新与应用[J], 2016(34): 52-53.
DAI C, ZHU S P, FENG W Z, *et al.* Technological Innovation and Application[J], 2016(34): 52-53.
- [22] CUI N, CHEN S H, XU W T, *et al.* Metals[J], 2022, 12: 1564.
- [23] 孙花梅, 刘伟, 戚运莲, 等. 钛工业进展[J], 2021, 38(1): 25-29.
SUN H M, LIU W, QI Y L, *et al.* Titanium Industry Progress[J], 2021, 38(1): 25-29.
- [24] 戚运莲, 辛社伟, 杜宇, 等. 有色金属材料与工程[J], 2019, 40(4): 6-12.
QI Y L, XIN S W, DU Y, *et al.* Nonferrous Metal Materials and Engineering[J], 2019, 40(4): 6-12.
- [25] ZHANG Z, LIU D, YANG Y H, *et al.* The International Journal of Advanced Manufacturing Technology[J], 2019, 104(9-12): 3991-4006.
- [26] ZHANG Z, LIU D, LI Z F, *et al.* Journal of Materials Processing Technology[J], 2021, 295: 117153.
- [27] 朱洪志. 钛合金的三辊斜轧穿孔工艺分析[D]. 太原: 太原科技大学, 2013.
ZHU H Z. Analysis of Three Roll Cross Rolling Perforation Process for Titanium Alloy[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Science and Technology, 2013.
- [28] 马小菊, 曲恒磊, 李明强, 等. 稀有金属材料与工程[J], 2009, 38(12): 2242-2245.
MA X J, QU H L, LI M Q, *et al.* Rare Metal Materials and Engineering[J], 2009, 38(12): 2242-2245.
- [29] 张一帆, 宋德军, 张智超, 等. 塑性工程学报[J], 2022, 29(8): 110-116.
ZHANG Y F, SONG D J, ZHANG Z C, *et al.* Journal of Plasticity Engineering[J], 2022, 29(8): 110-116.
- [30] 赵恒章, 奚正平, 郭荻子, 等. 稀有金属材料与工程[J], 2015, 44(3): 671-675.
ZHAO H Z, XI Z P, GUO D Z, *et al.* Rare Metal Materials and Engineering[J], 2015, 44(3): 671-675.
- [31] 苏航标, 杨英丽, 赵永庆, 等. 中国有色金属学报[J], 2010, 20(S1): 945-949.
SU H B, YANG Y L, ZHAO Y Q, *et al.* The Chinese Journal of Nonferrous Metals[J], 2010, 20(S1): 945-949.
- [32] 李永林, 袁红军, 朱宝辉, 等. 钛工业进展[J], 2014, 31(5): 23-27.
LI Y L, YUAN H J, ZHU B H, *et al.* Titanium Industry Progress[J], 2014, 31(5): 23-27.
- [33] 张浩泽, 余堃, 钟海, 等. 兵器材料科学与工程[J], 2022, 45(3): 35-41.
ZHANG H Z, YU K, ZHONG H, *et al.* Ordnance Material Science and Engineering[J], 2022, 45(3): 35-41.
- [34] 肖雅静, 徐先泽, 张树启, 等. 稀有金属快报[J], 2008(1): 29-32.
XIAO Y J, XU X Z, ZHANG S Q, *et al.* Rare Metals Letters[J], 2008(1): 29-32.
- [35] 余伟, 董恩涛, 蔡庆伍. 钛工业进展[J], 2016, 33(4): 36-39.
YU W, DONG E T, CAI Q W. Titanium Industry Progress[J], 2016, 33(4): 36-39.
- [36] 吴威, 庞玉华, 刘东, 等. 热加工工艺[J], 2019, 48(19): 92-96.
WU W, PANG Y H, LIU D, *et al.* Hot Working Technology[J], 2019, 48(19): 92-96.
- [37] 庞玉华, 林鹏程, 王杨, 等. 塑性工程学报[J], 2019, 26(3): 293-299.
PANG Y H, LIN P C, WANG Y, *et al.* Journal of Plasticity Engineering[J], 2019, 26(3): 293-299.
- [38] ZHANG Z, LIU D, YANG Y H, *et al.* Archives of Civil and Mechanical Engineering[J], 2018, 18(4): 1451-1463.
- [39] 赵恒章, 杨英丽, 郭荻子, 等. 稀有金属快报[J], 2007(12): 34-37.
ZHAO H Z, YANG Y L, GUO D Z, *et al.* Rare Metals Letters[J], 2007(12): 34-37.
- [40] LI H, WEI D, ZHANG H Q, *et al.* Journal of Materials Processing Technology[J], 2020, 279: 116520.
- [41] 李凯玥. TC4 钛合金薄壁管材冷轧工艺及组织性能研究[D]. 江

- 苏：江苏科技大学，2012.
- LI K Y. Investigation on Cold Rolling Process, Microstructure and Properties of TC4 Alloy Thin Thickness Tubes[D]. Jiangsu: Jiangsu University of Science and Technology, 2012.
- [42] 邢健, 杨英丽, 郭荻子, 等. 钛工业进展[J], 2012, 29(3): 19-21.
- XING J, YANG Y L, GUO D Z, *et al.* Titanium Industry Progress [J], 2012, 29(3): 19-21.
- [43] 田壮, 赵志浩. 有色金属加工[J], 2023, 52(2): 1-11.
- TIAN Z, ZHAO Z H. Nonferrous Metals Processing[J], 2023, 52(2): 1-11.
- [44] 韩建业, 刘汉源, 张鹏省, 等. 内燃机与配件[J], 2023(24): 114-116.
- HAN J Y, LIU H Y, ZHANG P S, *et al.* Internal Combustion Engine Parts[J], 2023(24): 114-116.
- [45] 黄亮, 徐哲, 代春, 等. 稀有金属材料与工程[J], 2013, 42(3): 524-529.
- HUANG L, XU Z, DAI C, *et al.* Rare Metal Materials and Engineering[J], 2013, 42(3): 524-529.
- [46] 黄亮, 徐哲, 代春, 等. 稀有金属材料与工程[J], 2013, 42(4): 741-745.
- HUANG L, XU Z, DAI C, *et al.* Rare Metal Materials and Engineering[J], 2013, 42(4): 741-745.
- [47] 雷江, 马小菊, 尉北玲, 等. 钛工业进展[J], 2012, 29(1): 36-38.
- LEI J, MA X J, WEI B L, *et al.* Titanium Industry Progress [J], 2012, 29(1): 36-38.
- [48] 洪权, 戚运莲, 赵彬, 等. 钛工业进展[J], 2016, 33(2): 16-19.
- HONG Q, QI Y L, ZHAO B, *et al.* Titanium Industry Progress[J], 2016, 33(2): 16-19.
- [49] 张亚峰, 于振涛, 余森, 等. 钛工业进展[J], 2012, 29(3): 11-13.
- ZHANG Y F, YU Z T, YU S, *et al.* Titanium Industry Progress [J], 2012, 29(3): 11-13.
- [50] 王东, 佟学文, 李长江, 等. 钛工业进展[J], 2005(2): 24-25.
- WANG D, TONG X W, LI C J, *et al.* Titanium Industry Progress [J], 2005(2): 24-25.
- [51] 王巧莉, 成小丽, 羊玉兰. 世界有色金属[J], 2021(16): 107-108.
- WANG Q L, CHENG X L, YANG Y L. World Nonferrous Metals [J], 2021(16): 107-108.
- [52] 陈胜川, 朱宝辉, 袁红军, 等. 钛工业进展[J], 2016, 33(5): 25-29.
- CHEN S C, ZHU B H, YUAN H J, *et al.* Titanium Industry Progress[J], 2016, 33(5): 25-29.
- [53] 杨碧芸, 雷杨, 陈肖, 等. 世界有色金属[J], 2020(4): 20-22.
- YANG B Y, LEI Y, CHEN X, *et al.* World Nonferrous Metals[J], 2020(4): 20-22.
- [54] 王忠华. 稀有金属快报[J], 2008(3): 35-39.
- WANG Z H. Rare Metals Letters[J], 2008(3): 35-39.
- [55] 刘伟, 卢天健, 杨冠军, 等. 钛工业进展[J], 2009, 26(6): 19-22.
- LIU W, LU T J, YANG G J, *et al.* Titanium Industry Progress[J], 2009, 26(6): 19-22.
- [56] 羊玉兰, 佟学文, 李长江, 等. 钛工业进展[J], 2003(Z1): 66-69.
- YANG Y L, TONG X W, LI C J, *et al.* Titanium Industry Progress [J], 2003(Z1): 66-69.
- [57] 李宝霞, 李红博, 赵富强, 等. 有色金属加工[J], 2018, 47(5): 47-49.
- LI B X, LI H B, ZHAO F Q, *et al.* Nonferrous Metals Processing [J], 2018, 47(5): 47-49.
- [58] 高莹, 李德富, 胡捷. TB2 钛合金管材冷轧加工组织和性能研究 [C]//中国有色金属学会第十二届材料科学与合金加工学术年会论文集. 北京: 北京有色金属研究总院加工中心, 2007: 429-433.
- GAO Y, LI D F, HU J. Experimental Research on Microstructure and Properties of TB2 Titanium Alloy by Roller Milling[C]//Proceedings of the 12th Academic Annual Conference on Materials Science and Alloy Processing of the China Nonferrous Metals Society. Beijing: Beijing Nonferrous Metals Research Institute Processing Center, 2007: 429-433.
- [59] 薛海龙. 高强亚稳 β 型 Ti5563 管材的轧制及热处理工艺性能的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2015.
- XUE H L. Research on Rolling and Heat Treatment Technology of Metastable β Ti5563 Tube with High Strength[D]. Shenyang: Northeastern University, 2015.
- [60] 车永平. 生物医用近 β 型 TLM 钛合金的管材制备与性能研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2015.
- CHE Y P. Study on Fabrication and Properties of Biomedical near β -Type TLM Titanium Tubes[D]. Shenyang: Northeastern University, 2015.
- [61] 安耿, 周莎, 张晓, 等. 中国铝业[J], 2021, 45(6): 7-11.
- AN G, ZHOU S, ZHANG X, *et al.* China Molybdenum Industry [J], 2021, 45(6): 7-11.
- [62] 孙松, 陈庆, 杨纯梅, 等. 铝加工[J], 2021(1): 8-11.
- SUN S, CHEN Q, YANG C M, *et al.* Aluminium Fabrication [J], 2021(1): 8-11.
- [63] MUSIC O, SARIYARLIOGLU E C. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology[J], 2022, 123(3/4): 709-735.
- [64] 牟少正, 韩冬. 航天制造技术[J], 2008(4): 38-42.
- MOU S Z, HAN D. Aerospace Manufacturing Technology [J], 2008(4): 38-42.
- [65] 杨明辉, 梁佰祥, 夏琴香, 等. 机电工程技术[J], 2004(11): 14-16.
- YANG M H, LIANG B X, XIA Q X, *et al.* Mechanical & Electrical Engineering Technology[J], 2004(11): 14-16.
- [66] 冯玉珩. 钛工业进展[J], 1994(2): 55-60.

- FENG Y H. Titanium Industry Progress[J], 1994(2): 55-60.
- [67] ZHANG Y Q, ZHAN M, FAN X G, *et al.* Journal of Manufacturing Processes[J], 2023, 105: 70-83.
- [68] 徐文臣, 单德彬, 陈宇, 等. 锻压技术[J], 2008(3): 56-59.
XU W C, SHAN D B, CHEN Y, *et al.* Forging & Stamping Technology[J], 2008(3): 56-59.
- [69] 赵小凯. TA15 钛合金薄壁构件热强旋成形及性能强化机理研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
ZHAO X K. Deformation and Strengthening Mechanism Thin-Walled Workpiece of TA15 Titanium Alloy During Hot Power Spinning[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [70] GAO P F, YU C, FU M W, *et al.* Chinese Journal of Aeronautics [J], 2022, 35(2): 12.
- [71] 郭靖. TA15 钛合金薄壁筒形构件轧-旋成形极限研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2018.
GUO J. Study on Forming Limit of Rolling-Spinning Forming of TA15 Alloy Thin-Walled Tube Components[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2018.
- [72] ZHAN M, ZHANG T, YANG H, *et al.* The International Journal of Advanced Manufacturing Technology [J], 2016, 87(5-8): 1345-1357.
- [73] 张富平, 成小丽, 周川. 科技创新与应用[J], 2014(25): 41.
ZHANG F P, CHENG X L, ZHOU C. Technological Innovation and Application[J], 2014(25): 41.
- [74] 汪发春, 于志德, 李兴凯, 等. 模具制造[J], 2017, 17(12): 63-66.
WANG F C, YU Z D, LI X K, *et al.* Die & Mould Manufacture [J], 2017, 17(12): 63-66.
- [75] 胡宗式. 钛工业进展[J], 1999(1): 20-22.
HU Z S. Titanium Industry Progress[J], 1999(1): 20-22.
- [76] YANG Z Z, XU W C, WU H, *et al.* International Journal of Machine Tools and Manufacture[J], 2020, 152: 103530.
- [77] 朱恩锐, 崔霞, 郭陆陆, 等. 锻压技术[J], 2023, 48(2): 126-134.
ZHU E R, CUI X, GUO L L, *et al.* Forging & Stamping Technology [J], 2023, 48(2): 126-134.
- [78] 写旭, 张立武, 杨延涛, 等. 宇航材料工艺[J], 2016, 46(6): 50-53.
XIE X, ZHANG L W, YANG Y T, *et al.* Aerospace Materials & Technology[J], 2016, 46(6): 50-53.
- [79] 杨延涛, 任长洁, 曹学文, 等. 宇航材料工艺[J], 2014, 44(3): 88-90.
YANG Y T, REN C J, CAO X W, *et al.* Aerospace Materials & Technology[J], 2014, 44(3): 88-90.
- [80] XU W C, WU H, MA H, *et al.* International Journal of Mechanical Sciences[J], 2018, 135: 226-239.
- [81] 谢仁冲, 冯永琦, 李渭清, 等. 稀有金属快报[J], 2007(3): 40-42.
XIE R P, FENG Y Q, LI W Q, *et al.* Rare Metals Letters [J], 2007(3): 40-42.
- [82] YANG Y Z, XU C, FAN L X. Advances in Manufacturing [J], 2024, 12(2): 396-408.
- [83] ZHANG Q, JIN K Q, MU D, *et al.* The International Journal of Advanced Manufacturing Technology [J], 2015, 80(9-12): 2015-2026.
- [84] 熊庆华, 王梦寒, 周杰. 锻压装备与制造技术[J], 2005(3): 50-52.
XIONG Q H, WANG M H, ZHOU J. China Metal Forming Equipment & Manufacturing Technology[J], 2005(3): 50-52.
- [85] 陈胜川, 李建锋, 朱宝辉, 等. 热加工工艺[J], 2024, 53(13): 134-137.
CHEN S C, LI J F, ZHU B H, *et al.* Hot Working Technology[J], 2024, 53(13): 134-137.
- [86] YUAN L H, WANG W R, YANG M Y, *et al.* JOM[J], 2021, 73(6): 1786-1794.
- [87] KUN ČICKÁ L K. Materials[J], 2024, 17(2): 466.
- [88] 葛鹏, 席锦会, 王瑞琴, 等. 一种超大规格钛合金管材的制备方法: CN202111231462.0[P]. 2024-06-25.
GE P, XI J H, WANG R Q, *et al.* A Preparation Method for Ultra Large Specification Titanium Alloy Pipes: CN202111231462.0[P]. 2024-06-25.
- [89] 张晖, 袁利红, 张旺峰. 一种薄壁高强度钛合金管材及其制备方法: CN202010280353.7[P]. 2020-07-24.
ZHANG H, YUAN L H, ZHANG W F, *et al.* A Thin-Walled High-Strength Titanium Alloy Tube and Its Preparation Method: CN202010280353.7[P]. 2020-07-24.
- [90] 赵恒章, 吴金平, 赵彬, 等. 一种大口径薄壁 Ti35 钛合金无缝管材及其制备方法: CN202110146690.1[P]. 2021-03-09.
ZHAO H Z, WU J P, ZHAO B, *et al.* A Large-Diameter Thin-Walled Ti35 Titanium Alloy Seamless Pipe and Its Preparation Method: CN202110146690.1[P]. 2021-03-09.
- [91] 宋德军, 陶欢, 李冲, 等. 一种高冲击韧性钛合金及利用钛合金制备无缝管材的方法: CN201910824117.4[P]. 2019-12-20.
SONG D J, TAO H, LI C, *et al.* A High Impact Toughness Titanium Alloy and a Method for Preparing Seamless Pipes Using Titanium Alloy: CN201910824117.4[P]. 2019-12-20.
- [92] 葛鹏, 席锦会, 侯鹏, 等. 一种难变形金属管材的制备方法: CN202111641372.9[P]. 2022-04-05.
GE P, XI J H, HOU P, *et al.* A Preparation Method for Difficult to Deform Metal Pipes: CN202111641372.9[P]. 2022-04-05.
- [93] 董月成, 王楚, 何苗霞, 等. 用于海洋及石油勘探的钛合金管材的制备方法: CN202410261634.6[P]. 2024-05-17.
DONG Y C, WANG C, HE M X, *et al.* Preparation Method of Titanium Alloy Pipes for Marine and Petroleum Exploration: CN202410261634.6[P]. 2024-05-17.
- [94] 魏芬绒, 罗斌莉, 杨晓康, 等. 一种超大口径钛合金薄壁无缝管材的制备方法: CN202111228659.9[P]. 2022-01-28.
WEI F R, LUO B L, YANG X K, *et al.* Preparation Method of Ul-

- tra Large Diameter Titanium Alloy Thin-Walled Seamless Pipe; CN202111228659.9[P]. 2022-01-28.
- [95] 辛社伟, 屈磊, 杜宇, 等. 一种高强 TC18 钛合金无缝管材高效低成本加工方法; CN114101372B[P]. 2022-07-22.
- XIN S W, QU L, DU Y, *et al.* A High-Strength TC18 Titanium Alloy Seamless Pipe High Efficiency and Low-Cost Processing Method; CN114101372B[P]. 2022-07-22.
- [96] 李倩, 杜宇, 郭荻子, 等. 一种 Ti-1300 钛合金薄壁管材的制备方法; CN202211085308.1[P]. 2022-12-02.
- LI Q, DU Y, GUO D Z, *et al.* Preparation Method of Ti-1300 Titanium Alloy Thin-Walled Tube; CN202211085308.1 [P]. 2022 - 12-02.
- [97] 王长江, 陈小龙, 姬会爽, 等. 用于钛及钛合金管材的短流程制备方法; CN202011570752.3[P]. 2021-05-11.
- WANG C J, CHEN X L, JI H S, *et al.* Short Process Preparation Method for Titanium and Titanium Alloy Pipes; CN202011570752.3 [P]. 2021-05-11.
- [98] 周静, 姬会爽, 陈小龙, 等. 一种大口径高性能钛合金管材的制备方法及其产品; CN202111037382.1[P]. 2021-11-26.
- ZHOU J, JI H S, CHEN X L, *et al.* A Preparation Method and Product of Large-Diameter High-Performance Titanium Alloy Pipes; CN202111037382.1[P]. 2021-11-26.
- [99] 王长江. 信息记录材料[J], 2023, 24(3): 46-49.
- WANG C J. Information Recording Materials[J], 2023, 24(3): 46-49.