



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 105063528 A

(43) 申请公布日 2015. 11. 18

(21) 申请号 201510540531. 4

(22) 申请日 2015. 08. 28

(71) 申请人 西北有色金属研究院

地址 710016 陕西省西安市未央路 96 号

(72) 发明人 刘汉源 于振涛 张亚峰 赵利渊

何卫敏 王昌 程军

(74) 专利代理机构 西安创知专利事务所 61213

代理人 谭文琰

(51) Int. Cl.

G22F 1/18(2006. 01)

G21D 9/08(2006. 01)

G21D 8/10(2006. 01)

权利要求书1页 说明书8页

(54) 发明名称

一种细径薄壁高强 β 钛合金管材的成型方法

(57) 摘要

本发明提供了一种细径薄壁高强 β 钛合金管材的成型方法,包括以下步骤:一、对 β 钛合金管坯进行固溶处理;二、将固溶处理后的 β 钛合金管坯浸入浸蚀处理液中浸蚀,超声波清洗后干燥;三、进行拉拔前润滑;四、进行多模拉拔加工;五、对拉拔后的 β 钛合金管坯的外径和壁厚进行检测;六、依次进行除油、去氧化层和矫直处理;七、强化处理,得到外径为 1.0mm ~ 5.0mm,壁厚为 0.1mm ~ 0.3mm,抗拉强度为 800MPa ~ 1100MPa 的细径薄壁高强 β 钛合金管材。采用本发明成型的 β 钛合金管材的表面质量好,几何尺寸精度高,力学性能优良,属于高强 β 钛合金范畴。

1. 一种细径薄壁高强 β 钛合金管材的成型方法,其特征在于,该方法包括以下步骤:

步骤一、固溶处理:将 β 钛合金管坯置于管式退火炉中,在温度为 $(T_{\beta}+20)^{\circ}\text{C} \sim (T_{\beta}+100)^{\circ}\text{C}$ 的条件下保温 10min \sim 60min,空冷或水冷后得到固溶处理后的 β 钛合金管坯;所述 T_{β} 为 β 钛合金管坯的 β 相转变温度, T_{β} 的单位为 $^{\circ}\text{C}$;

步骤二、表面处理:将步骤一中所述固溶处理后的 β 钛合金管坯浸入浸蚀处理液中,在温度为 $50^{\circ}\text{C} \sim 60^{\circ}\text{C}$ 的条件下浸蚀 5min \sim 15min,然后对浸蚀后的 β 钛合金管坯进行超声波清洗,干燥后得到表面处理后的 β 钛合金管坯;所述浸蚀处理液为十二水磷酸钠、氟化钠、冰醋酸和去离子水混合均匀而成的混合溶液;

步骤三、拉拔前润滑:将润滑剂均匀涂覆于步骤二中所述表面处理后的 β 钛合金管坯表面,然后将涂覆有润滑剂的 β 钛合金管坯置于温度为 $150^{\circ}\text{C} \sim 200^{\circ}\text{C}$ 的烘箱中烘干;

步骤四、拉拔加工:采用精密拉床对步骤三中烘干后的 β 钛合金管坯进行多模拉拔,得到拉拔后的 β 钛合金管坯;所述多模拉拔的模次数为 2 \sim 3 模次,每模次拉拔的速率均为 $0.2\text{m}/\text{min} \sim 0.5\text{m}/\text{min}$,每模次拉拔的加工率均为 4% \sim 16%;

步骤五、检测:对步骤四中所述拉拔后的 β 钛合金管坯的外径和壁厚进行检测,若拉拔后的 β 钛合金管坯的外径和壁厚均满足设计要求,则进入步骤六,否则,返回步骤一;

步骤六、精整处理:对步骤五中检测后的 β 钛合金管坯依次进行除油、去氧化层和矫直处理;

步骤七、强化处理:将步骤六中矫直处理后的 β 钛合金管坯置于管式退火炉中,在温度为 $400^{\circ}\text{C} \sim 650^{\circ}\text{C}$ 的条件下保温 1h \sim 12h,空冷或炉冷后得到外径为 1.0mm \sim 5.0mm,壁厚为 0.1mm \sim 0.3mm,抗拉强度为 800MPa \sim 1100MPa 的细径薄壁高强 β 钛合金管材;或者,将步骤六中矫直处理后的 β 钛合金管坯置于管式退火炉中,先在温度为 $(T_{\beta}+20)^{\circ}\text{C} \sim (T_{\beta}+100)^{\circ}\text{C}$ 的条件下保温 10min \sim 60min 后水冷或空冷,再在温度为 $400^{\circ}\text{C} \sim 650^{\circ}\text{C}$ 的条件下保温 1h \sim 12h 后空冷或炉冷,得到外径为 1.0mm \sim 5.0mm,壁厚为 0.1mm \sim 0.3mm,抗拉强度为 800MPa \sim 1100MPa 的细径薄壁高强 β 钛合金管材。

2. 根据权利要求 1 所述的一种细径薄壁高强 β 钛合金管材的成型方法,其特征在于,步骤一中所述 β 钛合金管坯的名义成分为 Ti-13Nb-13Zr 或 Ti-25Nb-3Zr-3Mo-2Sn。

3. 根据权利要求 1 所述的一种细径薄壁高强 β 钛合金管材的成型方法,其特征在于,步骤一中所述固溶处理在真空条件或惰性气氛保护下进行。

4. 根据权利要求 1 所述的一种细径薄壁高强 β 钛合金管材的成型方法,其特征在于,步骤二中所述浸蚀处理液中十二水磷酸钠的浓度为 30g/L \sim 50g/L,氟化钠的浓度为 20g/L \sim 40g/L,冰醋酸的浓度为 50g/L \sim 70g/L。

5. 根据权利要求 1 所述的一种细径薄壁高强 β 钛合金管材的成型方法,其特征在于,步骤二中所述冰醋酸的质量百分比浓度为 36%。

6. 根据权利要求 1 所述的一种细径薄壁高强 β 钛合金管材的成型方法,其特征在于,步骤三中所述润滑剂由二硫化钼、石墨和去离子水混合均匀而成,所述润滑剂中二硫化钼的质量百分含量为 70% \sim 80%,石墨的质量百分含量为 10% \sim 15%,余量为去离子水。

7. 根据权利要求 1 所述的一种细径薄壁高强 β 钛合金管材的成型方法,其特征在于,步骤七中所述强化处理在真空条件或惰性气氛保护下进行。

一种细径薄壁高强 β 钛合金管材的成型方法

技术领域

[0001] 本发明属于钛合金材料加工技术领域,具体涉及一种细径薄壁高强 β 钛合金管材的成型方法。

背景技术

[0002] 钛合金具有高比强度、优良的耐腐蚀、无磁性、较好的生物相容性等特点,广泛应用于武器装备、航空航天、医疗器械等领域,其主要产品有棒、管、锻件、丝等。相比于钛合金棒、条、板等产品,无缝金属管材是一种工序长、加工工艺复杂的产品,尤其是制备高精度、高性能、低成本细径薄壁管材(毛细管)则技术难度更大。目前,国内在金属毛细管研制方面比较落后,只能生产一些低强度、高塑性的材料,如铝合金、Cu、纯 Ti 毛细管等,传统的拉拔方法包括带芯杆拉拔、游动芯头拉拔、复合芯头拉拔和无芯拉拔等,拉拔温度为室温,采用固体润滑。而钛合金室温强度较大,且表面固体润滑与钛合金表面结合不好,存在表面光洁度差、薄壁尺寸允许误差大等问题,拉拔高质量的毛细管困难,而拉拔工艺最关键的技术是润滑条件。国外已有报道采用高温(700℃)拉拔工艺生产金属毛细管,但这种工艺对于金属的表面润滑、表面光洁度、产品性能控制等提出了严格的要求,工艺实施难度很大,不宜推广。因此,要加工出合格的钛合金毛细管必须要解决拉拔工艺与毛细管尺寸精度和内外表面尺寸精度、质量控制等难题。

[0003] 现如今,钛合金高精度、高质量细径薄壁管材的制备技术已成为制约钛合金在高端材料加工技术领域急需解决的瓶颈。因此,迫切需要研发一种钛合金细径薄壁管材冷加工成型工艺,该工艺目前未见国内外相关报道。

发明内容

[0004] 本发明所要解决的技术问题在于针对上述现有技术的不足,提供一种细径薄壁高强 β 钛合金管材的成型方法。采用该方法成型的 β 钛合金管材具有表面质量好、几何尺寸精度高、力学性能优良等优异性能。

[0005] 为解决上述技术问题,本发明采用的技术方案是:一种细径薄壁高强 β 钛合金管材的成型方法,其特征在于,该方法包括以下步骤:

[0006] 步骤一、固溶处理:将 β 钛合金管坯置于管式退火炉中,在温度为 $(T_{\beta}+20)^{\circ}\text{C}\sim(T_{\beta}+100)^{\circ}\text{C}$ 的条件下保温 10min~60min,空冷或水冷后得到固溶处理后的 β 钛合金管坯;所述 T_{β} 为 β 钛合金管坯的 β 相转变温度, T_{β} 的单位为 $^{\circ}\text{C}$;

[0007] 步骤二、表面处理:将步骤一中所述固溶处理后的 β 钛合金管坯浸入浸蚀处理液中,在温度为 $50^{\circ}\text{C}\sim 60^{\circ}\text{C}$ 的条件下浸蚀 5min~15min,然后对浸蚀后的 β 钛合金管坯进行超声波清洗,干燥后得到表面处理后的 β 钛合金管坯;所述浸蚀处理液为十二水磷酸钠、氟化钠、冰醋酸和去离子水混合均匀而成的混合溶液;

[0008] 步骤三、拉拔前润滑:将润滑剂均匀涂覆于步骤二中所述表面处理后的 β 钛合金管坯表面,然后将涂覆有润滑剂的 β 钛合金管坯置于温度为 $150^{\circ}\text{C}\sim 200^{\circ}\text{C}$ 的烘箱中烘

干；

[0009] 步骤四、拉拔加工：采用精密拉床对步骤三中烘干后的 β 钛合金管坯进行多模拉拔，得到拉拔后的 β 钛合金管坯；所述多模拉拔的模次数为 2~3 模次，每模次拉拔的速率均为 0.2m/min~0.5m/min，每模次拉拔的加工率均为 4%~16%；

[0010] 步骤五、检测：对步骤四中所述拉拔后的 β 钛合金管坯的外径和壁厚进行检测，若拉拔后的 β 钛合金管坯的外径和壁厚均满足设计要求，则进入步骤六，否则，返回步骤一；

[0011] 步骤六、精整处理：对步骤五中检测后的 β 钛合金管坯依次进行除油、去氧化层和矫直处理；

[0012] 步骤七、强化处理：将步骤六中矫直处理后的 β 钛合金管坯置于管式退火炉中，在温度为 400℃~650℃的条件下保温 1h~12h 后空冷或炉冷，得到外径为 1.0mm~5.0mm，壁厚为 0.1mm~0.3mm，抗拉强度为 800MPa~1100MPa 的细径薄壁高强 β 钛合金管材；或者，将步骤六中矫直处理后的 β 钛合金管坯置于管式退火炉中，先在温度为 $(T_{\beta}+20)$ ℃~ $(T_{\beta}+100)$ ℃的条件下保温 10min~60min 后水冷或空冷，再在温度为 400℃~650℃的条件下保温 1h~12h 后空冷或炉冷，得到外径为 1.0mm~5.0mm，壁厚为 0.1mm~0.3mm，抗拉强度为 800MPa~1100MPa 的细径薄壁高强 β 钛合金管材。

[0013] 上述的一种细径薄壁高强 β 钛合金管材的成型方法，其特征在于，步骤一中所述 β 钛合金管坯的名义成分为 Ti-13Nb-13Zr 或 Ti-25Nb-3Zr-3Mo-2Sn。

[0014] 上述的一种细径薄壁高强 β 钛合金管材的成型方法，其特征在于，步骤一中所述固溶处理在真空条件或惰性气氛保护下进行。

[0015] 上述的一种细径薄壁高强 β 钛合金管材的成型方法，其特征在于，步骤二中所述浸蚀处理液中十二水磷酸钠的浓度为 30g/L~50g/L，氟化钠的浓度为 20g/L~40g/L，冰醋酸的浓度为 50g/L~70g/L。

[0016] 上述的一种细径薄壁高强 β 钛合金管材的成型方法，其特征在于，步骤二中所述冰醋酸的质量百分比浓度为 36%。

[0017] 上述的一种细径薄壁高强 β 钛合金管材的成型方法，其特征在于，步骤三中所述润滑剂由二硫化钼、石墨和去离子水混合均匀而成，所述润滑剂中二硫化钼的质量百分含量为 70%~80%，石墨的质量百分含量为 10%~15%，余量为去离子水。

[0018] 上述的一种细径薄壁高强 β 钛合金管材的成型方法，其特征在于，步骤七中所述强化处理在真空条件或惰性气氛保护下进行。

[0019] 本发明与现有技术相比具有以下优点：

[0020] 1、本发明采用冷拉拔加工的方法成型 β 钛合金管材，首先，对 β 钛合金管坯进行固溶处理，充分利用 β 型钛合金从 β 相区经固溶处理后具有室温强度低、冷成型和冷加工能力强、均匀延伸率高的特点，然后经过适宜的表面浸蚀和润滑处理，采用精密拉床进行多模拉拔，通过合理控制模次数、拉拔速率、加工率等条件，使得在室温条件下对管材的多模拉拔，最终制成表面质量好，几何尺寸精度高、力学性能优良的高强度 β 型钛合金细径薄壁管材。

[0021] 2、本发明充分利用 β 型钛合金固溶后形成 β 基体在室温有较好的塑性这一特点，经表面处理并均匀涂抹润滑剂后，形成一层与基体结合强致密的保护层，在室温下，采

用精密拉床,采用多模拉拔工艺进行冷拉拔加工。通过选择和控制浸蚀、润滑、拉拔等工艺过程及工艺参数,使得 β 型钛合金能够充分利用其加工塑性并有效控制材料的表面质量,使钛合金细径薄壁管材在室温能够顺利成型,通过后续矫直、强化等处理,进而获得表面质量好、壁厚均匀度高、综合力学性能优良的钛合金细径薄壁管材。

[0022] 3、对本发明成型的细径薄壁 β 钛合金管材进行力学性能检测,测得管材的抗拉强度(R_m)为800MPa~1100MPa,延伸率(A)为8%~20%,由此可知本发明成型的细径薄壁 β 钛合金管材的力学性能优良,属于高强 β 钛合金管材范畴。

[0023] 4、本发明工艺简单,成本低,加工效果好。

[0024] 下面结合实施例对本发明作进一步详细说明。

具体实施方式

[0025] 实施例1

[0026] 本实施例所要成型的 β 钛合金管材为名义成分为Ti-13Nb-13Zr,外径为4.0mm,壁厚为0.25mm的细径薄壁高强 β 钛合金管材;本实施例细径薄壁高强 β 钛合金管材的成型方法包括以下步骤:

[0027] 步骤一、固溶处理:将外径为5.0mm,壁厚为0.25mm的 β 钛合金管坯置于管式退火炉中,在温度为($T_\beta+60$) $^\circ\text{C}$ 的条件下保温30min,出炉水冷后得到固溶处理后的 β 钛合金管坯;所述 T_β 为 β 钛合金管坯的 β 相转变温度, T_β 的单位为 $^\circ\text{C}$;所述固溶处理优选在惰性气氛保护或真空条件下进行,以防止 β 钛合金管坯发生氧化;

[0028] 步骤二、表面处理:将步骤一中所述固溶处理后的 β 钛合金管坯浸入浸蚀处理液中,在温度为55 $^\circ\text{C}$ 的条件下浸蚀10min,然后对浸蚀后的 β 钛合金管坯进行超声波清洗,干燥后得到表面处理后的 β 钛合金管坯;所述浸蚀处理液为十二水磷酸钠、氟化钠、质量百分比浓度为36%的冰醋酸和去离子水混合均匀而成的混合溶液,所述浸蚀处理液中十二水磷酸钠的浓度为40g/L,氟化钠的浓度为30g/L,冰醋酸的浓度为60g/L;

[0029] 步骤三、拉拔前润滑:将润滑剂均匀涂覆于步骤二中所述表面处理后的 β 钛合金管坯表面,然后将涂覆有润滑剂的 β 钛合金管坯置于温度为180 $^\circ\text{C}$ 的烘箱中烘干;所述润滑剂由二硫化钼、石墨和去离子水混合均匀而成,所述润滑剂中二硫化钼的质量百分含量为75%,石墨的质量百分含量为12%,余量为去离子水;

[0030] 步骤四、拉拔加工:采用精密拉床对步骤三中烘干后的 β 钛合金管坯进行多模拉拔(即拉拔时连续通过两个或两个以上拉拔模进行两次或两次以上变形的拉拔方式),具体过程为:多模拉拔的模次数为2模次,每模次拉拔的速率均为0.5m/min,各模次拉拔的加工率分别为6%和5%,最终得到拉拔后的 β 钛合金管坯,其外径4.5mm,壁厚为0.25mm;

[0031] 实际拉拔加工过程中,可对 β 钛合金管坯进行带芯拉拔(即在 β 钛合金管坯内插装一根芯棒然后进行拉拔),也可直接进行空芯拉拔(即在 β 钛合金管坯内不插装芯棒直接拉拔);本实施例优选带芯拉拔工艺;

[0032] 步骤五、对步骤四中拉拔后的 β 钛合金管坯的外径和壁厚进行检测,经检测,拉拔后的 β 钛合金管坯的外径和壁厚均不满足设计要求,则返回步骤一,对拉拔后的 β 钛合金管坯再次进行步骤一中所述的固溶处理、步骤二中所述的表面处理、步骤三中所述的拉拔前润滑和步骤四中所述的拉拔加工(重复步骤一至四时各工艺参数均与前相同,其中不

同之处仅为：步骤四中各模次拉拔的加工率分别为 7% 和 5%），然后再次对管坯外径和壁厚进行检测，经检测，经返回处理后的 β 钛合金管坯的外径和壁厚均满足设计要求（外径 4.0mm，壁厚 0.25mm），则进入步骤六；

[0033] 步骤六、精整处理：对步骤五中检测后的 β 钛合金管坯依次进行除油、去氧化层和矫直处理；

[0034] 步骤七、强化处理：将步骤六中矫直处理后的 β 钛合金管坯置于管式退火炉中，在温度为 500℃ 的条件下保温 6h，出炉空冷后得到外径为 4.0mm，壁厚为 0.25mm 的细径薄壁 β 钛合金管材；所述强化处理优选在惰性气氛保护或真空条件下进行，以防止 β 钛合金管坯发生氧化。

[0035] 对本实施例成型的细径薄壁 β 钛合金管材进行力学性能检测，测得该管材的抗拉强度 (Rm) 为 910MPa，延伸率 (A) 为 10%，由此可知本实施例成型的细径薄壁 β 钛合金管材的力学性能优良，属于高强 β 钛合金管材范畴。

[0036] 实施例 2

[0037] 本实施例所要成型的 β 钛合金管材为名义成分为 Ti-13Nb-13Zr，外径为 2mm，壁厚为 0.15mm 的细径薄壁高强 β 钛合金管材；本实施例细径薄壁高强 β 钛合金管材的成型方法包括以下步骤：

[0038] 步骤一、固溶处理：将外径为 2.5mm，内径为 0.15mm 的 β 钛合金管坯置于管式退火炉中，在温度为 $(T_{\beta}+50)$ ℃ 的条件下保温 20min，出炉空冷后得到固溶处理后的 β 钛合金管坯；所述 T_{β} 为 β 钛合金管坯的 β 相转变温度， T_{β} 的单位为℃；所述固溶处理优选在惰性气氛保护或真空条件下进行，以防止 β 钛合金管坯发生氧化；

[0039] 步骤二、表面处理：将步骤一中所述固溶处理后的 β 钛合金管坯浸入浸蚀处理液中，在温度为 50℃ 的条件下浸蚀 8min，然后对浸蚀后的 β 钛合金管坯进行超声波清洗，干燥后得到表面处理后的 β 钛合金管坯；所述浸蚀处理液为十二水磷酸钠、氟化钠、质量百分比浓度为 36% 的冰醋酸和去离子水混合均匀而成的混合溶液，所述浸蚀处理液中十二水磷酸钠的浓度为 36g/L，氟化钠的浓度为 24g/L，冰醋酸的浓度为 55g/L；

[0040] 步骤三、拉拔前润滑：将润滑剂均匀涂覆于步骤二中所述表面处理后的 β 钛合金管坯表面，然后将涂覆有润滑剂的 β 钛合金管坯置于温度为 180℃ 的烘箱中烘干；所述润滑剂由二硫化钼、石墨和去离子水混合均匀而成，所述润滑剂中二硫化钼的质量百分含量为 70%，石墨的质量百分含量为 15%，余量为去离子水；

[0041] 步骤四、拉拔加工：采用精密拉床对步骤三中烘干后的 β 钛合金管坯进行多模拉拔（即拉拔时连续通过两个或两个以上拉拔模进行两次或两次以上变形的拉拔方式），具体过程为：多模拉拔的模次数为 3 模次，每模次拉拔的速率均为 0.3m/min，各模次拉拔的加工率分别为 4%、4.5% 和 5%，最终得到拉拔后的 β 钛合金管坯，其外径 2.2mm，壁厚为 0.15mm；

[0042] 由于管材外径较小，本实施例采用的是空芯拉拔工艺；

[0043] 步骤五、对步骤四中拉拔后的 β 钛合金管坯的外径和壁厚进行检测，经检测，拉拔后的 β 钛合金管坯的外径和壁厚均不满足设计要求，则返回步骤一，对拉拔后的 β 钛合金管坯再次进行步骤一中所述的固溶处理、步骤二中所述的表面处理、步骤三中所述的拉拔前润滑和步骤四中所述的拉拔加工（重复步骤一至四时各工艺参数均与前相同，其中不

同之处仅为：步骤四中拉拔的模次数为 2 模次，各模次拉拔的加工率分别为 5% 和 5%），然后再对管坯外径和壁厚进行检测，经检测，经返回处理后的 β 钛合金管坯的外径和壁厚均满足设计要求（外径为 2.0mm，壁厚为 0.15mm），则进入步骤六；

[0044] 步骤六、精整处理：对步骤五中检测后的 β 钛合金管坯依次进行除油、去氧化层和矫直处理；

[0045] 步骤七、强化处理：将步骤六中矫直处理后的 β 钛合金管坯置于管式退火炉中，先在温度为 $(T_{\beta}+100)^{\circ}\text{C}$ 的条件下保温 60min 后出炉水冷，再在温度为 400°C 的条件下保温 12h 后出炉空冷，得到外径为 2.0mm，壁厚为 0.15mm 的细径薄壁 β 钛合金管材；所述强化处理优选在惰性气氛保护或真空条件下进行，以防止 β 钛合金管坯发生氧化。

[0046] 对本实施例成型的细径薄壁 β 钛合金管材进行力学性能检测，测得该管材的抗拉强度 (Rm) 为 870MPa，延伸率 (A) 为 12%，由此可知本实施例成型的细径薄壁 β 钛合金管材的力学性能优良，属于高强 β 钛合金管材范畴。

[0047] 实施例 3

[0048] 本实施例所要成型的 β 钛合金管材为名义成分为 Ti-25Nb-3Zr-3Mo-2Sn (TLM)，外径为 1.0mm，壁厚为 0.1mm 的细径薄壁高强 β 钛合金管材；本实施例细径薄壁高强 β 钛合金管材的成型方法包括以下步骤：

[0049] 步骤一、固溶处理：将外径为 1.5mm，壁厚为 0.1mm 的 β 钛合金管坯置于管式退火炉中，在惰性气氛保护，温度为 $(T_{\beta}+20)^{\circ}\text{C}$ 的条件下保温 60min，出炉水冷后得到固溶处理后的 β 钛合金管坯；所述 T_{β} 为 β 钛合金管坯的 β 相转变温度， T_{β} 的单位为 $^{\circ}\text{C}$ ；所述固溶处理优选在惰性气氛保护或真空条件下进行，以防止 β 钛合金管坯发生氧化；

[0050] 步骤二、表面处理：将步骤一中所述固溶处理后的 β 钛合金管坯浸入浸蚀处理液中，在温度为 50°C 的条件下浸蚀 15min，然后对浸蚀后的 β 钛合金管坯进行超声波清洗，干燥后得到表面处理后的 β 钛合金管坯；所述浸蚀处理液为十二水磷酸钠、氟化钠、质量百分比浓度为 36% 的冰醋酸和去离子水混合均匀而成的混合溶液，所述浸蚀处理液中十二水磷酸钠的浓度为 30g/L，氟化钠的浓度为 20g/L，冰醋酸的浓度为 50g/L；

[0051] 步骤三、拉拔前润滑：将润滑剂均匀涂覆于步骤二中所述表面处理后的 β 钛合金管坯表面，然后将涂覆有润滑剂的 β 钛合金管坯置于温度为 150°C 的烘箱中烘干；所述润滑剂由二硫化钼、石墨和去离子水混合均匀而成，所述润滑剂中二硫化钼的质量百分含量为 80%，石墨的质量百分含量为 10%，余量为去离子水；

[0052] 步骤四、拉拔加工：采用精密拉床对步骤三中烘干后的 β 钛合金管坯进行多模拉拔（即拉拔时连续通过两个或两个以上拉拔模进行两次或两次以上变形的拉拔方式），具体过程为：多模拉拔的模次数为 3 模次，每模次拉拔的速率均为 0.5m/min，各模次拉拔的加工率分别为 7%、8% 和 8%，最终得到拉拔后的 β 钛合金管坯，其外径为 1.2mm，壁厚为 0.1mm；

[0053] 由于外径较小，采用带芯拉拔较为困难，本实施例采用空芯拉拔

[0054] 步骤五、对步骤四中拉拔后的 β 钛合金管坯的外径和壁厚进行检测，经检测，拉拔后的 β 钛合金管坯的外径和壁厚均不满足设计要求，则返回步骤一，对拉拔后的 β 钛合金管坯再次进行步骤一中所述的固溶处理、步骤二中所述的表面处理、步骤三中所述的拉拔前润滑和步骤四中所述的拉拔加工（重复步骤一至四时各工艺参数均与前相同，其中不

同之处仅为：步骤四中拉拔的模次数为 2 模次，各模次拉拔的加工率分别为 9% 和 10%），然后再次对管坯外径和壁厚进行检测，经检测，经返回处理后的 β 钛合金管坯的外径和壁厚均满足设计要求（外径为 1.0mm，壁厚为 0.1mm），则进入步骤六；

[0055] 步骤六、精整处理：对步骤五中检测后的 β 钛合金管坯依次进行除油、去氧化层和矫直处理；

[0056] 步骤七、强化处理：将步骤六中矫直处理后的 β 钛合金管坯置于管式退火炉中，先在温度为 $(T_{\beta}+20)^{\circ}\text{C}$ 的条件下保温 10min 后出炉空冷，再在温度为 650°C 的条件下保温 1h 后出炉空冷，得到外径为 1.0mm，壁厚为 0.1mm 的细径薄壁 β 钛合金管材；所述强化处理优选在惰性气氛保护或真空条件下进行，以防止 β 钛合金管坯发生氧化；

[0057] 对本实施例成型的细径薄壁 β 钛合金管材进行力学性能检测，测得该管材的抗拉强度 (Rm) 为 922MPa，延伸率 (A) 为 17%，由此可知本实施例成型的细径薄壁 β 钛合金管材的力学性能优良，属于高强 β 钛合金管材范畴。

[0058] 实施例 4

[0059] 本实施例所要成型的 β 钛合金管材为名义成分为 Ti-25Nb-3Zr-3Mo-2Sn (TLM)，外径为 5.0mm，壁厚为 0.3mm 的细径薄壁高强 β 钛合金管材；本实施例细径薄壁高强 β 钛合金管材的成型方法包括以下步骤：

[0060] 步骤一、固溶处理：将外径为 6.0mm，壁厚为 0.3mm 的 β 钛合金管坯置于管式退火炉中，在温度为 $(T_{\beta}+20)^{\circ}\text{C}$ 的条件下保温 60min，出炉空冷后得到固溶处理后的 β 钛合金管坯；所述 T_{β} 为 β 钛合金管坯的 β 相转变温度， T_{β} 的单位为 $^{\circ}\text{C}$ ；所述固溶处理优选在惰性气氛保护或真空条件下进行，以防止 β 钛合金管坯发生氧化；

[0061] 步骤二、表面处理：将步骤一中所述固溶处理后的 β 钛合金管坯浸入浸蚀处理液中，在温度为 50°C 的条件下浸蚀 5min，然后对浸蚀后的 β 钛合金管坯进行超声波清洗，干燥后得到表面处理后的 β 钛合金管坯；所述浸蚀处理液为十二水磷酸钠、氟化钠、质量百分比浓度为 36% 的冰醋酸和去离子水混合均匀而成的混合溶液，所述浸蚀处理液中十二水磷酸钠的浓度为 30g/L，氟化钠的浓度为 40g/L，冰醋酸的浓度为 70g/L；

[0062] 步骤三、拉拔前润滑：将润滑剂均匀涂覆于步骤二中所述表面处理后的 β 钛合金管坯表面，然后将涂覆有润滑剂的 β 钛合金管坯置于温度为 200°C 的烘箱中烘干；所述润滑剂由二硫化钼、石墨和去离子水混合均匀而成，所述润滑剂中二硫化钼的质量百分含量为 80%，石墨的质量百分含量为 15%，余量为去离子水；

[0063] 步骤四、拉拔加工：采用精密拉床对步骤三中烘干后的 β 钛合金管坯进行多模拉拔（即拉拔时连续通过两个或两个以上拉拔模进行两次或两次以上变形的拉拔方式），具体过程为：多模拉拔的模次数为 2 模次，每模次拉拔的速率均为 0.2m/min，各模次拉拔的加工率分别为 5% 和 4%，最终得到拉拔后的 β 钛合金管坯，其外径 5.5mm，壁厚为 0.3mm；

[0064] 实际拉拔加工过程中，可对 β 钛合金管坯进行带芯拉拔（即在 β 钛合金管坯内插装一根芯棒然后进行拉拔），也可直接进行空芯拉拔（即在 β 钛合金管坯内不插装芯棒直接拉拔）；本实施例优选带芯拉拔工艺；

[0065] 步骤五、对步骤四中拉拔后的 β 钛合金管坯的外径和壁厚进行检测，经检测，拉拔后的 β 钛合金管坯的外径和壁厚均不满足设计要求，则返回步骤一，对拉拔后的 β 钛合金管坯再次进行步骤一中所述的固溶处理、步骤二中所述的表面处理、步骤三中所述的拉

拔前润滑和步骤四中所述的拉拔加工（重复步骤一至四时各工艺参数均与前相同，其中不同之处仅为：步骤四中拉拔的模次数为 2 模次，各模次拉拔的加工率分别为 6% 和 4%），然后再次对管坯外径和壁厚进行检测，经检测，经返回处理后的 β 钛合金管坯的外径和壁厚均满足设计要求（外径为 5.0mm，壁厚为 0.3mm），则进入步骤六；

[0066] 步骤六、精整处理：对步骤五中检测后的 β 钛合金管坯依次进行除油、去氧化层和矫直处理；

[0067] 步骤七、强化处理：将步骤六中矫直处理后的 β 钛合金管坯置于管式退火炉中，温度为 650℃ 的条件下保温 1h 后炉冷，得到外径为 5.0mm，壁厚为 0.3mm 的细径薄壁 β 钛合金管材；所述强化处理优选在惰性气氛保护或真空条件下进行，以防止 β 钛合金管坯发生氧化。

[0068] 对本实施例成型的细径薄壁 β 钛合金管材进行力学性能检测，测得该管材的抗拉强度 (R_m) 为 1096MPa，延伸率 (A) 为 8%，由此可知本实施例成型的细径薄壁 β 钛合金管材的力学性能优良，属于高强 β 钛合金管材范畴。

[0069] 实施例 5

[0070] 本实施例所要成型的 β 钛合金管材为名义成分为 Ti-25Nb-3Zr-3Mo-2Sn (TLM)，外径为 1.5mm，壁厚为 0.15mm 的细径薄壁高强 β 钛合金管材；本实施例细径薄壁高强 β 钛合金管材的成型方法包括以下步骤：

[0071] 步骤一、固溶处理：将外径为 2.0mm，壁厚为 0.15mm 的 β 钛合金管坯置于管式退火炉中，在温度为 ($T_\beta+100$)℃ 的条件下保温 10min，水冷后得到固溶处理后的 β 钛合金管坯；所述 T_β 为 β 钛合金管坯的 β 相转变温度， T_β 的单位为℃；所述固溶处理优选在惰性气氛保护或真空条件下进行，以防止 β 钛合金管坯发生氧化；

[0072] 步骤二、表面处理：将步骤一中所述固溶处理后的 β 钛合金管坯浸入浸蚀处理液中，在温度为 60℃ 的条件下浸蚀 5min，然后对浸蚀后的 β 钛合金管坯进行超声波清洗，干燥后得到表面处理后的 β 钛合金管坯；所述浸蚀处理液为十二水磷酸钠、氟化钠、质量百分比浓度为 36% 的冰醋酸和去离子水混合均匀而成的混合溶液，所述浸蚀处理液中十二水磷酸钠的浓度为 50g/L，氟化钠的浓度为 25g/L，冰醋酸的浓度为 65g/L；

[0073] 步骤三、拉拔前润滑：将润滑剂均匀涂覆于步骤二中所述表面处理后的 β 钛合金管坯表面，然后将涂覆有润滑剂的 β 钛合金管坯置于温度为 160℃ 的烘箱中烘干；所述润滑剂由二硫化钼、石墨和去离子水混合均匀而成，所述润滑剂中二硫化钼的质量百分含量为 78%，石墨的质量百分含量为 12.5%，余量为去离子水；

[0074] 步骤四、拉拔加工：采用精密拉床对步骤三中烘干后的 β 钛合金管坯进行多模拉拔（即拉拔时连续通过两个或两个以上拉拔模进行两次或两次以上变形的拉拔方式），具体过程为：多模拉拔的模次数为 2 模次，每模次拉拔的速率均为 0.5m/min，各模次拉拔的加工率分别为 16% 和 13%，最终得到拉拔后的 β 钛合金管坯，其外径 1.5mm，壁厚为 0.15mm；

[0075] 由于外径较小，本实施例优选空芯拉拔工艺；

[0076] 步骤五、对步骤四中拉拔后的 β 钛合金管坯的外径和壁厚进行检测，经检测，拉拔后的 β 钛合金管坯的外径和壁厚均满足设计要求，则进入步骤六；

[0077] 步骤六、精整处理：对步骤五中检测后的 β 钛合金管坯依次进行除油、去氧化层和矫直处理；

[0078] 步骤七、强化处理：将步骤六中矫直处理后的 β 钛合金管坯置于管式退火炉中，在惰性气氛保护，温度为 400℃ 的条件下保温 3h 后空冷，得到外径为 1.5mm，壁厚为 0.15mm 的细径薄壁 β 钛合金管材；所述强化处理优选在惰性气氛保护或真空条件下进行，以防止 β 钛合金管坯发生氧化。

[0079] 对本实施例成型的细径薄壁 β 钛合金管材进行力学性能检测，测得该管材的抗拉强度 (Rm) 为 804MPa，延伸率 (A) 为 20%，由此可知本实施例成型的细径薄壁 β 钛合金管材的力学性能优良，属于高强 β 钛合金管材范畴。

[0080] 需要说明的是，为防止 β 钛合金管坯发生氧化反应，本发明所述固溶处理和强化处理均优选在惰性气氛保护或真空条件下进行。具体操作过程中，可先将 β 钛合金管坯放入一可密封的容器中，再通入惰性气体或进行抽真空处理，然后密封所述容器，使密封于容器中的 β 钛合金管坯一直处于惰性气氛或真空环境，之后将密封于容器中的 β 钛合金管坯进行固溶处理或强化处理，处理完毕后拆封即可。也可凭借其它现有技术手段实现。

[0081] 以上所述，仅是本发明的较佳实施例，并非对本发明作任何限制。凡是根据发明技术实质对以上实施例所作的任何简单修改、变更以及等效变化，均仍属于本发明技术方案的保护范围内。