(19)中华人民共和国国家知识产权局

(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 110465575 A
(43)申请公布日 2019.11.19

(21)申请号 201910861120.3

(22)申请日 2019.09.10

(71)申请人 哈尔滨工业大学
地址 150001 黑龙江省哈尔滨市南岗区西大直街92号

(72)发明人 苑世剑 王克环 刘钢

(74)专利代理机构 北京隆源天恒知识产权代理事务所(普通合伙) 11473
代理人 涂杰

(51)Int.Cl.
B21D 26/033(2011.01)
B21D 37/16(2006.01)
C22F 1/18(2006.01)

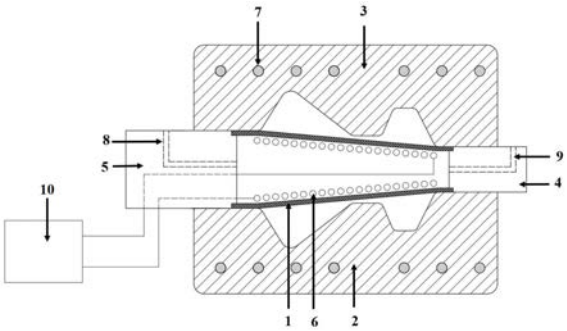
权利要求书2页 说明书8页 附图5页

(54)发明名称

一种钛合金薄壁件热处理与气压成形一体化方法

(57)摘要

本发明提供了一种钛合金薄壁件热处理与气压成形一体化方法，包括步骤：S1、将模具加热至成形后热处理温度T2，将筒坯放入模具中，通过密封冲头将模具闭合；S2、将筒坯加热到预先热处理温度T1并保持第一时长；S3、停止对筒坯的加热，并向密闭空腔内注入高压气体，使所述筒坯在高压气体的作用下发生快速胀形而贴合到模具的型腔，得到热态气压成形后管件；S4、将所述密闭空腔内的压力提高至应力松弛压力P3并保持第二时长；S5、停止对所述模具加热，打开排气口，并进行气冷，最后开模取件，得到钛合金薄壁件。本发明实现了钛合金薄壁件气压成形过程的形状精度与组织性能一体化调控，使构件同时获得高精度与高性能。



CN 110465575 A

1.一种钛合金薄壁件热处理与气压成形一体化方法，其特征在于，包括步骤：

S1、装模：将模具加热至成形后热处理温度T2，然后将筒坯(1)放入所述模具中，通过密封冲头将所述模具闭合，以使所述密封冲头和所述筒坯(1)之间形成密闭空腔；

S2、筒坯加热：将所述筒坯(1)加热到预先热处理温度T1并保持第一时长t1；

S3、进气补料成形：停止对所述筒坯(1)的加热，并向所述密闭空腔内注入高压气体，使所述筒坯(1)在高压气体的作用下发生快速胀形而贴合到所述模具的型腔，得到热态气压成形后管件；

S4、应力松弛及成形后热处理：将所述密闭空腔内的压力提高至应力松弛压力P3并保持第二时长t2；

S5、开模取件：停止对所述模具加热，打开排气口，并对所述热态气压成形后管件进行气冷，最后开模取件，得到钛合金薄壁件(11)。

2.根据权利要求1所述的钛合金薄壁件热处理与气压成形一体化方法，其特征在于，步骤S1中，所述将模具加热，包括步骤：

将嵌设在所述模具内的加热元件(7)通电，对所述模具进行加热。

3.根据权利要求1所述的钛合金薄壁件热处理与气压成形一体化方法，其特征在于，步骤S1中，所述将筒坯(1)放入所述模具中，通过密封冲头将所述模具闭合，包括步骤：

将所述筒坯(1)放入由上模(3)和下模(2)组成的所述模具的型腔内，合模并施加合模力，通过左冲头(5)和右冲头(4)对所述筒坯(1)的端部实行密封；

其中所述左冲头(5)上设置有感应加热线圈(6)，在装模完成后，所述感应加热线圈(6)位于筒坯(1)内部。

4.根据权利要求3所述的钛合金薄壁件热处理与气压成形一体化方法，其特征在于，步骤S3中，所述向密闭空腔内注入高压气体，使所述筒坯(1)在高压气体的作用下发生快速胀形而贴合到所述模具的型腔，包括步骤：

通过设置在所述左冲头(5)上的进气孔(8)，向所述密闭空腔内注入进气压力P1的压缩气体，同时所述左冲头(5)和所述右冲头(4)进行轴向补料，补料完成后，将所述密闭空腔内的压力提高至胀形压力P2，进行热态气压成形。

5.根据权利要求3所述的钛合金薄壁件热处理与气压成形一体化方法，其特征在于，所述对热态气压成形后管件进行气冷，包括步骤：

打开设置在所述右冲头(4)上的排气孔(9)，通过所述进气孔(8)向所述密闭空腔内注入气冷压力P4的压缩气体，以所述热态气压成形后管件的冷却速度为5-30℃/s进行气冷，当所述热态气压成形后管件的温度降至取件温度T3时，停止进气。

6.根据权利要求1-5中任一项所述的钛合金薄壁件热处理与气压成形一体化方法，其特征在于，步骤S4中，在所述应力松弛及成形后热处理过程下，所述热态气压成形后管件的温度与所述模具的温度相同或相近。

7.根据权利要求6所述的钛合金薄壁件热处理与气压成形一体化方法，其特征在于，所述预先热处理温度T1的范围为850-1000℃，所述成形后热处理温度T2的范围为400-700℃。

8.根据权利要求4所述的钛合金薄壁件热处理与气压成形一体化方法，其特征在于，所述进给压力P1的范围为0.5-3MPa，所述胀形压力P2的范围为3-12MPa，所述应力松弛压力P3的范围为12-35Mpa。

9.根据权利要求1所述的钛合金薄壁件热处理与气压成形一体化方法，其特征在于，所述第一时长t1的范围为5-30min，所述第二时长t2的范围为60-180min。

10.根据权利要求1-5中任一项所述的钛合金薄壁件热处理与气压成形一体化方法，其特征在于，所述筒坯(1)为钛合金管，所述钛合金管为近α相系和/或α+β双相系钛合金。

一种钛合金薄壁件热处理与气压成形一体化方法

技术领域

[0001] 本发明涉及薄壁构件塑性成形制造技术领域，特别涉及一种钛合金薄壁件热处理与气压成形一体化方法。

背景技术

[0002] 钛合金异形截面薄壁件是火箭、飞机中常用的一类轻质耐热构件，如排气道、发动机喷管等，为了满足气动性能、高温高压服役性能等苛刻要求，对此类构件的尺寸精度和组织性能提出了很高的要求。以TA15钛合金构件为例，为了满足室温和高温(服役温度约500℃)强韧性合理匹配，传统技术在成形后将构件放入热处理炉进行组织性能调控，由于热处理过程导致的应力应变极易造成薄壁构件形状畸变，难以实现型面轮廓精度的要求，对于大尺寸超薄构件，这一问题将更加突出。

[0003] 由于现有技术无法整体制造这样的钛合金异形截面薄壁构件，被迫采用分块成形-焊接-校形的传统技术，而这种分块成形-焊接-校形的工艺不能满足钛合金异形截面薄壁件的制造要求，主要问题是：1)焊接构件尺寸精度低，由于分块成形构件在焊接时易产生形状畸变，尺寸偏差可达到2mm以上(一般此类构件设计精度要求均小于0.5mm)；2)构件力学性能差，由于产品分块成形和校形热暴露时间长(20-30小时)，且为避免破坏尺寸精度不能进行后续热处理，现有工艺构件综合性能一般均低于母材，不能发挥出材料最佳的效能。

[0004] 可以看出，采用传统工艺成形时，精度控制和组织性能调控是一对矛盾体，在同一个构件上不能高效率的同时保证精度和性能，因此急需开发新的成形技术来解决上述难题。

发明内容

[0005] 本发明旨在一定程度上解决现有技术中钛合金异形截面薄壁件制造工艺存在的尺寸精度低、组织性能差等问题。

[0006] 为解决上述问题，本发明提供了一种钛合金薄壁件热处理与气压成形一体化方法，包括步骤：

[0007] S1、装模：将模具加热至成形后热处理温度T2，然后将筒坯放入模具中，通过密封冲头将模具闭合，以使密封冲头和所述筒坯之间形成密闭空腔；

[0008] S2、筒坯加热：将筒坯加热到预先热处理温度T1并保持第一时长t1；

[0009] S3、进气补料成形：停止对筒坯的加热，并向密闭空腔内注入高压气体，使所述筒坯在高压气体的作用下发生快速胀形而贴合到所述模具的型腔，得到热态气压成形后管件；

[0010] S4、应力松弛及成形后热处理：将所述密闭空腔内的压力提高至应力松弛压力P3并保持第二时长t2；

[0011] S5、开模取件：停止对所述模具加热，打开排气口，并对所述热态气压成形后管件进行气冷，最后开模取件，得到钛合金薄壁件。

[0012] 可选的，步骤S1中，所述将模具加热，包括步骤：将嵌设在所述模具内的加热元件通电，对所述模具进行加热。

[0013] 可选的，步骤S1中，所述将筒坯放入模具中，通过密封冲头将模具闭合，包括步骤：

[0014] 将筒坯放入由上模和下模组成的所述模具的型腔内，合模并施加合模力，通过左冲头和右冲头对筒坯的端部实行密封；

[0015] 其中所述左冲头上设置有感应加热线圈，在装模完成后，所述感应加热线圈位于筒坯内部。

[0016] 可选的，步骤S3中，所述向密闭空腔内注入高压气体，使所述筒坯在高压气体的作用下发生快速胀形而贴合到所述模具的型腔，包括步骤：

[0017] 通过设置在左冲头上的进气孔，向密闭空腔内注入进气压力P1的压缩气体，同时左冲头和右冲头进行轴向补料，补料完成后，将密闭空腔内的压力提高至胀形压力P2，进行热态气压成形。

[0018] 可选的，所述对热态气压成形后管件进行气冷，包括步骤：

[0019] 打开设置在右冲头上的排气孔，通过所述进气孔向所述密闭空腔内注入气冷压力P4的压缩气体，以热态气压成形后管件的冷却速度为5-30℃/s进行气冷，当热态气压成形后管件的温度降至取件温度T3时，停止进气。

[0020] 可选的，其特征在于，步骤S4中，在所述应力松弛及成形后热处理过程下，所述热态气压成形后管件的温度与所述模具温度相同或相近。

[0021] 可选的，所述预先热处理温度T1的范围为850-1000℃，所述成形后热处理温度T2的范围为400-700℃。

[0022] 可选的，所述进给压力P1的范围为0.5-3MPa，所述胀形压力P2的范围为3-12MPa，所述应力松弛压力P3的范围为12-35Mpa。

[0023] 可选的，所述第一时长t1的范围为5-30min，第二时长t2的范围为60-180min。

[0024] 可选的，所述筒坯为钛合金管，所述钛合金管为近α相系和/或α+β双相系钛合金。

[0025] 相对于现有技术，本发明提供的钛合金薄壁件热处理与气压成形一体化方法具有以下优势：

[0026] (1)本发明将钛合金薄壁件的成形精度控制与组织性能调控相结合，在成形模具内完成热处理与气压成形两个加工过程的工艺方法，由于筒坯进行了预先热处理，因此在应力松弛温度下进行应力松弛时，可以同时完成钛合金薄壁件的成形后热处理，将控形与控性合二为一，从而获得高精度、高性能钛合金异形截面薄壁件。

[0027] (2)本发明通过分别对模具和筒坯进行加热，有效提高工艺过程中的加热效率、降低能源消耗，从而节约成本；还可以根据筒坯材料热处理调控需求，相对自由的设计筒坯和模具温度，提高了工艺操作的灵活性。

[0028] (3)本发明一体化方法制备的TA15钛合金薄壁件，在室温使用条件下，其抗拉强度比成形前提高了11.5%；在500℃使用条件下，其抗拉强度比成形前提高7.7%。

附图说明

[0029] 图1为钛合金薄壁件热处理与气压成形一体化装置在成形前的结构示意图；

[0030] 图2为钛合金薄壁件热处理与气压成形一体化装置在成形后的结构示意图；

[0031] 图3为钛合金薄壁件热处理与气压成形一体化方法工艺步骤图；

[0032] 图4为TA15钛合金筒坯成形前的微观组织图；

[0033] 图5为TA15钛合金筒坯成形后的微观组织图；

[0034] 图6为TA15钛合金筒坯成形前后在室温下的应力应变曲线图；

[0035] 图7为TA15钛合金筒坯成形前后在500℃下的应力应变曲线图；

[0036] 图8为TA15钛合金筒坯成形后热处理应力松弛曲线图；

[0037] 图9为钛合金异形截面薄壁件结构示意图之一；

[0038] 图10为钛合金异形截面薄壁件结构示意图之二。

[0039] 附图标记说明：

[0040] 1-筒坯，2-下模，3-上模，4-右冲头，5-左冲头，6-感应加热线圈，7-加热元件，8-进气孔，9-排气孔，10-感应发热器，11-钛合金薄壁件。

具体实施方式

[0041] 需要说明的是，在不冲突的情况下，本发明中的实施例及实施例中的特征可以相互组合。

[0042] 另外，对该具体实施方式中涉及到方位作简要说明：下述在提到每个结构件的“顶端”、“底端”这些位置关系仅是为了便于描述和简化描述，而不是指示或暗示所指的装置必须具有特定的方位、以特定的方位构造和操作，因此不能理解为对本发明的限制。

[0043] 结合图9-10所示，现有的钛合金异形截面薄壁件，具有空间曲面形状复杂、截面形状尺寸变化剧烈等几何特征，此类构件制造难度在于：1)形状复杂，对材料成形性能要求高，由于钛合金热成形组织性能演变复杂，工艺参数不合理极易导致局部减薄、破裂等缺陷；2)构件组织性能调控难度大，现有成形工艺主要从保证成形精度角度出发，若调控组织性能，需进行成形后热处理，然而热处理过程易导致形状畸变，难以满足高精度要求。

[0044] 且钛合金异形截面薄壁构件若采用分块成形-焊接-校形的成形技术，其制备过程通常为：将构件分解成6-8个形状相对简单的曲面板件，对每块板件分别采用一对刚性模具成形，将板坯放入加热到一定温度的上、下二个模具之间，通过模具闭合施加压力使板坯变形，并保压20-30min基本定形；然后将板件逐一切边后组装焊接，获得异形截面薄壁件；再将异形截面薄壁件套在镶块式校形芯模上，在真空环境完成热校形。而这种成形方法制备的构件不仅尺寸精度低，且力学性能差。

[0045] 为解决上述问题，本发明提供了一种钛合金薄壁件热处理与气压成形一体化方法，通过将钛合金薄壁件的成形精度控制与组织性能调控相结合，在成形模具内完成热处理与气压成形两个加工过程，从而获得高精度、高性能钛合金薄壁件，且在成形过程中，创造性的将模具与筒坯分别加热，使筒坯在固溶温度下进行成形，进一步保证构件成形后的性能，提高了工艺灵活性。

[0046] 为使本发明的上述目的、特征和优点能够更为明显易懂，下面结合附图对本发明的具体实施例做详细的说明。

[0047] 结合图1-3所示，一种钛合金薄壁件热处理与气压成形一体化方法，包括步骤：

[0048] S1、装模：将模具加热至成形后热处理温度T2，然后将筒坯1放入模具中，通过密封冲头将模具闭合，以使密封冲头和筒坯1之间形成密闭空腔；

[0049] S2、筒坯加热：将筒坯1加热到预先热处理温度T1并保持第一时长t1；

[0050] S3、进气补料成形：停止对筒坯1的加热，并向密闭空腔内注入高压气体，使筒坯1在高压气体的作用下发生快速胀形而贴合到模具的型腔，得到热态气压成形后管件；

[0051] S4、应力松弛及成形后热处理：将密闭空腔内的压力提高至应力松弛压力P3并保持第二时长t2；

[0052] S5、开模取件：停止对模具加热，打开排气口，对热态气压成形后管件进行气冷，最后开模取件，得到钛合金薄壁件11。

[0053] 其中，预先热处理温度T1也即为筒坯1的成形温度，成形后热处理温度T2也即为应力松弛温度，可以理解的是，预先热处理温度T1大于成形后热处理温度T2。

[0054] 相比于现有技术中，成形过程中同时对模具和筒坯1进行加热，当成形构件的尺寸较大时，需要设置超大加热炉，对设备要求很高，本发明提供的一体化方法，分别对模具和筒坯1进行加热，降低了设备要求。为便于描述，在本发明中，将传统的同时加热的方法称为等温成形，将本发明提供的分别加热的方法称为非等温成形。可以理解的是，一方面，非等温成形方法可以实现成形过程中模具温度比筒坯1初始温度低，而由于模具在结构上比筒坯1的尺寸大，也即模具达到成形温度的时间要远大于筒坯1达到成形温度的时间，因此，当只需要筒坯1达到成形温度即可实现工艺操作时，可以有效提高工艺过程中的加热效率、降低能源消耗，从而节约成本；另一方面，非等温成形方法由于只需将坯料加热到成形温度，模具可以处于较低温度，因此对工艺设备要求也会相应的降低。

[0055] 具体的，钛合金薄壁件热处理与气压成形一体化方法采用的装置包括模具、密封冲头和加热器，其中，模具包括上模3和下模2，上模3与下模2合模形成容纳筒坯1的型腔；密封冲头包括设置在模具的两端的左冲头5和右冲头4，用于密封所述型腔；且左冲头5上设置有进气孔8，右冲头4上设置有排气孔9，进气孔8和排气孔9配合用于提高或降低型腔内的压力，且进气孔8和排气孔9在外界开口处均设置有开关。加热器包括嵌设在模具内的加热元件7，加热元件7的数量为多个，多个加热元件7均匀分布在上模3和下模2内，当加热元件7通电后可以同时对上模3和下模2进行加热。此外，加热器还包括相互电连的感应电加热线圈与感应发热器10，其中，感应加热线圈6设置在左冲头5上，且能够随着左冲头5的移动插入筒坯1内，通过感应电加热线圈与感应发热器10可以对筒坯1进行加热。

[0056] 结合图1所示，可以看出在筒坯1成形前，感应加热线圈6位于筒坯1内，实现均匀快速的对筒坯1的加热；而当筒坯1发生快速涨形后，结合图2所示，可以看出筒坯1朝远离感应电加热线圈的方向变形，贴靠模具型腔，形成钛合金薄壁件。

[0057] 本发明实施例提供的钛合金薄壁件热处理与气压成形一体化方法，在气压成形模具中，先进行筒坯的预先热处理，然后在预先热处理温度T1(同气压成形温度)下施加气压成形压力完成塑性成形，使筒坯贴模成为钛合金异形截面薄壁件，由于筒坯温度较高、弹性极限较低，可以减少弹性变形；同时，使模具保持在成形后热处理温度T2(同应力松弛温度)，采用应力松弛压力使钛合金薄壁件11保持贴模，以避免降温收缩，并在模具和气压共同约束下保温保压，使成形后热处理和应力松弛2个过程同时完成，在成形后热处理温度T2和应力松弛压力作用下，变形的筒坯1内部的应力可以快速释放，使弹性形变转化为塑形形变而达到应力松弛成形的目的。这种将钛合金薄壁件11的成形精度控制与组织性能调控相结合，在成形模具内完成热处理与气压成形两个加工过程的工艺方法，由于筒坯1进行了预

先热处理，因此在应力松弛温度下进行应力松弛时，可以同时完成钛合金薄壁件11的成形后热处理，将控形与控性合二为一，从而获得高精度、高性能钛合金异形截面薄壁件。

[0058] 其中，步骤S1装模中，将筒坯1放入模具中，通过密封冲头将模具闭合，包括步骤：将筒坯1放入由上模3和下模2组成的模具的型腔内，合模并施加合模力，通过左冲头5和右冲头4对筒坯1的端部实行密封；其中左冲头5上设置有感应加热线圈6，在装模完成后，所述感应加热线圈6位于筒坯1内部。为提高用电安全性，避免感应加热线圈6与筒坯1之间发生短路，二者之间需留一定的均匀间隙。

[0059] 具体为：根据欲加工的筒坯1的形状采用相应的加热器件、模具和密封冲头，上述与现有技术相同，此不赘述。按设计要求将上模3与下模2装配于压力机上，下模2固定不动，上模3上行至设定高度，上模3和下模2开启空间用于放置管坯；加热元件7通电，上模3和下模2的温度逐步升高，当模具加热至成形后热处理温度T2后，将筒坯1放入型腔内，通过控制压力机主滑块运动使上模3下行合模，同时左冲头5和右冲头4在水平缸作用下做相向运动，使筒坯1、左冲头5和右冲头4之间形成封闭空腔，左冲头5移动时带动感应电加热线圈插入筒坯1内部。

[0060] 热处理温度T2的范围可以根据材料适当选取，在本发明实施例中，热处理温度T2为400-700℃，优选地为550℃。

[0061] 在步骤S2中，筒坯1通过感应加热线圈6进行加热，感应加热线圈6轴向长度与筒坯1的轴向长度相近，感应加热线圈6采用有绝缘层的铜芯导线并紧密缠绕成圆筒形，导线金属芯直径根据实际需要选取。

[0062] 步骤S2具体为：打开感应发热器10，利用感应电加热线圈将筒坯加热至预先热处理温度T1，且在预先热处理温度T1下保温第一时长t1，对筒坯进行预先热处理。

[0063] 其中，预先热处理温度T1，也即筒坯1气压成形温度可以根据筒坯1材料适当选取，在本发明实施例中，预先热处理温度T1的范围为850-1000℃℃，优选地为900℃。第一时长t1也可以根据筒坯1材料适当选取，此处t1例如为5-30min，优选地为20min。

[0064] 本发明实施例中，对筒坯1单独加热，且将温度提升至预先热处理温度T1，次温度优选为筒坯1的固溶温度，而固溶温度通常高于传统的成形温度，这也相当于提高了本发明所述的一体化方法的成形温度，将成形温度提高到固溶温度，可以减小筒坯1气胀成形过程中的弹性应变，进一步提高成形精度。

[0065] 通过分别对模具和筒坯1进行加热，还可以根据筒坯1材料热处理调控需求，可以相对自由的设计筒坯1和模具温度，相比等温成形调控组织性能方法的局限性更小，提高了工艺操作的灵活性。

[0066] 在步骤S3进气补料成形中，向密闭空腔内注入高压气体，使筒坯1在高压气体的作用下发生快速胀形而贴合到所述模具的型腔，包括步骤：通过设置在左冲头5上的进气孔8，向密闭空腔内注入进气压力P1的压缩气体，同时左冲头5和右冲头4进行轴向补料，补料完成后，将密闭空腔内的压力提高至胀形压力P2，进行热态气压成形。

[0067] 步骤S3具体为：关闭感应发热器10，停止给筒坯1加热，打开进气孔8关闭排气孔9，向筒坯内注入进给压力P1的压缩气体，同时左冲头5和右冲头4轴向进给至一定位置进行补料，可以理解的是，轴向进给量应根据筒坯1的具体胀形率或壁厚均匀性而定，在此不作限定。在轴向补料结束后，将筒坯1内的压力提高至胀形压力P2，使筒坯在胀形压力P2和气压

成形温度T1下发生快速塑性变形，并贴靠在模具型腔上，形成热态气压成形后管件。

[0068] 其中，进给压力P1、胀形压力P2均可以根据筒坯1材料适当选取，在本发明实施例中，进给压力P1的范围为0.5-3MPa，胀形压力P2的范围为3-12MPa，优选地进给压力P1为1.5MPa，胀形压力P2为8MPa。

[0069] 步骤S4应力松弛及成形后热处理，具体为：通过进气孔8，将密闭空腔内的气压提高至应力松弛压力P3，以使筒坯完全贴模，进一步形成热态钛合金异形截面薄壁件，同时，由于热态气压成形后管件与模具之间的热传导作用，热态气压成形后管件的温度降低直至与模具的温度相同或相近，也即，此时，热态气压成形后管件的温度与所述模具温度均为成形后热处理温度T2(也即应力松弛温度)，在此温度下保持至时间第二时长t2，从而完成热态气压成形后管件的应力松弛和成形后热处理(根据材料确定成形后热处理规范)，实现钛合金异形截面薄壁件的微观组织和综合性能调控。

[0070] 其中，松弛压力P3和第二时长t2的值均可以根据筒坯1材料适当选取，在本发明实施例中，松弛压力P3的范围为12-35Mpa，优选地为24Mpa；第二时长t2的范围为60-180min，优选地为120min。

[0071] 结合图8所示，图8为采用RDL100电子蠕变试验机测试得到的TA15钛合金在600℃条件下的应力松弛曲线图，从图中可以看出，随着应力松弛时间的延长，应力松弛量越来越多，但是松弛速率逐渐下降，接近120min钟时，应力趋于恒定，因此120min之后，继续延长时间对应力松弛效果不显著，故本发明实施例中，第二时长优选为120min。

[0072] 相比于传统钛合金热成形工艺过程中，成形后性能经常发生不同程度的下降。本发明提出的钛合金薄壁件热处理与气压成形一体化方法，通过将筒坯1加热到预先热处理温度T1，该预先热处理温度T1也为气压成形温度，同时也是筒坯1的固溶温度，筒坯1在固溶温度下进行气胀成形，该温度高于传统的热成形温度，在固溶温度下保温一段时间，可以将钛合金中的部分α相转变为β相；而此时，模具温度T2设定为时效处理温度，由前述知道，T2＜T1；因此当钛合金筒坯1气胀成形贴模后，形成的热态气压成形后管件温度会下降，下降过程中钛合金中的β相会转变为转变β组织；在热传导作用下，热态气压成形后管件贴模后，温度会变成和模具相同，在该温度下应力松弛过程中，材料会发生时效，在转变β组织中析出细针状次生α相，次生α相可以提高材料的强度，从而保证筒坯1成形后的性能。

[0073] 在步骤S5开模取件中，所述对热态气压成形后管件进行气冷，包括步骤：

[0074] 打开设置在右冲头4上的排气孔9，通过进气孔8向密闭空腔内注入气冷压力P4的压缩气体，以热态气压成形后管件的冷却速度为5-30℃/s进行气冷，当热态气压成形后管件的温度降至取件温度T3时，停止进气。

[0075] 步骤S5具体包括：关闭加热元件7，打开排气孔9，同时以气冷压力P4，通过进气口向热态气压成形后管件内部注入压缩气体，由气体带走钛合金异形截面薄壁件的热量，使钛合金异形截面薄壁件降温至取件温度T3，由于降温收缩，钛合金异形截面薄壁件与模具的内壁脱离，此时停止进气，待气压降至0.5MPa以下，退出左冲头5和右冲头4，打开上模3，将钛合金薄壁件11取出，即获得了所需产品。

[0076] 其中，气冷压力P4和取件温度T3的值均可以根据筒坯1材料适当选取，在本发明实施例中，气冷压力P4的范围为4-6MPa，优选地为5MPa；取件温度T3的范围为400-500℃，优选地为450℃。

[0077] 本发明提供的实施例中的压缩气体可以为空气的压缩气体、氩气的压缩气体、氮气的压缩气体、氦气的压缩气体或CO2的压缩气体，优选地为氩气的压缩气体。

[0078] 图3为钛合金薄壁件热处理与气压成形一体化方法工艺步骤图，其中T1为预先热处理温度、T2为成形后热处理温度、T3为取件温度、P1为进给压力、P2为胀形压力、P3为应力松弛压力、P4为气冷压力。

[0079] 结合图3所示，本发明提供的钛合金薄壁件热处理与气压成形一体化方法，将钛合金薄壁件的成形精度控制与组织性能调控相结合，在成形模具内完成热处理与气压成形二个过程。首先，预先热处理与气压成形结合：在气压成形模具中，模具升温至成形后热处理温度T2，再进行筒坯的预先热处理，然后在预先热处理温度T1(同气压成形温度)施加气压P2成形压力完成塑性成形，使筒坯贴模成为钛合金异形截面薄壁件。其次，成形后热处理与应力松弛复合：使模具保持在成形后热处理温度T1(同应力松弛温度)，采用应力松弛压力P3使钛合金异形截面薄壁件保持贴模、避免降温收缩，并在模具和气压共同约束下保温保压，使成形后热处理和应力松弛2个过程同时完成；最后在气冷压力P4支撑下进行钛合金异形截面薄壁件冷却，实现了钛合金异形截面薄壁件气压成形过程的形状精度与组织性能一体化调控，达到同时获得高精度与高性能的要求。

[0080] 下面以TA15钛合金筒坯1为例，对钛合金薄壁件热处理与气压成形一体化方法进行说明，其一体化成形步骤包括：

[0081] 1、将TA15钛合金筒坯1放入到下模2中，上模3向下运动，直到和下模2接触，形成对筒坯的外部约束，然后使左冲头5和右冲头4相对移动，将感应加热线圈6插入筒坯内部，左冲头5、右冲头4以及筒坯1之间形成密闭空间，感应加热线圈6位于密闭空间内；

[0082] 2、采用加热元件7将上模3和下模2加热到600±5℃；

[0083] 3、打开感应发热器10，将筒坯加热至950±5℃，在该温度保温30分钟，对筒坯1进行预先热处理；

[0084] 4、关闭感应发热器10，通过进气孔8，向筒坯内注入1MPa的氩气，同时左冲头5和右冲头4进行轴向补料，补料结束后，将筒坯1内压力提高至10MPa，使筒坯发生快速塑性变形，并贴靠模具型腔；

[0085] 5、提高筒坯1内压力至15MPa，使筒坯完全贴模，形成钛合金异形截面薄壁件，通过热传导，钛合金异形截面薄壁件的温度同模具的温度均为600±5℃，在此温度和压力下保温120min；

[0086] 6、关闭加热元件7，打开排气孔9，同时持续通过进气口向钛合金异形截面薄壁件11内注入5MPa的常温高压氩气，至钛合金异形截面薄壁件降温至400℃时，由于降温收缩，钛合金异形截面薄壁件从上模3和下模2的内壁脱离，停止进气，待气压降至0.5MPa以下，退出左冲头5和右冲头4，打开上模3，将钛合金异形截面薄壁件取出，即获得了所需产品。

[0087] 可以理解的是，本发明实施例提供的一体化方法中使用的筒坯1为钛合金管，虽然以TA15钛合金筒坯1为例进行描述，但在其他实施例中，钛合金管还可以采用TC2钛合金、TC4钛合金、TC31钛合金或Ti55钛合金，只要为α相和/或α+β双相钛合金即可。

[0088] 结合图4-5所示，图4为采用蔡司SUPRA55扫描电镜拍摄的TA15钛合金筒坯成形前的微观组织图，图5为TA15钛合金筒坯成形后的微观组织图，经对比可以看出，成形前微观组织为等轴组织，经过成形后热处理调控后，钛合金薄壁件11组织演变为双态组织，转变β

组织中包括有次生α相，也即成形后的钛合金薄壁件11也具有较好的性能。

[0089] 结合6-7所示，图6为采用Instron5569电子万能试验机测试的TA15钛合金筒坯成形前后在室温下的应力应变曲线图；图7为TA15钛合金筒坯成形前后在500℃下的应力应变曲线图；从图6中可以看出，在室温使用条件下，成形后的TA15钛合金薄壁件11的抗拉强度比成形前提高11.5％；在500℃使用条件下，成形后的TA15钛合金薄壁件11的抗拉强度比成形前提高7.7％。

[0090] 本发明提供的钛合金薄壁件热处理与气压成形一体化方法采用筒形坯料，通过高压气体作用使钛合金异形截面薄壁件一次整体成形，有效避免了多片热压成形件在焊接过程中产生的形状畸变；且采用的组织性能模内调控方法与成形过程结合在一起，避免了成形后再次加热进行热处理导致的形状畸变，同时利用内部气压支撑避免筒坯1在模具内热处理过程发生形状畸变；并利用热处理温度消除构件内部应力，避免卸载后发生回弹，提高了制备的钛合金薄壁件11的精度，此外还通过单独预先加热筒坯1，使筒坯1在固溶温度下进行气胀成形，实现了组织性能调控；且从抗拉强度测试中，也可以看出，成形后的钛合金薄壁件11的抗拉强度得到了有效提升，达到成形精度与组织性能一体化控制的目的。

[0091] 虽然本公开披露如上，但本公开的保护范围并非仅限于此。本领域技术人员在不脱离本公开的精神和范围的前提下，可进行各种变更与修改，这些变更与修改均将落入本发明的保护范围。

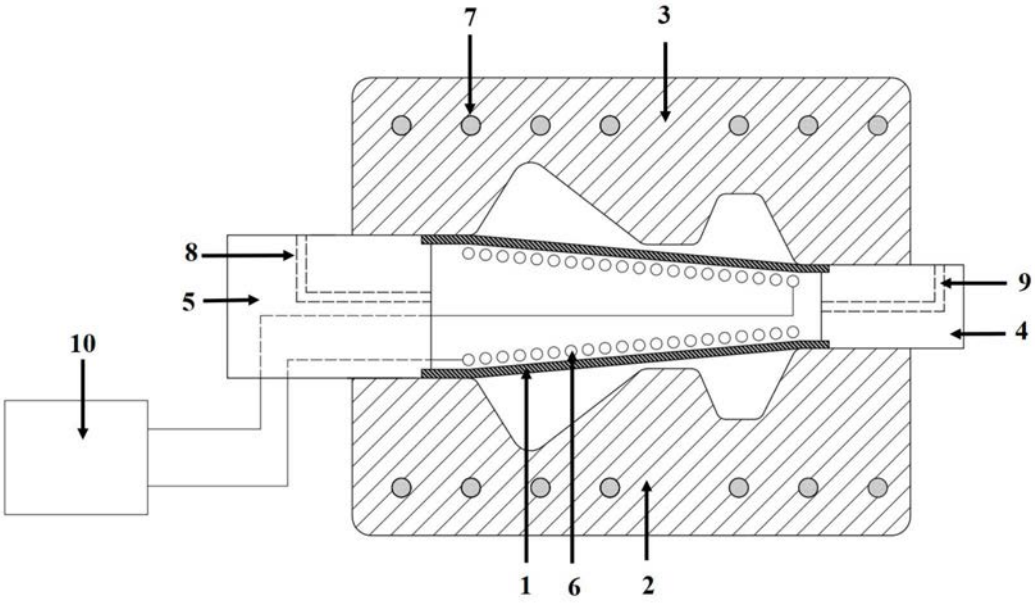


图1

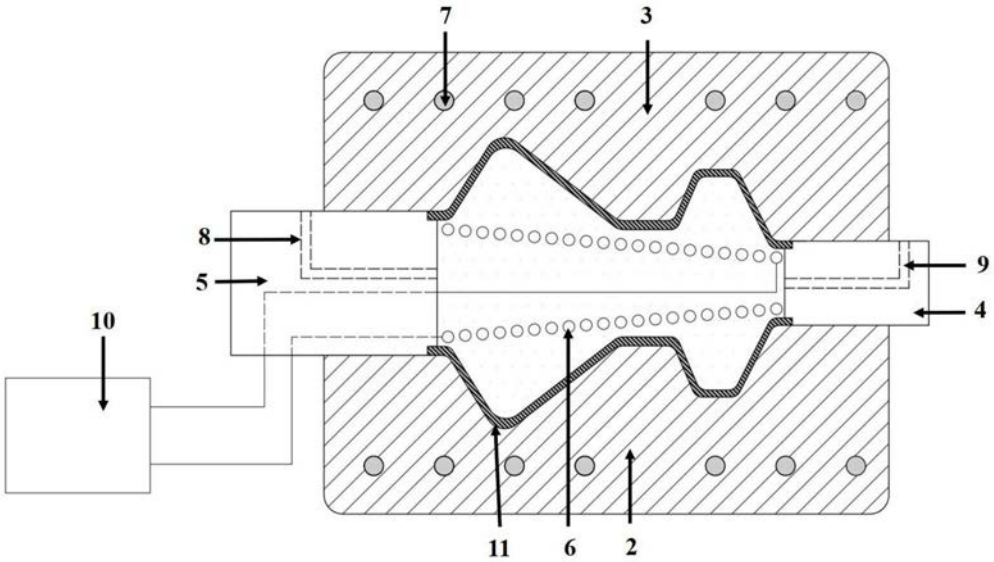


图2

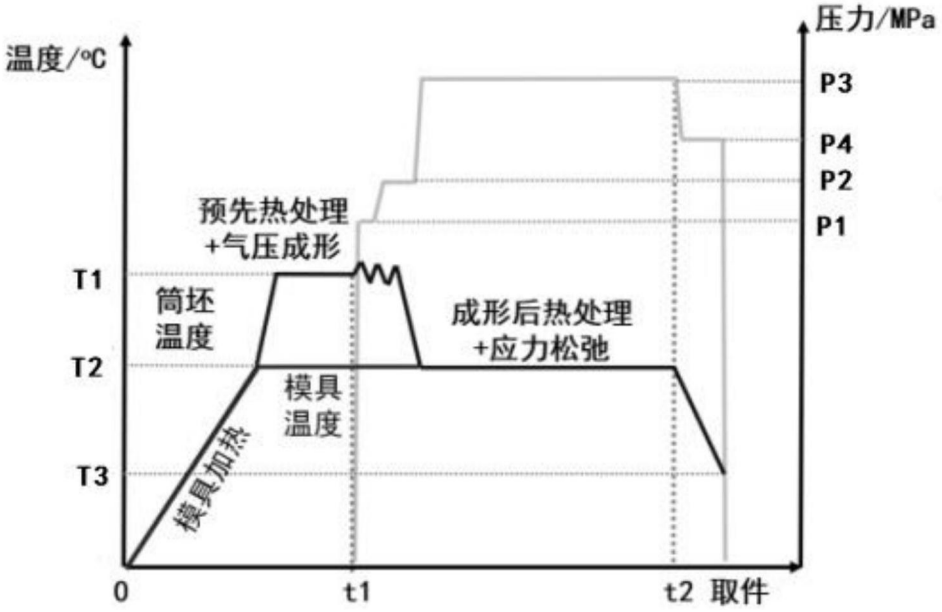

温度/°C
压力/MPa
P3
P4
P2
P1
预先热处理
+气压成形
T1
筒坯
温度
成形后热处理
+应力松弛
T2
模具
温度
T3
模具加热
0
t1
t2 取件

图3

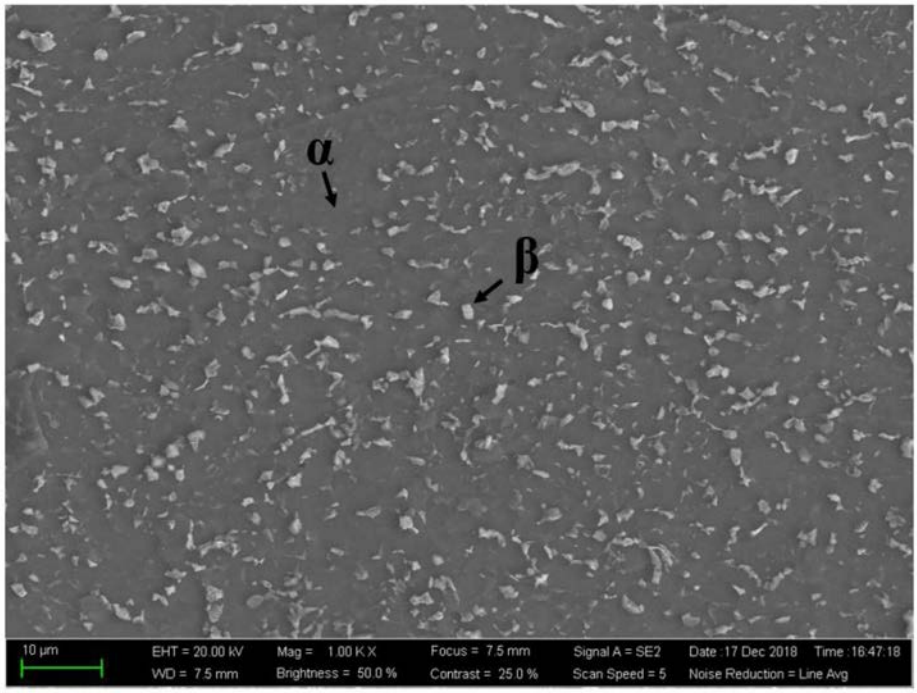

α
β
10 µm
EHT = 20.00 kV
WD = 7.5 mm
Mag = 1.00 K X
Brightness = 50.0 %
Focus = 7.5 mm
Contrast = 25.0 %
Signal A = SE2
Scan Speed = 5
Date :17 Dec 2018
Time :16:47:18
Noise Reduction = Line Avg

图4

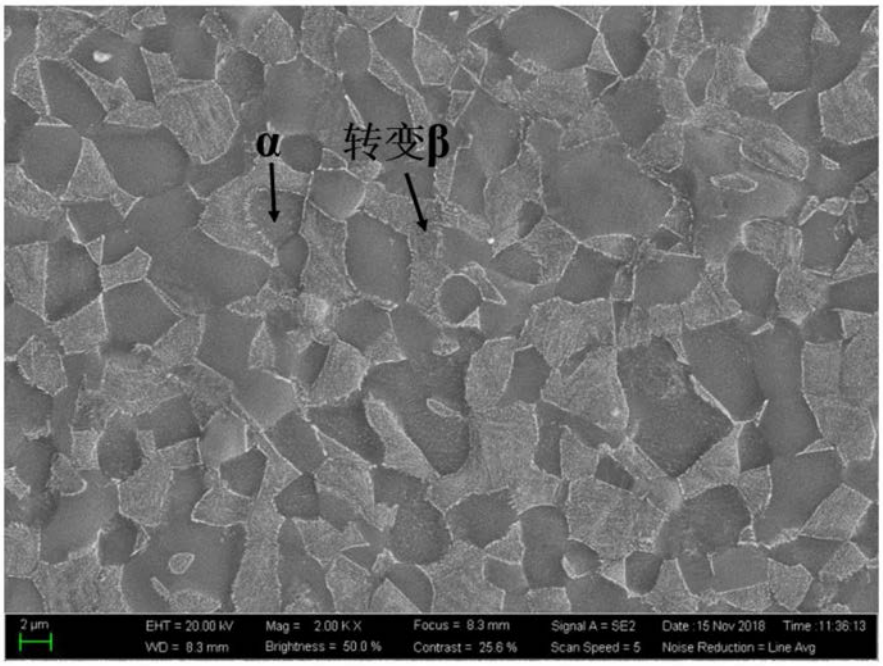

α
转变β
2 μm
EHT = 20.00 kV
WD = 8.3 mm
Mag = 2.00 K X
Brightness = 50.0 %
Focus = 8.3 mm
Contrast = 25.6 %
Signal A = SE2
Scan Speed = 5
Date :15 Nov 2018
Time :11:36:13
Noise Reduction = Line Avg

图5

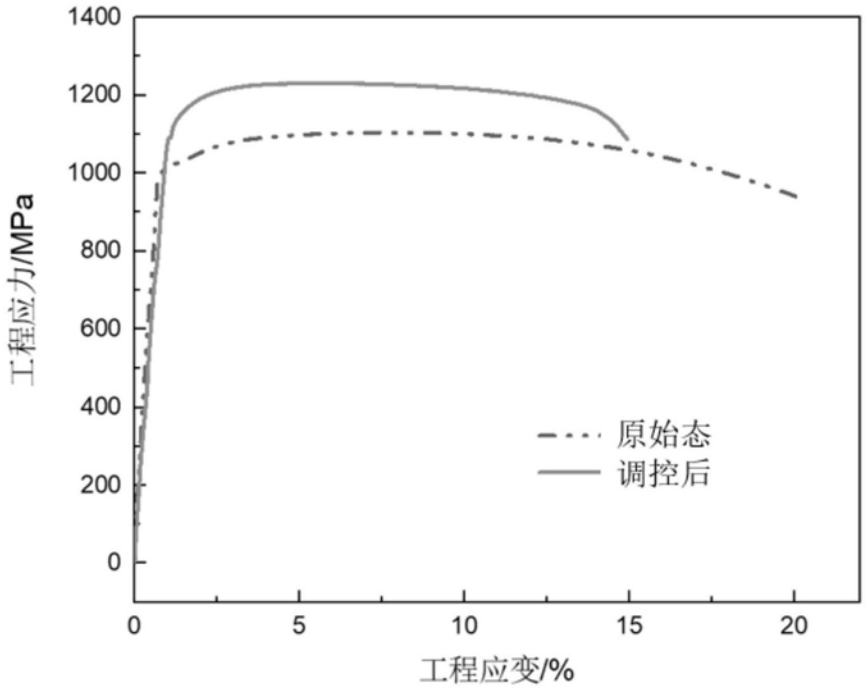

1400
1200
1000
800
600
400
200
0
工程应力/MPa
0
5
10
15
20
工程应变/%
原始态
调控后

图6

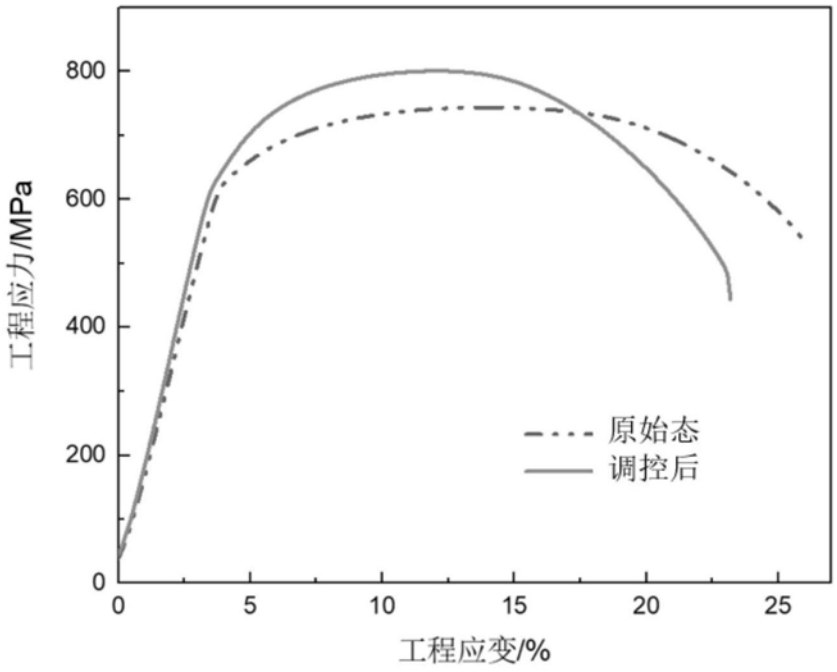

800
600
400
200
0
工程应力/MPa
0
5
10
15
20
25
工程应变/%
原始态
调控后

图7

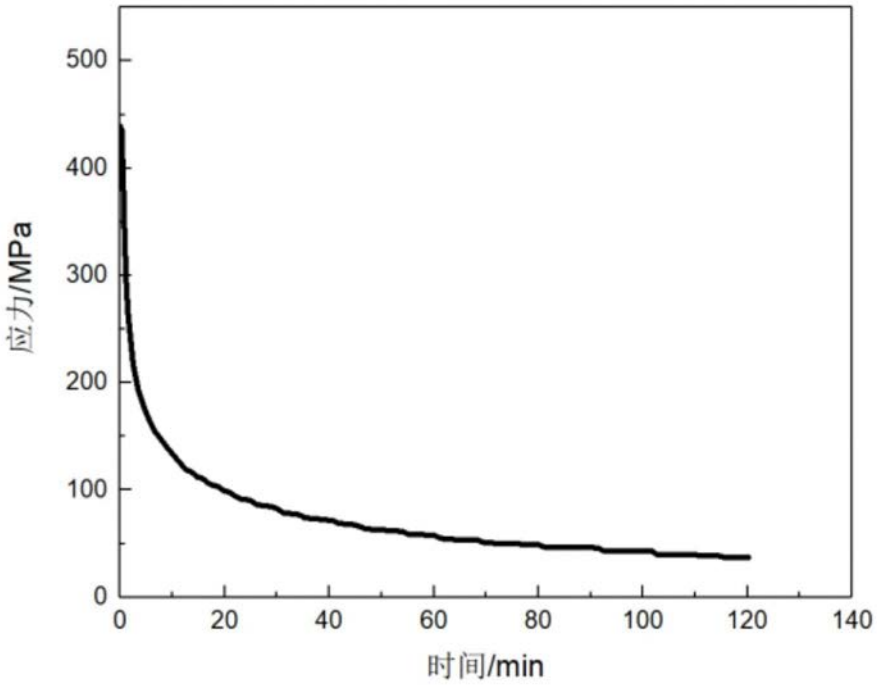

500
400
300
200
100
0
应力/MPa
0
20
40
60
80
100
120
140
时间/min

图8

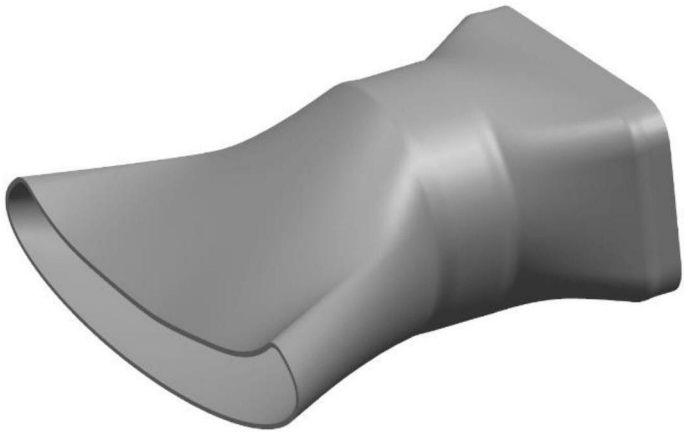


图9

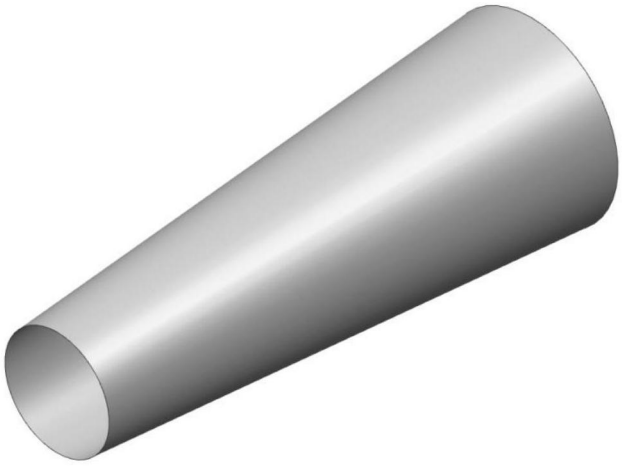


图10