(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 112275821 A
(43)申请公布日 2021.01.29

(21)申请号 202011071208.4

(22)申请日 2020.10.09

(71)申请人 徐州工程学院
地址 221018 江苏省徐州市云龙区丽水路2号

(72)发明人 王晓溪 张翔 唐虓 徐岩 井新宇

(74)专利代理机构 北京高沃律师事务所 11569
代理人 王富强

(51)Int.Cl.
B21C 25/02(2006.01)
B21C 23/00(2006.01)
B21C 23/08(2006.01)
B21C 29/00(2006.01)
B21C 31/00(2006.01)

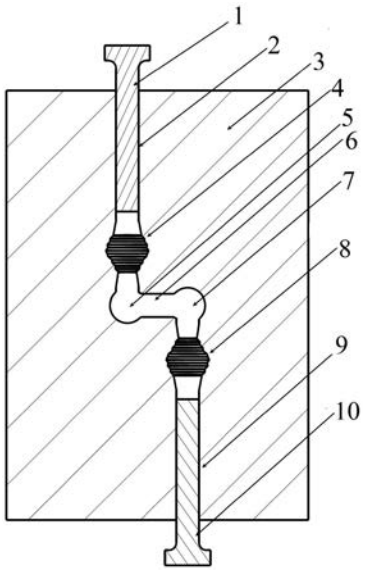
权利要求书2页 说明书6页 附图4页

(54)发明名称

一种多效应耦合剧烈塑性变形模具及方法

(57)摘要

本发明公开一种多效应耦合剧烈塑性变形模具及方法，涉及金属塑性加工挤压技术领域，变形模具包括模具本体，模具本体包括挤压凹模和凸模；挤压凹模内由上至下依次设置有入口通道、第一挤压通道、过渡通道、第二挤压通道和出口通道，第一挤压通道与第二挤压通道均为螺旋梯度挤压通道，螺旋梯度挤压通道内设置有梯度挤压模块，梯度挤压模块包括挤压模块上部和挤压模块下部，挤压模块上部由上至下呈台阶状扩径，挤压模块下部由上至下呈台阶状缩径；凸模包括第一凸模和第二凸模。本发明满足航空航天结构件在复杂工况条件下苛刻的服役要求，可获得晶粒尺寸多尺度连续分布的超细晶梯度结构高性能轻质金属材料。



CN 112275821 A

1.一种多效应耦合剧烈塑性变形模具，包括模具本体，所述模具本体包括挤压凹模和凸模，所述挤压凹模和所述凸模安装于液压机的工作台上；其特征在于：所述挤压凹模内由上至下依次设置有入口通道、第一挤压通道、过渡通道、第二挤压通道和出口通道，所述过渡通道与所述第一挤压通道之间设置有第一转角，所述过渡通道与所述第二挤压通道之间设置有第二转角，所述第一挤压通道与所述第二挤压通道均为螺旋梯度挤压通道，所述螺旋梯度挤压通道内设置有梯度挤压模块，所述梯度挤压模块包括挤压模块上部和挤压模块下部，所述挤压模块上部由上至下呈台阶状扩径，所述挤压模块下部由上至下呈台阶状缩径；所述凸模包括第一凸模和第二凸模，所述第一凸模用于顶入所述入口通道内，所述第二凸模用于顶入所述出口通道内。

2.根据权利要求1所述的多效应耦合剧烈塑性变形模具，其特征在于：所述挤压凹模包括两个凹模半模，两个所述凹模半模关于所述过渡通道的中心水平纵截面对称设置，并通过螺栓固定连接。

3.根据权利要求1所述的多效应耦合剧烈塑性变形模具，其特征在于：所述入口通道为竖直通道，所述过渡通道为水平通道，并与所述入口通道垂直设置，所述出口通道为竖直通道，并与所述入口通道平行设置，所述入口通道、所述过渡通道以及所述出口通道的横截面为圆形。

4.根据权利要求3所述的多效应耦合剧烈塑性变形模具，其特征在于：所述梯度挤压模块的顶部和底部分别设置有上连接通道和下连接通道；所述第一挤压通道的上连接通道与所述入口通道的底部连通，所述第一挤压通道的下连接通道通过第一转角与所述过渡通道的一端垂直连通；所述第二挤压通道的上连接通道通过第二转角与所述过渡通道的另一端垂直连通，所述第二挤压通道的下连接通道与所述出口通道的顶部连通。

5.根据权利要求4所述的多效应耦合剧烈塑性变形模具，其特征在于：所述挤压模块上部和所述挤压模块下部对称设置。

6.根据权利要求5所述的多效应耦合剧烈塑性变形模具，其特征在于：所述梯度挤压模块的横截面为椭圆形，形成台阶状椭圆梯度，所述台阶状椭圆梯度的椭圆截面等比例发生扭转，所述梯度挤压模块从最顶部的椭圆截面到最底部的椭圆截面整体扭转90°，所述上连接通道以及所述下连接通道靠近所述梯度挤压模块一端的横截面为椭圆形，另一端的横截面为圆形。

7.根据权利要求3所述的多效应耦合剧烈塑性变形模具，其特征在于：所述第一转角和所述第二转角均为球形转角，所述球形转角内设置有球形空腔，所述球形空腔的直径大于所述入口通道、所述过渡通道以及所述出口通道的横截面直径。

8.一种多效应耦合剧烈塑性变形方法，其特征在于：包括以下步骤：

步骤一、将挤压凹模安装在液压机工作台上，将第一凸模安装于液压机主缸的上滑块，将第二凸模安装于液压机顶出缸的滑块，与挤压凹模进行对模调试；

步骤二、将坯料从入口通道放入，开启液压机；

步骤三、启动顶出缸，将第二凸模末端移动至第二挤压通道下部，用于提供背压，对坯料进行成形；

步骤四、启动主缸，上滑块下行，带动第一凸模向下运动，挤压坯料至第一挤压通道上部，停止挤压，主缸回程；

步骤五、接着放入下一根坯料，重复步骤四中挤压过程，直至第一根变形坯料从出口通道被挤出；

步骤六、重复上述步骤五。

9.根据权利要求8所述的多效应耦合剧烈塑性变形方法，其特征在于：所述步骤五中，坯料在挤压凹模内可实现往复、多道次、连续变形，在第一根坯料从出口通道被挤出前，主缸用于提供背压力，将第一凸模末端移动至第一挤压通道上部，用于提供背压，对坯料进行成形；启动顶出缸，向上移动第二凸模，将第二凸模顶端上移挤压至第二挤压通道下部，停止挤压，顶出缸回程；接着从出口通道放入下一根坯料，重复上述挤压过程，直至变形坯料从入口通道被挤出。

10.根据权利要求8所述的多效应耦合剧烈塑性变形方法，其特征在于：所述步骤二中可根据实际挤压情况和材料变形特点，对模具本体进行预热，对坯料进行加热并保温，所述坯料采用可塑性成形的轻质金属材料。

一种多效应耦合剧烈塑性变形模具及方法

技术领域

[0001] 本发明涉及金属塑性加工挤压技术领域，特别是涉及一种多效应耦合剧烈塑性变形模具及方法。

背景技术

[0002] 随着航空航天技术的迅猛发展，各种飞行器的飞行速度不断提高，迫切需要减轻零件重量而又要满足其高强度及刚度的要求。与世界发达国家相比，我国制造业关键核心技术和关键零部件的自主研发能力相对薄弱，在自主创新发展与产品质量提升等方面差距明显。

[0003] 轻质金属(铝、镁、钛合金和泡沫金属等)具有密度小、比强度高、耐腐蚀性强等优点，近年来在航空航天、交通运输、海洋工程和石油化工等领域具有广泛的应用。然而，某些轻质金属如钛合金、镁合金等为难变形材料，塑性变形能力不佳，耐磨性较差，用作航空航天结构件时强度有限，易产生磨损，降低了关键零部件的安全性和可靠性，难以满足复杂工况条件对构件服役性能提出的苛刻性能要求。

[0004] 近年来，通常采用细晶强化的手段制备超细晶结构轻质金属材料。然而，材料在获得极高强度的同时，损失了较大的塑韧性。这一传统金属材料“强度-塑性”倒置难题，一直是制约以剧烈塑性变形法为代表的超细晶材料制备技术产业化的瓶颈。研究表明，当金属晶粒尺寸由表层(亚微米晶或纳米晶)至心部(粗晶或微米晶)呈梯度连续变化分布时，材料可获得兼具较高强度与良好塑韧性的优异综合性能。

[0005] 目前，梯度结构金属材料的主要制备方法有：机械变形法、电化学沉积法、热处理法和磁控溅射法等。然而，上述工艺在实际应用过程中，存在很多技术不足，如：制备工序复杂、样品尺寸受限、表层细晶效果不佳、梯度层厚度较小、界面处易产生热应力、材料组织难以实现连续梯度过渡等。

[0006] 因此，寻求一种理想的高性能轻质金属材料先进制备方法，使材料晶粒尺寸呈现由表层超细晶(亚微米晶或纳米晶)至内部粗晶的连续梯度结构分布，最终获得强度与塑韧性匹配良好的超细晶梯度结构轻质金属材料，对于充分发掘传统金属材料性能潜力，拓宽其工业应用范围，推动梯度结构材料制备技术发展具有重要意义。

发明内容

[0007] 本发明的目的是提供一种多效应耦合剧烈塑性变形模具及方法，以解决现有技术所存在的上述问题，满足航空航天结构件在复杂工况条件下苛刻的服役要求，可获得晶粒尺寸多尺度连续分布的超细晶梯度结构高性能轻质金属材料，使其兼具高强度和良好的塑韧性。

[0008] 为实现上述目的，本发明提供了如下方案：本发明提供一种多效应耦合剧烈塑性变形模具，包括模具本体，所述模具本体包括挤压凹模和凸模，所述挤压凹模和所述凸模安装于液压机的工作台上；所述挤压凹模内由上至下依次设置有入口通道、第一挤压通道、过

渡通道、第二挤压通道和出口通道，所述过渡通道与所述第一挤压通道之间设置有第一转角，所述过渡通道与所述第二挤压通道之间设置有第二转角，所述第一挤压通道与所述第二挤压通道均为螺旋梯度挤压通道，所述螺旋梯度挤压通道内设置有梯度挤压模块，所述梯度挤压模块包括挤压模块上部和挤压模块下部，所述挤压模块上部由上至下呈台阶状扩径，所述挤压模块下部由上至下呈台阶状缩径；所述凸模包括第一凸模和第二凸模，所述第一凸模用于顶入所述入口通道内，所述第二凸模用于顶入所述出口通道内。

[0009] 优选的，所述挤压凹模包括两个凹模半模，两个所述凹模半模关于所述过渡通道的中心水平纵截面对称设置，并通过螺栓固定连接。

[0010] 优选的，所述入口通道为竖直通道，所述过渡通道为水平通道，并与所述入口通道垂直设置，所述出口通道为竖直通道，并与所述入口通道平行设置，所述入口通道、所述过渡通道以及所述出口通道的横截面为圆形。

[0011] 优选的，所述梯度挤压模块的顶部和底部分别设置有上连接通道和下连接通道；所述第一挤压通道的上连接通道与所述入口通道的底部连通，所述第一挤压通道的下连接通道通过第一转角与所述过渡通道的一端垂直连通；所述第二挤压通道的上连接通道通过第二转角与所述过渡通道的另一端垂直连通，所述第二挤压通道的下连接通道与所述出口通道的顶部连通。

[0012] 优选的，所述挤压模块上部和所述挤压模块下部对称设置。

[0013] 优选的，所述梯度挤压模块的横截面为椭圆形，形成台阶状椭圆梯度，所述台阶状椭圆梯度的椭圆截面等比例发生扭转，所述梯度挤压模块从最顶部的椭圆截面到最底部的椭圆截面整体扭转90°，所述上连接通道以及所述下连接通道靠近所述梯度挤压模块一端的横截面为椭圆形，另一端的横截面为圆形。

[0014] 优选的，所述第一转角和所述第二转角均为球形转角，所述球形转角内设置有球形空腔，所述球形空腔的直径大于所述入口通道、所述过渡通道以及所述出口通道的横截面直径。

[0015] 本发明还公开一种多效应耦合剧烈塑性变形方法，包括以下步骤：

[0016] 步骤一、将挤压凹模安装在液压机工作台上，将第一凸模安装于液压机主缸的上滑块，将第二凸模安装于液压机顶出缸的滑块，与挤压凹模进行对模调试；

[0017] 步骤二、将坯料从入口通道放入，开启液压机；

[0018] 步骤三、启动顶出缸，将第二凸模末端移动至第二挤压通道下部，用于提供背压，对坯料进行成形；

[0019] 步骤四、启动主缸，上滑块下行，带动第一凸模向下运动，挤压坯料至第一挤压通道上部，停止挤压，主缸回程；

[0020] 步骤五、接着放入下一根坯料，重复步骤四中挤压过程，直至第一根变形坯料从出口通道被挤出；

[0021] 步骤六、重复上述步骤五。

[0022] 优选的，所述步骤五中，坯料在挤压凹模内可实现往复、多道次、连续变形，在第一根坯料从出口通道被挤出前，主缸用于提供背压力，将第一凸模末端移动至第一挤压通道上部，用于提供背压，对坯料进行成形；启动顶出缸，向上移动第二凸模，将第二凸模顶端上移挤压至第二挤压通道下部，停止挤压，顶出缸回程；接着从出口通道放入下一根坯料，重

复上述挤压过程，直至变形坯料从入口通道被挤出。

[0023] 优选的，所述步骤二中可根据实际挤压情况和材料变形特点，对模具本体进行预热，对坯料进行加热并保温，所述坯料采用可塑性成形的轻质金属材料。

[0024] 本发明相对于现有技术取得了以下有益技术效果：

[0025] a)耦合球形膨胀、转角剪切、扭转成形、扩径与缩径挤压等多种变形于一体，组合优化后形成了最佳的复合成形模式，使得材料变形更加协调、有序，实现了“一次挤压，多种变形，连续协调”的变形效果，有效提高了变形效率与成形效果；

[0026] b)通道结构以过渡通道中心水平纵截面为中心，呈近似对称结构，可有效改善单道次转角剪切存在的模具偏载问题，使得模具整体受力均匀。同时，无需开模取料和拆卸模具，即可实现往复多道次挤压，真正实现了梯度结构组织的有效、连续、可控过渡；

[0027] c)材料经螺旋梯度挤压后，获得了晶粒尺寸多尺度连续分布(由表层超细晶至心部粗晶)的超细晶梯度结构组织，充分发挥了表面高硬高强、心部塑韧性良好的性能优势，克服了传统细晶强化手段产生的“强度-塑性”倒置难题；

[0028] d)材料经多效应耦合剧烈塑性变形后，内部累积了较高的塑性应变，晶粒细化效果明显，力学性能得到显著提升；

[0029] e)可根据实际需要，调整模具几何参数，如螺旋梯度挤压通道内扩径与缩径比例、台阶深度，过渡通道长度尺寸、球形空腔尺寸等，通过模具几何参数的优化设计，可实现不同晶粒特征的梯度结构组织，满足不同用户的需求；

[0030] f)可根据实际需要，调整工艺参数，如挤压速度(1mm/min～10mm/min)、模具加热温度(20℃～600℃)、坯料加热及保温温度(20℃～600℃)、坯料保温时间(3min～60min)，通过工艺参数的优化设计，可获得所需的细晶层深度及梯度层尺寸，满足不同用户的需求。

附图说明

[0031] 为了更清楚地说明本发明实施例或现有技术中的技术方案，下面将对实施例中所需要使用的附图作简单地介绍，显而易见地，下面描述中的附图仅仅是本发明的一些实施例，对于本领域普通技术人员来讲，在不付出创造性劳动的前提下，还可以根据这些附图获得其他的附图。

[0032] 图1为本发明多效应耦合剧烈塑性变形模具及方法的结构示意图；

[0033] 图2为本发明螺旋梯度挤压通道的结构示意图；

[0034] 图3为本发明台阶状梯度挤压模块(扭转前)示意图；

[0035] 图4为本发明台阶状梯度挤压模块(扭转后)示意图；

[0036] 图5为本发明挤压坯料内部应变分布图；

[0037] 图6为本发明梯度结构组织分布图；

[0038] 其中：1-第一凸模，2-入口通道，3-凹模半模，4-第一挤压通道，5-第一转角，6-过渡通道，7-第二转角，8-第二挤压通道，9-出口通道，10-第二凸模，101-第一阶梯初始椭圆，102-第二阶梯扩径椭圆，103-第三阶梯扩径椭圆，104-第四阶梯扩径椭圆，105-第五阶梯缩径椭圆，106-第六阶梯缩径椭圆，107-第七阶梯缩径椭圆。

具体实施方式

[0039] 下面将结合本发明实施例中的附图，对本发明实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述，显然，所描述的实施例仅仅是本发明一部分实施例，而不是全部的实施例。基于本发明中的实施例，本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例，都属于本发明保护的范围。

[0040] 为使本发明的上述目的、特征和优点能够更加明显易懂，下面结合附图和具体实施方式对本发明作进一步详细的说明。

[0041] 实施例一

[0042] 如图1-4所示，本实施例提供一种多效应耦合剧烈塑性变形模具，带有螺旋梯度结构，耦合镦-剪-挤-扭等多种变形效应于一体，包括模具本体，模具本体包括挤压凹模和凸模，挤压凹模和凸模安装于液压机的工作台上；挤压凹模内由上至下依次设置有入口通道2、第一挤压通道4、过渡通道6、第二挤压通道8和出口通道9，过渡通道6与第一挤压通道4之间设置有第一转角5，过渡通道6与第二挤压通道8之间设置有第二转角7，第一挤压通道4与第二挤压通道8均为螺旋梯度挤压通道，螺旋梯度挤压通道内设置有梯度挤压模块，梯度挤压模块包括挤压模块上部和挤压模块下部，挤压模块上部由上至下呈台阶状扩径，挤压模块下部由上至下呈台阶状缩径，挤压模块上部和挤压模块下部以中间最大截面为对称面上下对称设置；本实施例中连续多次台阶状扩径后，再次进行连续多次台阶状缩径；凸模包括第一凸模1和第二凸模10，第一凸模1用于顶入入口通道2内，第二凸模10用于顶入出口通道9内。

[0043] 在本实施例中，挤压凹模竖直分模，为左右组合式结构，包括两个凹模半模3，两个凹模半模3关于过渡通道6的中心水平纵截面呈对称设置，并且两个凹模半模3通过螺栓固定连接。

[0044] 在本实施例中，入口通道2为竖直通道，过渡通道6为水平通道，并与入口通道2垂直设置，出口通道9为竖直通道，并与入口通道2平行设置，入口通道2、过渡通道6以及出口通道9的横截面为圆形，而且三者的横截面直径可以相同，或者根据需要对尺寸进行相应调整。

[0045] 在本实施例中，梯度挤压模块的顶部和底部分别设置有上连接通道和下连接通道；第一挤压通道4的上连接通道与入口通道2的底部连通，第一挤压通道4的下连接通道通过第一转角5与过渡通道6的一端垂直连通；第二挤压通道8的上连接通道通过第二转角7与过渡通道6的另一端垂直连通，第二挤压通道8的下连接通道与出口通道9的顶部连通。

[0046] 在本实施例中，梯度挤压模块的横截面为椭圆形，形成台阶状椭圆梯度，椭圆截面面积基本保持不变，椭圆截面长轴与短轴尺寸根据工艺要求可灵活调整；台阶状椭圆梯度的椭圆截面等比例发生扭转，梯度挤压模块从最顶部的椭圆截面到最底部的椭圆截面整体扭转90°，上连接通道以及下连接通道靠近梯度挤压模块一端的横截面为椭圆形，另一端的横截面为圆形。

[0047] 在本实施例中，第一转角5和第二转角7均为球形转角，由水平过渡通道6与竖直出口通道9或入口通道2相交呈90°形成，球形转角内设置有球形空腔，球形空腔的直径大于入口通道2、过渡通道6以及出口通道9的横截面直径。

[0048] 本实施例变形模具可以实现金属坯料的往复多道次挤压，且无需开模取料和拆卸

模具，只需将模具入口通道2和出口通道9对换调整即可，此时出口变入口，入口变出口。

[0049] 本发明还公开一种多效应耦合剧烈塑性变形方法，包括以下步骤：

[0050] 步骤一、将挤压凹模安装在液压机工作台上，将第一凸模1安装于液压机主缸的上滑块，将第二凸模10安装于液压机顶出缸的滑块，与挤压凹模进行对模调试，并采用螺栓固定；

[0051] 步骤二、将坯料从入口通道2放入，开启液压机；

[0052] 步骤三、启动顶出缸，将第二凸模10末端移动至第二挤压通道8下部，固定顶出压力为5KN，用于提供背压，对坯料进行成形；

[0053] 步骤四、启动主缸，上滑块下行，带动第一凸模1向下运动，挤压坯料至第一挤压通道4上部，停止挤压，主缸回程；

[0054] 步骤五、接着放入下一根坯料，重复步骤四中挤压过程，实现“料顶料”连续挤压，直至第一根变形坯料从出口通道9被挤出；

[0055] 步骤六、重复上述步骤五。

[0056] 在本实施例中，步骤五中，在第一根坯料从出口通道9被挤出前，坯料在挤压凹模内可实现往复、多道次、连续变形。此时，主缸用于提供背压力，将第一凸模1末端移动至第一挤压通道4上部，固定顶出压力5KN，用于提供背压，对坯料进行成形；启动顶出缸，向上移动第二凸模10，将第二凸模10顶端上移挤压至第二挤压通道8下部，停止挤压，顶出缸回程；接着从出口通道9放入下一根坯料，重复上述挤压过程，实现“料顶料”连续挤压，直至变形坯料从入口通道2被挤出。

[0057] 在本实施例中，步骤二中可根据实际挤压情况和材料变形特点，对模具本体进行预热，对坯料进行加热并保温，坯料采用可塑性成形轻质金属材料，优选钛合金、镁合金或铝合金。

[0058] 本实施例中，重复上述操作，可实施多效应耦合作用下坯料多道次剧烈塑性变形，以累积更高的塑性应变量，并在材料内部形成理想的梯度应变分布，进而获得具有晶粒尺寸呈多尺度连续分布(由表层超细晶至心部粗晶)的超细晶梯度结构轻质金属材料。

[0059] 实施例二

[0060] 本实施例以尺寸规格为Φ15mm×80mm的铝合金棒料为实验材料，进行挤压变形实验。

[0061] 模具关键结构参数为：入口通道2与出口通道9圆形截面直径均为15mm，入口通道2与水平过渡通道6相交呈90°，出口通道9与水平过渡通道6相交呈90°，入口通道2与出口通道9方向相反，两处球形空腔直径均为Φ23mm，螺旋梯度挤压通道的梯度挤压模块尺寸为：第一阶梯初始椭圆101尺寸(长轴：18.75mm；短轴：12.00mm)，第二阶梯扩径椭圆102尺寸(长轴：22.75mm；短轴：16.00mm)，第三阶梯扩径椭圆103尺寸(长轴：26.75mm；短轴：20.00mm)，第四阶梯扩径椭圆104尺寸(长轴：30.75mm；短轴：24.00mm)，第五阶梯缩径椭圆105尺寸(长轴：26.75mm；短轴：20.00mm)，第六阶梯缩径椭圆106尺寸(长轴：22.75mm；短轴：16.00mm)，第七阶梯缩径椭圆107尺寸(长轴：18.75mm；短轴：12.00mm)，螺旋梯度挤压通道共含有6个梯度挤压模块，台阶高度均为2mm，以第四阶梯为对称面，扩径与缩径台阶上下对称分布，如图3所示。螺旋梯度挤压通道以第一阶梯初始椭圆为基准，发生扭转，第七阶梯缩径椭圆相对于第一阶梯初始椭圆截面扭转90°，内部各阶梯通道均等分扭转，如图4所示。

[0062] 将上述铝合金棒料放入马弗炉中加热至150℃，并保温30min。同时，在挤压凹模外配置加热圈，对模具本体进行整体加热，模具本体内部型腔温度维持在150℃左右。将保温后的铝合金棒料迅速由马弗炉放入入口通道2，将第一凸模1安装于主缸上滑块，将第二凸模10安装于顶出缸滑块，与挤压凹模进行对模调试，并采用螺栓固定。

[0063] 开启液压机，启动顶出缸，将第二凸模10末端移动至第二挤压通道8下部，固定顶出压力5KN，用于提供背压，对坯料进行成形。启动主缸，上滑块下行，第一凸模1向下运动，挤压坯料至第一挤压通道4上部，停止挤压，压力机回程。接着放入下一根坯料，重复上述挤压过程，实现“料顶料”连续挤压，直至成形坯料从竖直出口通道9被挤出。

[0064] 为深入研究挤压坯料内部的应变分布规律，对上述多效应耦合剧烈塑性变形过程进行三维有限元数值模拟，提取挤压坯料内部中心纵剖面上的等效应变分布云图，如图5所示。可以清楚地看到，坯料在螺旋梯度挤压通道内变形时，内部累积了较高的塑性应变，等效应变由外向内呈阶梯状分布。当完成螺旋梯度挤压进入球形转角后，坯料内部依然保留了较大的梯度塑变区。

[0065] 研究表明，应变累积及其分布是材料晶粒细化和性能提升的关键所在。与此同时，进一步对挤出坯料的中心横截面进行金相组织观察(见图6)，可明显地看出，材料变形后晶粒尺寸呈多尺度连续变化分布，形成了典型的梯度结构组织。

[0066] 需要说明的是，对于本领域技术人员而言，显然本发明不限于上述示范性实施例的细节，而且在不背离本发明的精神或基本特征的情况下，能够以其他的具体形式实现本发明。因此，无论从哪一点来看，均应将实施例看作是示范性的，而且是非限制性的，本发明的范围由所附权利要求而不是上述说明限定，因此旨在将落在权利要求的等同要件的含义和范围内的所有变化囊括在本发明内，不应将权利要求中的任何附图标记视为限制所涉及的权利要求。

[0067] 本发明中应用了具体个例对本发明的原理及实施方式进行了阐述，以上实施例的说明只是用于帮助理解本发明的方法及其核心思想；同时，对于本领域的一般技术人员，依据本发明的思想，在具体实施方式及应用范围上均会有改变之处。综上所述，本说明书内容不应理解为对本发明的限制。

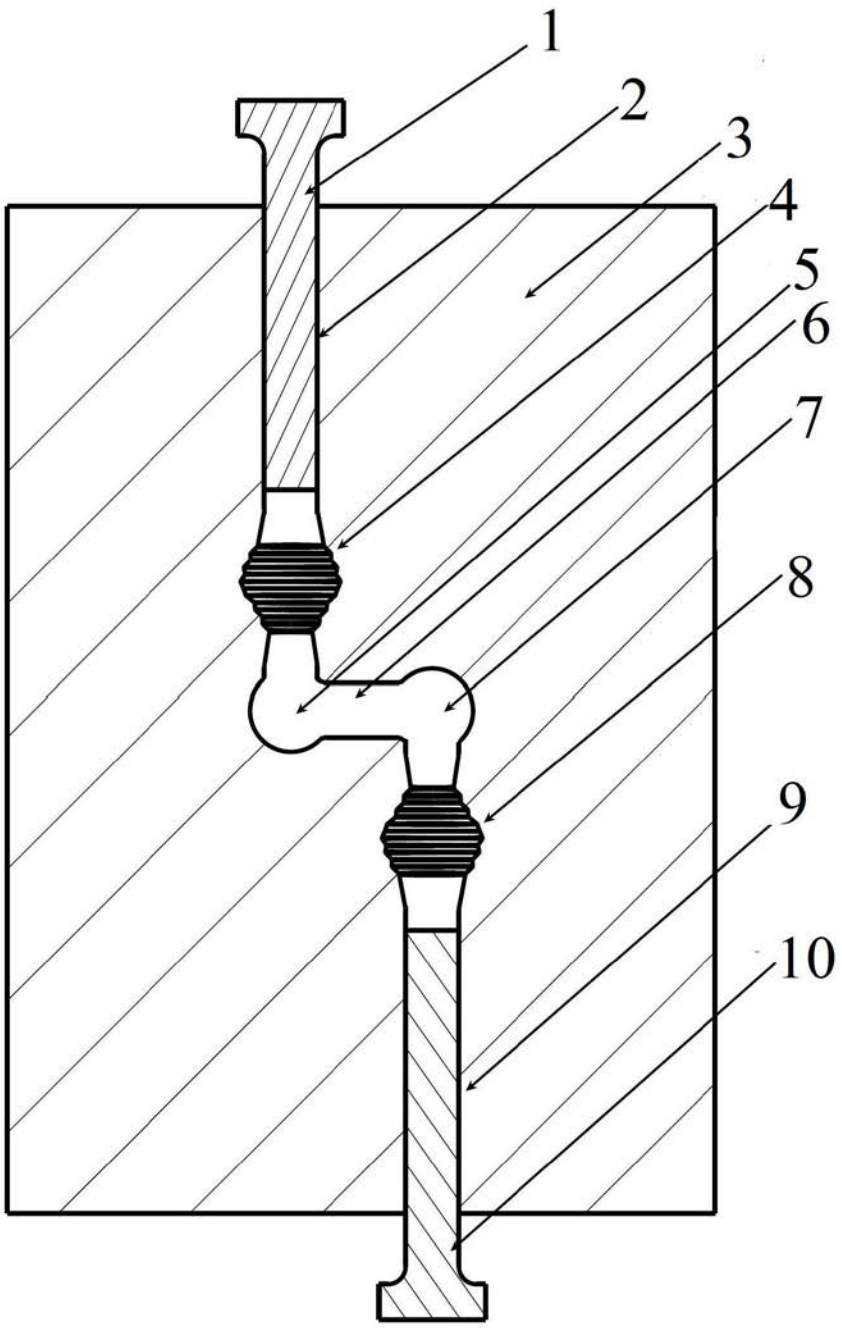


图1

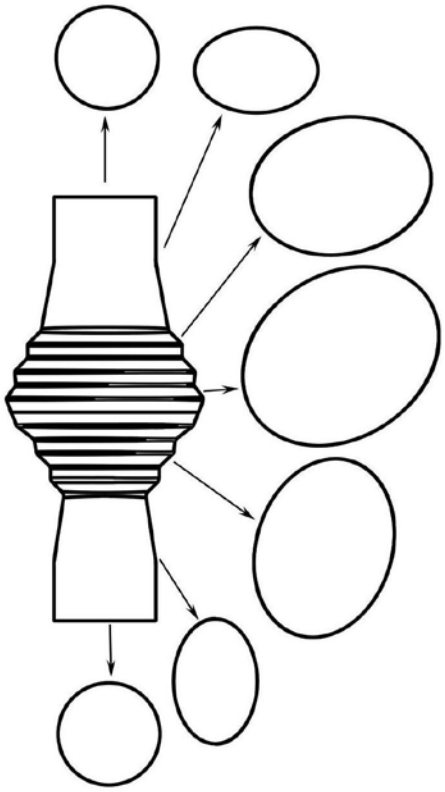


图2

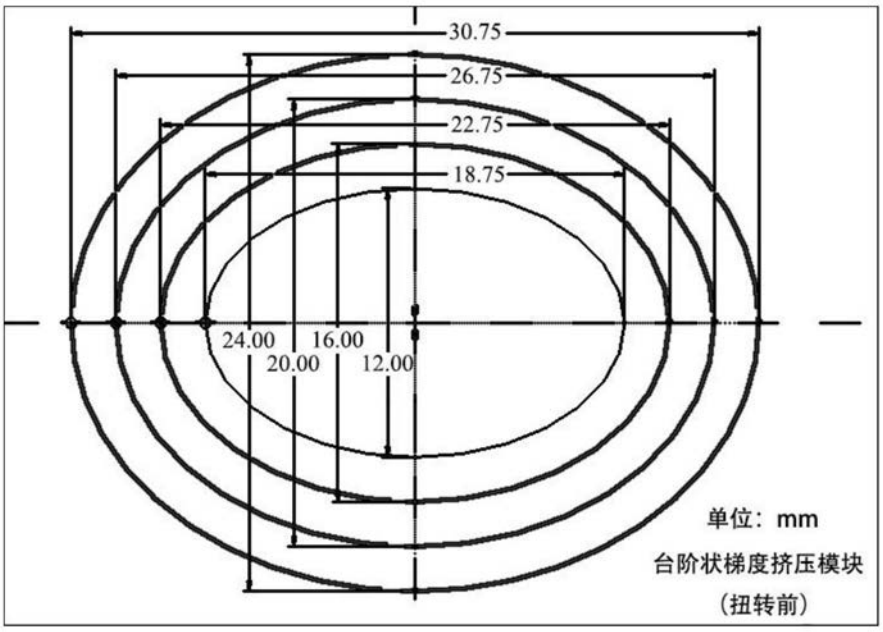


图3

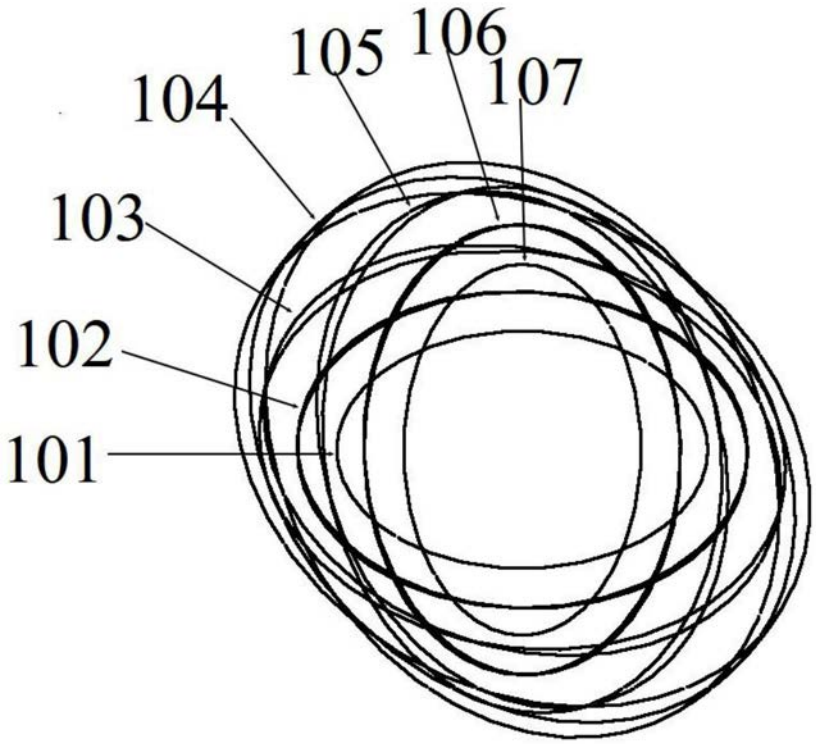

105
106
104
107
103
102
101

图4

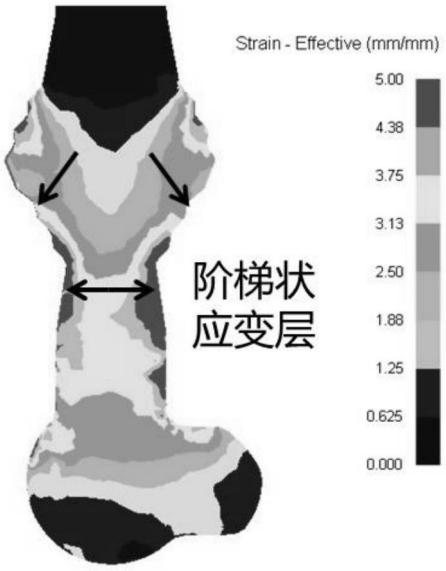

Strain - Effective (mm/mm)
5.00
4.38
3.75
3.13
2.50
1.88
1.25
0.625
0.000
阶梯状
应变层

图5

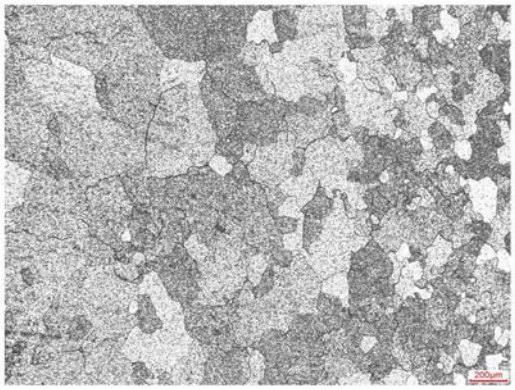


图6