



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 104797723 A

(43) 申请公布日 2015. 07. 22

(21) 申请号 201380060682. 9

(51) Int. Cl.

(22) 申请日 2013. 11. 26

*G22C 14/00*(2006. 01)

(30) 优先权数据

*G22F 1/18*(2006. 01)

13/714, 465 2012. 12. 14 US

(85) PCT国际申请进入国家阶段日

2015. 05. 20

(86) PCT国际申请的申请数据

PCT/US2013/071801 2013. 11. 26

(87) PCT国际申请的公布数据

W02014/093009 EN 2014. 06. 19

(71) 申请人 ATI 资产公司

地址 美国俄勒冈州

(72) 发明人 戴维·J·布莱恩

约翰·V·马堤欧尼

琼-菲利普·托马斯

(74) 专利代理机构 北京律盟知识产权代理有限

责任公司 11287

代理人 林斯凯

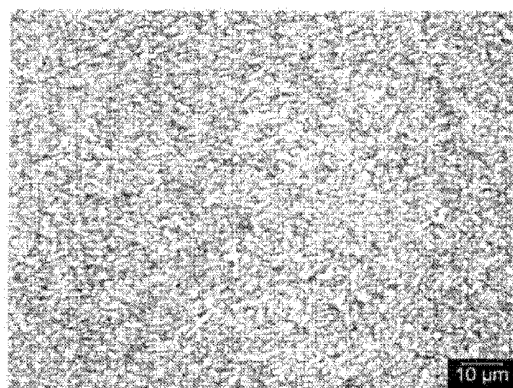
权利要求书4页 说明书30页 附图17页

(54) 发明名称

用于加工钛合金的方法

(57) 摘要

细化钛合金工件的颗粒大小的方法包括使所述工件  $\beta$  退火, 将所述  $\beta$  退火的工件冷却至低于所述钛合金的  $\beta$  转变温度的温度, 并且高应变率多轴锻造所述工件。采用高应变率多轴锻造直到实现所述钛合金工件中的至少 1 的总应变, 或直到实现所述钛合金工件中的至少 1 直至 3.5 的总应变。所述工件的钛合金可包含有效于降低  $\alpha$  相沉淀和生长动力学的颗粒固定成合金添加剂和  $\beta$  稳定化含量中的至少一种。



1. 一种细化包含钛合金的工件的颗粒大小的方法,所述方法包括:  
使所述工件  $\beta$  退火;  
将所述  $\beta$  退火的工件冷却至低于所述钛合金的  $\beta$  转变温度的温度;以及  
多轴锻造所述工件,其中所述多轴锻造包括  
以足以绝热地加热所述工件的内部区域的应变率、在所述工件的第一正交轴的方向上、在工件锻造温度范围内的工件锻造温度下压力锻造所述工件,  
以足以绝热地加热所述工件的所述内部区域的应变率、在所述工件的第二正交轴的方向上、在所述工件锻造温度范围内的工件锻造温度下压力锻造所述工件,  
以足以绝热地加热所述工件的所述内部区域的应变率、在所述工件的第三正交轴的方向上、在所述工件锻造温度范围内的工件锻造温度下压力锻造所述工件,以及  
重复所述压力锻造步骤中的至少一个,直到实现所述工件中的至少 1.0 的总应变。
2. 如权利要求 1 所述的方法,其中重复所述压力锻造步骤中的至少一个,直到实现所述工件中的至少 1.0 直至小于 3.5 范围内的总应变。
3. 如权利要求 1 所述的方法,其中在压力锻造期间使用的应变率在  $0.2\text{s}^{-1}$  至  $0.8\text{s}^{-1}$  的范围内。
4. 如权利要求所述的方法,其中所述工件包含  $\alpha + \beta$  钛合金和亚稳态  $\beta$  钛合金中的一种。
5. 如权利要求 1 所述的方法,其中所述工件包含  $\alpha + \beta$  钛合金。
6. 如权利要求 4 或 5 所述的方法,其中所述钛合金包含有效于降低  $\alpha$  相沉淀和生长动力学的颗粒固定成合金添加剂和  $\beta$  稳定化含量中的至少一种。
7. 如权利要求 1 所述的方法,其中所述工件包含选自 Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo 合金 (UNS R56260)、Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo-0.08Si 合金 (UNS R54620)、Ti-4Al-2.5V 合金 (UNS R54250)、Ti-6Al-7Nb 合金 (UNS R56700) 以及 Ti-6Al-6V-2Sn 合金 (UNS R56620) 的钛合金。
8. 如权利要求 1 所述的方法,其中冷却所述  $\beta$  退火的工件包括将所述工件冷却至环境温度。
9. 如权利要求 1 所述的方法,其中冷却所述  $\beta$  退火的工件包括将所述工件冷却至处于或接近所述工件锻造温度的温度。
10. 如权利要求 1 所述的方法,其中使所述工件  $\beta$  退火包括在所述钛合金的所述  $\beta$  转变温度直至高于所述钛合金的所述  $\beta$  转变温度  $300^\circ\text{F}$  ( $111^\circ\text{C}$ ) 的范围内的  $\beta$  退火温度下加热所述工件。
11. 如权利要求 1 所述的方法,其中使所述工件  $\beta$  退火包括在  $\beta$  退火温度下加热所述工件持续 5 分钟至 24 小时范围内的时间。
12. 如权利要求 1 所述的方法,还包括在冷却所述  $\beta$  退火的工件之前使所述工件在所述钛合金的所述  $\beta$  相场中的塑性变形温度下塑性变形。
13. 如权利要求 12 所述的方法,其中使所述工件在所述钛合金的所述  $\beta$  相场中的塑性变形温度下塑性变形包括拉伸、镦粗锻造和高应变率多轴锻造所述工件中的至少一种。
14. 如权利要求 12 所述的方法,其中所述塑性变形温度是在所述钛合金的所述  $\beta$  转变温度直至高于所述钛合金的所述  $\beta$  转变温度  $300^\circ\text{F}$  ( $111^\circ\text{C}$ ) 的范围内。

15. 如权利要求 12 所述的方法, 其中使所述工件塑性变形包括高应变率多轴锻造, 并且其中冷却所述工件包括当所述工件冷却至所述钛合金的所述  $\alpha + \beta$  相场中的所述工件锻造温度时高应变率多轴锻造所述工件。

16. 如权利要求 12 所述的方法, 其中使所述工件塑性变形包括将所述工件锻粗锻造至 0.1 至 0.5 范围内的  $\beta$ - 锻粗应变。

17. 如权利要求 1 所述的方法, 其中所述工件锻造温度是在低于所述钛合金的所述  $\beta$  转变温度 100 °F (55.6 °C) 至低于所述钛合金的所述  $\beta$  转变温度 700 °F (388.9 °C) 的范围内。

18. 如权利要求 1 所述的方法, 还包括在连续压力锻造步骤中间, 使所述工件的所述绝热加热的内部区域冷却至处于或接近所述工件锻造温度范围内的所述工件锻造温度的温度, 并且将所述工件的所述外表面加热至处于或接近所述工件锻造温度范围内的所述工件锻造温度的温度。

19. 如权利要求 18 所述的方法, 其中允许所述工件的所述绝热加热的内部区域冷却 5 秒至 120 秒范围内的内部区域冷却时间。

20. 如权利要求 18 所述的方法, 其中加热所述工件的所述外表面包括使用火焰加热、箱式炉加热、感应加热和辐射加热中的一个或多个来加热。

21. 如权利要求 18 所述的方法, 其中将用于压力锻造所述工件的锻造机的所述模具加热至所述工件锻造温度至低于所述工件锻造温度 100 °F (55.6 °C) 的范围内的温度。

22. 如权利要求 1 所述的方法, 其中在实现至少 1.0 的总应变之后, 所述工件包括 4  $\mu\text{m}$  或更小范围内的平均  $\alpha$  粒子颗粒大小。

23. 如权利要求 1 所述的方法, 其中重复所述压力锻造步骤中的至少一个直到实现所述工件中的至少 1.0 的总应变包括在第二工件锻造温度下压力锻造所述工件, 其中所述第二工件锻造温度在所述工件的所述钛合金的所述  $\alpha - \beta$  相场内, 并且其中所述第二工件锻造温度低于所述工件锻造温度。

24. 一种细化包含钛合金的工件的颗粒大小的方法, 所述方法包括:

使所述工件  $\beta$  退火;

将所述  $\beta$  退火的工件冷却至低于所述钛合金的所述  $\beta$  转变温度的温度; 以及

多轴锻造所述工件, 其中所述多轴锻造包括

以足以绝热地加热所述工件的内部区域的应变率、在所述工件的第一正交 A- 轴的方向上、在工件锻造温度范围内的工件锻造温度下将所述工件压力锻造至主要减少间隔物高度,

在所述工件的第二正交 B- 轴的方向上、在所述工件锻造温度下将所述工件压力锻造至第一阻塞减少间隔物高度,

在所述工件的第三正交 C- 轴的方向上、在所述工件锻造温度下将所述工件压力锻造至第二阻塞减少间隔物高度,

以足以绝热地加热所述工件的内部区域的应变率、在所述工件的所述第二正交 B- 轴的方向上、在所述工件锻造温度下将所述工件压力锻造至所述主要减少间隔物高度,

在所述工件的所述第三正交 C- 轴的方向上、在所述工件锻造温度下将所述工件压力锻造至所述第一阻塞减少间隔物高度,

在所述工件的所述第一正交 A- 轴的方向上、在所述工件锻造温度下将所述工件压力锻造至所述第二阻塞减少间隔物高度，

以足以绝热地加热所述工件的内部区域的应变率、在所述工件的所述第三正交 C- 轴的方向上、在所述工件锻造温度下将所述工件压力锻造至所述主要减少间隔物高度，

在所述工件的所述第一正交 A- 轴的方向上、在所述工件锻造温度下将所述工件压力锻造至所述第一阻塞减少间隔物高度，

在所述工件的所述第二正交 B- 轴的方向上、在所述工件锻造温度下将所述工件压力锻造至所述第二阻塞减少间隔物高度，以及

重复所述前述压力锻造步骤中的至少一个，直到实现所述工件中的至少 1.0 的总应变。

25. 如权利要求 24 所述的方法，其中重复所述压力锻造步骤中的至少一个，直到实现所述工件中的至少 1.0 直至小于 3.5 的总应变。

26. 如权利要求 24 所述的方法，其中在压力锻造期间使用的应变率在  $0.2\text{s}^{-1}$  至  $0.8\text{s}^{-1}$  的范围内。

27. 如权利要求 24 所述的方法，其中所述工件包含  $\alpha + \beta$  钛合金和亚稳态  $\beta$  钛合金中的一种。

28. 如权利要求 24 所述的方法，其中所述工件包含  $\alpha + \beta$  钛合金。

29. 如权利要求 27 或 28 所述的方法，其中所述钛合金包含颗粒固定成合金添加剂和  $\beta$  稳定化含量中的至少一种以便降低  $\alpha$  相沉淀和  $\alpha$  相生长动力学。

30. 如权利要求 24 所述的方法，其中所述工件包含选自 Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo 合金 (UNS R56260)、Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo-0.08Si 合金 (UNS R54620)、Ti-4Al-2.5V 合金 (UNS R54250)、Ti-6Al-7Nb 合金 (UNS R56700) 以及 Ti-6Al-6V-2Sn 合金 (UNS R56620) 的钛合金。

31. 如权利要求 24 所述的方法，其中冷却所述  $\beta$  退火的工件包括将所述工件冷却至环境温度。

32. 如权利要求 24 所述的方法，其中冷却所述  $\beta$  退火的工件包括将所述工件冷却至所述工件锻造温度。

33. 如权利要求 24 所述的方法，其中使所述工件  $\beta$  退火包括在所述钛合金的所述  $\beta$  转变温度直至高于所述钛合金的所述  $\beta$  转变温度  $300\text{ }^{\circ}\text{F}$  ( $111\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) 的范围内的  $\beta$  退火温度下加热所述工件。

34. 如权利要求 24 所述的方法，其中使所述工件  $\beta$  退火包括在  $\beta$  退火温度下加热所述工件持续 5 分钟至 24 小时范围内的时间。

35. 如权利要求 24 所述的方法，还包括在将所述  $\beta$  退火的工件冷却至低于所述钛合金的所述  $\beta$  转变温度的温度之前使所述工件在所述钛合金的所述  $\beta$  相场中的塑性变形温度下塑性变形。

36. 如权利要求 35 所述的方法，其中使所述工件在所述钛合金的所述  $\beta$  相场中的塑性变形温度下塑性变形包括拉伸、镦粗锻造和高应变率多轴锻造所述工件中的至少一种。

37. 如权利要求 35 所述的方法，其中所述塑性变形温度是在所述工件的所述钛合金的所述  $\beta$  转变温度直至高于所述工件的所述钛合金的所述  $\beta$  转变温度  $300\text{ }^{\circ}\text{F}$  ( $111\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) 的范

围内。

38. 如权利要求 35 所述的方法,其中使所述工件塑性变形包括高应变率多轴锻造,并且其中冷却所述  $\beta$  退火的工件包括当所述工件冷却至所述钛合金的所述  $\alpha + \beta$  相场中的所述工件锻造温度时高应变率多轴锻造所述工件。

39. 如权利要求 35 所述的方法,其中使所述工件塑性变形包括将所述工件锻造至 0.1 至 0.5 范围内的  $\beta$  - 锻造应变。

40. 如权利要求 24 所述的方法,其中所述工件锻造温度是在低于所述钛合金的所述  $\beta$  转变温度 100 °F (55.6°C) 至低于所述钛合金的所述  $\beta$  转变温度 700 °F (388C) 的范围内。

41. 如权利要求 24 所述的方法,其中在连续压力锻造步骤中间,允许所述工件的所述绝热加热的内部区域冷却至处于或接近所述工件锻造温度范围内的所述工件锻造温度的温度,并且将所述工件的所述外表面区域加热至处于或接近所述工件锻造温度范围内的所述工件锻造温度的温度。

42. 如权利要求 41 所述的方法,其中允许所述工件的所述绝热加热的内部区域冷却 5 秒至 120 秒范围内的时间。

43. 如权利要求 41 所述的方法,其中加热所述工件的所述外表面包括使用火焰加热、箱式炉加热、感应加热和辐射加热中的一个或多个来加热。

44. 如权利要求 41 所述的方法,其中将用于压力锻造所述工件的锻造机的所述模具加热至所述工件锻造温度至低于所述工件锻造温度 100 °F (55.6°C) 的范围内的温度。

45. 如权利要求 24 所述的方法,其中在实现至少 1.0 的总应变之后,所述工件包括 4  $\mu$ m 或更小的平均  $\alpha$  粒子颗粒大小。

46. 如权利要求 24 所述的方法,其中重复所述压力锻造步骤中的至少一个直到实现所述工件中的至少 1.0 的总应变包括在第二工件锻造温度下压力锻造所述工件,其中所述第二工件锻造温度在所述钛合金工件的所述  $\alpha - \beta$  相场内,并且其中所述第二工件锻造温度低于所述工件锻造温度。

## 用于加工钛合金的方法

[0001] 关于联邦资助的研究或研发的声明

[0002] 本发明是在美国政府支持下、根据美国商务部的国家标准和技术研究所 (National Institute of Standards and Technology ;NIST) 授予的 NIST 合同号 70NANB7H7038 来进行的。美国政府可享有本发明的某些权利。

### 技术背景

#### 技术领域

[0003] 本公开涉及用于加工钛合金的方法。

[0004] 技术背景描述

[0005] 用于生产具有粗粒 (CG)、细粒 (FG)、极细粒 (VFG) 或超细粒 (UFG) 微观结构的钛和钛合金的方法涉及使用多个再加热和锻造步骤。锻造步骤可包括在开式压模上的除了拉伸锻造以外的一个或多个墩粗锻造步骤。

[0006] 如本文使用,在提及钛合金的微观结构时:术语“粗粒”是指  $400\ \mu\text{m}$  至大于约  $14\ \mu\text{m}$  的  $\alpha$  颗粒大小;术语“细粒”是指在  $14\ \mu\text{m}$  至大于  $10\ \mu\text{m}$  范围内的  $\alpha$  颗粒大小;术语“极细粒”是指  $10\ \mu\text{m}$  至大于  $4.0\ \mu\text{m}$  的  $\alpha$  颗粒大小;并且术语“超细粒”是指  $4.0\ \mu\text{m}$  或更小的  $\alpha$  颗粒大小。

[0007] 锻造钛和钛合金以便产生粗粒或细粒微观结构的已知商业方法通过使用多个再加热和锻造步骤来采用  $0.03\text{s}^{-1}$  至  $0.10\text{s}^{-1}$  的应变率。

[0008] 意图用于制造细粒、极细粒或超细粒微观结构的已知方法应用  $0.001\text{s}^{-1}$  或更慢的超慢应变率下的多轴锻造 (MAF) 过程 (参见例如 G. Salishchev 等, Materials Science Forum, 第 584-586 卷, 第 783-788 页 (2008))。一般 MAF 过程描述于例如 C. Desrayaud 等, Journal of Materials Processing Technology, 172, 第 152-156 页 (2006)。

[0009] 超慢应变率 MAF 过程中的颗粒细化的关键是在由所使用的超慢应变率,即  $0.001\text{s}^{-1}$  或更慢的应变率所产生的动态再结晶状况下连续运作的的能力。在动态再结晶期间,颗粒同时成核、生长并且积累位移。新成核颗粒内的位移的产生连续地减少颗粒生长的驱动力,并且颗粒成核在能量方面为有利的。超慢应变率 MAF 过程使用动态再结晶以便在锻造过程期间连续地使颗粒再结晶。

[0010] 超细粒 Ti-6-4 合金 (UNS R56400) 的相对均匀的立方体可使用超慢应变率 MAF 过程来生产,但是在商业情形中为了执行 MAF 步骤所耗费的累积时间可为过度的。另外,常规大规模、可商购开式压模锻造设备可能不具有实现这类实施方案中所需要的超慢应变率的能力,并且因此,可能需要定制锻造设备来用于进行生产规模超慢应变率 MAF。

[0011] 因此,开发用于生产具有粗的、细的、极细或超细粒微观结构的钛合金的过程将为有利的,所述过程不需要多个再加热、顾及较高应变率、减少加工所需时间,并且消除对于定制锻造装备的需要。

[0012] 概述

[0013] 根据本公开的非限制性方面,细化包含钛合金的工件的颗粒大小的方法包括使工件  $\beta$  退火。在  $\beta$  退火之后,将工件冷却至低于钛合金的  $\beta$  转变温度的温度。然后将工件多轴锻造。多轴锻造包括:以足以绝热地加热所述工件的内部区域的应变率、在所述工件的第一正交轴的方向上、在工件锻造温度范围内的工件锻造温度下压力锻造所述工件;以足以绝热地加热所述工件的所述内部区域的应变率、在所述工件的第二正交轴的方向上、在所述工件锻造温度范围内的工件锻造温度下压力锻造所述工件;以及以足以绝热地加热所述工件的所述内部区域的应变率、在所述工件的第三正交轴的方向上、在所述工件锻造温度范围内的工件锻造温度下压力锻造所述工件。任选地,在连续压力锻造步骤中间,使所述工件的绝热地加热的内部区域冷却至处于或接近所述工件锻造温度范围内的工件锻造温度的温度,并且将所述工件的外表面区域加热至处于或接近所述工件锻造温度范围内的工件锻造温度的温度。重复所述压力锻造步骤中的至少一个,直到在所述工件的至少一个区域中实现至少 1.0 的总应变。在另一个非限制性实施方案中,重复所述压力锻造步骤中的至少一个,直到在所述工件的至少一个区域中实现至少 1.0 直至小于 3.5 的总应变。在一个非限制性实施方案中,在压力锻造期间所使用的应变率在  $0.2\text{s}^{-1}$  至  $0.8\text{s}^{-1}$  的范围内。

[0014] 根据本公开的另一个非限制性方面,细化包含钛合金的工件的颗粒大小的方法的非限制性实施方案包括使所述工件  $\beta$  退火。在  $\beta$  退火之后,将工件冷却至低于钛合金的  $\beta$  转变温度的温度。然后使用包括以下锻造步骤的顺序将工件多轴锻造。

[0015] 以足以绝热地加热工件的内部区域的应变率、在所述工件的第一正交 A 轴的方向上、在工件锻造温度范围内的工件锻造温度下将工件压力锻造至主要减少间隔物高度。如本文所用,主要减少间隔物高度是等于工件的每个正交轴所需的最终锻造尺寸的距离。

[0016] 在第一阻塞减少中在所述工件的第二正交 B 轴方向上、在所述工件锻造温度范围内的工件锻造温度下将工件压力锻造至第一阻塞减少间隔物高度。应用第一阻塞减少来使工件大致上恢复至所述工件的锻造前形状。虽然第一阻塞减少的应变率可能足以绝热地加热工件的内部区域,但在非限制性实施方案中,在所述第一阻塞减少期间绝热加热可能不会发生,因为在所述第一阻塞减少中引发的总应变可能不足以显著绝热地加热所述工件。所述第一阻塞减少间隔物高度大于主要减少间隔物高度。

[0017] 在第二阻塞减少中在所述工件的第三正交 C 轴方向上、在所述工件锻造温度范围内的工件锻造温度下将工件压力锻造至第二阻塞减少间隔物高度。应用第二阻塞减少来使工件大致上恢复至所述工件的锻造前形状。虽然第二阻塞减少的应变率可能足以绝热地加热工件的内部区域,但在非限制性实施方案中,在所述第二阻塞减少期间绝热加热可能不会发生,因为在所述第二阻塞减少中引发的总应变可能不足以显著绝热地加热所述工件。所述第二阻塞减少间隔物高度大于主要减少间隔物高度。

[0018] 以足以绝热地加热工件的内部区域的应变率、在所述工件的第二正交 B 轴的方向上、在工件锻造温度范围内的工件锻造温度下将工件压力锻造至主要减少间隔物高度。

[0019] 在第一阻塞减少中在所述工件的第三正交 C 轴方向上、在所述工件锻造温度范围内的工件锻造温度下将工件压力锻造至第一阻塞减少间隔物高度。应用第一阻塞减少来使工件大致上恢复至所述工件的锻造前形状。虽然第一阻塞减少的应变率可能足以绝热地加热工件的内部区域,但在非限制性实施方案中,在所述第一阻塞减少期间绝热加热可能不会发生,因为在所述第一阻塞减少中引发的总应变可能不足以显著绝热地加热所述工件。

所述第一阻塞减少间隔物高度大于主要减少间隔物高度。

[0020] 在第二阻塞减少中在所述工件的第一正交 A 轴方向上、在所述工件锻造温度范围内的工件锻造温度下将工件压力锻造至第二阻塞减少间隔物高度。应用第二阻塞减少来使工件大致上恢复至所述工件的锻造前形状。虽然第二阻塞减少的应变率可能足以绝热地加热工件的内部区域,但在非限制性实施方案中,在所述第二阻塞减少期间绝热加热可能不会发生,因为在所述第二阻塞减少中引发的总应变可能不足以显著绝热地加热所述工件。所述第二阻塞减少间隔物高度大于主要减少间隔物高度。

[0021] 以足以绝热地加热工件的内部区域的应变率、在主要减少中在所述工件的第三正交 C 轴的方向上、在工件锻造温度范围内的工件锻造温度下将工件压力锻造至主要减少间隔物高度。

[0022] 在第一阻塞减少中在所述工件的第一正交 A 轴方向上、在所述工件锻造温度范围内的工件锻造温度下将工件压力锻造至第一阻塞减少间隔物高度。应用第一阻塞减少来使工件大致上恢复至所述工件的锻造前形状。虽然第一阻塞减少的应变率可能足以绝热地加热工件的内部区域,但在非限制性实施方案中,在所述第一阻塞减少期间绝热加热可能不会发生,因为在所述第一阻塞减少中引发的总应变可能不足以显著绝热地加热所述工件。所述第一阻塞减少间隔物高度大于主要减少间隔物高度。

[0023] 在第二阻塞减少中在所述工件的第二正交 B 轴方向上、在所述工件锻造温度范围内的工件锻造温度下将工件压力锻造至第二阻塞减少间隔物高度。应用第二阻塞减少来使工件大致上恢复至所述工件的锻造前形状。虽然第二阻塞减少的应变率可能足以绝热地加热工件的内部区域,但在非限制性实施方案中,在所述第二阻塞减少期间绝热加热可能不会发生,因为在所述第二阻塞减少中引发的总应变可能不足以显著绝热地加热所述工件。所述第二阻塞减少间隔物高度大于主要减少间隔物高度。

[0024] 任选地,在锻造方法实施方案的连续压力锻造步骤中间,使所述工件的绝热地加热的内部区域冷却约所述工件锻造温度范围内的工件锻造温度,并且将所述工件的外表面区域加热至约所述工件锻造温度范围内的工件锻造温度。重复所述方法实施方案的前述压力锻造步骤中的至少一个,直到在所述工件的至少一个区域中实现至少 1.0 的总应变。在所述方法的非限制性实施方案中,重复所述压力锻造步骤中的至少一个,直到在所述工件的至少一个区域中实现至少 1.0 并且直至小于 3.5 的总应变。在一个非限制性实施方案中,在压力锻造期间所使用的应变率在  $0.2\text{s}^{-1}$  至  $0.8\text{s}^{-1}$  的范围内。

[0025] 附图简述

[0026] 本文所述的设备和方法的特征和优点可通过参考附图来更好地了解,其中:

[0027] 图 1 是绘制存在于 Ti-6-4、Ti-6-2-4-6 和 Ti-6-2-4-2 合金中的平衡  $\alpha$  相的体积分数随温度变化的计算预测的图;

[0028] 图 2 是列出根据本公开的用于加工钛合金的方法的非限制性实施方案的步骤的流程图;

[0029] 图 3 是根据本公开的非限制性方面的用于针对颗粒大小的细化加工钛合金的使用热管理的高应变率多轴锻造方法的非限制性实施方案的方面的示意性图示,其中图 2(a)、2(c) 和 2(e) 表示非限制性压力锻造步骤,并且图 2(b)、2(d) 和 2(f) 表示任选地非限制性冷却和加热步骤;



[0030] 图 4 是已知用于细化小规模样本的颗粒大小的现有技术慢应变率多轴锻造技术的方面的示意性图示；

[0031] 图 5 是列出根据本公开的用于加工钛合金的方法的非限制性实施方案的步骤的流程图；包括主要正交减少至工件的最终所需尺寸和第一和第二阻塞减少；

[0032] 图 6 是根据本公开的高应变率多轴锻造方法的非限制性实施方案的温度-时间热机械工艺流程图；

[0033] 图 7 是根据本公开的多温度高应变率多轴锻造方法的非限制性实施方案的温度-时间热机械工艺流程图；

[0034] 图 8 是根据本公开的通过  $\beta$  转变高应变率多轴锻造方法的非限制性实施方案的温度-时间热机械工艺流程图；

[0035] 图 9 是根据本公开的用于颗粒大小细化的多次镦粗和拉伸方法的非限制性实施方案的方面的示意性图示；

[0036] 图 10 是列出根据本公开的用于多次镦粗并且拉伸加工钛合金以便细化颗粒大小的方法的非限制性实施方案的步骤的流程图；

[0037] 图 11(a) 是商业上锻造和加工的 Ti-6-2-4-2 合金的微观结构的显微照片；

[0038] 图 11(b) 是通过本公开的实施例 1 中描述的热管理高应变 MAF 实施方案加工的 Ti-6-2-4-2 合金的微观结构的显微照片；

[0039] 图 12(a) 是描绘商业上锻造和加工的 Ti-6-2-4-6 合金的微观结构的显微照片；

[0040] 图 12(b) 是通过本公开的实施例 2 中描述的热管理高应变 MAF 实施方案加工的 Ti-6-2-4-6 合金的微观结构的显微照片；

[0041] 图 13 是通过本公开的实施例 3 中描述的热管理高应变 MAF 实施方案加工的 Ti-6-2-4-6 合金的微观结构的显微照片；

[0042] 图 14 是通过本公开的实施例 4 中描述的热管理高应变 MAF 实施方案加工的 Ti-6-2-4-2 合金的微观结构的显微照片，其在各轴上施加相等应变；

[0043] 图 15 是通过本公开的实施例 5 中描述的热管理高应变 MAF 实施方案加工的 Ti-6-2-4-2 合金的微观结构的显微照片，其中阻塞减少用于最小化在各主要减少之后发生的工件的凸出；

[0044] 图 16(a) 是通过本公开的实施例 6 中描述的利用  $\beta$  转变 MAF 的热管理高应变 MAF 实施方案加工的 Ti-6-2-4-2 合金的中心区域的微观结构的显微照片；以及

[0045] 图 16(b) 是通过本公开的实施例 6 中描述的利用  $\beta$  转变 MAF 的热管理高应变 MAF 实施方案加工的 Ti-6-2-4-2 合金的表面区域的微观结构的显微照片。

[0046] 在考虑以下根据本公开的某些非限制性实施方案的详述之后，读者将了解前述细节以及其它内容。

[0047] 某些非限制性实施方案的详述

[0048] 在非限制实施方案的本说明中，除了操作实施例中或另作说明的地方之外，否则表示数量或特点的所有数字均理解成在所有情况下均由术语“约”修饰。因此，除非指出相反意思，否则以下说明中的所有数值参数均为近似值，所述近似值可取决于意图根据本公开的方法获得的所需特性而变化。在最低限度并且不试图限制对权利要求书范围的等价范围的原则的应用，每个数值参数均应当至少根据报道的有效数字的数值和通过应用普通四

舍五入技术来解读。

[0049] 同样地,本文引用的任何数值范围意在包括其中纳入的所有子范围。例如,“1 至 10”的范围意在包括在引用的最小值 1 与引用的最大值 10(含 1 和 10)之间的所有子范围,即具有等于或大于 1 的最小值以及等于或小于 10 的最大值。本文引用的任何最大数值限制意在包括纳入其中的所有较小数值限制,且本文引用的任何最小数值限制意在包括纳入其中的所有较大数值限制。因此,申请人保留修正本公开(包括权利要求书)的权力,以明确引用纳入本文所明确引用的范围内的任何子范围。所有这类范围意在在本文中以固有方式公开,以使得修正以明确引用任何这类子范围将符合美国法典 35 篇 112 条的第一段和美国法典 35 篇 132 条(a) 款的要求。

[0050] 除非另外指明,否则如本文使用的语法冠词“一个(种)(one)”、“一个(种)(a)”、“一个(种)(an)”以及“所述(the)”意在包括“至少一个(种)”或“一个或多个(一种或多种)”。因此,冠词在本文中用来指代冠词的语法对象的一个或一个以上(即,指代“至少一个”)。例如,“一个部件”意指一个或多个部件,并且因此可能涵盖多于一个部件,并且所描述的实施方案的实施可能采用或使用多于一个部件。

[0051] 本公开包括各个实施方案的描述。应理解的是,本文描述的所有实施方案是示例性的、说明性的以及非限制性的。因此,本发明并不局限于各个示例性、说明性以及非限制性实施方案的描述。事实上,本发明仅由权利要求书限定,所述权利要求书可修正以引用本公开中明确地或固有地描述的、或本公开以其它方式明确地或固有地支持的任何特征。

[0052] 据称以引用的方式全部或部分并入本文的任何专利、出版物或其它公开材料必是仅在以下程度上并如本文:并入的材料不得与本公开内容中阐述的现有定义、声明或其它公开材料冲突。因此,并且在必要的程度上,如本文中阐明的公开内容优先于以引用方式并入本文的任何冲突材料。据称以引用的方式并入本文中、但与本文阐明的现有定义、声明或其它公开材料冲突的任何材料或其部分,仅在并入材料与现有公开材料之间不出现冲突的程度上并入。

[0053] 本公开的一个方面涉及用于钛合金的多轴锻造过程的非限制性实施方案,包括在锻造步骤期间使用高应变率以便细化颗粒大小。这些方法实施方案在本公开中通常被称为“高应变率多轴锻造”或“高应变率 MAF”。如本文所用,术语“减少”和“撞击”可互换地是指单独的压力锻造步骤,其中在模具表面之间锻造工件。如本文所用,短语“间隔物高度”是指在沿一个正交轴减少之后沿所述轴测量的工件的尺寸或厚度。例如,在沿具体轴压力锻造减少至 4.0 英寸的间隔物高度之后,沿所述轴测量的压力锻造的工件的厚度将是约 4.0 英寸。间隔物高度的概念和使用对于具有压力锻造领域中的普通技能的技术人员来说是熟知的并且不必在本文进一步讨论。

[0054] 据以前所确定,对于合金如 Ti-6Al-4V 合金(ASTM5 级;UNS R56400)(其还可被称为“Ti-6-4”合金),其中工件被锻造至少至 3.5 的总应变的高应变率多轴锻造可用于制备超细颗粒坯料。所述工艺公开于 2010 年 9 月 15 日提交的名称为“Processing Routes for Titanium and Titanium Alloys”(“’538 申请”)的美国专利申请序列号 12/882,538 中,所述美国专利申请的内容以引用的方式整体并入本文。施加至少 3.5 的应变可能需要大量加工时间和复杂性,这增加了成本并且增加了未预料到的问题的机会。本公开公开了高应变率多轴锻造过程,所述过程可使用至少 1.0 直至小于 3.5 范围内的总应变来提供超细颗

粒结构。

[0055] 根据本公开的方法涉及施加多轴锻造及其衍生物,如'538 申请中公开的针对钛合金的多次锻造和拉伸(MUD)工艺,所述钛合金表现出比 Ti-6-4 合金更慢的有效  $\alpha$  沉淀和生长动力学。具体地说, Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo-0.08Si 合金(UNS R54620)(其还可被称为“Ti-6-2-4-2”合金)由于额外的颗粒固定元素如 Si 而具有比 Ti-6-4 合金更慢的有效  $\alpha$  动力学。此外, Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo 合金(UNS R56260)(其还可被称为“Ti-6-2-4-6”合金)由于增加的  $\beta$  稳定化含量而具有比 Ti-6-4 合金更慢的有效的动力学。应认识到,就成合金元素而言,  $\alpha$  相的生长和沉淀是钛基合金中的成合金元素的扩散速率的函数。钼已知具有所有钛成合金添加剂的较慢扩散速率中的一种。此外,  $\beta$  稳定剂如钼降低合金的  $\beta$  转变温度( $T_\beta$ ),其中较低  $T_\beta$  导致合金的加工温度下在所述合金中的原子的一般较慢扩散。Ti-6-2-4-2 和 Ti-6-2-4-6 合金的相对慢的有效  $\alpha$  沉淀和生长动力学的结果是当与对 Ti-6-4 合金的这类加工的作用相比,在根据本公开的实施方案的 MAF 之前使用的  $\beta$  热处理产生细小和稳定的  $\alpha$  条板大小。另外,在  $\beta$  热处理和冷却之后, Ti-6-2-4-2 和 Ti-6-2-4-6 合金具有细小的  $\beta$  颗粒结构,所述结构限制  $\alpha$  颗粒生长的动力学。

[0056]  $\alpha$  生长的有效动力学可通过鉴别在紧低于  $\beta$  转变的温度下最慢的扩散物质来评价。这种方法已在理论上概述并且在文献中实验验证(参见 Semiatin 等, Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science 38(4), 2007, 第 910-921 页)。在钛和钛合金中,针对所有潜在成合金元素的扩散率数据不容易获得;然而,文献调查如在 Lutjering 和 Williams 的 Titanium(第二版,2007)中通常接受一些常见成合金元素的以下相对排序:

[0057]  $D_{Mo} < D_{Nb} < D_{Al} \sim D_V \sim D_{Sn} \sim D_{Zr} \sim D_{Hf} < D_{Cr} \sim D_{Ni} \sim D_{Cr}D_{Co} \sim D_{Mn} \sim D_{Fe}$

[0058] 因此,含有钼的合金如 Ti-6-2-4-6 合金和 Ti-6-2-4-2 合金在比 Ti-6-4 合金(其中动力学通过铝的扩散来控制)相对更低的应变下显示实现超细颗粒微结构所要求的所希望的缓慢  $\alpha$  动力学。基于周期表族关系,还可合理地假定钽和钨属于缓慢扩散体族。

[0059] 除了包括缓慢扩散元素以便降低  $\alpha$  相的有效动力学,降低合金中通过铝扩散控制的  $\beta$  转变温度将具有类似的作用。100°C 的  $\beta$  转变温度降低将使  $\beta$  相中铝的扩散率在  $\beta$  转变温度下降低大约一个数量级。合金如 ATI 425<sup>®</sup> 合金(Ti-4Al-2.5V; UNS 54250)和 Ti-6-6-2 合金(Ti-6Al-6V-2Sn; UNS 56620)中的  $\alpha$  动力学可能通过铝扩散来控制;然而,这些合金相对于 Ti-6Al-4V 合金的较低  $\beta$  转变温度也产生所希望的较慢有效  $\alpha$  动力学。Ti-6Al-7Nb 合金(UNS R56700)(通常是 Ti-6Al-4V 合金的生物学型式)由于铌含量也可表现出较慢的有效  $\alpha$  动力学。

[0060] 起初预期不同于 Ti-6-4 合金的  $\alpha + \beta$  合金可在与'538 申请中所公开的那些条件相似的条件下在将产生相似的  $\alpha$  相体积分数的温度下进行加工。例如,根据使用 PANDAT 软件(可从 Computherm, LLC, Madison, Wisconsin, USA 获得的可商购的计算工具)的预测,预测在 1500 °F (815.6°C) 下的 Ti-6-4 合金应具有与在 1600 °F (871.1°C) 下的 Ti-6-2-4-2 合金和在 1200 °F (648.9°C) 下的 Ti-6-2-4-6 合金两者大约相同的  $\alpha$  相体积分数,参见图 1。然而, Ti-6-2-4-2 和 Ti-6-2-4-6 合金当使用预测将产生相似的  $\alpha$  相体积分数的温度以在'538 申请中加工 Ti-6-4 合金的方式进行加工时严重断裂。需要导致较低的  $\alpha$  平衡体积分数和 / 或显著减小的每道次应变的更高温度来成功地加工 Ti-6-2-4-2 和 Ti-6-2-4-6

合金。

[0061] 高应变率 MAF 过程的变化,包括  $\alpha/\beta$  锻造温度、应变率、每次撞击应变在撞击、再加热的次数和持续时间之间保持时间,并且中间热处理可各自影响所产生的微观结构和断裂的存在和程度。最初尝试较低的总应变以便抑制断裂,而无将产生超细颗粒结构的任何预期。然而,当检查时,使用较低总应变加工的样品显示出用于生产超细颗粒结构的显著前景。这个结果是完全未预料到的。

[0062] 在根据本公开的某些非限制性实施方案中,一种用于生产超细颗粒大小的方法包括以下步骤:1) 选择表现出比 Ti-6-4 合金更慢的有效  $\alpha$  相生长动力学的钛合金;2) 使所述钛合金  $\beta$  退火以产生细的稳定的  $\alpha$  板条大小;以及 3) 高应变率 MAF (或相似的衍生过程,如 '538 申请中公开的多次镦粗和拉伸 (MUD) 过程) 至至少 1.0 的总应变,或在另一个实施方案中,至至少 1.0 直至小于 3.5 的总应变。如本文所用,用于描述颗粒和板条大小的词语“细”是指能够实现的最小颗粒和板条大小,其在非限制性实施方案中是近似  $1\ \mu\text{m}$ 。词语“稳定的”在本文中用来意指多轴锻造步骤不会使  $\alpha$  颗粒大小显著变粗,并且不会使  $\alpha$  颗粒大小增加超过约 100%。

[0063] 图 2 中的流程图和图 3 中的示意性图示说明根据本公开的使用高应变率多轴锻造 (MAF) 来细化钛合金的颗粒大小的方法 (16) 的非限制性实施方案的方面。在多轴锻造 (26) 之前,使钛合金工件 24  $\beta$  退火 (18) 并且冷却 (20)。空气冷却在较小工件的情况下是可能的,例如像 4 英寸立方体;然而,还可使用水或液体冷却。较快冷却速度产生较细的板条和  $\alpha$  颗粒大小。 $\beta$  退火 (18) 包括将工件 24 加热至高于工件 24 的钛合金的  $\beta$  转变温度并且保持足以形成工件 24 中的所有  $\beta$  相的时间。 $\beta$  退火 (18) 是普通技术人员熟知的过程,并且因此不在本文中详细地描述。 $\beta$  退火的非限制性实施方案可包括将工件 24 加热至高于钛合金的  $\beta$  转变温度的  $\beta$  退火温度 (即约  $50\ ^\circ\text{F}$  ( $27.8\ ^\circ\text{C}$ )) 并且将工件 24 保持在所述温度下约 1 小时。

[0064] 在  $\beta$  退火 (18) 之后,将工件 24 冷却 (20) 至低于工件 24 的钛合金的  $\beta$  转变温度的温度。在本公开的非限制性实施方案中,将工件冷却至环境温度。如本文所用,“环境温度”是指周围环境的温度。例如,在非限制性商业生产情境中,“环境温度”是指工厂周围环境的温度。在一个非限制性实施方案中,冷却 (20) 可包括淬火。淬火包括将工件 24 浸入水、油、或另一种适合的液体中,并且是冶金领域中的技术人员所理解的过程。在其它非限制性实施方案中,特别是对于较小大小的工件来说,冷却 (20) 可包括空气冷却。本领域技术人员现在或将来已知的冷却钛合金工件 24 的任何方法在本公开的范围之内。此外,在某些非限制性实施方案中,冷却 (20) 包括直接冷却至工件锻造温度范围内的工件锻造温度以用于随后高应变率多轴锻造。

[0065] 在冷却 (20) 工件之后,使工件经受高应变率多轴锻造 (26)。正如本领域的普通技术人员所理解的那样,多轴锻造 (“MAF”) (其还可被称为“A-B-C”锻造) 是一种大塑性变形形式。根据本公开的非限制性实施方案的高应变率多轴锻造 (26) 包括将包含钛合金的工件 24 加热 (图 2 中的步骤 22) 至工件锻造温度范围内的工件锻造温度,所述温度在钛合金的  $\alpha+\beta$  相场内,接着使用高应变率的 MAF (26)。在冷却步骤 (20) 包括冷却至工件锻造温度范围内的温度的一个实施方案中明显的是,加热步骤 (22) 不是必需的。

[0066] 高应变率在高应变率 MAF 中用于绝热地加热工件的内部区域。然而,在根据本公

开的非限制性实施方案中,至少在循环中的高应变率 MAF 的最后 A-B-C 撞击循环中,钛合金工件 24 的内部区域的温度不应超过钛合金工件的  $\beta$  转变温度 ( $T_{\beta}$ )。因此,在这类非限制性实施方案中,至少对于高应变率 MAF 的最后 A-B-C 撞击循环或至少循环的最后撞击来说,工件锻造温度应加以选择以便确保在高应变率 MAF 期间工件的内部区域的温度不等于或超过合金的  $\beta$  转变温度。例如,在根据本公开的非限制性实施方案中,工件的内部区域的温度在 MAF 中的 A-B-C 撞击的至少最后高应变率循环期间或在至少最后压力锻造撞击期间、当在工件的至少一个区域中实现至少 1.0 或至少 1.0 直至小于 3.5 范围内的总应变时不超过合金的  $\beta$  转变温度以下 20 °F (11.1°C),即  $T_{\beta}-20$  °F ( $T_{\beta}-11.1$  °C)。

[0067] 在根据本公开的高应变率 MAF 的非限制性实施方案中,工件锻造温度包括工件锻造温度范围内的温度。在一个非限制性实施方案中,工件锻造温度范围是低于工件的钛合金的  $\beta$  转变温度 ( $T_{\beta}$ ) 100 °F (55.6°C) 至低于钛合金的  $\beta$  转变温度 700 °F (388.9°C)。在仍然另一个非限制性实施方案中,工件锻造温度范围是低于钛合金的  $\beta$  转变温度 300 °F (166.7°C) 至低于钛合金的  $\beta$  转变温度 625 °F (347°C)。在非限制性实施方案中,工件锻造温度范围的下端是  $\alpha+\beta$  相场中的温度,在所述相场中工件表面在锻造撞击期间未发生损伤,例如像裂纹形成和刨削。

[0068] 在应用于具有约 1820 °F (996°C) 的  $\beta$  转变温度 ( $T_{\beta}$ ) 的 Ti-6-2-4-2 合金的图 2 中所示的非限制性方法实施方案中,工件锻造温度范围可以是 1120 °F (604.4°C) 至 1720 °F (937.8°C),或在另一个实施方案中可以是 1195 °F (646.1°C) 至 1520 °F (826.7°C)。在应用于具有约 1720 °F (940°C) 的  $\beta$  转变温度 ( $T_{\beta}$ ) 的 Ti-6-2-4-6 合金的图 2 中所示的非限制性方法实施方案中,工件锻造温度范围可以是 1020 °F (548.9°C) 至 1620 °F (882.2°C),或在另一个实施方案中可以是 1095 °F (590.6°C) 至 1420 °F (771.1°C)。在另一个非限制性实施方案中,在将图 2 中所示的实施方案应用于还可被称为“Ti-4Al-2.5V”合金并且具有约 1780 °F (971.1°C) 的  $\beta$  转变温度 ( $T_{\beta}$ ) 的 ATI 425<sup>®</sup> 合金 (UNS R54250) 时,工件锻造温度范围可以是 1080 °F (582.2°C) 至 1680 °F (915.6°C),或在另一个实施方案中可以是 1155 °F (623.9°C) 至 1480 °F (804.4°C)。在另一个非限制性实施方案中,在将图 2 的本公开的实施方案应用于还可被称为“Ti-6-6-2”合金并且具有约 1735 °F (946.1°C) 的  $\beta$  转变温度 ( $T_{\beta}$ ) 的 Ti-6Al-6V-2Sn 合金 (UNS 56620) 时,工件锻造温度范围可以是 1035 °F (527.2°C) 至 1635 °F (890.6°C),或在另一个实施方案中可以是 1115 °F (601.7°C) 至 1435 °F (779.4°C)。本公开涉及施加高应变率多轴锻造及其衍生物,如'538 申请中公开的针对钛合金的 MUD 方法,所述钛合金具有比 Ti-6-4 合金更慢的有效  $\alpha$  沉淀和生长动力学。

[0069] 再次参见图 2 和 3,当钛合金工件 24 在工件锻造温度下时,工件 24 经受高应变率 MAF (26)。在根据本公开的非限制性实施方案中,MAF (26) 包括使用足以绝热地加热工件,或至少绝热地加热工件的内部区域,并且使工件 24 塑性变形的应变率、在工件的第一正交轴 30 的方向 (A) 上在工件锻造温度下压力锻造 (步骤 28,在图 3(a) 中示出) 工件 24。

[0070] 在根据本公开的高应变率 MAF 的非限制性实施方案中,高应变率和快速冲压速度用于绝热地加热工件的内部区域。在根据本公开的非限制性实施方案中,术语“高应变率”是指约  $0.2s^{-1}$  至约  $0.8s^{-1}$  范围内的应变率。在根据本公开的另一个非限制性实施方案中,术语“高应变率”是指约  $0.2s^{-1}$  至约  $0.4s^{-1}$  范围内的应变率。

[0071] 在根据本公开的非限制性实施方案中,使用如在上文中定义的高应变率,钛合金工件的内部区域可绝热地加热至高于工件锻造温度约 200 °F (111.1 °C)。在另一个非限制性实施方案中,在压力锻造期间,将内部区域绝热地加热至高于工件锻造温度约 100 °F (55.6 °C) 至约 300 °F (166.7 °C) 范围内的温度。在另一个非限制性实施方案中,在压力锻造期间,将内部区域绝热地加热至高于工件锻造温度约 150 °F (83.3 °C) 至约 250 °F (138.9 °C) 范围内的温度。如以上提及,在非限制性实施方案中,在高应变率 A-B-C MAF 撞击的最后循环期间或在正交轴上最后撞击期间,没有一部分的工件应加热至高于钛合金的  $\beta$ -转变温度。

[0072] 在非限制性实施方案中,在压力锻造 (28) 期间,工件 24 塑性变形至高度或另一种尺寸减少 20% 至 50% 的范围,即,所述尺寸减少所述范围内的百分比。在另一个非限制性实施方案中,在压力锻造 (28) 期间,工件 24 塑性变形至高度或另一种尺寸减少 30% 至 40% 的范围。

[0073] 已知的超慢应变率 ( $0.001\text{s}^{-1}$  或更慢) 多轴锻造过程示意性地描绘于图 4 中。通常,多轴锻造的方面为在通过锻造设备 (其可以是例如开式锻造模) 每三次冲击 (即,“三次撞击”) 之后,工件的形状和大小接近正好在所述三次撞击循环的第一撞击之前的工件的形状和大小。例如,在 5 英寸侧面的立方体形状的工件最初在 “a” 轴方向上以第一 “撞击” 来锻造、旋转 90° 并且在正交 “b” 轴方向上以第二撞击来锻造、并且然后旋转 90° 并在正交 “c” 轴方向上以第三撞击来锻造之后,工件将类似于起始立方体并且包括大约 5 英寸侧面。换言之,虽然三次撞击循环使立方体在三个步骤中沿所述立方体的三个正交轴变形,但是由于工件在单独撞击之间重新定位并且在每次撞击期间减少的选择,三次锻造变形的总结结果是使立方体返回至大约其初始形状和大小。

[0074] 在根据本公开的另一个非限制性实施方案中,在图 2(a) 中示出的在本文中还称为 “第一撞击” 的第一压力锻造步骤 (28) 可包括在工件处于工件锻造温度范围内的温度下的同时自顶向下压力锻造工件至预定间隔物高度。如本文所使用,术语 “间隔物高度” 是指在完成特定压力锻造减少时工件的尺寸。例如,对于 5 英寸的间隔物高度来说,工件被锻造至约 5 英寸的尺寸。在本公开的方法的具体非限制性实施方案中,间隔物高度是例如 5 英寸。在另一个非限制性实施方案中,间隔物高度是 3.25 英寸。例如像小于 5 英寸、约 4 英寸、约 3 英寸、大于 5 英寸或 5 英寸直至 30 英寸的其它间隔物高度在本文中的实施方案的范围内,但是不应被认为限制本公开的范围。间隔物高度仅受锻造能力限制,并且任选地如将在本文中所见,受根据本公开的非限制性实施方案的热管理系统的能力限制以便将工件维持在工件锻造温度下。小于 3 英寸的间隔物高度也在本文所公开的实施方案的范围内,并且这类相对小的间隔物高度仅受成品的所需特性限制。使用约 30 英寸的间隔物高度 (例如在根据本公开的方法中) 允许生产具有细颗粒大小、极细颗粒大小或超细颗粒大小的小钢坯大小 (例如 30 英寸侧面) 的立方体形状的钛合金形式。小钢坯大小的立方体形状形式的常规合金已用作被锻造成例如用于航空或陆基涡轮机的盘、环和罩零件的工件。

[0075] 应在根据本公开的方法的各种非限制性实施方案中采用的预定间隔物高度可由本领域的普通技术人员确定而无需关于考虑本公开的过度实验。具体间隔物高度可由普通技术人员确定而无需过度实验。具体间隔物高度依赖于具体合金在锻造期间断裂的敏感性。对断裂具有较高敏感性的合金将需要较大的间隔物高度,即,每次撞击较少变形以便防

止断裂。还必须在选择间隔物高度时考虑绝热加热限制,因为至少在最后撞击循环中,工件温度不应超过合金的 $T_{\beta}$ 。另外,在选择间隔物高度时需要考虑锻压机能力限制。例如,在压制4英寸侧面的立方体工件期间,横截面积在压制步骤期间增加。如此,保持工件在所要求的应变率下变形所需要的总负载增加。所述负载不能增加超出锻压机的能力范围。此外,在选择间隔物高度时需要考虑工件几何形状。大的变形可导致工件凸出。太大的减少可导致工件相对扁平,所以在不同正交轴方向上的下一次锻造撞击可导致工件弯曲。

[0076] 在某些非限制性实施方案中,针对各正交轴撞击使用的间隔物高度是相等的。在某些其它非限制性实施方案中,针对各正交轴撞击使用的间隔物高度是不相等的。针对各正交轴使用不相等间隔物高度的高应变率MAF的非限制性实施方案在以下呈现。

[0077] 在第一正交轴30的方向上,即在图2(a)中所示的A方向上压力锻造(28)工件24之后,根据本公开的方法的非限制性实施方案任选地还包括允许(步骤32)将工件的绝热加热的内部区域(未示出)的温度冷却至处于或接近工件锻造温度范围内的工件锻造温度步骤,这在图3(b)示出。在不同非限制性实施方案中,内部区域冷却时间,或“等待时间”可例如在5秒至120秒、10秒至60秒或5秒至5分钟的范围内。在根据本公开的各种非限制性实施方案中,工件的“绝热加热的内部区域”如本文所用是指从工件的中心向外延伸并且具有工件的至少约50%或至少约60%或至少约70%或至少约80%的体积的区域。本领域的技术人员将认识到将工件的内部区域冷却至处于或接近工件锻造温度的温度所需的时间将取决于工件24的大小、形状和组成,以及围绕工件24的气氛条件。

[0078] 在内部区域冷却时间期间,根据本文公开的某些非限制性实施方案的热管理系统33的方面任选地包括将工件24的外表面区域36加热(步骤34)至处于或接近工件锻造温度的温度。以这种方式,在每次高应变率MAF撞击之前,工件24的温度是在处于或接近工件锻造温度的均匀或接近均匀并且大致上恒温条件下。应认识到在各A轴加热之后、在各B轴撞击之后和/或在各C轴撞击之后任选地加热(34)工件24的外表面区域36在本公开的范围内。在非限制性实施方案中,任选地在各A-B-C撞击循环之后加热(34)工件的外表面。在其它非限制性实施方案中,外表面区域任选地在任一撞击或撞击循环之后被加热,只要工件的总体温度在锻造过程期间维持在工件锻造温度范围内。工件应被加热以便在每次高应变率MAF撞击之前将工件24的温度维持在处于或接近工件锻造温度的均匀或接近均匀并且大致上恒温条件下的次数可取决于工件的大小,并且这可由普通技术人员确定而无需过度实验。在根据本公开的各种非限制性实施方案中,工件的“外表面区域”如本文所用是指从工件的外表面向内延伸并且具有工件的至少约50%或至少约60%或至少约70%或至少约80%的体积的区域。应认识到在任何中间时间

[0079] 在非限制性实施方案中,加热(34)工件24的外表面区域36可使用热管理系统33的一个或多个表面加热机构38来完成。可能的表面加热机构的实例连续压力锻造步骤,可将整个工件放置在炉中或以其它方式加热至工件锻造温度范围内的温度。

[0080] 在某些非限制性实施方案中,作为任选的特征,在各次A、B和C锻造撞击之间,热管理系统33用于加热工件的外表面区域36,并且允许绝热加热的内部区域冷却内部区域冷却时间,以便使工件的温度返回至处于或接近选定工件锻造温度的大致上均匀的温度。在根据本公开的某些其它非限制性实施方案中,作为任选的特征,在各次A、B和C锻造撞击之间,热管理系统33用于加热工件的外表面区域36,并且允许绝热加热的内部区域冷却内

部区域冷却时间,以使得工件的温度返回至工件锻造温度范围内的大致上均匀的温度。利用(1)热管理系统33来将工件的外表面区域加热至工件锻造温度范围内的温度和(2)在其期间绝热加热的内部区域冷却至工件锻造温度范围内的温度的一段时间两者的根据本公开的方法的非限制性实施方案在本文中可被称为“热管理的高应变率多轴锻造”38包括但不限于适于火焰加热的火焰加热器;适于感应加热的感应加热器;以及适于辐射加热工件24的外表面的辐射加热器。用于加热工件的外表面区域的其它机构和技术对于本领域普通技术人员在考虑本公开后将是显而易知的,并且这类机构和技术在本公开的范围内。外表面区域加热机构38的非限制性实施方案可包括箱式炉(未示出)。箱式炉可被配置成具有各种加热机构以便使用火焰加热机构、辐射加热机构、感应加热机构和现在或今后为本领域普通技术人员已知的任何其它适合的加热机构中的一种或多种来加热工件的外表面区域。

[0081] 在另一个非限制性实施方案中,使用热管理系统33的一个或多个模具加热器40来任选地加热(34)工件24的外表面区域36的温度并且使其保持处于或接近工件锻造温度并且处于工件锻造温度范围内。模具加热器40可用于保持模具42或模具的压模锻造表面44处于或接近工件锻造温度或在工件锻造温度范围内的温度下。在非限制性实施方案中,将热管理系统的模具42加热至包括工件锻造温度直至低于工件锻造温度100°F(55.6°C)的范围内的温度。模具加热器40可通过现在或今后为本领域技术人员已知的任何适合的加热机构来加热模具42或压模锻造表面44,所述机构包括但不限于火焰加热机构、辐射加热机构、传导加热机构和/或感应加热机构。在非限制性实施方案中,模具加热器40可以是箱式炉(未示出)的部件。虽然示出热管理系统33处于适当位置中并且在图2(b)、(d)和(f)中所示的多轴锻造过程(26)的冷却步骤(32)、(52)、(60)期间使用,但应认识到热管理系统33在图2(a)、(c)和(e)中描绘的压力锻造步骤(28)、(46)、(56)期间可能处于或可能不处于适当位置中。

[0082] 如图3(c)中所示,根据本公开的多轴锻造方法(26)的非限制性实施方案的方面包括使用足以绝热地加热工件24或至少工件24的内部区域,并且使工件24塑性变形的应变率、在工件24的第二正交轴48的方向(B)上在工件锻造温度范围内的工件锻造温度下来压力锻造(步骤46)工件24。在非限制性实施方案中,在压力锻造(46)期间,工件24变形至高度或另一种尺寸减少20%至50%的塑性变形。在另一个非限制性实施方案中,在压力锻造(46)期间,工件24塑性变形至高度或另一种尺寸减少30%至40%的塑性变形。在非限制性实施方案中,工件24可在第二正交轴48的方向上压力锻造(46)至与第一压力锻造步骤(28)中所使用的间隔物高度相同的间隔物高度。在另一个非限制性实施方案中,工件24可在第二正交轴48的方向上压力锻造至与第一压力锻造步骤(28)中所使用的间隔物高度不同的间隔物高度。在另一个非限制性实施方案中,工件24的内部区域(未示出)在压力锻造步骤(46)期间绝热地加热至与第一压力锻造步骤(28)中相同的温度。在其它非限制性实施方案中,用于压力锻造(46)的高应变率处于与第一压力锻造步骤(28)中所公开的应变率范围相同的应变率范围内。

[0083] 在一个非限制性实施方案中,如图2(b)和(d)中所示,工件24可在连续压力锻造步骤(例如(28)、(46)、(56))之间旋转(50)以呈现不同的正交轴至锻造表面。这种旋转可被称为“A-B-C”旋转。应理解通过使用不同锻造配置,可能旋转锻造机上的冲头来代替



旋转工件 24, 或锻造机可配备有多轴冲头以使得不需要旋转工件和锻造机。明显地, 重要方面是所使用的工件和冲头的位置的相对改变, 并且旋转 (50) 工件 24 可是不必要的或任选的。然而, 在大多数当前工业设备设置中, 将需要在压力锻造步骤之间将工件旋转 (50) 至不同正交轴以便完成多轴锻造过程 (26)。

[0084] 在需要 A-B-C 旋转 (50) 的非限制性实施方案中, 工件 24 可由锻造机操作员手动地旋转或通过自动旋转系统 (未示出) 旋转以便提供 A-B-C 旋转 (50)。自动 A-B-C 旋转系统可包括但是不限于包括自由摆动的钳夹型式操纵工具等以便能够实现本文公开的非限制性热管理高应变率多轴锻造实施方案。

[0085] 在第二正交轴 48 的方向, 即在 B 方向上并且如图 3(d) 中所示, 压力锻造 (46) 工件 24 之后, 过程 (20) 任选地还包括允许 (步骤 52) 工件的绝热加热的内部区域 (未示出) 冷却至处于或接近工件锻造温度的温度, 其在图 3(d) 中示出。在某些非限制性实施方案中, 内部区域冷却时间或等待时间可例如在 5 秒至 120 秒或 10 秒至 60 秒或 5 秒直至 5 分钟的范围内。普通技术人员将认识到, 最小冷却时间取决于工件 24 的大小、形状和组成, 以及围绕工件的环境的特征。

[0086] 在任选的内部区域冷却时间期间, 根据本文公开的某些非限制性实施方案的热管理系统 33 的任选方面包括将工件 24 的外表面区域 36 加热 (步骤 54) 至处于或接近工件锻造温度的工件锻造温度范围内的温度。以这种方式, 在每次高应变率 MAF 撞击之前, 工件 24 的温度被维持在处于或接近工件锻造温度的均匀或接近均匀并且大致上恒温条件下。在非限制性实施方案中, 当使用热管理系统 33 来加热外表面区域 36, 并且允许绝热加热的内部区域冷却规定的内部区域冷却时间时, 在各次 A-B-C 锻造撞击之间使工件的温度返回至处于或接近工件锻造温度的大致上均匀的温度。在根据本公开的另一个非限制性实施方案中, 当使用热管理系统 33 来加热外表面区域 36, 并且允许绝热加热的内部区域冷却规定的内部区域冷却时间时, 在每次高应变率 MAF 撞击之前使工件温度返回至工件锻造温度范围内的大致上均匀的温度。

[0087] 在非限制性实施方案中, 加热 (54) 工件 24 的外表面区域 36 可使用热管理系统 33 的一个或多个外表面加热机构 38 来完成。可能的加热机构 38 的实例可包括但不限于适于工件 24 的火焰加热的火焰加热器; 适于感应加热的感应加热器; 和 / 或适于辐射加热的辐射加热器。表面加热机构 38 的非限制性实施方案可包括箱式炉 (未示出)。用于加热工件的外表面的其它机构和技术对于本领域普通技术人员在考虑本公开后将是显而易知的, 并且这类机构和技术在本公开的范围内。箱式炉可被配置成具有各种加热机构以便加热工件的外表面, 并且这类加热机构可包括火焰加热机构、辐射加热机构、感应加热机构和 / 或现在或今后为本领域普通技术人员已知的任何其它加热机构中的一种或多种。

[0088] 在另一个非限制性实施方案中, 可使用热管理系统 33 的一个或多个模具加热器 40 来加热 (54) 工件 24 的外表面区域 36 的温度并且使其保持处于或接近工件锻造温度并且处于工件锻造温度范围内。模具加热器 40 可用于保持模具 42 或模具的压模锻造表面 44 处于或接近工件锻造温度或在工件温度锻造范围内的温度下。模具加热器 40 可通过现在或今后为本领域技术人员已知的任何适合的加热机构来加热模具 42 或压模锻造表面 44, 所述机构包括但不限于火焰加热机构、辐射加热机构、传导加热机构和 / 或感应加热机构。在非限制性实施方案中, 模具加热器 40 可以是箱式炉 (未示出) 的部件。虽然示出热管理

系统 33 处于适当位置中并且在图 2(b)、(d) 和 (f) 中所示的多轴锻造过程 (26) 的平衡和冷却步骤 (32)、(52)、(60) 期间使用,但应认识到热管理系统 33 在图 2(a)、(c) 和 (e) 中描绘的压力锻造步骤 (28)、(46)、(56) 期间可能处于或可能不处于适当位置中。

[0089] 如图 3(e) 中所示,根据本公开的多轴锻造 (26) 的实施方案的方面包括使用足以绝热地加热工件 24,或至少绝热地加热工件的内部区域,并且使工件 24 塑性变形的冲压速度和应变率、在工件 24 的第三正交轴 58 的方向 (C) 上在工件锻造温度范围内的工件锻造温度下来压力锻造 (步骤 56) 工件 24。在非限制性实施方案中,工件 24 在压力锻造 (56) 期间变形至高度或另一种尺寸减少 20% 至 50% 的塑性变形。在另一个非限制性实施方案中,在压力锻造 (56) 期间,工件塑性变形至高度或另一种尺寸减少 30% 至 40% 的塑性变形。在非限制性实施方案中,工件 24 可在第三正交轴 58 的方向上压力锻造 (56) 至与第一压力锻造步骤 (28) 和 / 或第二锻造步骤 (46) 中所使用的间隔物高度相同的间隔物高度。在另一个非限制性实施方案中,工件 24 可在第三正交轴 58 的方向上压力锻造至与第一压力锻造步骤 (28) 中所使用的间隔物高度不同的间隔物高度。在根据本公开的另一个非限制性实施方案中,工件 24 的内部区域 (未示出) 在压力锻造步骤 (56) 期间绝热地加热至与第一压力锻造步骤 (28) 中相同的温度。在其它非限制性实施方案中,用于压力锻造 (56) 的高应变率处于与第一压力锻造步骤 (28) 中所公开的应变率范围相同的应变率范围内。

[0090] 在非限制性实施方案中,如图 3(b)、3(d) 和 3(e) 中箭头 50 所示,工件 24 可在连续压力锻造步骤 (例如,46、56) 之间旋转 (50) 至不同正交轴。如以上所讨论,这种旋转可被称为 A-B-C 旋转。应理解通过使用不同锻造配置,可能旋转锻造机上的冲头来代替旋转工件 24,或锻造机可配备有多轴冲头以使得不需要旋转工件和锻造机。因此,旋转 50 工件 24 可以是不必要的或任选的步骤。然而,在大多数当前工业设置中,将需要在压力锻造步骤之间将工件旋转 50 至不同正交轴以便完成多轴锻造过程 (26)。

[0091] 在第三正交轴 58 的方向,即在 C 方向上并且如图 3(e) 中所示,压力锻造 56 工件 24 之后,过程 20 任选地还包括允许 (步骤 60) 工件的绝热加热的内部区域 (未示出) 冷却至处于或接近工件锻造温度的温度,其在图 3(f) 中指示。内部区域冷却时间可例如在 5 秒至 120 秒、10 秒至 60 秒或 5 秒直至 5 分钟的范围内,并且本领域技术人员认识到冷却时间取决于工件 24 的大小、形状和组成,以及围绕工件的环境特性。

[0092] 在任选的冷却时间期间,根据本文公开的非限制性实施方案的热管理系统 33 的任选方面包括将工件 24 的外表面区域 36 加热 (步骤 62) 至等于或接近工件锻造温度的温度。以这种方式,在每次高应变率 MAF 撞击之前,工件 24 的温度被维持在处于或接近工件锻造温度的均匀或接近均匀并且大致上恒温条件下。在非限制性实施方案中,通过使用热管理系统 33 来加热外表面区域 36,并且允许绝热加热的内部区域冷却规定的内部区域冷却时间时,在各次 A-B-C 锻造撞击之间使工件的温度返回至处于或接近工件锻造温度的大致上均匀的温度。在根据本公开的另一个非限制性实施方案中,通过使用热管理系统 33 来加热外表面区域 36,并且允许绝热加热的内部区域冷却规定的内部区域冷却时间,在连续 A-B-C 锻造撞击之间使工件温度返回至工件锻造温度范围内的大致上恒温的条件。

[0093] 在非限制性实施方案中,加热 (62) 工件 24 的外表面区域 36 可使用热管理系统 33 的一个或多个外表面加热机构 38 来完成。可能的加热机构 38 的实例可包括但不限于用于工件 24 的火焰加热的火焰加热器;用于感应加热的感应加热器;和 / 或用于辐射加热的辐

射加热器。用于加热工件的外表面的其它机构和技术对于本领域普通技术人员在考虑本公开后将是显而易知的,并且这类机构和技术在本公开的范围内。表面加热机构 38 的非限制性实施方案可包括箱式炉(未示出)。箱式炉可被配置成具有各种加热机构以便使用火焰加热机构、辐射加热机构、感应加热机构和 / 或现在或今后为本领域普通技术人员已知的任何其它适合的加热机构中的一种或多种来加热工件的外表面。

[0094] 在另一个非限制性实施方案中,可使用热管理系统 33 的一个或多个模具加热器 40 来加热 (62) 工件 24 的外表面区域 36 的温度并且使其保持处于或接近工件锻造温度并且处于工件锻造温度范围内。模具加热器 40 可用于保持模具 42 或模具的压模锻造表面 44 处于或接近工件锻造温度或在温度锻造范围内的温度下。在非限制性实施方案中,将热管理系统的模具 42 加热至包括工件锻造温度至低于工件锻造温度 100 °F (55.6 °C) 的范围内的温度。模具加热器 40 可通过现在或今后为本领域技术人员已知的任何适合的加热机构来加热模具 42 或压模锻造表面 44,所述机构包括但不限于火焰加热机构、辐射加热机构、传导加热机构和 / 或感应加热机构。在非限制性实施方案中,模具加热器 40 可以是箱式炉(未示出)的部件。虽然示出热管理系统 33 处于适当位置中并且在图 2(b)、(d) 和 (f) 中所示的多轴锻造过程的平衡步骤 (32)、(52)、(60) 期间使用,但应认识到热管理系统 33 在图 2(a)、(c) 和 (e) 中描绘的压力锻造步骤 28、46、56 期间可能处于或可能不处于适当位置中。

[0095] 本公开的一方面包括非限制性实施方案,其中重复沿着工件的三个正交轴的压力锻造步骤中的一个或多个直到在工件中实现至少 1.0 的总应变。总应变是总真实应变。短语“真实应变”还为本领域技术人员已知为“对数应变”或“有效应变”。参看图 2,此由步骤 (g) 来例示,即重复(步骤 64)压力锻造步骤 (28)、(46)、(56) 中的一个或多个直到在工件中实现至少 1.0 或在至少 1.0 直至小于 3.5 范围内的总应变。应进一步认识到,在任何压力锻造步骤 (28) 或 (46) 或 (56) 中实现所需应变之后并且进一步压力锻造是不必要的,且不需要任选的平衡步骤(即,允许工件的内部区域冷却至处于或接近工件锻造温度的温度 (32) 或 (52) 或 (60) 并且使工件的外表面加热 (34) 或 (54) 或 (62) 至处于或接近工件锻造温度的温度),工件可在一个非限制性实施方案中通过在液体中淬火或在另一个非限制性实施方案中通过空气冷却或任何更快的冷却速率简单地冷却至环境温度。

[0096] 应理解,在一个非限制性实施方案中,总应变是在多轴锻造之后整个工件中的总应变,如本文所公开。在根据本公开的非限制性实施方案中,总应变可包括在每一正交轴上的相等应变,或总应变可包括一个或多个正交轴上的不同应变。

[0097] 根据非限制性实施方案,在  $\beta$  退火之后,工件可在  $\alpha - \beta$  相场中在两种不同温度下多轴锻造。例如,参见图 3,重复图 2 的步骤 (64) 可包括在  $\alpha - \beta$  相场中在第一温度下重复步骤 (a)-(任选的 b)、(c)-(任选的 d) 和 (e)-(任选的 f) 中的一个或多个直到实现某一应变,并且然后在  $\alpha - \beta$  相场中在第二温度下重复步骤 (a)-(任选的 b)、(c)-(任选的 d) 和 (e)-(任选的 f) 中的一个或多个直到在最后压力锻造步骤 (a)、(b) 或 (c)(即,(28)、(46)、(56)) 之后,在工件中实现至少 1.0 或在至少 1.0 直至小于 3.5 范围内的总应变。在非限制性实施方案中, $\alpha - \beta$  相场中的第二温度低于  $\alpha - \beta$  相场中的第一温度。应认识到,实施所述方法以便在多于两种 MAF 压力锻造温度下重复步骤 (a)-(任选的 b)、(c)-(任选的 d) 和 (e)-(任选的 f) 中的一个或多个在本公开的范围内,只要所述温度在锻造温度范

围内。还应认识到,在非限制性实施方案中, $\alpha-\beta$ 相场中的第二温度高于 $\alpha-\beta$ 相场中的第一温度。

[0098] 在根据本公开的另一个非限制性实施方案中,不同减少用于A轴撞击、B轴撞击和C轴撞击以便在所有方向上提供均衡应变。应用高应变率MAF来在所有方向上引入均衡应变导致工件的更少断裂和更等轴的 $\alpha$ 颗粒结构。例如,可通过以在A轴上高应变率锻造至3.0英寸高度的4英寸立方体开始来将非均衡的应变引入至立方体工件中。A轴上的这种减少引起工件沿着B轴和C轴隆起。如果B轴方向上的第二减少使B-轴尺寸减少至3.0英寸,与在A-轴上相比,将更多应变在B轴上引入工件。同样,在C-轴方向上后续撞击以便使C-轴尺寸减少至3.0英寸,与在A-轴或B轴上相比,会将更多应变在C轴上引入至工件中。作为另一个实例,为了在所有正交方向上引入均衡应变,将4英寸立方的工件在A轴上锻造(“撞击”)至3.0英寸的高度,旋转90度并且在B轴上撞击至3.5英寸的高度,并且然后旋转90度并在C轴上撞击至4.0英寸的高度。这一后者结果将产生具有大约4英寸侧面且在立方体的每个正交方向上包括均衡应变的立方体。用于计算在高应变率MAF期间在立方体工件的每一正交轴上的减少的一般方程式提供于方程式1中。

[0099] 方程式1:应变 =  $-\ln(\text{间隔物高度} / \text{起始高度})$

[0100] 用于计算总应变的一般方程式由方程式2提供:

[0101] 方程式2: 
$$\text{总应变} = \sum_{n=1}^i -\ln(\text{间隔物高度} / \text{起始高度})$$

[0102] 不同的减少可通过在锻造装置中使用提供不同间隔物高度的间隔物或通过本领域的普通技术人员已知的任何替代方式来进行。

[0103] 在根据本公开的非限制性实施方案中,现在参见图5并且考虑图3,用于生产超细粒钛合金的方法(70)包括:使钛合金工件 $\beta$ 退火(71);将 $\beta$ 退火的工件24冷却(72)至低于工件的钛合金的 $\beta$ 转变温度的温度;将工件24加热(73)至在工件的钛合金的 $\alpha+\beta$ 相场内的工件锻造温度范围内的工件锻造温度;以及高应变率MAF(74)工件,其中高应变率MAF(74)包括工件的正交轴压力锻造减少至不同的间隔物高度。在根据本公开的多轴锻造(74)的非限制性实施方案中,将工件24在第一正交轴(A-轴)上压力锻造(75)至主要减少间隔物高度。短语“将...压力锻造至主要减少间隔物高度”如本文所用是指将工件沿着正交轴压力锻造至工件的沿特定正交轴的所需最终尺寸。因此,术语“主要减少间隔物高度”被定义为用于沿着每一正交轴获得工件的最终尺寸的间隔物高度。用于主要减少间隔物高度的所有压力锻造步骤应使用足以绝热地加热工件的内部区域的应变率来发生。

[0104] 在第一正交A-轴的方向上将工件24压力锻造(75)至如图3(a)中所示的主要减少间隔物高度之后,过程(70)任选地还包括允许(步骤76,图3(b)中所示)工件的绝热加热的内部区域(未示出)冷却至处于或接近工件锻造温度的温度。内部区域冷却时间可例如在5秒至120秒、10秒至60秒或5秒直至5分钟的范围内,并且普通技术人员将认识到所需的冷却时间将取决于工件的大小、形状和组成,以及围绕工件的环境特性。

[0105] 在任选的内部区域冷却时间期间,根据本文公开的非限制性实施方案的热管理系统33的方面可包括将工件24的外表面区域36加热(步骤77)至处于或接近工件锻造温度的温度。以这种方式,在每次高应变率MAF撞击之前,工件24的温度被维持在处于或接

近工件锻造温度的均匀或接近均匀并且大致上恒温条件下。在某些非限制性实施方案中,使用热管理系统 33 来加热外表面区域 36,并且允许绝热加热的内部区域冷却规定的内部区域冷却时间,在 A、B 和 C 锻造撞击各自中间使工件的温度返回至处于或接近工件锻造温度的大致上均匀的温度。在根据本公开的其它非限制性实施方案中,使用热管理系统 33 来加热外表面区域 36,并且允许绝热加热的内部区域冷却规定的内部区域冷却时间,在 A、B 和 C 锻造撞击各自中间使工件温度返回至工件锻造温度范围内的大致上均匀的温度。

[0106] 在非限制性实施方案中,加热 (77) 工件 24 的外表面区域 36 可使用热管理系统 33 的一个或多个外表面加热机构 38 来完成。可能的外表面加热机构 38 的实例包括但不限于适于工件 24 的火焰加热的火焰加热器 ;适于感应加热的感应加热器 ;和适于辐射加热的辐射加热器。用于加热工件的外表面区域的其它机构和技术对于本领域普通技术人员在考虑本公开后将是显而易知的,并且这类机构和技术在本公开的范围之内。外表面区域加热机构 38 的非限制性实施方案可包括箱式炉 (未示出)。箱式炉可被配置成具有各种加热机构以便使用例如火焰加热机构、辐射加热机构、感应加热机构和 / 或现在或今后为本领域普通技术人员已知的任何其它适合的加热机构中的一种或多种来加热工件的外表面区域。

[0107] 在另一个非限制性实施方案中,可使用热管理系统 33 的一个或多个模具加热器 40 来加热 (34) 工件 24 的外表面区域 36 的温度并且使其保持处于或接近工件锻造温度并且处于工件锻造温度范围内。模具加热器 40 可用于保持模具 42 或模具的压模锻造表面 44 处于或接近工件锻造温度或在工件锻造温度范围内的温度下。在非限制性实施方案中,将热管理系统的模具 42 加热至包括工件锻造温度直至低于工件锻造温度 100 °F (55.6 °C) 的范围内的温度。模具加热器 40 可通过现在或今后为本领域技术人员已知的任何适合的加热机构来加热模具 42 或压模锻造表面 44,所述机构包括但不限于火焰加热机构、辐射加热机构、传导加热机构和 / 或感应加热机构。在非限制性实施方案中,模具加热器 40 可以是箱式炉 (未示出) 的部件。虽然示出热管理系统 33 处于适当位置中并且在多轴锻造过程的冷却步骤期间使用,但应认识到热管理系统 33 在压力锻造步骤期间可能处于或可能不处于适当位置中。

[0108] 在一个非限制性实施方案中,在 A- 轴上压力锻造至主要减少间隔物高度 (75) (其在本文中还被称为减少“**A**”)之后 (参见图 3),并且在任选的允许 (76) 和加热 (77) 步骤 (如果应用)之后,在 B 和 C 轴上将用于阻塞减少间隔物高度的随后压力锻造 (其可包括任选的加热和冷却步骤)应用至“成正方形”工件。短语“压力锻造至…阻塞减少间隔物高度” (在本文中其它地方称为压力锻造至第一阻塞减少间隔物高度 ((78)、(87)、(96)) 和压力锻造至第二阻塞减少间隔物高度 ((81)、(90)、(99))) 被定义为在用于使在压力锻造至主要减少间隔物高度之后在任何面的中心附近发生的凸出减少或“成正方形”的压力锻造步骤。在任何面的中心处或附近的凸出导致三轴应力状态被引入至所述面中,这可能导致工件的断裂。采用压力锻造至第一减少间隔物高度和压力锻造至第二阻塞减少间隔物高度 (在此还称为第一阻塞减少、第二阻塞减少或简单地阻塞减少) 的步骤来使凸出的面变形,以使得工件的所述面在沿着正交轴下一压力锻造至主要减少间隔物高度之前是平的或基本上平的。阻塞减少涉及压力锻造至大于在压力锻造至主要减少间隔物高度的每一步骤中使用的间隔物高度的间隔物高度。虽然本文所公开的全部第一和第二阻塞减少的应变率可能足以绝热地加热工件的内部区域,但在非限制性实施方案中,在所述第一阻塞和

第二阻塞减少期间绝热加热可能不会发生,因为在所述第一和第二阻塞减少中引发的总应变可能不足以显著绝热地加热所述工件。因为阻塞减少被执行至大于在压力锻造至主要减少间隔物高度中使用的间隔物高度的间隔物高度,所以在阻塞减少中添加至工件的应变可能不足以绝热地加热工件的内部区域。正如将看到的那样,在非限制性实施方案中在高应变率 MAF 过程中并入第一和第二阻塞减少产生由以下组成的至少一个循环的锻造顺序:**A-B-C-B-C-A-C**,其中**A**、**B**和**C**包括压力锻造至主要减少间隔物高度,并且其中 B、C 和 A 包括压力锻造至第一或第二阻塞减少间隔物高度;或在另一个非限制性实施例中,由以下组成的至少一个循环:**A-B-C-B-C-A-C-A-B**,其中**A**、**B**和**C**包括压力锻造至主要减少间隔物高度,并且其中 B、C、C、A、A 和 B 包括压力锻造至第一或第二阻塞减少间隔物高度。

[0109] 再次参见图 3 和 5,在一个非限制性实施方案中,在第一正交轴(**A**减少)上压力锻造至主要减少间隔物高度(75)的步骤自后,并且(如果应用)在任选的允许(76)和加热(77)步骤之后,如上文所述,将工件在 B 轴上压力锻造(78)至第一阻塞减少间隔物高度。虽然第一阻塞减少的应变率可能足以绝热地加热工件的内部区域,但在非限制性实施方案中,在所述第一阻塞减少期间绝热加热可能不会发生,因为在所述第一阻塞减少中引发的应变可能不足以显著绝热地加热所述工件。任选地,允许(79)工件的绝热加热的内部区域冷却至处于或接近工件锻造温度的温度,同时将工件的外表面区域加热(80)至处于或接近工件锻造温度的温度。用于上文所公开和本公开的其它实施方案中的**A**减少(75)的所有冷却时间和加热方法适用于步骤(79)和(80)并且适用于允许工件的内部区域冷却并且加热工件的外表面区域的所有任选的后续步骤。

[0110] 接下来将工件在 C 轴上压力锻造(81)至大于主要减少间隔物高度的第二阻塞减少间隔物高度。应用第一和第二阻塞减少来使工件大致上恢复至所述工件的锻造前形状。虽然第二阻塞减少的应变率可能足以绝热地加热工件的内部区域,但在非限制性实施方案中,在所述第二阻塞减少期间绝热加热可能不会发生,因为在所述第二阻塞减少中引发的应变可能不足以显著绝热地加热所述工件。任选地,允许(82)工件的绝热加热的内部区域冷却至处于或接近工件锻造温度的温度,同时将工件的外表面区域加热(83)至处于或接近工件锻造温度的温度。

[0111] 接下来将工件在第二正交轴或 B-轴方向上压力锻造至主要减少间隔物高度(84)。在 B-轴(84)上压力锻造至主要减少间隔物高度在本文被称为**B**减少。任选地,在**B**减少(84)之后,允许(85)工件的绝热加热的内部区域冷却至处于或接近工件锻造温度的温度,同时将工件的外表面区域加热(86)至处于或接近工件锻造温度的温度。

[0112] 接下来将工件在 C 轴上压力锻造(87)至大于主要减少间隔物高度的第一阻塞减少间隔物高度。虽然第一阻塞减少的应变率可能足以绝热地加热工件的内部区域,但在非限制性实施方案中,在所述第一阻塞减少期间绝热加热可能不会发生,因为在所述第一阻塞减少中引发的应变可能不足以显著绝热地加热所述工件。任选地,允许(88)工件的绝热加热的内部区域冷却至处于或接近工件锻造温度的温度,同时将工件的外表面区域加热(89)至处于或接近工件锻造温度的温度。

[0113] 接下来将工件在 A 轴上压力锻造 (90) 至大于主要减少间隔物高度的第二阻塞减少间隔物高度。应用第一和第二阻塞减少来使工件大致上恢复至所述工件的锻造前形状。虽然第二阻塞减少的应变率可能足以绝热地加热工件的内部区域,但在非限制性实施方案中,在所述第二阻塞减少期间绝热加热可能不会发生,因为在所述第二阻塞减少中引发的应变可能不足以显著绝热地加热所述工件。任选地,允许 (91) 工件的绝热加热的内部区域冷却至处于或接近工件锻造温度的温度,同时将工件的外表面区域加热 (92) 至处于或接近工件锻造温度的温度。

[0114] 接下来将工件在第三正交轴或 C 轴方向上压力锻造至主要减少间隔物高度 (93)。在 C-轴 (93) 上压力锻造至主要减少间隔物高度在本文被称为 **C** 减少。任选地,在 **C** 减少 (93) 之后,允许 (94) 工件的绝热加热的内部区域冷却至处于或接近工件锻造温度的温度,同时将工件的外表面区域加热 (95) 至处于或接近工件锻造温度的温度。

[0115] 接下来将工件在 A 轴上压力锻造 (96) 至大于主要减少间隔物高度的第一阻塞减少间隔物高度。虽然第一阻塞减少的应变率可能足以绝热地加热工件的内部区域,但在非限制性实施方案中,在所述第一阻塞减少期间绝热加热可能不会发生,因为在所述第一阻塞减少中引发的应变可能不足以显著绝热地加热所述工件。任选地,允许 (97) 工件的绝热加热的内部区域冷却至处于或接近工件锻造温度的温度,同时将工件的外表面区域加热 (98) 至处于或接近工件锻造温度的温度。

[0116] 接下来将工件在 B 轴上压力锻造 (99) 至大于主要减少间隔物高度的第二阻塞减少间隔物高度。应用第一和第二阻塞减少来使工件大致上恢复至所述工件的锻造前形状。虽然第二阻塞减少的应变率可能足以绝热地加热工件的内部区域,但在非限制性实施方案中,在所述第二阻塞减少期间绝热加热可能不会发生,因为在所述第二阻塞减少中引发的应变可能不足以显著绝热地加热所述工件。任选地,允许 (100) 工件的绝热加热的内部区域冷却至处于或接近工件锻造温度的温度,同时将工件的外表面区域加热 (101) 至处于或接近工件锻造温度的温度。

[0117] 参看图 5,在非限制性实施方案中,重复 (102) 压力锻造步骤 (75)、(78)、(81)、(84)、(87)、(90)、(93)、(96) 和 (99) 中的一个或多个直到实现钛合金工件中的至少 1.0 的总应变。在另一个非限制性实施方案中,重复 (102) 压力锻造步骤 (75)、(78)、(81)、(84)、(87)、(90)、(93)、(96) 和 (99) 中的一个或多个直到实现钛合金工件中的至少 1.0 直至小于 3.5 的总应变。将认识到,在实现至少 1.0 的所需应变或可替代地在至少 1.0 直至小于 3.5 范围中的所需应变之后,在压力锻造步骤 (75)、(78)、(81)、(84)、(87)、(90)、(93)、(96) 和 (99) 中的任一个中,不需要任选的中间平衡步骤(即允许工件的内部区域冷却 (76)、(79)、(82)、(85)、(88)、(91)、(94)、(97) 或 (100) 和加热工件的外表面 (77)、(80)、(83)、(86)、(89)、(92)、(95)、(98) 或 (101)),并且可将工件冷却至环境温度。在非限制性实施方案中,冷却包括液体淬火,例如像水淬火。在另一个非限制性实施方案中,冷却包括以空气冷却或更快的冷却速率冷却。

[0118] 以上描述的过程包括压力锻造至主要减少间隔物高度,接着压力锻造至第一和第二阻塞减少间隔物高度的重复顺序。如公开于以上所述的非限制性实施方案中的表示一个总 MAF 循环的锻造顺序可被表示为 **A-B-C-B-C-A-C-A-B**,其中以粗体表示并且加下划

线的减少（撞击）是压力锻造至主要减少间隔物高度，并且不以粗体表示或加下划线的减少是第一或第二阻塞减少。应理解根据本公开的 MAF 过程的所有压力锻造减少，包括压力锻造至主要减少间隔物高度和所述第一和第二阻塞减少，是以足以绝热地加热工件的内部区域的高应变率，例如且不限于  $0.2\text{s}^{-1}$  至  $0.8\text{s}^{-1}$  范围中或  $0.2\text{s}^{-1}$  至  $0.4\text{s}^{-1}$  范围中的应变率进行的。还应理解，由于与主要减少相比，在这些减少中较低程度的变形，在第一和第二阻塞减少期间绝热加热可能实质上不会发生。还将理解，作为任选的步骤，在连续压力锻造减少中间，允许工件的绝热加热的内部区域冷却至处于或接近工件锻造温度的温度，并且使用本文所公开的热管理系统将工件的外表面加热至处于或接近工件锻造温度的温度。据信当所述方法用于加工较大大小的工件时，这些任选的步骤可能是更有利的。应进一步理解本文所述的 A-B-C-B-C-A-C-A-B 锻造顺序实施方案可全部或部分重复直到实现工件中至少 1.0 或至少 1.0 直至小于 3.5 范围内的总应变。

[0119] 工件中的凸出是由表面模锁和工件的中心附近较热的材料的存在的组合造成的。随着凸出增加，每个面中心经受可引发断裂的渐增的三轴负载。在 A-B-C-B-C-A-C-A-B 顺序中，在每个压力锻造至主要减少间隔物高度中间使用阻塞减少使工件中断裂形成的倾向降低。在非限制性实施方案中，当工件呈立方体形状时，第一阻塞减少的第一阻塞减少间隔物高度可以是至大于主要减少间隔物高度的 40% -60% 的间隔物高度。在非限制性实施方案中，当工件呈立方体形状时，第二阻塞减少的第二阻塞减少间隔物高度可以是至大于主要减少间隔物高度的 15% -30% 的间隔物高度。在另一个非限制性实施方案中，第一阻塞减少间隔物高度可大致上等于第二阻塞减少间隔物高度。

[0120] 在根据本公开的热管理、高应变率多轴锻造的非限制性实施方案中，在至少 1.0 或至少 1.0 直至小于 3.5 范围内的总应变之后，工件包含  $4\mu\text{m}$  或更小的平均  $\alpha$  粒子颗粒大小，其被认为是超细颗粒 (UFG) 大小。在根据本公开的非限制性实施方案中，施加至少 1.0 或至少 1.0 直至小于 3.5 范围内的总应变产生等轴的颗粒。

[0121] 在根据本公开的包括多轴锻造和使用任选的热管理系统的过程的非限制性实施方案中，工件 - 冲压模界面用本领域普通技术人员已知的润滑剂，如但不限于石墨、玻璃和 / 或其它已知的固体润滑剂来润滑。

[0122] 在根据本公开的方法的某些非限制性实施方案中，工件包含选自  $\alpha + \beta$  钛合金和亚稳态  $\beta$  钛合金的钛合金。在另一个非限制性实施方案中，工件包含  $\alpha + \beta$  钛合金。在另一个非限制性实施方案中，工件包含亚稳态  $\beta$  钛合金。在非限制性实施方案中，通过根据本公开的方法加工的钛合金包含有效的  $\alpha$  相沉淀和比 Ti-6-4 合金 (UNS R56400) 的生长动力学更慢的生长动力学，并且这种动力学可在本文中称为“较慢  $\alpha$  动力学”。在非限制性实施方案中，较慢  $\alpha$  动力学是在  $\beta$  转变温度 ( $T_{\beta}$ ) 下在钛合金中的最慢扩散成合金种类的扩散率低于 Ti-6-4 合金中铝的扩散率时实现。例如，由于 Ti-6-2-4-2 合金中另外的颗粒固定元素如硅的存在，Ti-6-2-4-2 合金表现出比 Ti-6-4 合金更慢的  $\alpha$  动力学。此外，由于另外的  $\beta$  稳定化合金添加剂如比 Ti-6-4 合金更高的钼含量的存在，Ti-6-2-4-6 合金具有比 Ti-6-4 合金更慢的  $\alpha$  动力学。在这些合金中较慢  $\alpha$  动力学的结果是在高应变率 MAF 之前使 Ti-6-2-4-6 和 Ti-6-2-4-2 合金退火产生与 Ti-6-4 合金和表现出比 Ti-6-2-4-6 和 Ti-6-2-4-2 合金更快的  $\alpha$  相沉淀和生长动力学的某些其它钛合金相比，相对细的和稳定



的  $\alpha$  板条大小和细的  $\beta$  相结构。术语“较慢  $\alpha$  动力学”在本公开中较前部分进行了进一步详细地讨论。可使用根据本公开的方法的实施方案进行加工的示例性钛合金包括但不限于 Ti-6-2-4-2 合金、Ti-6-2-4-6 合金、ATI 425<sup>®</sup> 合金 (Ti-4Al-2.5V 合金)、Ti-6-6-2 合金和 Ti-6Al-7Nb 合金。

[0123] 在根据本公开的非限制性实施方案中,  $\beta$  退火包括:将工件加热至  $\beta$  退火温度;将工件在所述  $\beta$  退火温度下保持足以形成工件中的 100% 钛  $\beta$  相微观结构的退火时间;并且将工件直接冷却至处于或接近工件锻造温度的温度。在某些非限制性实施方案中,  $\beta$  退火温度是在钛合金的  $\beta$  转变温度直至高于钛合金的  $\beta$  转变温度 300 °F (111 °C) 的温度范围内。非限制性实施方案包括 5 分钟至 24 小时的  $\beta$  退火时间。本领域技术人员在阅读本说明书后将了解其它  $\beta$  退火温度和  $\beta$  退火时间在本公开的实施方案的范围内,并且例如相对较大工件可能需要相对较高  $\beta$  退火温度和 / 或更长  $\beta$  退火时间以便形成 100%  $\beta$  相钛微观结构。

[0124] 在工件保持于  $\beta$  退火温度下以便形成 100%  $\beta$  相微观结构的某些非限制性实施方案中,在将工件冷却至处于或接近工件锻造温度或至环境温度之前,工件也可在钛合金的  $\beta$  相场中的塑性变形温度下塑性变形。工件的塑性变形可包括拉伸、镦粗锻造和高应变率多轴锻造工件中的至少一种。在非限制性实施方案中,  $\beta$  相区中的塑性变形包括将工件镦粗锻造至 0.1 至 0.5 范围内的  $\beta$ -镦粗应变。在某些非限制性实施方案中,塑性变形温度是在包括钛合金的  $\beta$  转变温度直至高于钛合金的  $\beta$  转变温度 300 °F (111 °C) 的温度范围内。

[0125] 图 6 是使高于  $\beta$  转变温度的工件塑性变形并且直接冷却至工件锻造温度的非限制性方法的温度-时间热机械工艺流程图。在图 6 中,非限制性方法 200 包括将包含具有低于 Ti-6-4 合金的  $\alpha$  沉淀和生长动力学的  $\alpha$  沉淀和生长动力学钛合金的工件加热 202 至高于钛合金的  $\beta$  转变温度 206 的  $\beta$  退火温度 204,并且将工件在  $\beta$  退火温度 204 下保持或“均热”208 以便形成工件中的所有  $\beta$  钛相微观结构。在根据本公开的非限制性实施方案中,在均热 208 之后,可使工件塑性变形 210。在非限制性实施方案中,塑性变形 210 包括镦粗锻造。在非限制性实施方案中,塑性变形 210 包括镦粗锻造至 0.3 的真实应变。在非限制性实施方案中,塑性变形 210 包括在  $\beta$  退火温度下的热管理高应变率多轴锻造(未在图 6 中示出)。

[0126] 仍然参看图 6,在  $\beta$  相场中塑性变形 210 之后,在非限制性实施方案中,将工件冷却 212 至钛合金的  $\alpha + \beta$  相场中的工件锻造温度 214。在非限制性实施方案中,冷却 212 包括空气冷却或在比通过空气冷却实现的速率更快的速率下冷却。在另一个非限制性实施方案中,冷却包括液体淬火,如但不限于水淬火。在冷却 212 之后,根据本公开的某些非限制性实施方案将工件高应变率多轴锻造 214。在图 6 的非限制性实施方案中,将工件撞击或压力锻造 12 次,即,工件的三个正交轴分别非连续地压力锻造总共 4 次。换句话说,参看图 2 和 6,将包括步骤 (a)-(任选的 b)、(c)-(任选的 d) 和 (e)-(任选的 f) 的循环执行 4 次。在图 6 的非限制性实施方案中,在涉及 12 次撞击的多轴锻造顺序之后,总应变可能等于例如至少 1.0 或可在至少 1.0 直至小于 3.5 的范围内。在多轴锻造 214 之后,将工件冷却 216 至环境温度。在非限制性实施方案中,冷却 216 包括空气冷却或在比通过空气冷却实现的速率更快的速率下冷却,但其它形式的冷却如但不限于流体或液体淬火也在本文公开的实

施方案的范围内。

[0127] 本公开的非限制性方面包括在  $\alpha + \beta$  相场中的两个温度下高应变率多轴锻造。图 7 是根据本公开的非限制性方法的温度 - 时间热机械工艺流程图, 所述方法包括任选地利用在上文中公开的热管理特征的非限制性实施方案, 在第一工件锻造温度下多轴锻造钛合金工件; 冷却至  $\alpha + \beta$  相中的第二工件锻造温度, 并且任选地利用本文公开的热管理特征的非限制性实施方案, 在第二工件锻造温度下多轴锻造钛合金工件。

[0128] 在图 7 中, 根据本公开的非限制性方法 230 包括将工件加热 232 至高于合金的  $\beta$  转变温度 236 的  $\beta$  退火温度 234 并且将工件在  $\beta$  退火温度 234 下保持或均热 238 以便形成钛合金工件中的所有  $\beta$  相微观结构。在均热 238 之后, 可使工件塑性变形 240。在非限制性实施方案中, 塑性变形 240 包括锻造粗锻造。在另一个非限制性实施方案中, 塑性变形 240 包括锻造粗锻造至 0.3 的应变。在另一个非限制性实施方案中, 使工件塑性变形 240 包括在  $\beta$  退火温度下高应变多轴锻造 (未在图 7 中示出)。

[0129] 仍然参看图 7, 在  $\beta$  相场中的塑性变形 240 之后, 将工件冷却 242 至钛合金的  $\alpha + \beta$  相场中的第一工件锻造温度 244。在非限制性实施方案中, 冷却 242 包括空气冷却和液体淬火中的一种。在冷却 242 之后, 将工件在第一工件锻造温度下高应变率多轴锻造 246, 并且任选地使用根据本文公开的非限制性实施方案的热管理系统。在图 7 的非限制性实施方案中, 将工件在第一工件锻造温度下撞击或压力锻造 12 次, 并且在每次撞击之间旋转  $90^\circ$ , 即工件的三个正交轴分别压力锻造 4 次。换句话说, 参看图 2, 将包括步骤 (a)-(任选的 b)、(c)-(任选的 d) 和 (e)-(任选的 f) 的循环执行 4 次。在图 7 的非限制性实施方案中, 在将工件在第一工件锻造温度下高应变率多轴锻造 246 之后, 将钛合金工件冷却 248 至  $\alpha + \beta$  相场中的第二工件锻造温度 250。在冷却 248 之后, 将工件在第二工件锻造温度下高应变率多轴锻造 250, 并且任选地使用根据本文公开的非限制性实施方案的热管理系统。在图 7 的非限制性实施方案中, 将工件在第二工件锻造温度下撞击或压力锻造总共 12 次。应认识到在第一和第二工件锻造温度下应用于钛合金工件的撞击数量可取决于所需真实应变和所需最终颗粒大小而变化, 并且合适的撞击数量可在考虑本公开之后在无过度实验的情况下来确定。在第二工件锻造温度下多轴锻造 250 之后, 将工件冷却 252 至环境温度。在非限制性实施方案中, 冷却 252 包括空气冷却和液体淬火至环境温度中的一种。

[0130] 在非限制性实施方案中, 第一工件锻造温度是在低于钛合金的  $\beta$  转变温度超过  $100^\circ\text{F}$  ( $55.6^\circ\text{C}$ ) 至低于钛合金的  $\beta$  转变温度  $500^\circ\text{F}$  ( $277.8^\circ\text{C}$ ) 的第一工件锻造温度范围内, 即第一工件锻造温度  $T_1$  在  $T_\beta - 100^\circ\text{F} > T_1 \geq T_\beta - 500^\circ\text{F}$  的范围内。在非限制性实施方案中, 第二工件锻造温度是在低于钛合金的  $\beta$  转变温度超过  $200^\circ\text{F}$  ( $277.8^\circ\text{C}$ ) 至低于  $\beta$  转变温度  $700^\circ\text{F}$  ( $388.9^\circ\text{C}$ ) 的第二工件锻造温度范围内, 即第二工件锻造温度  $T_2$  在  $T_\beta - 200^\circ\text{F} > T_2 \geq T_\beta - 700^\circ\text{F}$  的范围内。在非限制性实施方案中, 钛合金工件包含 Ti-6-2-4-2 合金; 第一工件温度是  $1650^\circ\text{F}$  ( $898.9^\circ\text{C}$ ); 并且第二工件锻造温度是  $1500^\circ\text{F}$  ( $815.6^\circ\text{C}$ )。

[0131] 图 8 是根据本公开的非限制性方法实施方案的温度 - 时间热机械工艺流程图, 所述方法用于使包含钛合金的工件在  $\beta$  转变温度以上塑性变形并且使工件冷却至工件锻造温度, 同时根据本文的非限制性实施方案对工件使用热管理高应变率多轴锻造。在图 8 中, 使用热管理高应变率多轴锻造以用于使钛合金颗粒细化的非限制性方法 260 包括将工件加热 262 至高于钛合金的  $\beta$  转变温度 266 的  $\beta$  退火温度 264 并且将工件在  $\beta$  退火温度

264 下保持或均热 268 以便形成工件中的所有  $\beta$  相微观结构。在  $\beta$  退火温度下使工件均热 268 之后,将工件塑性变形 270。在非限制性实施方案中,塑性变形 270 可包括热管理高应变率多轴锻造。在非限制性实施方案中,在工件通过  $\beta$  转变温度冷却时,使用如本文公开的任选的热管理系统将工件反复高应变率多轴锻造 272。图 8 示出三个中间高应变率多轴锻造 272 步骤,但将了解根据需要,可存在更多或更少中间高应变率多轴锻造 272 步骤。中间高应变率多轴锻造 272 步骤处于均热温度下的初始高应变率多轴锻造步骤 270 与钛合金的  $\alpha + \beta$  相场中的最终高应变率多轴锻造步骤 274 的中间。虽然图 8 示出一个最终高应变率多轴锻造步骤,其中工件的温度保持完全处于  $\alpha + \beta$  相场中,但应了解在阅读本说明书之后可在  $\alpha + \beta$  相场中执行一个以上多轴锻造步骤以便进一步颗粒细化。根据本公开的非限制性实施方案,至少一个最终高应变率多轴锻造步骤完全在钛合金工件的  $\alpha + \beta$  相场中的温度下发生。

[0132] 因为多轴锻造步骤 270、272、274 在工件的温度经由钛合金的  $\beta$  转变温度冷却时发生,所以如图 8 中所示的方法实施方案在本文中称为“经由  $\beta$  变点高应变率多轴锻造”。在非限制性实施方案中,热管理系统(图 3 的 33)在经由  $\beta$  变点多轴锻造中使用以便在每一种经由  $\beta$  变点锻造温度下的每次撞击之前保持工件的温度处于均匀的或大致上均匀的温度下,并且任选地,用于减缓冷却速率。在  $\alpha + \beta$  相场中的工件锻造温度下最终多轴锻造 274 之后,将工件冷却 276 至环境温度。在非限制性实施方案中,冷却 276 包括空气冷却。

[0133] 使用如在上文中公开的热管理系统的多轴锻造的非限制性实施方案可用于使用常规锻压机设备来加工具有大于 4 平方英寸的横截面的钛合金工件,并且立方体形状的工件的大小可按比例决定以便匹配单独压力机的能力。已确定来自  $\beta$ -退火结构的  $\alpha$  薄片或板条在本文非限制性实施方案中公开的工件锻造温度下容易地分解成细微的均匀的  $\alpha$  颗粒。还已确定降低工件锻造温度降低  $\alpha$  粒子大小(颗粒大小)。

[0134] 虽然不希望固守任何特定理论,据信在根据本公开的热管理、高应变率多轴锻造的非限制性实施方案中发生的颗粒细化经由亚动态再结晶来发生。在现有技术慢应变率多轴锻造过程中,动态再结晶在将应变施加于材料期间即刻发生。据信在根据本公开的高应变率多轴锻造中,亚动态再结晶在每次变形或锻造撞击结束时发生,而至少工件的内部区域由于绝热加热而为热的。在根据本公开的热管理、高应变率多轴锻造的非限制性方法中,残余绝热热量、内部区域冷却时间和外表面区域加热影响颗粒细化的程度。

[0135] 本发明人已根据本公开进一步发展替代方法,所述方法提供相对于如上所述的过程的某些优点,包括多轴锻造并且使用热管理系统和包含钛合金的立方体形状的工件。据信以下因素中的一个或多个可不利地将应变集中于工件的核心区域内:(1) 在本文公开的热管理多轴锻造的某些实施方案中使用的立方体工件几何形状、(2) 模具冷淬(即,使模具温度显著下降至低于工件锻造温度),以及(3) 使用高应变率。

[0136] 根据本公开的替代方法可在小钢坯大小的钛合金工件中实现总体上均匀的细颗粒、极细颗粒或超细颗粒大小。换句话说,通过这类替代方法加工的工件可包含所需颗粒大小,如整个工件中的超细颗粒微观结构,而非只在工件的中心区域中。这类替代方法的非限制性实施方案包括对于具有大于 4 平方英寸的横截面的小钢坯进行的“多个锻粗和拉伸”步骤。多个锻粗和拉伸步骤旨在赋予整个工件中的均匀的细颗粒、极细颗粒或超细颗粒微观结构,同时大致上保持工件的原始尺寸。因为这些替代方法包括多个锻粗和拉伸步骤,其

在本文中称为“MUD”方法的实施方案。MUD 方法包括重度塑性变形并且可在小钢坯大小（例如，30 英寸（76.2cm）长度）的钛合金工件中产生均匀的超细颗粒。在根据本公开的 MUD 方法的非限制性实施方案中，用于镦粗锻造和拉伸锻造步骤的应变率在  $0.001s^{-1}$  至  $0.02s^{-1}$  的范围内。相比之下，通常用于常规开式模镦粗和拉伸锻造的应变率在  $0.03s^{-1}$  至  $0.1s^{-1}$  范围内。MUD 的应变率慢地足以防止工件中的绝热加热以便保持锻造温度控制，然而应变率对于商业实践为可接受的。

[0137] MUD 方法的非限制性实施方案的示意性图示提供于图 9 中，并且 MUD 方法的某些实施方案的流程图提供于图 10 中。参看图 9 和 10，使用多个镦粗和拉伸锻造步骤来细化包含钛合金的工件中的颗粒的非限制性方法 300 包括将细长钛合金工件加热 302 至钛合金的  $\alpha + \beta$  相场中的工件锻造温度。在非限制性实施方案中，细长工件的形状是圆柱体或圆柱体样形状。在另一个非限制性实施方案中，工件的形状是八角形圆柱体或正八角形体。

[0138] 细长工件具有起始横截面尺寸。例如，在起始工件为圆柱体的根据本公开的 MUD 方法的非限制性实施方案中，起始横截面尺寸是圆柱体的直径。在起始工件为八角形圆柱体的根据本公开的 MUD 方法的非限制性实施方案中，起始横截面尺寸是八角形横截面的外接圆的直径，即穿过八角形横截面的所有顶点的圆的直径。

[0139] 当细长工件在工件锻造温度下时，将工件进行镦粗锻造 304。在镦粗锻造 304 之后，在非限制性实施方案中，将工件旋转  $90^\circ$  至取向 306，并且然后经受多次拉伸锻造 312。工件的实际旋转是任选的，并且此步骤的目的是将工件相对于锻造装置布置成正确的取向（参看图 9）以便进行后续多次拉伸锻造 312 步骤。

[0140] 多次拉伸锻造包括使工件在旋转方向（由箭头 310 方向指示）中递增地旋转（由箭头 310 描绘），随后在每次递增旋转之后对工件进行拉伸锻造 312。在非限制性实施方案中，重复递增地旋转 310 和拉伸锻造 312 直到工件包括起始横截面尺寸。在非限制性实施方案中，重复镦粗锻造和多次拉伸锻造步骤直到实现工件中的至少 1.0 的总应变。另一个非限制性实施方案包括重复加热、镦粗锻造和多次拉伸锻造步骤直到实现工件中的至少 1.0 直至小于 3.5 的总应变。在另一个非限制性实施方案中，重复加热、镦粗锻造和多次拉伸锻造步骤直到实现工件中的至少 10 的总应变。预计在将 10 的总应变赋予 MUD 锻造时，产生超细颗粒  $\alpha$  微观结构，并且增加赋予工件的总应变产生更小的平均颗粒大小。

[0141] 本公开的一方面是在镦粗和多个拉伸步骤期间使用足以产生钛合金工件的重度塑性变形的应变率，这种重度塑性变形在非限制性实施方案中进一步产生超细颗粒大小。在非限制性实施方案中，在镦粗锻造中使用的应变率在  $0.001s^{-1}$  至  $0.003s^{-1}$  范围内。在另一个非限制性实施方案中，在多次拉伸锻造步骤中使用的应变率在  $0.01s^{-1}$  至  $0.02s^{-1}$  的范围内。在 '538 申请中公开的是这些范围内的应变率不会导致工件的绝热加热，从而允许工件温度控制，并且对于经济上可接受的商业实践来说是充分的。

[0142] 在非限制性实施方案中，在 MUD 方法结束之后，工件大致上具有起始细长物品例如像圆柱体 314 或八角形圆柱体 316 的原始尺寸。在另一个非限制性实施方案中，在 MUD 方法结束之后，工件大致上具有与起始工件相同的横截面。在非限制性实施方案中，单一镦粗需要许多拉伸撞击和中间旋转以便使工件回到工件的形状，包括起始横截面。

[0143] 在其中工件为圆柱体形状的 MUD 方法的非限制性实施方案中，例如，递增地旋转和拉伸锻造还包括以  $15^\circ$  增量旋转圆柱形工件并且随后拉伸锻造的多个步骤，直到圆柱形

工件经由 360° 旋转并且在每个增量下拉伸锻造为止。在其中工件为圆柱体形状的 MUD 方法的非限制性实施方案中,在每次镦粗锻造之后,使用二十四个拉伸锻造步骤(其中在连续拉伸锻造步骤之间具有中间增量旋转)来使工件达到大致上其起始横截面尺寸。在另一个非限制性实施方案中,其中工件为八角形圆柱体形状,递增地旋转和拉伸锻造还包括以 45° 增量旋转圆柱形工件并且随后拉伸锻造的多个步骤,直到圆柱形工件经由 360° 旋转并且在每个增量下拉伸锻造为止。在其中工件为八角形圆柱体形状的 MUD 方法的非限制性实施方案中,在每次镦粗锻造之后,使用通过工件的增量旋转分离的八个锻造步骤来使工件大致上达到其起始横截面尺寸。在 MUD 方法的非限制性实施方案中观察到通过操作设备来操纵八角形圆柱体比通过操作设备来操纵圆柱体更精确。还观察到在 MUD 方法的非限制性实施方案中通过操作设备来操纵八角形圆柱体比在本文公开的热管理高应变率 MAF 过程的非限制性实施方案中使用手钳来操纵立方体形状的工件更精确。在考虑本说明书之后将认识到,各自包括多个拉伸锻造步骤和特定数量角度的中间增量旋转的其它拉伸锻造顺序可用于其它横截面小钢坯形状,以使得在拉伸锻造之后工件的最终形状大致上与在镦粗锻造之前工件的起始形状相同。这类其它可能的顺序可由本领域的技术人员在无过度实验的情况下确定并且包括在本公开的范围之内。

[0144] 在根据本公开的 MUD 方法的非限制性实施方案中,工件锻造温度包括工件锻造温度范围内的温度。在一个非限制性实施方案中,工件锻造温度是在低于钛合金的  $\beta$  转变温度 ( $T_{\beta}$ ) 100 °F (55.6 °C) 至低于钛合金的  $\beta$  转变温度 700 °F (388.9 °C) 的工件锻造温度范围内。在另一个非限制性实施方案中,工件锻造温度是在低于钛合金的  $\beta$  转变温度 300 °F (166.7 °C) 至低于钛合金的  $\beta$  转变温度 625 °F (347 °C) 的温度范围内。在非限制性实施方案中,工件锻造温度范围的下端是  $\alpha + \beta$  相场中的温度,在所述温度下工件表面在锻造撞击期间未发生大致损伤,如本领域普通技术人员在无过度实验的情况下来确定。

[0145] 在根据本公开的 MUD 方法的非限制性实施方案中,具有约 1820 °F (993.3 °C) 的  $\beta$  转变温度 ( $T_{\beta}$ ) 的 Ti-6-2-4-2 合金的工件锻造温度范围可以是例如 1120 °F (604.4 °C) 至 1720 °F (937.8 °C),或在另一个实施方案中可以是 1195 °F (646.1 °C) 至 1520 °F (826.7 °C)。

[0146] MUD 方法的非限制性实施方案包括多个再加热步骤。在非限制性实施方案中,在镦粗锻造钛合金工件之后,将钛合金工件加热至工件锻造温度。在另一个非限制性实施方案中,在多次拉伸锻造的拉伸锻造步骤之前,将钛合金工件加热至工件锻造温度。在另一个非限制性实施方案中,在需要将工件加热以便在镦粗或拉伸锻造步骤之后使实际工件温度回到或接近工件锻造温度。

[0147] 已确定 MUD 方法的实施方案赋予附加功或极端变形,也称为重度塑性变形,其旨在产生包含钛合金的工件中的超细颗粒。不意图受任何特定操作理论约束,据信与正方形或矩形横截面形状的工件相比,圆柱形和八角形圆柱形工件的圆形或八角形横截面形状分别在 MUD 方法期间使应变更均匀地分布在工件的横截面区域上。工件与锻模之间的摩擦的有害影响也通过减少与模具接触的工件的面积来减少。

[0148] 另外,还确定通过降低 MUD 方法期间的温度而使最终颗粒大小减少至所使用的具体温度特有的大小。参看图 10,在用于细化工件颗粒大小的方法 400 的非限制性实施方案中,在工件锻造温度下通过 MUD 方法来加工工件之后,工件的温度可冷却 416 至第二工件锻

造温度。在非限制性实施方案中,在将工件冷却至第二工件锻造温度之后,工件在第二工件锻造温度下镦粗锻造 418。将工件旋转 420 或以另外的方式相对于锻压机定向以用于后续拉伸锻造步骤。工件在第二工件锻造温度下多步拉伸锻造 422。在第二工件锻造温度下多步拉伸锻造 422 包括在旋转方向中递增地旋转 424 工件(参看图 9),以及在每次递增旋转之后在第二工件锻造温度下拉伸锻造 426。在非限制性实施方案中,重复镦粗、递增地旋转 424 和拉伸锻造 426 的步骤直到工件包括起始横截面尺寸为止。在另一个非限制性实施方案中,重复在第二工件温度下镦粗锻造 418、旋转 420 和多步拉伸锻造 422 的步骤直到实现工件中的至少 1.0 或 1.0 直至小于 3.5 范围内或高达 10 或更大的总应变为止。应认识到 MUD 方法可持续直到将任何所需总应变赋予钛合金工件为止。

[0149] 在包括多温度 MUD 方法实施方案的非限制性实施方案中,工件锻造温度,或第一工件锻造温度是约 1600 °F (871.1°C) 并且第二工件锻造温度是约 1500 °F (815.6°C)。低于第一和第二工件锻造温度的后续工件锻造温度,如第三工件锻造温度、第四工件锻造温度等等在本公开的非限制性实施方案的范围内。

[0150] 当锻造继续进行时,颗粒细化导致在固定温度下的屈服应力降低。已确定降低连续镦粗和拉伸步骤的锻造温度使屈服应力保持恒定并且增加微观结构细化的速率。预计在根据本公开的 MUD 的非限制性实施方案中,至少 1.0、在至少 1.0 直至小于 3.5 的范围内或高达 10 的总应变产生钛合金工件中的均匀的等轴  $\alpha$  超细颗粒微观结构,并且在将高达 10 的总应变赋予 MUD 锻造之后,两种温度(或多温度)MUD 方法的较低温度可决定最终颗粒大小。

[0151] 本公开的一方面包括在通过 MUD 方法加工工件之后,在不使细化颗粒大小变粗的情况下进行后续变形步骤,只要工件的温度随后未加热至高于钛合金的  $\beta$  转变温度。举例来说,在非限制性实施方案中,在 MUD 方法之后的后续变形实践可包括在钛合金的  $\alpha + \beta$  相场中的温度下的拉伸锻造、多个拉伸锻造、镦粗锻造或这些锻造技术中的两种或更多种的任何组合。在非限制性实施方案中,后续变形或锻造步骤包括多次拉伸锻造、镦粗锻造和拉伸锻造的组合以便将圆柱体样或其它细长工件的起始横截面尺寸减少至横截面尺寸的一部分,例如像但不限于横截面尺寸的一半、横截面尺寸的四分之一等等,同时仍然维持钛合金工件中的均匀的细颗粒、极细颗粒或超细颗粒结构。

[0152] 在 MUD 方法的非限制性实施方案中,工件包含选自以下组成的组的钛合金: $\alpha + \beta$  钛合金和亚稳态  $\beta$  钛合金。在 MUD 方法的另一个非限制性实施方案中,工件包含  $\alpha + \beta$  钛合金。在本文公开的多个镦粗和拉伸过程的另一个非限制性实施方案中,工件包含亚稳态  $\beta$  钛合金。在 MUD 方法的非限制性实施方案中,工件是选自 Ti-6-2-4-2 合金、Ti-6-2-4-6 合金、ATI 425<sup>®</sup> 钛合金 (Ti-4Al-2.5V) 和 Ti-6-6-2 合金的钛合金。

[0153] 在根据本公开的 MUD 实施方案将工件加热至  $\alpha + \beta$  相场中的工件锻造温度之前,在非限制性实施方案中工件可加热至  $\beta$  退火温度,在  $\beta$  退火温度下保持足以形成工件中的 100%  $\beta$  相钛微观结构的  $\beta$  退火时间,并且冷却至环境温度。在非限制性实施方案中, $\beta$  退火温度是在包括钛合金的  $\beta$  转变温度直至高于钛合金的  $\beta$  转变温度 300 °F (111°C) 的  $\beta$  退火温度范围内。在非限制性实施方案中, $\beta$  退火时间是 5 分钟至 24 小时。

[0154] 在非限制性实施方案中,工件是在所有或某些表面上以减少工件与锻造模具之间摩擦的润滑涂层来涂布的小钢坯。在非限制性实施方案中,润滑涂层是固体润滑剂,如但不

限于石黑和玻璃润滑剂之一。现在或今后为本领域普通技术人员已知的其它润滑涂层在本公开的范围内。另外,在使用圆柱体样或其它细长形状的工件的 MUD 方法的非限制性实施方案中,工件与锻造模具之间的接触面积相对于立方体形状的工件的多轴锻造中的接触面积是较小的。例如,在 4 英寸立方体的情况下,立方体的两个整个 4 英寸 × 4 英寸面与模具相接触。在 5 英尺长小钢坯的情况下,小钢坯长度大于典型的 14 英寸长模具,并且减少的接触面积导致减少的模具摩擦和更均匀的钛合金工件微观结构和宏观结构。

[0155] 在根据本公开的 MUD 实施方案将包含钛合金的工件加热至  $\alpha + \beta$  相场中的工件锻造温度之前,在非限制性实施方案中,将工件在保持足以形成钛合金中的 100%  $\beta$  相的  $\beta$  退火时间之后并且在将合金冷却至环境温度之前在钛合金的  $\beta$  相场中的塑性变形温度下塑性变形。在非限制性实施方案中,塑性变形温度等于  $\beta$  退火温度。在另一个非限制性实施方案中,塑性变形温度是在包括钛合金的  $\beta$  转变温度直至高于钛合金的  $\beta$  转变温度 300 °F (111 °C) 的塑性变形温度范围内。

[0156] 在 MUD 方法的非限制性实施方案中,使钛合金的  $\beta$  相场中的工件塑性变形包括对钛合金工件进行拉伸、镦粗锻造和高应变率多轴锻造操作中的至少一种。在另一个非限制性实施方案中,使钛合金的  $\beta$  相场中的工件塑性变形包括根据本公开的非限制性实施方案的多个镦粗和拉伸锻造,并且其中使工件冷却至处于或接近工件锻造温度包括空气冷却。在另一个非限制性实施方案中,使钛合金的  $\beta$  相场中的工件塑性变形包括将工件镦粗锻造至高度或另一种尺寸如长度减少 30% - 35%。

[0157] 本公开的 MUD 方法的另一方面可包括在锻造期间加热锻造模具。非限制性实施方案包括将用于锻造工件的锻造机的模具加热至由工件锻造温度至低于工件锻造温度 100 °F (55.6 °C) 所界定的温度范围内的温度。

[0158] 在根据本公开的 MUD 方法的非限制性实施方案中,一种用于生产超细粒钛合金的方法包括:选择具有比 Ti-6-4 合金更慢的  $\alpha$  沉淀和生长动力学的钛合金;将所述合金  $\beta$  退火以提供细的和稳定的  $\alpha$  板条结构;并且根据本公开将所述合金高应变率多轴锻造至至少 1.0、或在至少 1.0 直至小于 3.5 的范围内的总应变。所述钛合金可选自在  $\beta$  退火之后提供细的和稳定的  $\alpha$  板条结构的  $\alpha + \beta$  钛合金和亚稳态  $\beta$  钛合金。

[0159] 据信本文公开的某些方法还可应用于除钛合金以外的金属和金属合金以便减少那些合金的工件的颗粒大小。本公开的另一方面包括金属和金属合金的高应变率多步锻造的方法的非限制性实施方案。所述方法的非限制性实施方案包括将包含金属或金属合金的工件加热至工件锻造温度。在加热之后,工件在足以绝热地加热工件的内部区域的应变率下在工件锻造温度下锻造。在锻造之后,在下一个锻造步骤之前使用等待期。在等待期期间,允许金属合金工件的绝热加热的内部区域的温度冷却至工件锻造温度,同时将工件的至少一个表面区域加热至工件锻造温度。锻造工件,并且然后在将金属合金工件的至少一个表面区域加热至工件锻造温度的同时允许工件的绝热加热的内部区域平衡至工件锻造温度的步骤重复进行直到获得所需特性为止。在非限制性实施方案中,锻造包括压力锻造、镦粗锻造、拉伸锻造和滚动锻造中的一个或多个。在另一个非限制性实施方案中,金属合金选自由以下组成的组:钛合金、锆和锆合金、铝合金、铁合金和超合金。在另一个非限制性实施方案中,所需特性是所赋予的应变、平均颗粒大小、形状和机械性质中的一个或多个。机械性质包括但不限于强度、延展性、断裂韧性和硬度。

[0160] 以下实施例旨在进一步描述某些非限制性实施方案而不限制本发明的范围。本领域的普通技术人员将认识到,可能存在在本发明范围内的以下实施例的变化形式,本发明的范围仅由权利要求书限定。

#### [0161] 实施例 1

[0162] 将 Ti-6-2-4-2 合金棒根据在工业中通过规格编号 AMS 4976 识别的商业锻造工艺进行加工,所述工艺通常用于加工 Ti-6-2-4-2 合金。通过参考 AMS 4976 规格,本领域普通技术人员了解所述工艺的细节以实现本说明书中给出的机械特性和微观结构。在加工后,从金相上制备合金并且用显微镜评估微观结构。如作为图 11(a) 包括的所制备的合金的显微照片中所示,微观结构包括近似  $20\ \mu\text{m}$  或更大的  $\alpha$  颗粒(图像中的颜色较浅的区域)。

[0163] 根据本公开内的非限制性实施方案,将 Ti-6-2-4-2 合金的 4.0 英寸立方体形状的工件在  $1950\ ^\circ\text{F}$  ( $1066\ ^\circ\text{C}$ ) 下  $\beta$  退火 1 小时并且然后空气冷却至环境温度。在冷却之后,将  $\beta$  退火的立方体形状的工件加热至  $1600\ ^\circ\text{F}$  ( $871.1\ ^\circ\text{C}$ ) 的工件锻造温度并且使用高应变率 MAF 的四次撞击进行锻造。撞击是对以下正交轴进行,按以下顺序:A-B-C-A。撞击是至 3.25 英寸的间隔物高度,并且冲压速度是每秒 1 英寸。对压力机不存在应变率控制,但是对于 4.0 英寸立方体,这种冲压速度在  $0.25\text{s}^{-1}$  的压制期间产生最小应变率。连续正交撞击之间的时间是约 15 秒。应用于工件的总应变是 1.37。以这种方式加工的 Ti-6-2-4-2 合金的微观结构描绘于图 11(b) 的显微图像中。大部分  $\alpha$  粒子(浅色区域)是近似  $4\ \mu\text{m}$  或更小,这大致上比通过以上所讨论的商业锻造工艺所产生并由图 11(a) 的显微图像所表示的  $\alpha$  颗粒更细。

#### [0164] 实施例 2

[0165] 将 Ti-6-2-4-6 合金棒根据通常用于 T-6-2-4-6 合金的商业锻造工艺,即根据规格 AMS 4981 进行加工。通过参考 AMS 4981 规格,本领域普通技术人员了解所述工艺的细节以实现本说明书中给出的机械特性和微观结构。在加工后,从金相上制备合金并且用显微镜评估微观结构。如图 12(a) 中所示的制备的合金的显微照片中所示,微观结构表现出近似  $10\ \mu\text{m}$  或更大的  $\alpha$  颗粒(颜色较浅的区域)。

[0166] 在根据本公开的非限制性实施方案中,将 Ti-6-2-4-6 合金的 4.0 英寸立方体形状的工件在  $1870\ ^\circ\text{F}$  ( $1066\ ^\circ\text{C}$ ) 下  $\beta$  退火 1 小时并且然后空气冷却。在冷却之后,将  $\beta$  退火的立方体形状的工件加热至  $1500\ ^\circ\text{F}$  ( $815.6\ ^\circ\text{C}$ ) 的工件锻造温度并且使用高应变率 MAF 的四次撞击进行锻造。撞击是对以下正交轴进行并且按照以下顺序:A-B-C-A。撞击是至 3.25 英寸的间隔物高度,并且冲压速度是每秒 1 英寸。对压力机不存在应变率控制,但是对于 4.0 英寸立方体,这种冲压速度在  $0.25\text{s}^{-1}$  的压制期间产生最小应变率。连续正交撞击之间的时间是约 15 秒。应用于工件的总应变是 1.37。以这种方式加工的合金的微观结构描绘于图 12(b) 的显微图像中。据观察大部分  $\alpha$  粒子(浅色区域)是近似  $4\ \mu\text{m}$  或更小,并且在任何情况下比通过以上所讨论的商业锻造工艺所产生并由图 12(a) 的显微图像所表示的  $\alpha$  颗粒更细得多。

#### [0167] 实施例 3

[0168] 在根据本公开的非限制性实施方案中,将 Ti-6-2-4-6 合金的 4.0 英寸立方体形状的工件在  $1870\ ^\circ\text{F}$  ( $1066\ ^\circ\text{C}$ ) 下  $\beta$  退火 1 小时并且然后空气冷却。在冷却之后,将  $\beta$  退火的立方体形状的工件加热至  $1500\ ^\circ\text{F}$  ( $815.6\ ^\circ\text{C}$ ) 的工件锻造温度并且使用高应变率 MAF 的



三次撞击进行锻造,在 A、B 和 C 轴上各一次(即所述撞击是对以下正交轴进行并且是按以下顺序:A-B-C)。撞击是至 3.25 英寸的间隔物高度,并且冲压速度是每秒 1 英寸。对压力机不存在应变率控制,但是对于 4.0 英寸立方体,这种冲压速度在  $0.25\text{s}^{-1}$  的压制期间产生最小应变率。连续撞击之间的时间是约 15 秒。在 A-B-C 撞击循环之后,将工件再加热至  $1500\text{ }^{\circ}\text{F}$  ( $815.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) 持续 30 分钟。立方体然后进行高应变率 MAF,其中在 A、B 和 C 轴上各自一次撞击,即所述撞击是对以下正交轴进行并且是按以下顺序:A-B-C。所述撞击是至相同间隔物高度并且在如用于第一 A-B-C 撞击顺序的撞击之间使用相同冲压速度和时间。在第二 A-B-C 撞击顺序之后,将工件再加热至  $1500\text{ }^{\circ}\text{F}$  ( $815.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) 持续 30 分钟。立方体然后进行高应变率 MAF,其中在 A、B 和 C 轴中的每个处一次撞击,即 A-B-C 顺序。所述撞击是至相同间隔物高度并且在如第一 A-B-C 撞击顺序中的撞击之间使用相同冲压速度和时间。这一高应变率多轴锻造过程的实施方案赋予 3.46 的应变。以这种方式加工的合金的微观结构描绘于图 13 的显微图像中。据观察大部分  $\alpha$  粒子(较浅颜色区域)是近似  $4\text{ }\mu\text{m}$  或更少。据信可能  $\alpha$  粒子包含单个  $\alpha$  颗粒并且  $\alpha$  颗粒各自具有  $4\text{ }\mu\text{m}$  或更小的颗粒大小并且在形状上等轴。

#### [0169] 实施例 4

[0170] 在根据本公开的非限制性实施方案中,将 Ti-6-2-4-2 合金的 4.0 英寸立方体形状的工件在  $1950\text{ }^{\circ}\text{F}$  ( $1066\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) 下  $\beta$  退火 1 小时并且然后空气冷却。在冷却之后,将  $\beta$  退火的立方体形状的工件加热至  $1700\text{ }^{\circ}\text{F}$  ( $926.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) 的工件锻造温度并且保持 1 小时。在  $1700\text{ }^{\circ}\text{F}$  ( $926.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) 下采用两个高应变率 MAF 循环(2 个三次 A-B-C 撞击顺序,总计 6 次撞击)。连续撞击之间的时间是约 15 秒。锻造顺序是:A 撞击至 3 英寸终止;B 撞击至 3.5 英寸终止;并且 C 撞击至 4.0 英寸终止。这种锻造顺序每一三次撞击 MAF 顺序对所有三个正交轴提供相等应变。冲压速度是 1 英寸/秒。对压力机不存在应变率控制,但是对于 4.0 英寸立方体,这种冲压速度在  $0.25\text{s}^{-1}$  的压制期间产生最小应变率。每循环总应变是在各方向上小于锻造至 3.25 英寸减少,如在之前实施例中。

[0171] 将工件加热至  $1650\text{ }^{\circ}\text{F}$  ( $898.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) 并且经受高强度 MAF 用于三次另外的撞击(即,一个另外的 A-B-C 高应变率 MAF 循环)。锻造顺序是:A 撞击至 3 英寸终止;B 撞击至 3.5 英寸终止;并且 C 撞击至 4.0 英寸终止。在锻造之后,赋予工件的总应变是 2.59。

[0172] 实施例 4 的锻造工件的微观结构描绘于图 14 的显微图像中。据观察大多数  $\alpha$  粒子(较浅颜色区域)是呈网状结构。据信可能  $\alpha$  粒子包含单个  $\alpha$  颗粒并且  $\alpha$  颗粒各自具有  $4\text{ }\mu\text{m}$  或更小的颗粒大小并且在形状上等轴。

#### [0173] 实施例 5

[0174] 在根据本公开的非限制性实施方案中,将 Ti-6-2-4-2 合金的 4.0 英寸立方体形状的工件在  $1950\text{ }^{\circ}\text{F}$  ( $1066\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) 下  $\beta$  退火 1 小时并且然后空气冷却。在冷却之后,将  $\beta$  退火的立方体形状的工件加热至  $1700\text{ }^{\circ}\text{F}$  ( $926.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) 的工件锻造温度并且保持 1 小时。采用根据本公开的 MAF 以便将 6 次压力锻造至主要减少间隔物高度 (**A**, **B**, **C**, **A**, **B**, **C**) 应用至立方体形状的工件。此外,在每次压力锻造至 3.25 英寸主要减少间隔物高度之间,对其它轴进行第一和第二阻塞减少以便使工件“成方形”。所使用的总体锻造顺序是如下,其中粗体且加下划线的撞击是压力锻造至主要减少间隔物高度:

**A-B-C-B-C-A-C-A-B-A-B-C-B-C-A-C**。

[0175] 所使用的锻造顺序,包括主要、第一阻塞和第二阻塞间隔物高度(以英寸计)在以下表中列出。冲压速度是 1 英寸/秒。对压力机不存在应变率控制,但是对于 4.0 英寸立方体,这种冲压速度在  $0.25\text{s}^{-1}$  的压制期间产生最小应变率。撞击之间经过的时间是约 15 秒。在根据这个非限制性实施方案的热管理 MAF 之后的总应变是 2.37。

[0176]

	轴和间隔物高度(英寸)		
撞击	A	B	C
1	<b><u>3.25</u></b>		
2		4.25	
3			4.25

[0177]

4		<b><u>3.25</u></b>	
5			4.75
6	4		
7			<b><u>3.25</u></b>
8	4.75		
9		4	
10	<b><u>3.25</u></b>		
11		4.75	
12			4
13		<b><u>3.25</u></b>	
14			4.75
15	4		
16			<b><u>3.25</u></b>
总应变	2.37		

[0178] 通过这个实施例 5 中描述的过程锻造的工件的微观结构描绘于图 15 的显微图像中。据观察大多数  $\alpha$  粒子(较浅颜色区域)是细长的。据信可能  $\alpha$  粒子包含单个  $\alpha$  颗粒并且  $\alpha$  颗粒各自具有  $4\ \mu\text{m}$  或更小的颗粒大小并且在形状上等轴。

[0179] **实施例 6**

[0180] 在根据本公开的非限制性实施方案中,将 Ti-6-2-4-2 合金的 4.0 英寸立方体形状的工件在  $1950\ \text{F}$  ( $1066\ \text{C}$ ) 下  $\beta$  退火 1 小时并且然后空气冷却。对工件进行根据本公开的实施方案的热管理高应变率 MAF,包括在  $1900\ \text{C}$  下 6 次撞击(2 个 A-B-C MAF 循环)。冲压速度是 1 英寸/秒。对压力机不存在应变率控制,但是对于 4.0 英寸立方体,这种冲压速度在  $0.25\text{s}^{-1}$  的压制期间产生最小应变率。具有中间保持的 6 次撞击的顺序被设计来在 MAF 期间通过  $\beta$  转变温度加热工件的表面,并且这因此可被称为通过转变高应变率 MAF。所述过程导致细化表面结构并且最小化随后锻造期间的断裂。然后在  $1650\ \text{F}$  ( $898.9\ \text{C}$ ) 即低于  $\beta$  转变温度下加热工件 1 小时。将根据本公开的实施方案的 MAF 应用于工件,包括 6 次撞击(两个 A-B-C MAF 循环),其中在撞击之间约 15 秒。第一三次撞击(第一 A-B-C MAF

循环中的撞击)以 3.5 英寸间隔物高度进行,并且第二 3 次撞击(第二 A-B-C MAF 循环中的撞击)以 3.25 英寸间隔物高度进行。将工件加热至 1650 °F 并且在以 3.5 英寸间隔物撞击与以 3.25 英寸间隔物撞击之间保持 30 分钟。用于第一 3 次撞击的较小减少(即,较大间隔物高度)被设计成在较小减少破坏可导致断裂的边界结构时抑制断裂。将工件再加热至 1500 °F (815.6°C)持续 1 小时。然后应用根据本公开的实施方案的 MAF,使用 3 次 A-B-C 撞击(一个 MAF 循环)至 3.25 英寸减少,其中在各撞击之间具有 15 秒。这一更重减少顺序被设计成将另外的功放入非边界结构。实施例 6 中描述的所有撞击的冲压速度是 1 英寸/秒。

[0181] 3.01 的总应变被赋予实施例 6 的工件。从实施例 6 的热管理 MAF 工件的中心的代表性显微照片在图 16(a) 中示出。实施例 6 的热管理 MAF 工件的表面的代表性显微照片在图 16(b) 中呈现。表面微观结构(图 16(b))是大致上细化的并且大多数粒子和/或颗粒具有约 4 μm 或更小的大小,其是超细颗粒微观结构。图 16(a) 中所示的中心微观结构显示高度细化的颗粒,并且据信可能 α 粒子包含单个 α 颗粒并且 α 颗粒各自具有 4 μm 或更小的颗粒大小并且在形状上等轴。

[0182] 应了解本说明书示出与清晰了解本发明相关的本发明的那些方面。对于本领域普通技术人员显而易见并且因此不促进更好了解本发明的某些方面未予以呈现以便简化本说明书。虽然本文中仅必要地描述了有限数量的本发明实施方案,但是本领域普通技术人员在考虑前述描述后将了解可使用本发明的许多改进和变化。本发明的所有这类变化和改进行意图由前述描述和以下权利要求书来涵盖。

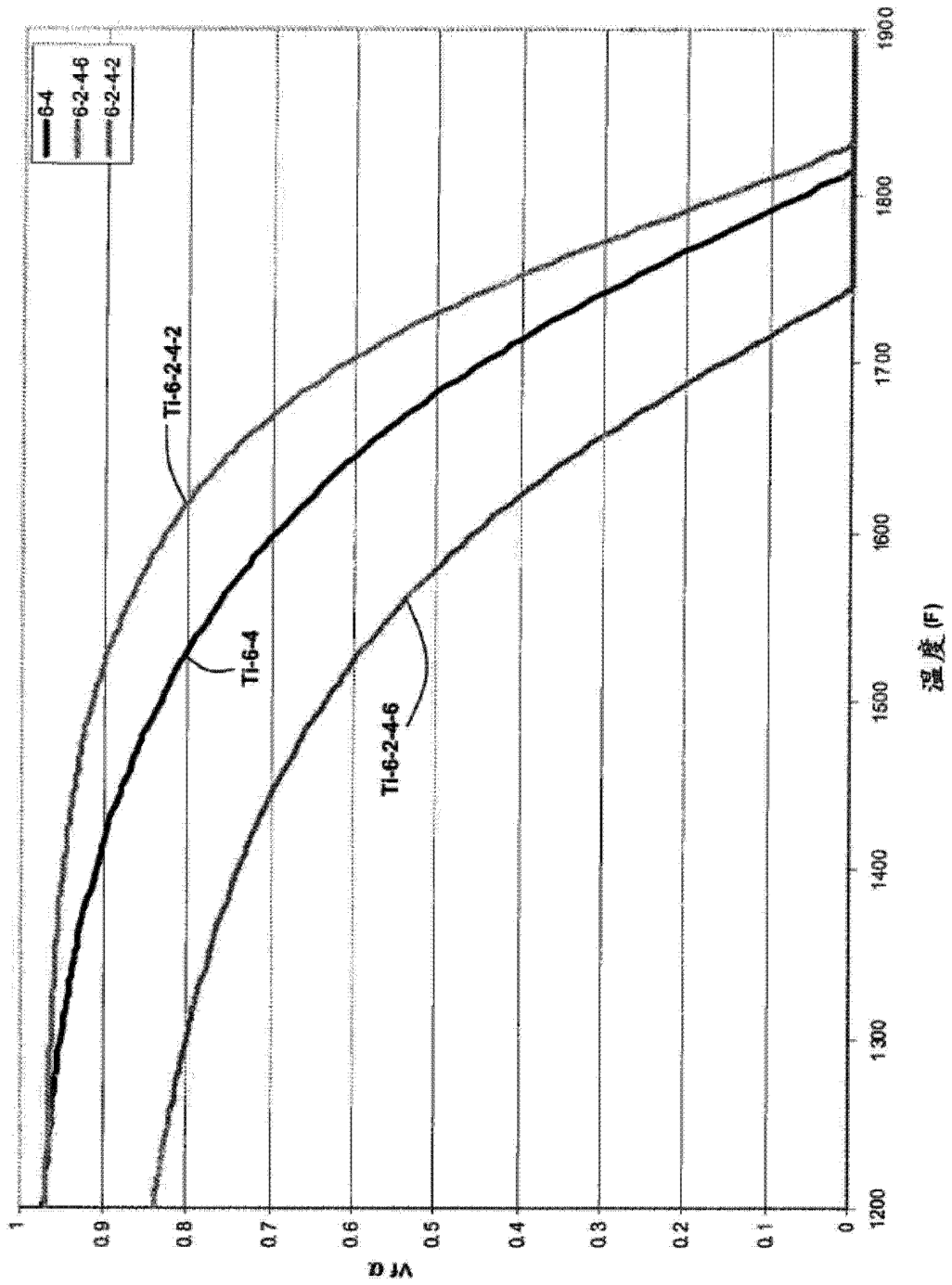


图 1

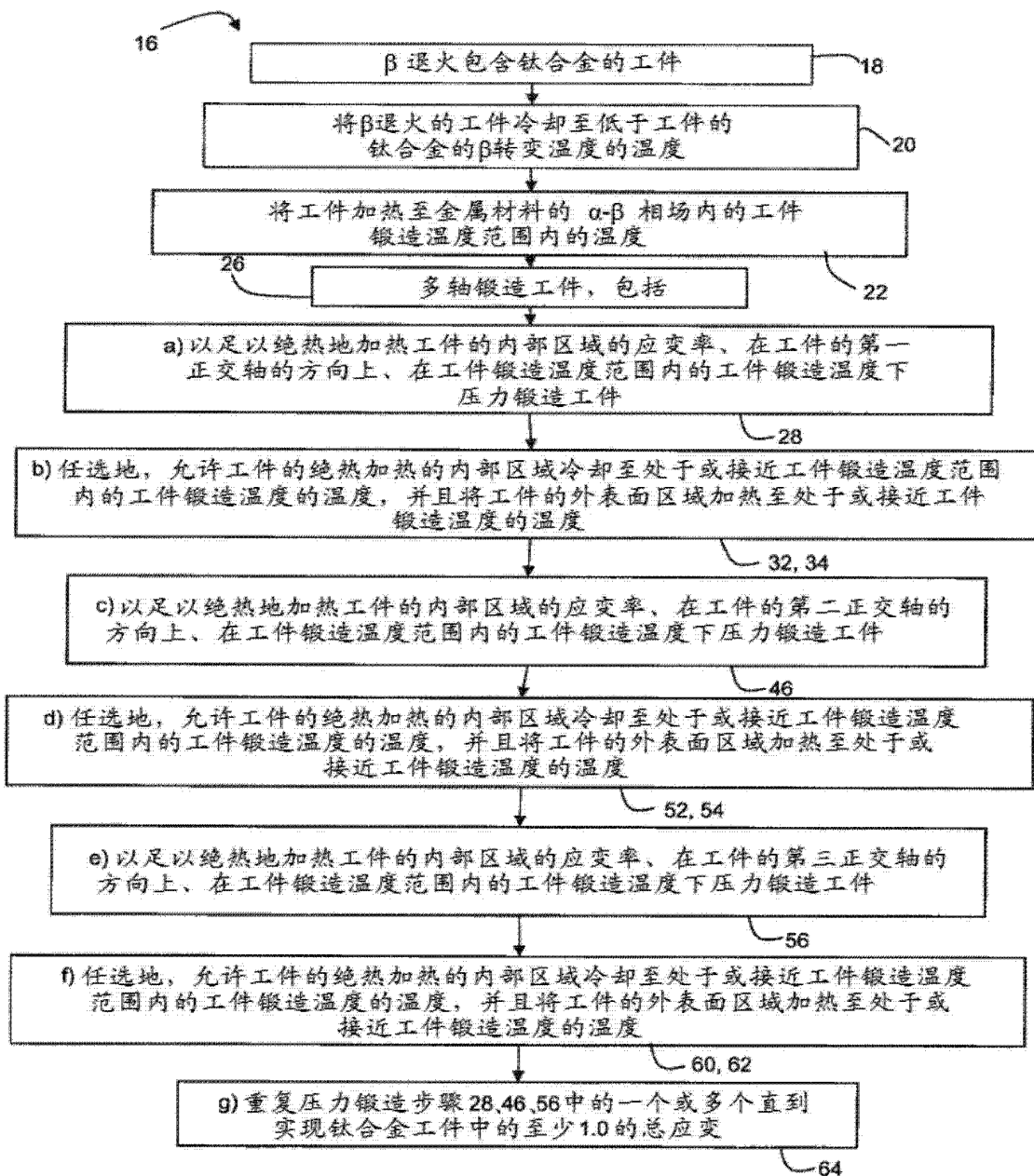


图 2

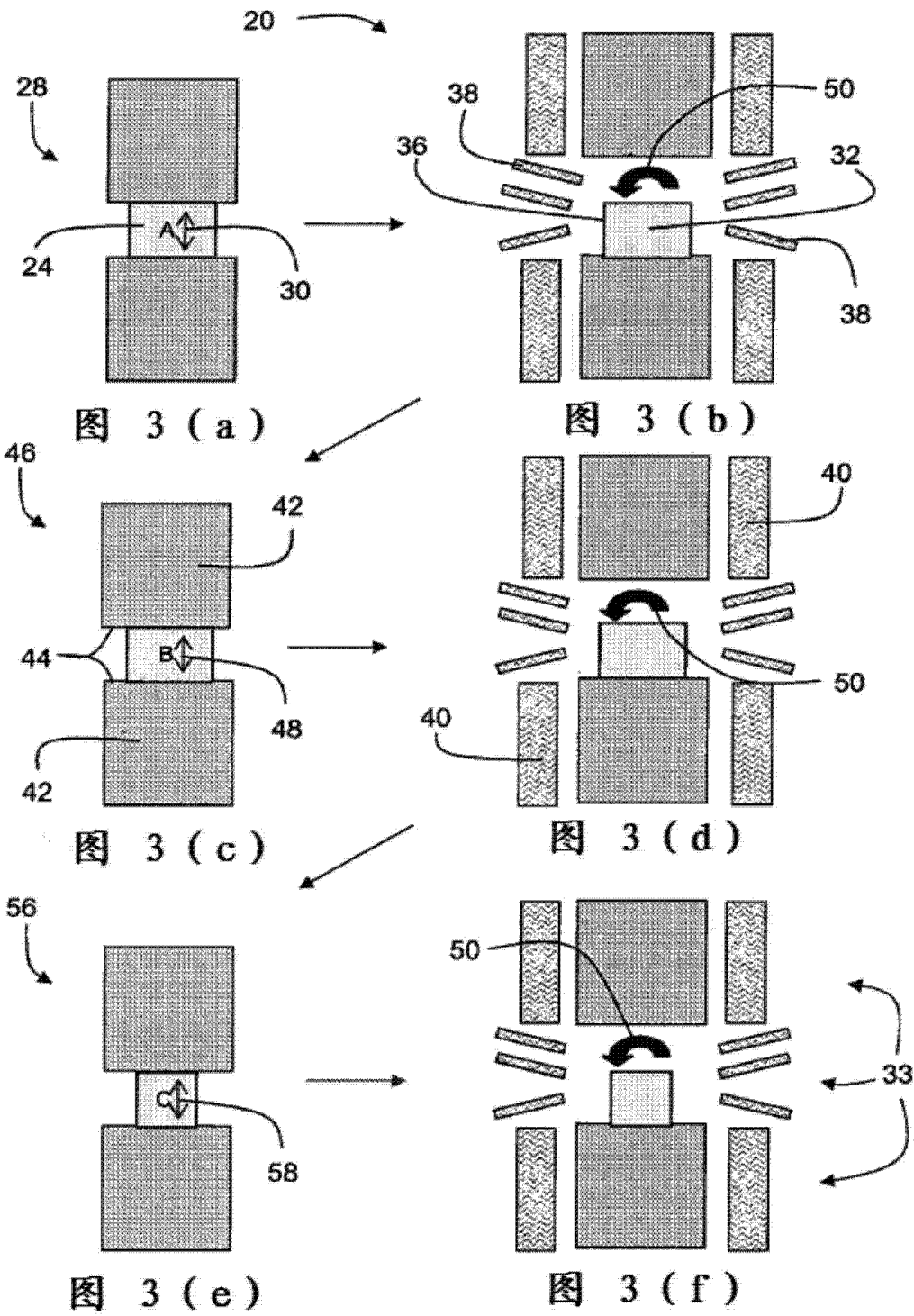


图 3

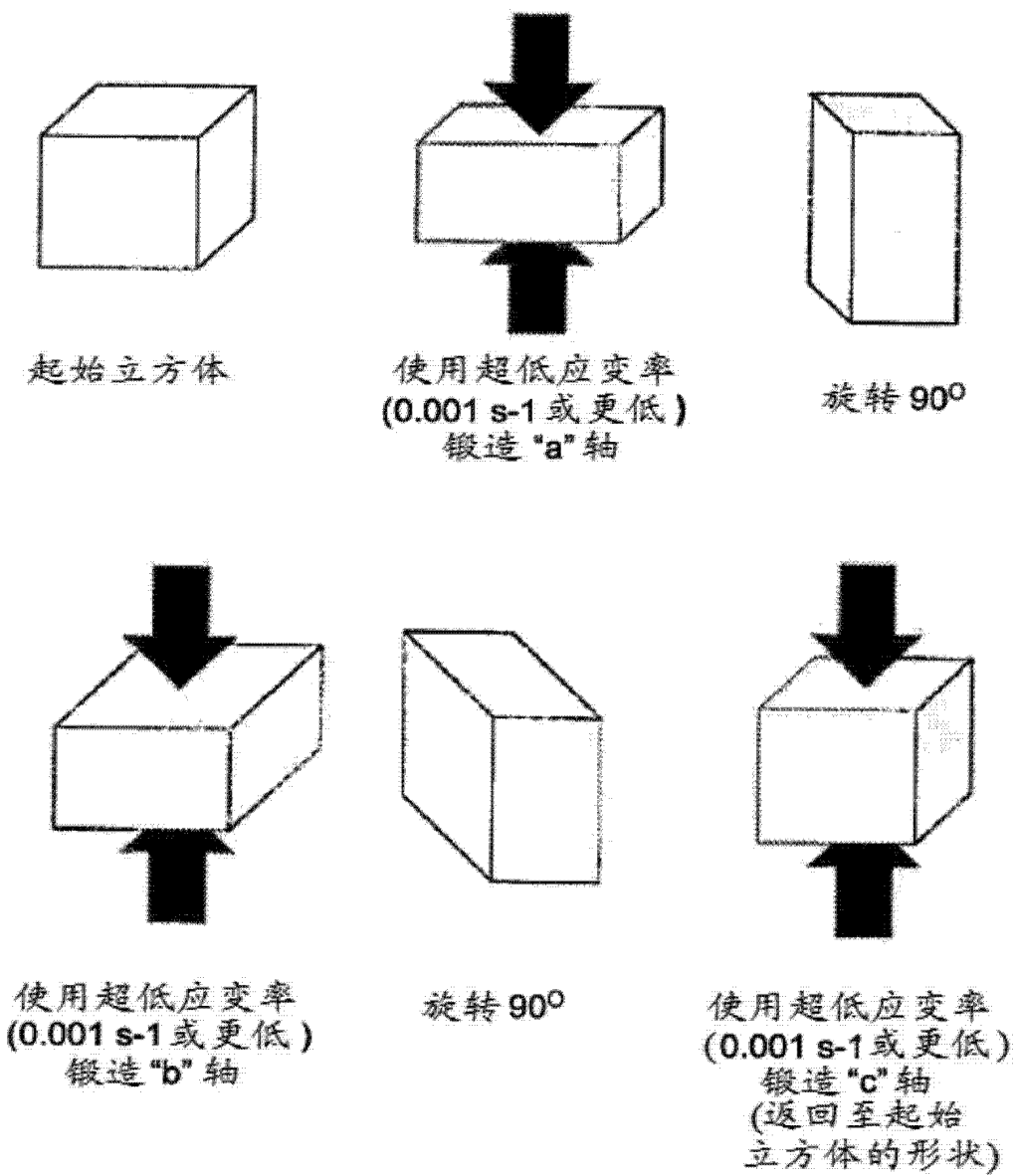


图 4 现有技术

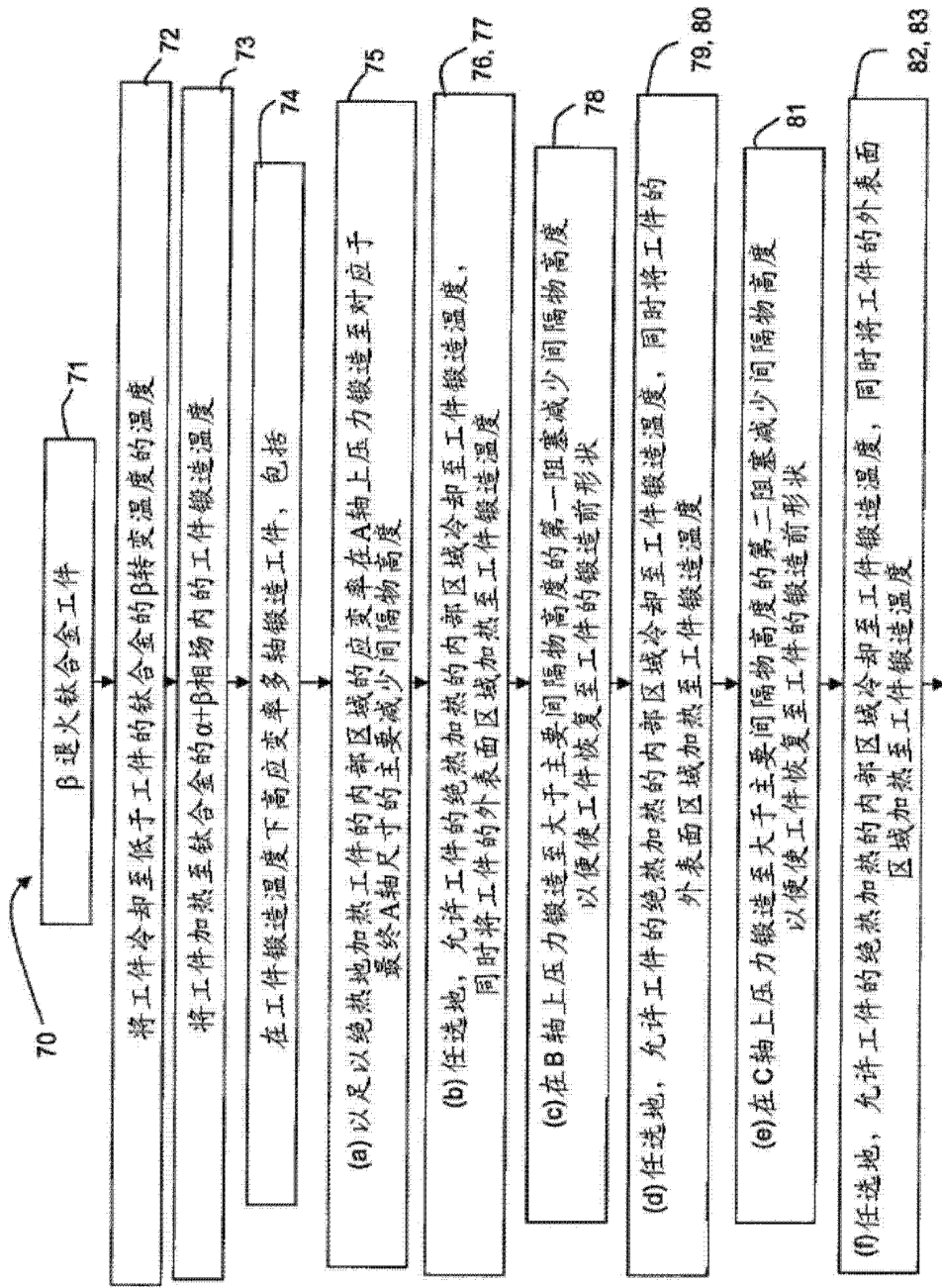


图 5



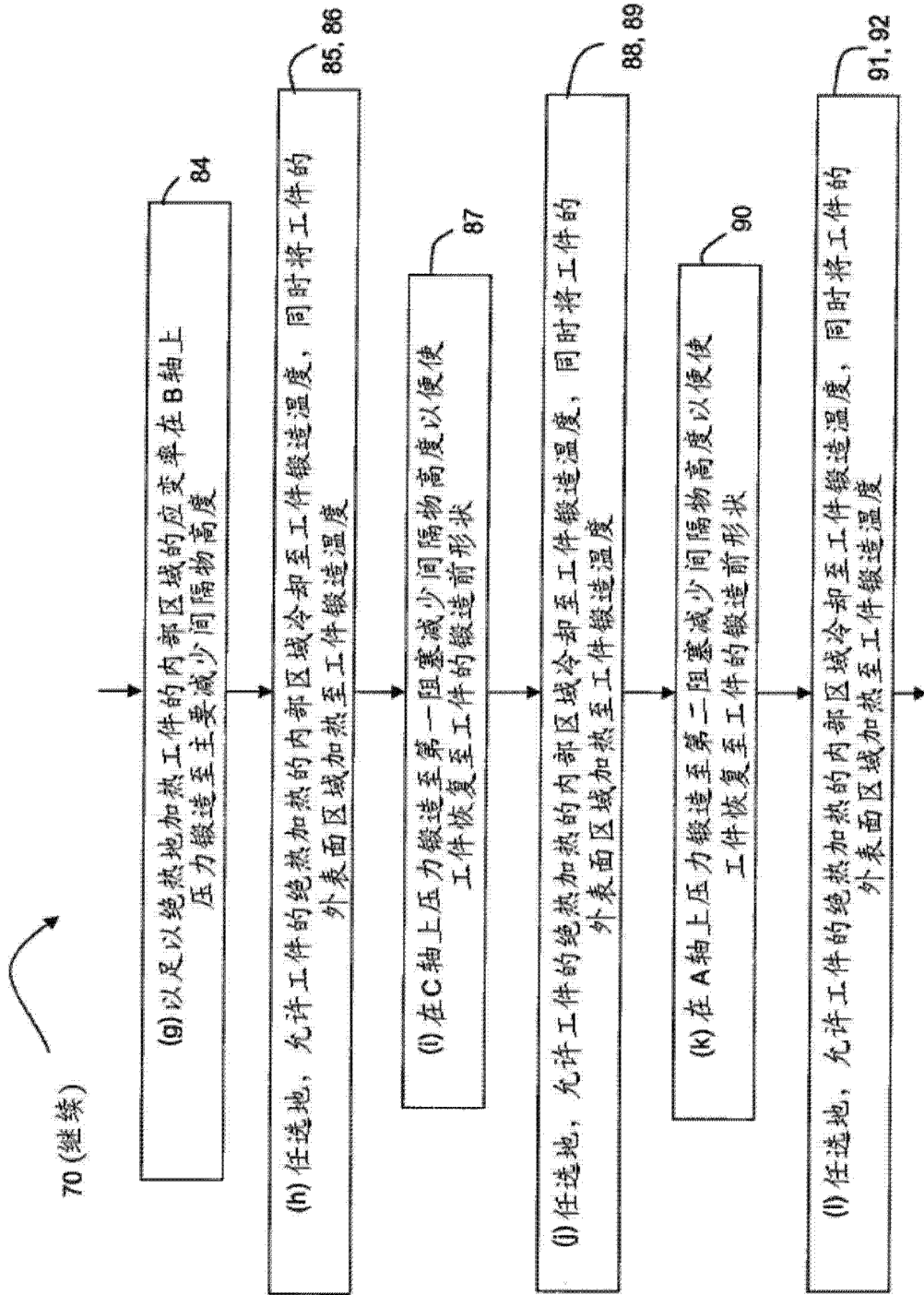


图 5(续)

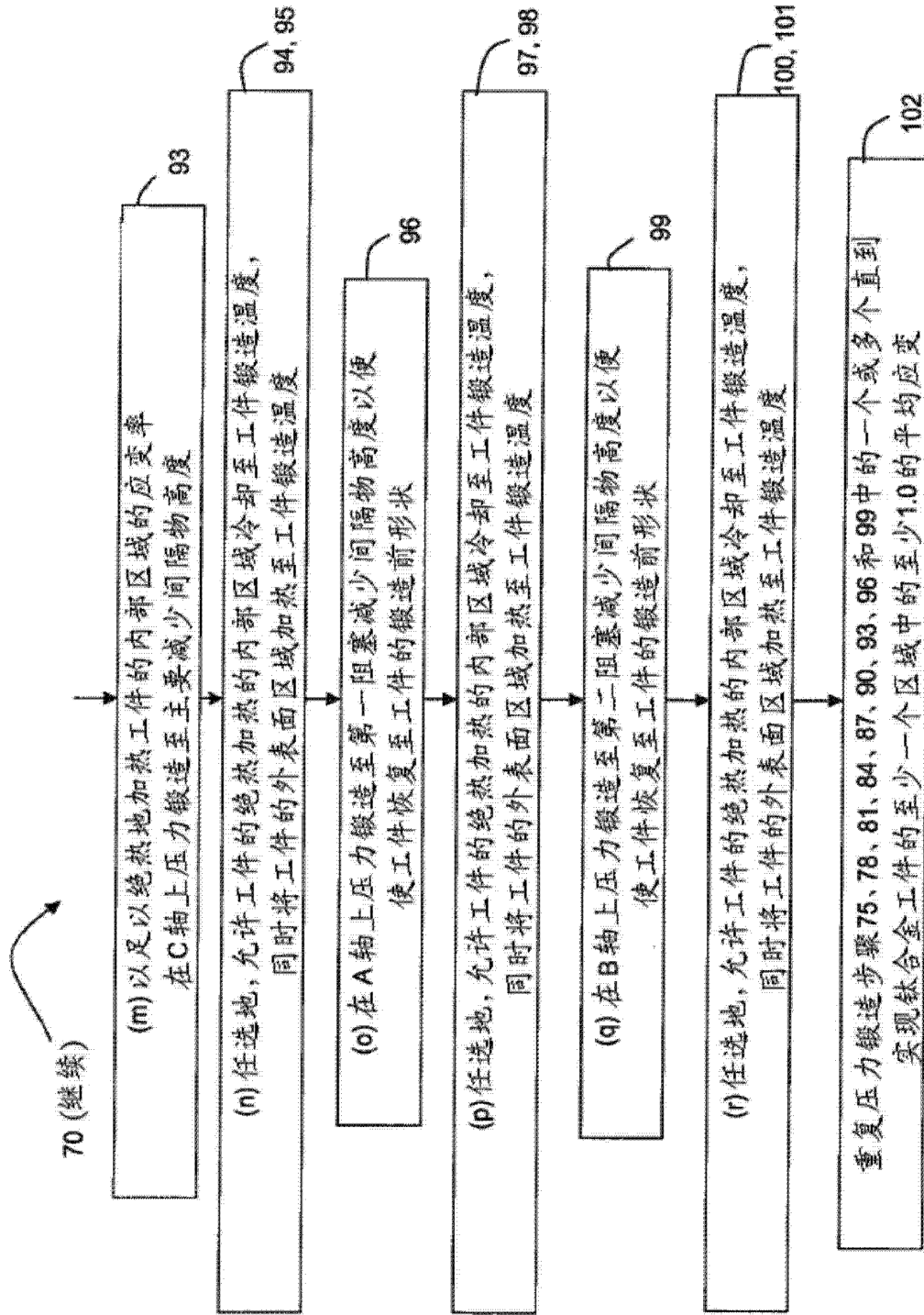


图5(续)

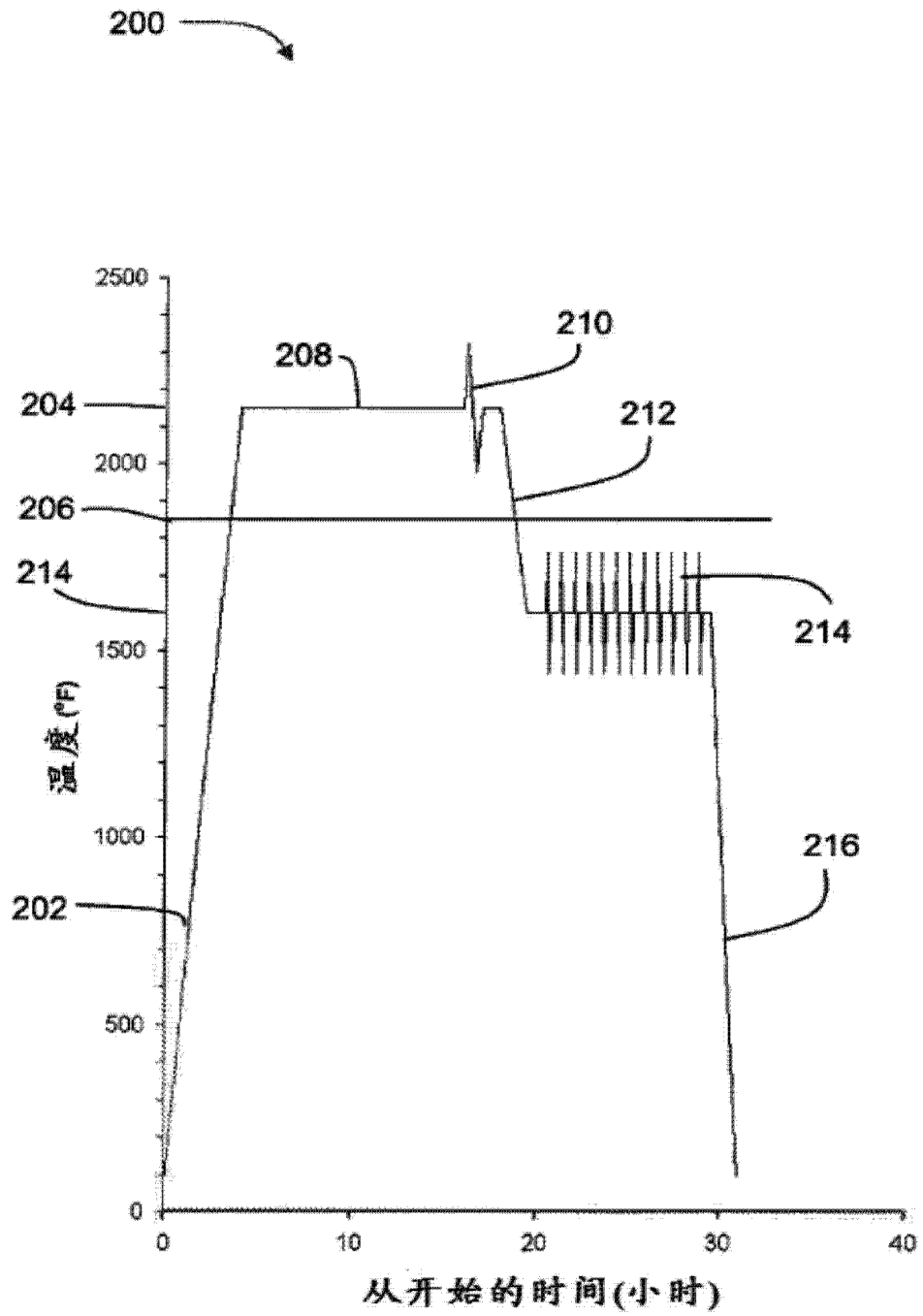


图 6

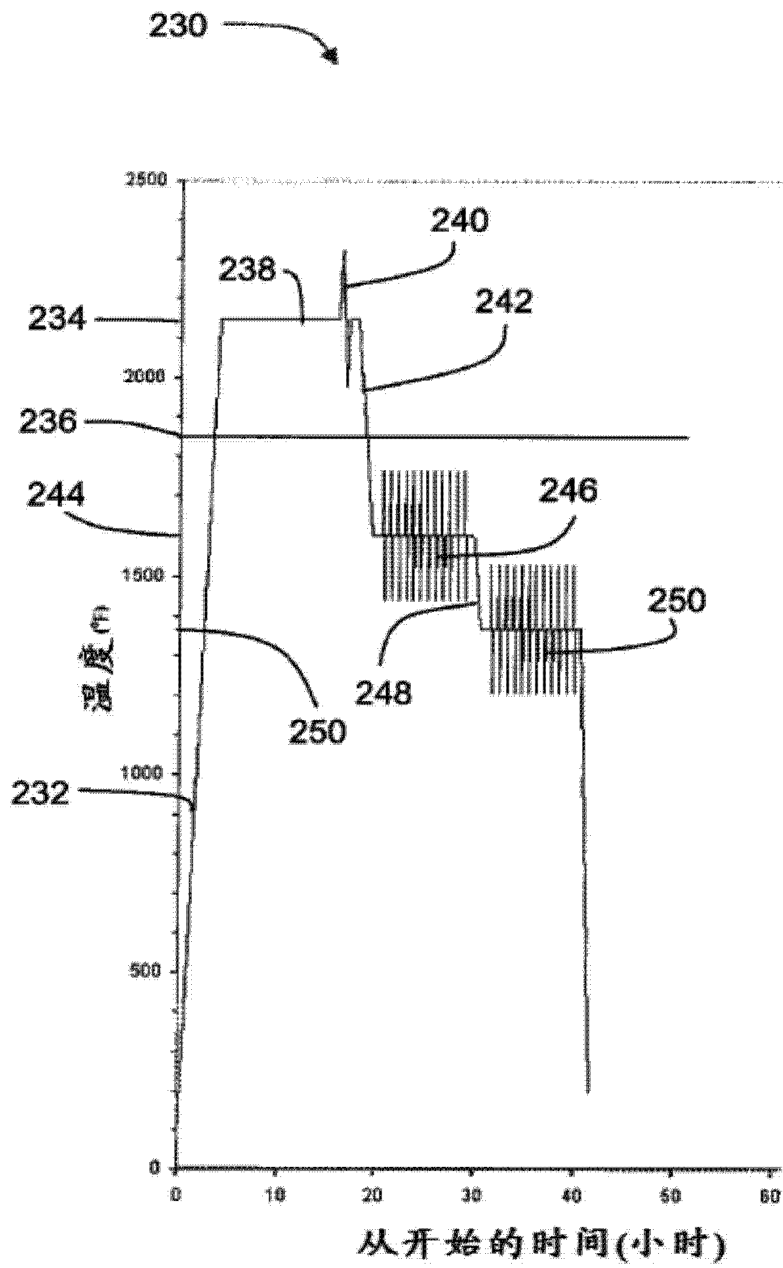


图 7

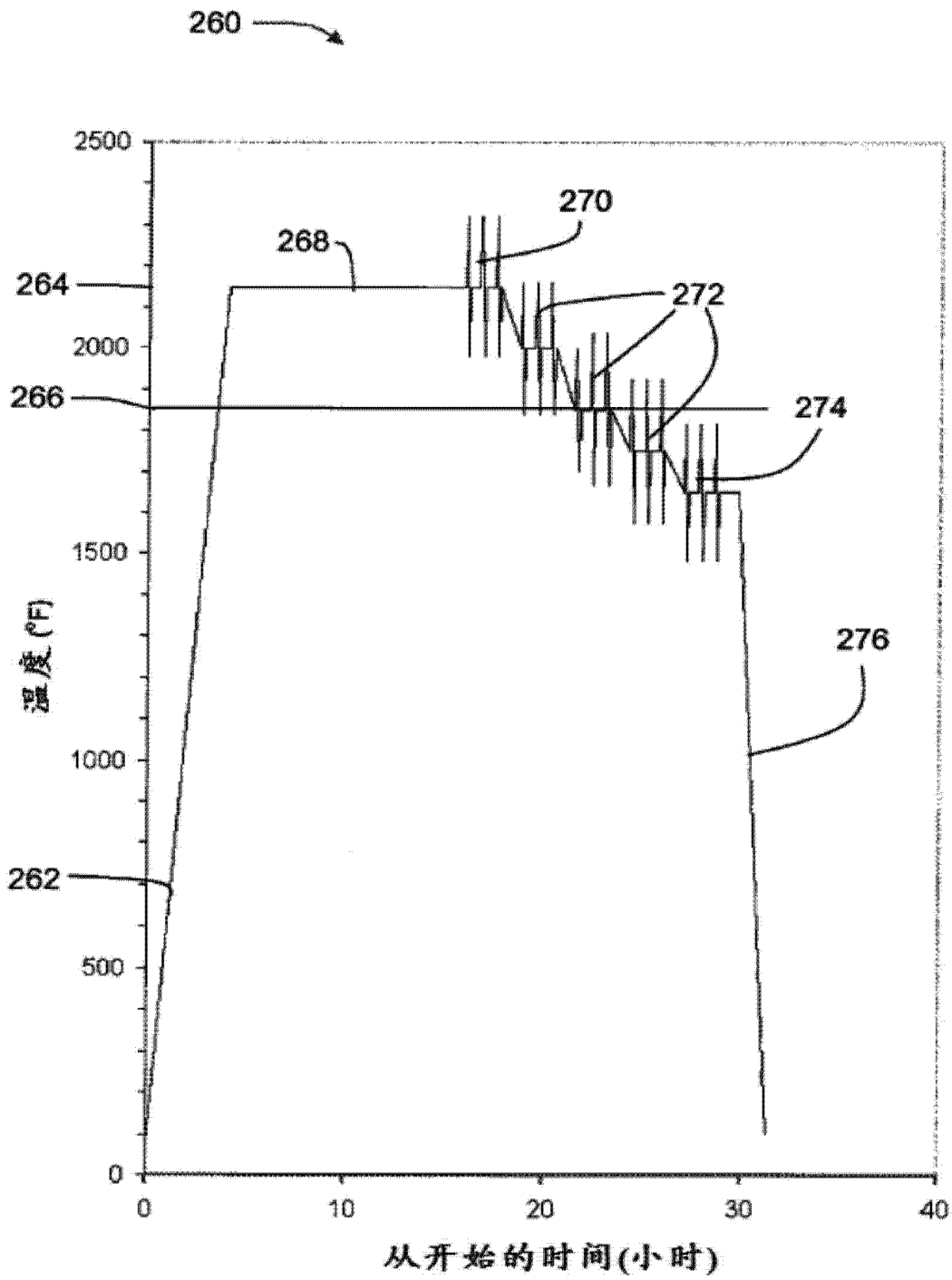


图 8

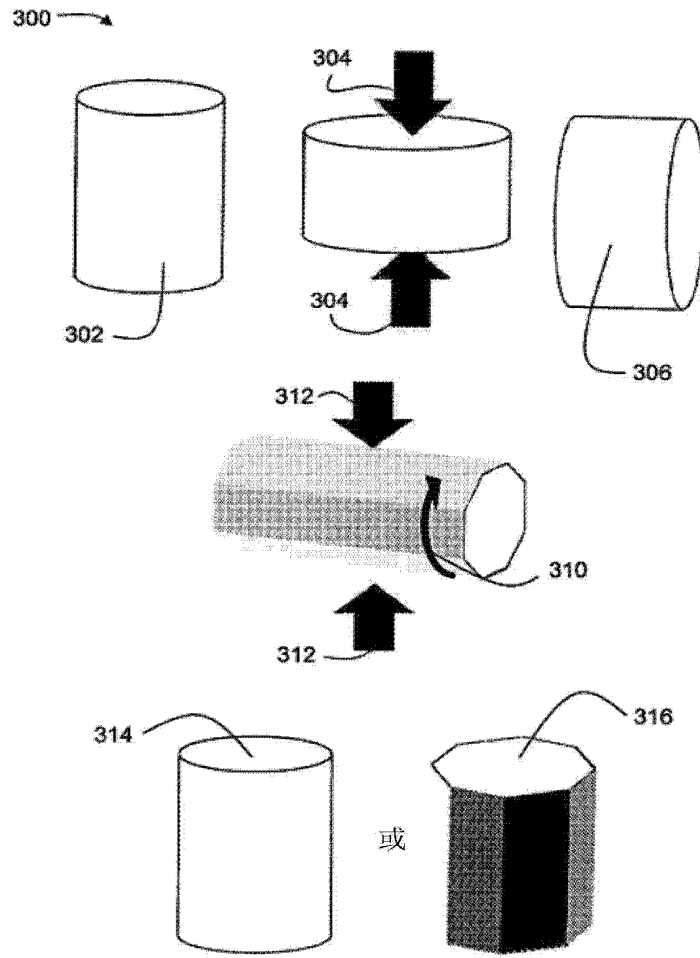


图 9

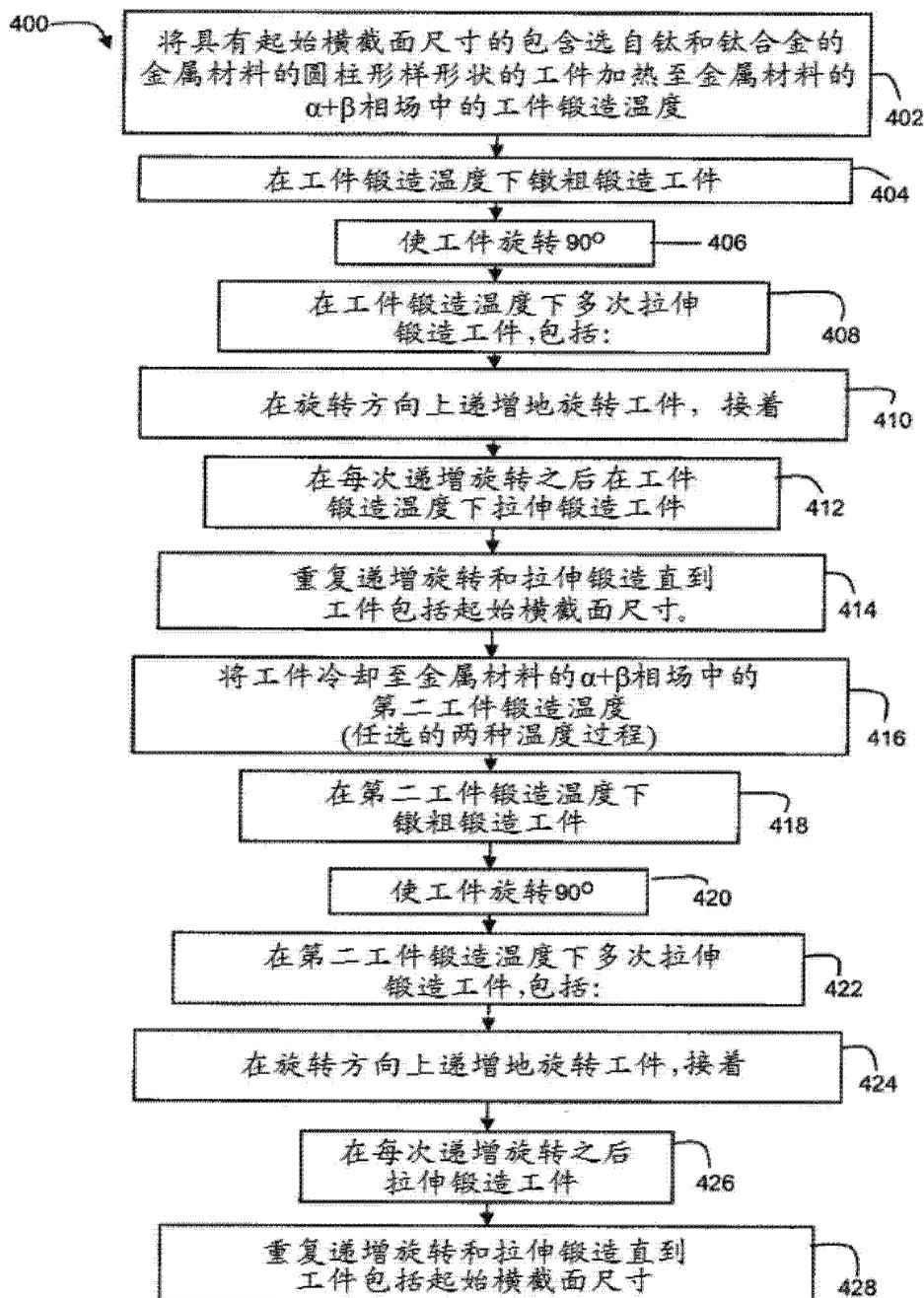


图 10

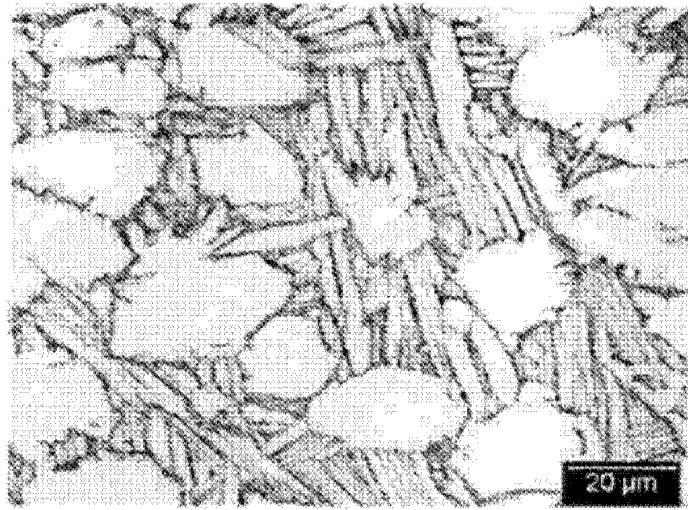


图 11(a)

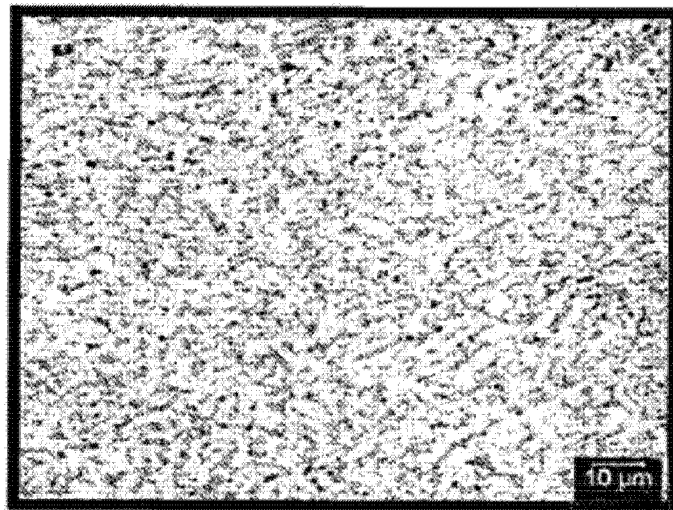


图 11(b)



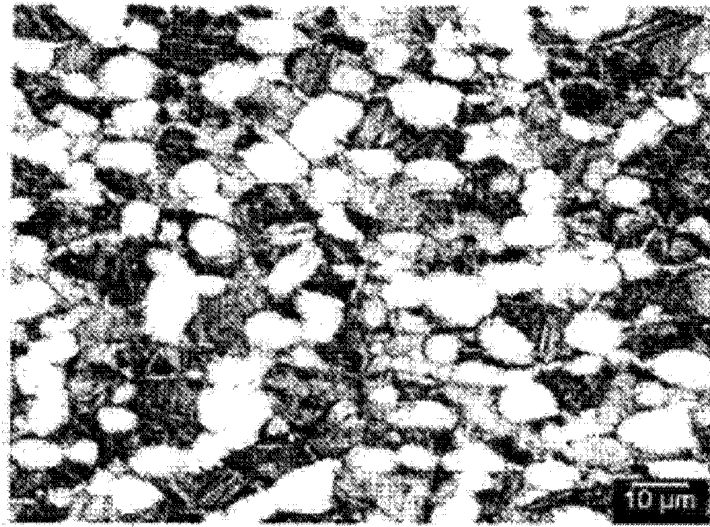


图 12(a)

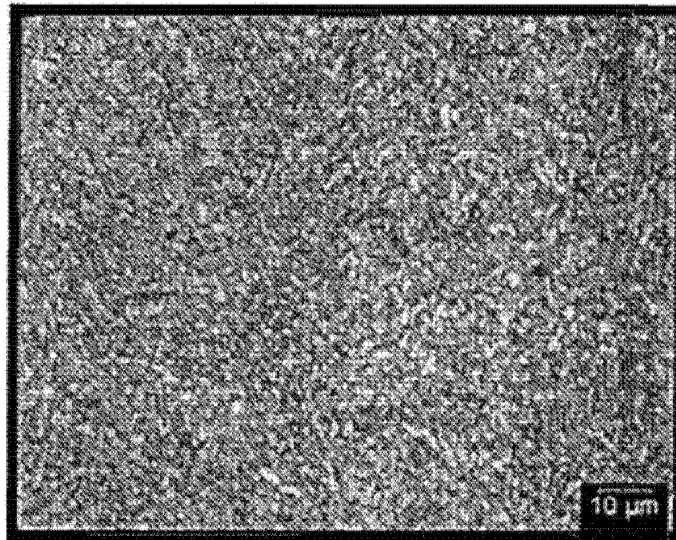


图 12(b)

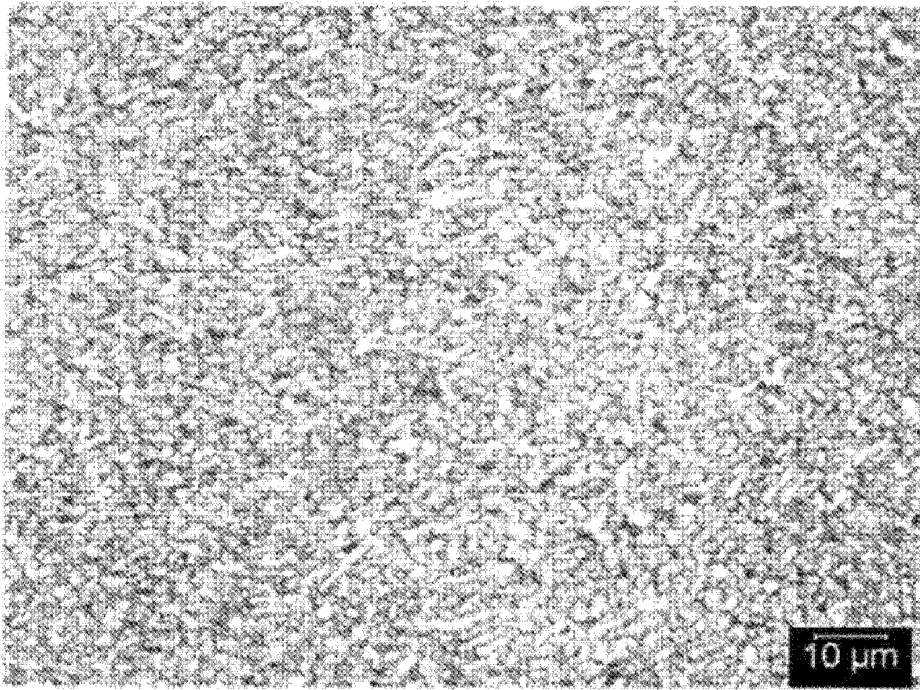


图 13

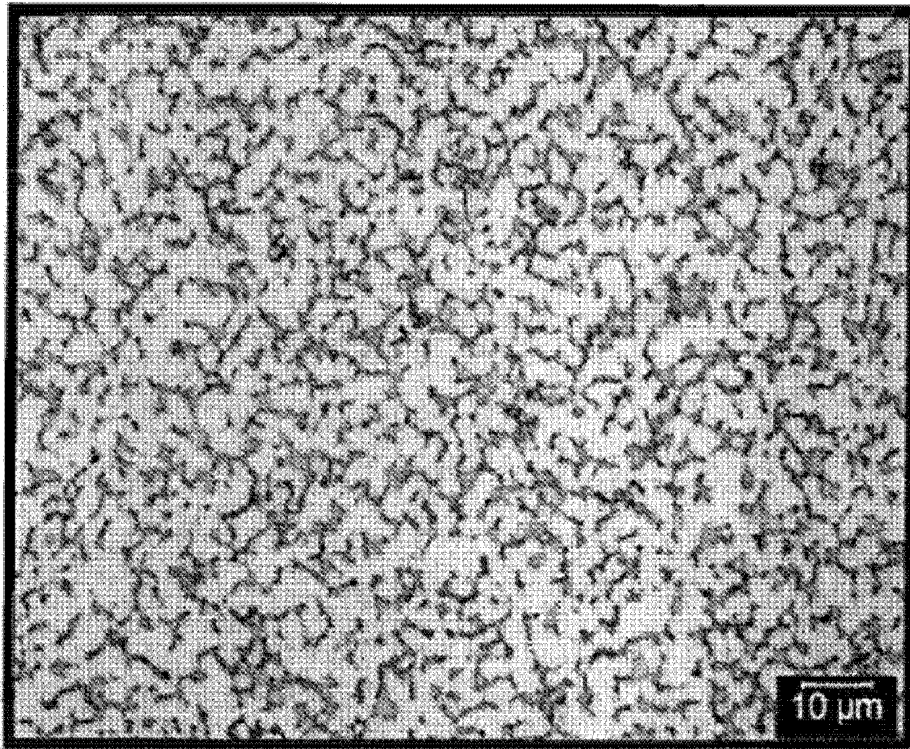


图 14

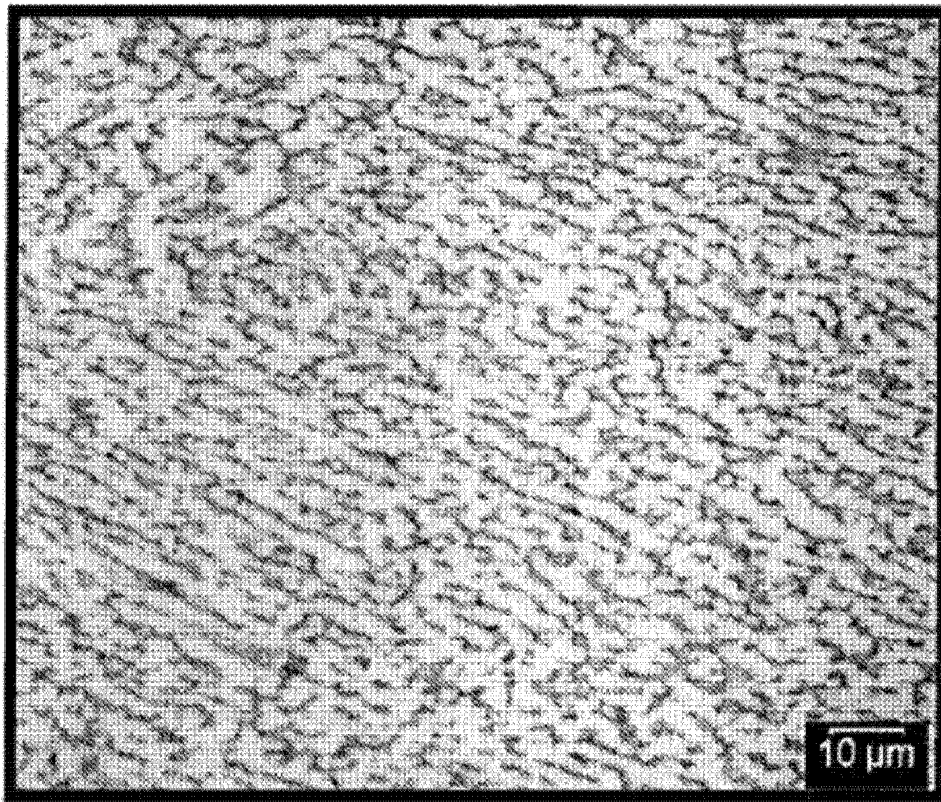


图 15

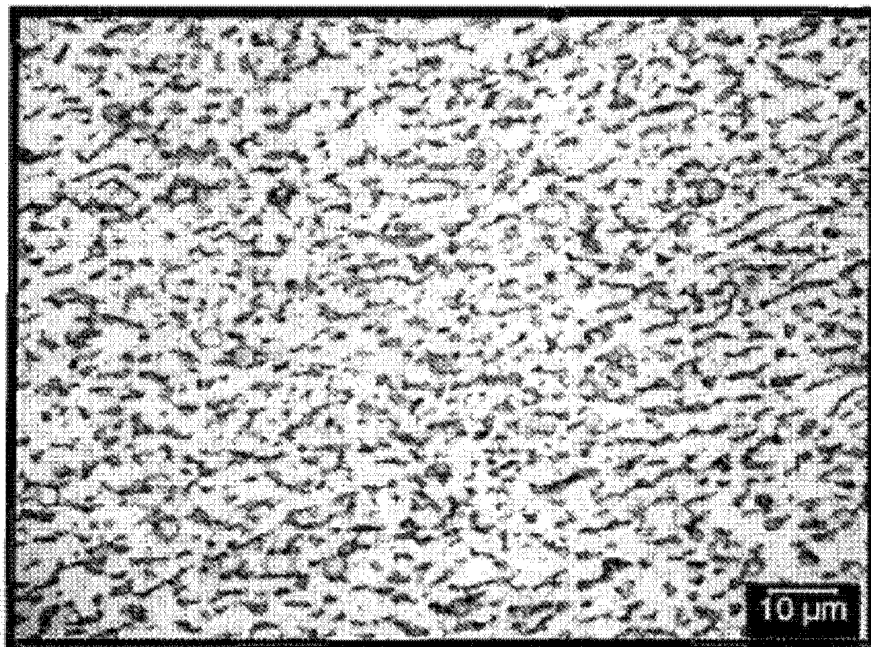


图 16(a)

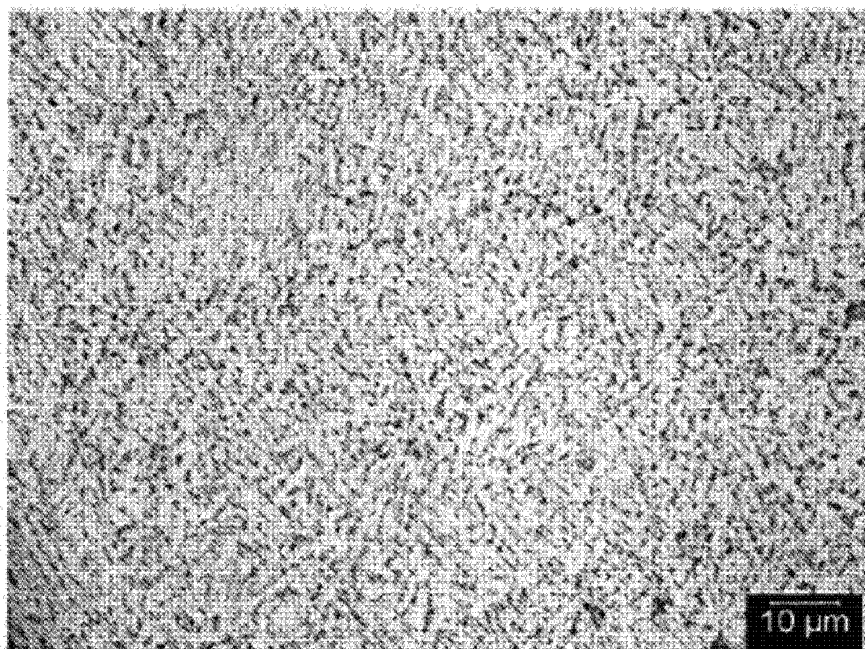


图 16(b)