(19)中华人民共和国国家知识产权局

(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 107532239 B
(45)授权公告日 2021.03.19

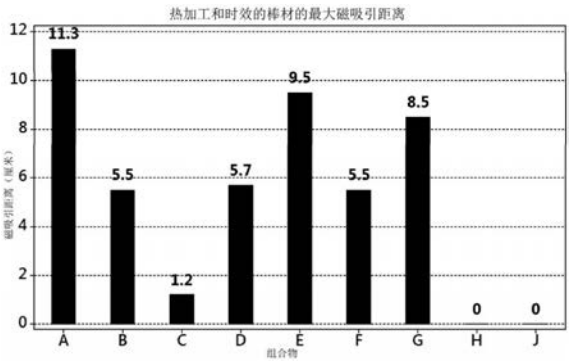
(21)申请号 201680023200.6
(22)申请日 2016.03.18
(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 107532239 A
(43)申请公布日 2018.01.02
(30)优先权数据
62/134,731 2015.03.18 US
62/169,989 2015.06.02 US
(85)PCT国际申请进入国家阶段日
2017.10.20
(86)PCT国际申请的申请数据
PCT/US2016/023137 2016.03.18
(87)PCT国际申请的公布数据
WO2016/149619 EN 2016.09.22
(73)专利权人 美题隆公司
地址 美国俄亥俄州
(72)发明人 弗里茨·格雷森
W·雷蒙德·克里布
艾米·E·克拉夫特
德里克·L·布朗
(74)专利代理机构 北京三高永信知识产权代理有限责任公司 11138
代理人 闫小刚
(51)Int.Cl.
C22C 9/06(2006.01)
C22C 9/05(2006.01)
C22F 1/08(2006.01)
H01F 1/147(2006.01)
(56)对比文件
JP H02225651 A,1990.09.07
US 4052204 A,1977.10.04
US 5019185 A,1991.05.28
郑润哲 等."Effect of Mn Substitution for Ni on the Microstructures and Properties in Cu-x%Ni-y%Mn(X+Y=9)-6%Sn Alloys".《J.Kor.Inst.Met.&Mater.》.1999,第37卷(第10期),第1184-1185页.
审查员 艾芬
权利要求书3页 说明书23页 附图49页

(54)发明名称

磁性铜合金

(57)摘要

本发明公开了磁性铜-镍-锡-锰合金。本发明还公开了多个处理步骤。通过执行所述多个处理步骤,能够保持和/或改变所述合金的各种磁性性能或力学性能。本发明进一步描述了上述合金的使用方法,以及由所述合金制成的各种制品。



CN 107532239 B

1.一种磁性铜合金,包括:

镍、锡、锰和余量的铜,其中,镍所占的重量百分比为8%-16%,锡所占的重量百分比为5%-9%,锰所占的重量百分比为5%-21%;

所述合金为磁性合金;

所述合金由下列步骤形成:

铸造所述合金;以及

在1200°F-1700°F的温度下对所述合金进行第一时长为4-22小时的均质化;

在1400°F-1600°F的温度下加热所述合金1-3小时;

热轧所述合金,实现减薄65%-70%;以及在1200°F-1600°F的温度下固溶退火所述合金1-3小时。

2.根据权利要求1所述的磁性铜合金,镍所占的重量百分比为14%-16%,锡所占的重量百分比为7%-9%,锰所占的重量百分比为5%-21%。

3.根据权利要求1所述的磁性铜合金,镍所占的重量百分比为8%-10%,锡所占的重量百分比为5%-7%,锰所占的重量百分比为5%-21%。

4.根据权利要求1所述的磁性铜合金,镍所占的重量百分比为10%-12%,锡所占的重量百分比为5%-7%,锰所占的重量百分比为5%-21%。

5.根据权利要求1所述的磁性铜合金,其中,所述磁性合金的相对磁导率(μ_r)至少为1.100。

6.根据权利要求1所述的磁性铜合金,其中,所述磁性合金是导电的。

7.根据权利要求1所述的磁性铜合金,其中,所述磁性合金的洛氏B硬度(HRB)至少为60。

8.根据权利要求1所述的磁性铜合金,其中,所述磁性合金的洛氏C硬度(HRC)至少为25。

9.根据权利要求1所述的磁性铜合金,其中,所述磁性合金的相对磁导率(μ_r)至少为1.100,其洛氏B硬度(HRB)至少为60。

10.根据权利要求1所述的磁性铜合金,其中,所述磁性合金的相对磁导率(μ_r)至少为1.100,其洛氏C硬度(HRC)至少为25。

11.根据权利要求1所述的磁性铜合金,所述合金由下列步骤形成:

在1500°F-1700°F的温度下均质化所述合金5-7小时,然后进行空冷。

12.根据权利要求1所述的磁性铜合金,所述合金进一步由下列步骤形成:

固溶退火后进行水淬。

13.根据权利要求12所述的磁性铜合金,镍的重量百分比为8%-12%,锡的重量百分比为5%-7%。

14.根据权利要求12所述的磁性铜合金,其中,所述合金进一步经过下列处理:在750°F-1200°F的温度下时效所述合金2-4小时,然后进行空冷。

15.根据权利要求12所述的磁性铜合金,其中,所述合金进一步经过下列处理:冷轧所述合金,实现减薄20%-40%。

16.根据权利要求15所述的磁性铜合金,其中,所述合金进一步经过下列处理:在750°F-1200°F的温度下时效所述合金2-4小时,然后进行空冷。

17.根据权利要求1所述的磁性铜合金，其中，所述合金在时效条件下展示的磁吸引距离大于其在固溶退火条件展示的磁吸引距离。

18.根据权利要求1所述的磁性铜合金，其中，所述合金在0.2％偏移量下的屈服强度为20-140ksi。

19.根据权利要求1所述的磁性铜合金，其中，所述合金的极限拉伸强度为60-150ksi。

20.根据权利要求1所述的磁性铜合金，其中，所述合金的拉伸伸长率为4％-70％。

21.根据权利要求1所述的磁性铜合金，其中，所述合金的洛氏B硬度(HRB)至少为60、洛氏C硬度(HRC)至少为25。

22.根据权利要求1所述的磁性铜合金，其中，所述合金在0.2％偏移量下的屈服强度为20-140ksi，极限拉伸强度为60-150ksi，拉伸伸长率为4％-70％。

23.根据权利要求1所述的磁性铜合金，其中，所述合金的磁吸引距离为0.5-11.5cm。

24.根据权利要求1所述的磁性铜合金，其中，所述合金的磁吸引距离至少为6cm。

25.根据权利要求1所述的磁性铜合金，其中，所述合金的最大饱和磁矩至少为0.4emu。

26.根据权利要求1所述的磁性铜合金，其中，所述合金的矫顽力至少为100奥斯特。

27.根据权利要求1所述的磁性铜合金，其中，所述合金的矫顽力小于100奥斯特。

28.根据权利要求1所述的磁性铜合金，其中，所述合金是通过将镍、锡和锰加入到铜熔池中形成的；或者通过先形成铜、镍、锡和锰的混合物，然后熔化该混合物，制成所述合金。

29.根据权利要求1所述的磁性铜合金，还包括重量百分比高达约15％的钴。

30.根据权利要求1所述的磁性铜合金，所述合金包含魏德曼结构。

31.根据权利要求30所述的磁性铜合金，其中，所述魏德曼结构由三行析出物构成，所述三行析出物的取向在互成角度约60°的方向上。

32.根据权利要求1所述的磁性铜合金，所述合金包含析出物；当垂直长轴观察时，所述析出物的纵横比为4:1至20:1。

33.根据权利要求1所述的磁性铜合金，所述合金包含析出物；当在横截面上观察时，所述析出物的纵横比为1:1至4:1。

34.一种磁性铜合金，包括：

8％-16％的镍，5％-9％的锡，5％-21％的锰，和余量的铜；

其中，所述合金是磁性的；以及

所述磁性铜合金由下列步骤形成：

在1500°F-1700°F的第一温度下对所述合金进行第一时长为5-7小时的均质化，然后进行空冷；

在1400°F-1600°F的温度下加热所述合金1-3小时；

热轧所述合金，实现减薄65％-70％；

在1400°F-1600°F的温度下固溶退火所述合金4-6小时；以及

通过炉冷或者水淬冷却固溶退火后的合金。

35.根据权利要求34所述的磁性铜合金，其中，所述合金进一步由下列步骤形成：在750°F-850°F的温度下时效所述合金1-24小时，然后进行空冷。

36.一种由权利要求1-35中任一项所述的磁性铜合金制备的制品。

37.根据权利要求36所述的制品，其中，所述制品是线、条或板形。

38.根据权利要求36所述的制品，所述制品是薄膜。

39.根据权利要求36所述的制品，所述制品是弹簧。

40.根据权利要求39所述的制品，所述弹簧为导电弹簧。

41.根据权利要求36所述的制品，所述制品是磁屏蔽罩、磁开关继电器或磁传感器的部件；或是磁性材料之间的分离器；或是声学阻尼装置；或是温度/位置控制装置。

42.一种将磁性铜合金制成制品的工艺，包括：根据权利要求11-16中任一项所描述的步骤处理所述合金以获得所述制品。

磁性铜合金

[0001] 相关申请的交叉引用

[0002] 本申请要求2015年6月2日提交的、申请号为No.62/169,989的美国临时专利申请以及2015年3月18日提交的、申请号为No.62/134,731的美国临时专利申请的优先权，这些专利申请的公开内容以引用方式全文并入于此。

技术领域

[0003] 本发明涉及磁性铜基合金，特别是铜-镍-锡-锰合金。本发明还公开了用于获得和/或使用这些合金磁性合金的各种工艺，以及由所述磁性合金制成的各种制品。

背景技术

[0004] 由申请人美题隆公司(Materion Corporation)提供的铜-镍-锡合金，例如ToughMet®合金，具有较低的摩擦系数和优异的耐磨性。所述合金被设计为具有高强度、高硬度、抗磨损、抗应力松弛、抗腐蚀和抗侵蚀性能的亚稳态硬化合金。在高温下，所述合金的强度保持不变，并且，所述合金易于被加工成复杂的部件。但是，这些合金没有磁性。

[0005] 因此，希望提供在某些应用中具有一些优势的磁性铜基合金。

发明内容

[0006] 本发明涉及磁性铜合金，特别是铜-镍-锡-锰合金。通过在某些条件下处理合金，可以制成这些磁性合金。本发明还提供了用于处理合金以调整合金的磁性能、同时使合金仍然具有有用的力学性能组合的工艺。

[0007] 下文将更具体地描述本发明的上述特征及其它非限制性特征。

附图说明

[0008] 以下是对附图的简要描述。所述附图是为了说明本发明的示例性实施例，而不是为了限制所述实施例。

[0009] 图1示出了50倍(50x)放大倍率下的铜-镍-锡-锰(Cu-Ni-Sn-M)合金的抛光和蚀刻的横截面的图像，而且，图示比例尺为600微米。

[0010] 图2示出了50x放大倍率下Cu-Ni-Sn-M合金的蚀刻的横截面的图像，而且，图示比例尺为600微米。

[0011] 图3示出了50x放大倍率下Cu-Ni-Sn-M合金的蚀刻的横截面的图像，而且，图示比例尺为600微米。

[0012] 图4示出了50x放大倍率下Cu-Ni-Sn-M合金的蚀刻的横截面的图像，而且，图示比例尺为600微米。

[0013] 图5示出了50x放大倍率下Cu-Ni-Sn-M合金的蚀刻的横截面的图像，而且，图示比例尺为600微米。

[0014] 图6示出了50x放大倍率下Cu-Ni-Sn-M合金的蚀刻的横截面的图像，而且，图示比

例尺为600微米。

[0015] 图7示出了50x放大倍率下Cu-Ni-Sn-M合金的蚀刻的横截面的图像，而且，图示比例尺为600微米。

[0016] 图8示出了50x放大倍率下铜-镍-锡(Cu-Ni-Sn)合金的蚀刻的横截面的图像，而且，图示比例尺为600微米。

[0017] 图9示出了在铸造、均质化和热镦之后某些组合物是否具有磁性的表格。

[0018] 图10示出了在均质化和固溶退火后某些组合物是否具有磁性的表格。

[0019] 图11示出了均质化和热轧后某些组合物是否具有磁性的表格。

[0020] 图12示出了均质化、热轧和固溶退火后某些组合物是否具有磁性的表格。

[0021] 图13示出了均质化、热轧、固溶退火和冷轧后的某些组合物是否具有磁性的表格。

[0022] 图14示出了均质化、热轧、固溶退火、冷轧和时效处理后的某些组合物是否具有磁性的表格。

[0023] 图15示出了均质化、加热、挤出和固溶退火后某些组成是否为磁性的表。

[0024] 图16所示的表格列出了经过图9所示的工艺后所述组合物的相对磁导率。

[0025] 图17所示的表格列出了经过图10所示的工艺后所述组合物的相对磁导率。

[0026] 图18所示的表格列出了经过图11所示的工艺后所述组合物的相对磁导率。

[0027] 图19所示的表格列出了经过图12所示的工艺后所述组合物的相对磁导率。

[0028] 图20所示的表格列出了经过图13所示的工艺后所述组合物的相对磁导率。

[0029] 图21所示的表格列出了经过图14所示的工艺后所述组合物的相对磁导率。

[0030] 图22所示的表格列出了经过图15所示的工艺后所述组合物的相对磁导率。

[0031] 图23所示的表格列出了经过图9所示的工艺后所述组合物的电导率。

[0032] 图24所示的表格列出了经过图10所示的工艺后所述组合物的电导率。

[0033] 图25所示的表格列出了经过图11所示的工艺后所述组合物的电导率。

[0034] 图26所示的表格列出了经过图12所示的工艺后所述组合物的电导率。

[0035] 图27所示的表格列出了经过图13所示的工艺后所述组合物的电导率。

[0036] 图28所示的表格列出了经过图14所示的工艺后所述组合物的电导率。

[0037] 图29所示的表格列出了经过图15所示的工艺后所述组合物的电导率。

[0038] 图30所示的表格列出了经过图9所示的工艺后所述组合物的硬度。

[0039] 图31所示的表格列出了经过图10所示的工艺后所述组合物的硬度。

[0040] 图32所示的表格列出了经过图11所示的工艺后所述组合物的硬度。

[0041] 图33所示的表格列出了经过图12所示的工艺后所述组合物的硬度。

[0042] 图34所示的表格列出了经过图13所示的工艺后所述组合物的硬度。

[0043] 图35所示的表格列出了经过图14所示的工艺后所述组合物的硬度。

[0044] 图36所示的表格列出了经过图15所示的工艺后所述组合物的硬度。

[0045] 图37示出了在各种温度下时效处理的几种不同组合物的最大磁吸引距离的条形图。

[0046] 图38A-38E示出不同Cu-Ni-Sn-Mn合金的锰含量与力学性能的关系图。

[0047] 图38A示出了0.2％偏移量时的屈服强度和锰含量之间的曲线图。

[0048] 图38B示出了极限拉伸强度和锰含量之间的曲线图。

[0049] 图38C出了伸长率(%)和锰含量之间的曲线图。

[0050] 图38D示出了硬度(HRB)和锰含量之间的曲线图。

[0051] 图38E示出了磁吸引距离和锰含量之间的曲线图。

[0052] 图39A示出了Cu-Ni-Sn-Mn合金在不同时效温度下的磁吸引距离和0.2％偏移量时的屈服强度。

[0053] 图39B示出了不同Cu-15Ni-8Sn-xMn合金在不同时效温度下的磁吸引距离和0.2％偏移量时的屈服强度。

[0054] 图39C示出了不同Cu-9Ni-6Sn-xMn合金在不同时效温度下的磁吸引距离和0.2％偏移量时的屈服强度。

[0055] 图39D示出了Cu-11Ni-6Sn-20Mn合金在不同时效温度下的磁吸引距离和0.2％偏移量时的屈服强度。

[0056] 图40A-40E示出了时效温度对力学性能的影响。

[0057] 图40A示出了0.2％偏移量时的屈服强度和时效温度之间的曲线图。

[0058] 图40B示出了极限拉伸强度和时效温度之间的曲线图。

[0059] 图40C示出了伸长率(%)和时效温度之间的曲线图。

[0060] 图40D示出了硬度(HRC)和时效温度之间的曲线图。

[0061] 图40E示出了磁吸引距离和时效温度之间的曲线图。

[0062] 图41A示出了不同工艺中组合物A的磁吸引距离。

[0063] 图41B示出了不同工艺中组合物E的磁吸引距离。

[0064] 图42示出了不同样式(棒和轧制板)和组合物的磁吸引距离。

[0065] 图43示出了一组(2个)按样式(棒和轧制板)分类的图42所示的样本的磁矩(ecm)和所施加的磁场强度。

[0066] 图44示出了一组(2条)按样式(棒和轧制板)分类的图42所示的样本的退磁曲线(第二象限)。

[0067] 图45示出了图42所示的样本的剩磁或剩余磁矩的条形图。

[0068] 图46示出了图42所示的样本的矫顽力或矫顽磁性(Oersted)的条形图。

[0069] 图47示出了图42所示的样本的最大饱和磁矩(emu)的条形图。

[0070] 图48示出了图42所示的样本的矩形比(剩磁除以最大饱和磁矩)的条形图。

[0071] 图49示出了图42所示的样本的Sigma(最大饱和磁矩除以质量)的条形图。

[0072] 图50示出了图42所示的样本的开关场分布(ΔH/Hc)的条形图。

[0073] 图51A示出了200x放大倍率下,固溶退火温度为1500华氏度(1500°F)的组合物G的光学图像,而且,图示比例尺为120微米。

[0074] 图51B示出了500x放大倍率下,固溶退火温度为1500°F的组合物G的光学图像,而且,图示比例尺为50微米。

[0075] 图52示出了250,000x放大倍率下,固溶退火温度为1520°F的组合物A的透射电子图像,而且,图示比例尺为100纳米。

[0076] 图53示出了500x放大倍率下,时效温度为910°F的组合物F的光学图像,而且,图示比例尺为50微米。

[0077] 图54A示出了500x放大倍率下,时效温度为910°F的组合物F的激光共聚焦扫描显

微镜(CLSM)图像，而且，图示比例尺为25微米。

[0078] 图54B示出了1500x放大倍率下，时效温度为910°F的组合物F的CLSM图像，而且，图示比例尺为25微米。

[0079] 图54C示出了500x放大倍率下，时效温度为835°F的组合物A的CLSM图像，而且，图示比例尺为25微米。

[0080] 图54D示出了1500x放大倍率下，时效温度为835°F的组合物A的CLSM图像，而且，图示比例尺为25微米。

[0081] 图54E示出了500x放大倍率下，过时效温度为1100°F的组合物F的CLSM图像，而且，图示比例尺为25微米。

[0082] 图54F示出了1500x放大倍率下，过时效温度为1100°F的组合物F的CLSM图像，而且，图示比例尺为25微米。

[0083] 图55A示出了1500x放大倍率下，过时效温度为1000°F的组合物A的扫描电子显微镜(SEM)图像，而且，图示比例尺为10微米。

[0084] 图55B示出了10,000x放大倍率下，过时效温度为1000°F的组合物A的SEM图像，而且，图示比例尺为1微米。

[0085] 图55C示出了3000x放大倍率下，过时效温度为1100°F的组合物F的CLSM图像，而且，图示比例尺为5微米。

[0086] 图55D示出了10,000x放大倍率下，过时效温度为1100°F的组合物F的SEM图像，而且，图示比例尺为1微米。

[0087] 图56A示出了20,000x放大倍率下，过时效温度为910°F的组合物A的ZC图像，而且，图示比例尺为1.5微米。

[0088] 图56B示出了50,000x放大倍率下，过时效温度为910°F的组合物A的ZC图像，而且，图示比例尺为600纳米。

[0089] 图56C示出了50,000x放大倍率下，过时效温度为910°F的组合物A的透射电子图像，而且，图示比例尺为600纳米。

[0090] 图57示出了一组(2个)经过固溶退火的含锰组合物A(未经时效处理)和经过时效处理的含锰组合物A的对比图，对比结果显示有新的相位。

[0091] 图58示出了一组(2个)经过固溶退火的含锰组合物E(未经时效处理)和经过时效处理的含锰组合物E的对比图，对比结果显示有新的相位。

[0092] 图59示出了一组(2个)经过固溶退火的铜-镍-锡合金H(未经时效处理)和经过时效处理的合金H的对比图，对比结果显示，没有形成新的相位，即，所述合金H没有磁性。

[0093] 图60A-60E是合金的放大图像，示出了析出物的线。

[0094] 图60A与图53相同，但图60A中有三条线用于显示析出物的取向。

[0095] 图60B与图54A相同，但图60B中有三条线用于显示析出物的取向。

[0096] 图60C与图54D相同，但图60C中有三条线用于显示析出物的取向。

[0097] 图60D与图54F相同，但图60D中有三条线用于显示析出物的取向。

[0098] 图60E与图55A相同，但图60E中有三条线用于显示析出物的取向。

[0099] 图60F与图55C相同，但图60F中有三条线用于显示析出物的取向。

具体实施方式

[0100] 可以参考附图来更全面地理解本发明所涉及的部件、工艺和装置。附图仅是为了简单容易地描述本发明所提出的示意图，并不用于表示装置或部件的相对大小和尺寸，和/或限定或限制示例性实施例的范围。

[0101] 为了清楚起见，虽然在下文描述中使用了具体术语，但是这些术语仅用于说明在附图中选择的实施例的特定结构，并不用于定义或限制本发明的范围。在附图和下文的描述中，应当理解，类似的数字编号表示相似功能的组件。

[0102] 单数形式的“一种”、“一个”、“所述”、“该”也旨在包括多数形式，除非上下文另有明确规定。

[0103] 如在说明书和权利要求中所使用的术语“包括”可以包括实施例中的“由...组成”和“基本上由...组成”。本文使用的术语包括”、“包含”、“具有”、“含有”、“有”、“容纳有”及其变体为开放式过渡性短语、术语或词语，其表示需要的指定成分/步骤，而且允许其它成分/步骤存在。然而，还应理解这样的描述表示组合物或工艺“由所列举的成分/步骤组成”或和“基本上由所列举的成分/步骤组成”，其中，可以仅存在所列举的成分/步骤，以及可能由此产生的任何杂质，但是不包括其它成分/步骤。

[0104] 本申请的说明书和权利要求书中的数值应当理解为：包括减少到相同有效数字位数时相同的数值；以及与设定值之差小于本申请中所述用来确定该值的常规测量技术的实验误差的数值。

[0105] 本文公开的所有范围都包括所列举的端点在内且可以独立地组合(例如，“2克至10克”的范围包括端点2克和10克，以及所有中间值)。

[0106] 例如，术语“约”和“近似”可以包括在不改变该值的基本功能的情况下变化的任何数值。在数值范围内使用时，“约”和“近似”同样表示由两个端点的绝对值定义的范围，例如，“约2-4”同样公开了“从2到4”的范围。通常，术语“约”和“近似”可以表示加上/减去所指数字的10％。

[0107] 本发明涉及某些工艺步骤的温度。应当注意，这些温度通常是指设定的热源(例如，熔炉)的温度，并不一定是指材料暴露在热源时必须达到的温度。

[0108] 本发明涉及的铜-镍-锡-锰(Cu-Ni-Sn-Mn)合金具有磁性和导电性。在合金中，镍所占的重量百分比约为8％-16％。在更具体的实施例中，镍所占的重量百分比约为14％-16％，或约为8％-10％，或约为10％-12％。锡所占的重量百分比约为5％-9％。在更具体的实施例中，锡所占的重量百分比约为7％-9％，或约为5％-7％。锰所占的重量百分比约为1％-21％，或约为1.9％-20％。在更具体的实施例中，锰所占的重量百分比至少为4％，或至少为5％，或约为4％-12％，或约为5％-21％，或约为19％-21％。合金中的余量为铜。合金还可以包括一种或多种其它金属，例如少量的铬、硅、钼或锌。在本发明中，重量百分比小于0.5％的元素应被视为杂质，例如铁。

[0109] 在一些具体的实施例中，铜-镍-锡-锰合金中镍所占的重量百分比约为8％-16％，锡所占的重量百分比约为5％-9％，锰所占的重量百分比约为1％-21％，余量为铜。

[0110] 在其它具体的实施例中，铜-镍-锡-锰合金中镍所占的重量百分比约为8％-16％，锡所占的重量百分比约为5％-9％，锰所占的重量百分比约为5％-21％，余量为铜。

[0111] 在不同的实施例中，铜-镍-锡-锰合金中镍所占的重量百分比约为8％-16％，锡所

占的重量百分比约为5%-9%，锰所占的重量百分比约为5%-11%，余量为铜。

[0112] 在其它的实施例中，铜-镍-锡-锰合金中镍所占的重量百分比约为14%-16%，锡所占的重量百分比约为5%-9%，锰所占的重量百分比约为5%-11%，余量为铜。

[0113] 在一些具体的实施例中，铜-镍-锡-锰合金中镍所占的重量百分比约为14%-16%，锡所占的重量百分比约为7%-9%，锰所占的重量百分比约为1%-21%，余量为铜。

[0114] 在一些具体的实施例中，铜-镍-锡-锰合金中镍所占的重量百分比约为14%-16%，锡所占的重量百分比约为7%-9%，锰所占的重量百分比约为4%-12%，余量为铜。

[0115] 在其它具体的实施例中，铜-镍-锡-锰合金中镍所占的重量百分比约为8%-10%，锡所占的重量百分比约为5%-7%，锰所占的重量百分比约为1%-21%，余量为铜。

[0116] 在其它具体的实施例中，铜-镍-锡-锰合金中镍所占的重量百分比约为8%-10%，锡所占的重量百分比约为5%-7%，锰所占的重量百分比约为4%-21%，余量为铜。

[0117] 在少许具体的实施例中，铜-镍-锡-锰合金中镍所占的重量百分比约为10%-12%，锡所占的重量百分比约为5%-7%，锰所占的重量百分比约为1%-21%，余量为铜。

[0118] 按所需比例组合固体铜、镍、锡和锰，可以形成这些合金。先制备一炉适量比例的铜、镍、锡和锰，然后将其熔化，以形成合金。可选地，可以将镍、锡和锰颗粒加入到铜熔浴中。可以通过尺寸与所需固体产物构造匹配的燃气炉、电感应炉、电阻炉或电弧炉执行所述熔化。通常，熔融温度至少约为2057°F；根据铸造工艺，其过热范围在150-500°F之间。为了保护可氧化元素，可以使用惰性气氛(例如，包括氩气和/或二氧化碳/一氧化碳)和/或使用绝缘保护盖(例如蛭石、氧化铝和/或石墨)来保持中性或还原条件。

[0119] 可以在开始熔化后加入诸如镁、钙、铍、锆和/或锂的活性金属，以确保溶解氧的浓度较低。熔融温度稳定之后，可以利用合适的过热热量进行合金的铸造，将合金制成连铸坯或其它铸形。此外，可以通过铸造生产铸锭、半成品件、近终型件、金属球、预合金粉末或其它离散式产品。

[0120] 可选地，可以将单独的元素粉末热机组合，用于生产铜-镍-锡-锰合金的输入原料、半成品件或近终型件。

[0121] 还可以通过标准薄膜沉积技术制备所述铜-镍-锡-锰合金的薄膜，该技术包括但不限于溅射或蒸镀。可以通过两个或更多个元素溅射靶进行共溅射以制备所述薄膜，或者通过合适的二元或三元合金溅射靶的组合来制备所述薄膜，或者通过包含制造所需比例的薄膜的四种元素的单体溅射靶来制备所述薄膜，其中，这四种元素为制备所述薄膜所需的元素。众所周知，可能需要对所述薄膜进行特定的热处理来开发和提高薄膜的磁性能和材料性能。

[0122] 在一些实施例中，铸态合金具有磁性。特别地，在这种铜-镍-锡-锰合金中，锰的重量百分比约为2%-20%。可以借助于存在强力稀土磁体时，合金的吸引力的半定量估算来确定铜基合金是否具有磁性。可选地，可以通过磁吸引距离测量来更加定量地确定所述合金是否具有磁性。也可以使用诸如振动样本磁力计的复杂磁测量系统来确定所述合金是否具有磁性。

[0123] 有趣的是，可以通过附加的处理步骤改变铸态合金的磁性能和力学性能。此外，通过进一步的处理步骤，可以使通过一些处理步骤之后获得初始磁性的合金失去磁性，然后经过附加处理使其再次获得磁性。因此，磁性能不是铜基合金本身所固有的性能，它会被所

执行的处理影响。从而，人们可以获得具有所需的磁性和强度性能组合(例如，相对磁导率、电导率和硬度)的磁性合金，其中所述硬度可以为洛氏B或C。因此，可以基于均质化、固溶退火、时效、热加工、冷加工、挤压和热镦的各种组合来定制针对顾客的磁响应。此外，这种合金应具有相对较低的弹性模量，量级约为(15)×10 ^{6}psi至(25)×10 ^{6}psi(psi，Pounds per square inch，磅/平方英寸)。因此，可以通过高弹性应变实现良好的弹簧特性，其比铁基合金或镍基合金的预期值高出50％。

[0124] 均质化涉及加热合金以在合金中产生均匀结构，减少固化的自然结果而引发的化学或冶金分离。在合金元素均匀分布在整个合金中之前，不会发生合金元素的扩散。当温度通常达到合金的固相线温度的80％-95％时，会发生合金元素的扩散。均质化改善了合金的塑性，提高了合金的一致性和力学性能水平，并且降低了合金的各向异性。

[0125] 固溶退火涉及将可沉淀硬化合金加热到足够高的温度，以将微结构转变为单相。快速淬火至室温使合金处于过饱和状态，从而使合金具有柔软性和延展性，这有助于调节晶粒尺寸，并且能够制备用于时效处理的合金。随后加热过饱和固溶体，使强化相出现沉淀，并使合金硬化。

[0126] 时效硬化是一种热处理技术，可以产生能够阻止晶格中的缺陷运动的杂质相的有序细颗粒(即沉淀)。这会使合金硬化。

[0127] 热加工是一种通常在温度高于合金的再结晶温度时的金属成形工艺。在所述工艺中，通过辊、模具或锻造，可以减小所述合金的横截面面积，并且获得所需的形状和尺寸。这通常会降低力学性能的方向性，并产生新的等轴微结构，特别是在固溶退火之后。厚度或面积的减少量(％)用以表示所进行的热加工的程度，并且，在本发明中，所述热加工的程度仅被视为“％减少量”。

[0128] 冷加工是一种通常在近室温下进行的金属成形工艺。在所述工艺中，通过辊、模具或冷加工，可以减小合金的横截面面积，并且使所述横截面尺寸均匀。这增加了合金的强度。厚度或面积的减少量(％)用以表示所进行的冷加工的程度，并且，在本发明中，所述冷加工的程度仅被视为“％减少量”。

[0129] 挤压是一种热加工工艺。在所述工艺中，具有特定横截面的合金被强迫通过具有较小横截面的模具。根据温度，这可以在挤压方向上产生细长的晶粒结构。最终的横截面积与原始横截面积的比率可用于表示变形程度。

[0130] 热镦或镦锻是一种通过加热和施加压力来压缩工件厚度的工艺。通过所述工艺，可以扩展工件的横截面或改变其形状。这种工艺使合金塑性变形，并且通常在温度高于再结晶温度时进行这种工艺。这提高了力学性能和延展性，进一步使合金均质化，并且细化了粗晶粒。厚度减少的百分比用于表示热镦或镦锻的程度。

[0131] 经过一些热处理后，必须将合金冷却至室温。这可以通过水淬、油淬、合成淬火、空冷或炉冷来完成。淬火介质的选择允许控制冷却速率。

[0132] 在第一组附加处理步骤中，在铸造合金后，在约1400°F-1700°F的温度下均质化所述合金约4-16小时，然后进行水淬或空冷。该组步骤通常可以保持锰重量含量至少为5％的合金的磁性，降低其相对磁导率，提高其电导率，并可根据需要改变任一方向上的硬度。通常，通过该组的附加处理步骤，具有较低锰含量的合金会失去磁性。

[0133] 在一些合金中，尽管第一组的附加处理步骤去除了其磁性，但是在约为1500°F-

1600°的温度下，第二次均质化合金约8-12小时，然后水淬，就可以恢复合金的磁性。

[0134] 如果在约为1400°F-1700°F的温度下均质化合金约4-16小时后，热墩使合金的厚度减少约40％-60％，然后进行水淬，就可以使合金保持磁性。

[0135] 在第二组的附加处理步骤中，在铸造合金后，将合金在约为1500°F-1700°F的温度下均质化约5-7小时，然后进行空冷。该组步骤可以保持锰重量含量至少为5％的合金的磁性，特别是锰重量含量约为10％-12％的合金的磁性。

[0136] 有趣的是，可以通过下列步骤使经过第二组附加步骤中的均质化步骤后失去磁性的合金再次具有磁性：在约为1400°F-1600°F的温度下将所述均质化的合金固溶退火约1-3小时，然后水淬；在约为750°F-1200°F的温度下将所述退火的合金时效处理约2-4小时，然后进行空冷。同样，这种处理可以降低合金的相对磁导率，增加电导率，并且可以根据需要改变任一方向的硬度。在具体实施例中，电导率增加至约4％(IACS)。

[0137] 在第三组的附加处理步骤中，在铸造合金后，在约1500°F-1700°F的第一温度下对所述合金进行约为5-7小时的均质化，然后进行空冷。随后，在约1400°F-1600°F(通常低于均质化温度)的温度下将合金加热约1-3小时，然后进行第一次热轧。如果需要，在约为1400°F-1600°F的温度下，根据横截面尺寸将合金再次加热约5-60分钟或更长的时间，然后进行第二次热轧，实现横截面总体减少约65％-70％。最后，在约为1400°F-1600°F的温度下固溶退火所述合金约4-6小时；然后通过炉冷或水淬冷却所述合金。该组步骤可以保持锰重量含量至少为5％的合金的磁性、以及锰重量含量约为4％-6％的合金的磁性。

[0138] 在经过第三组附加处理步骤中描述的均质化、热轧和固溶退火之后，还可以在约为750°F-850°F的温度下将所述合金时效约1-24小时，然后进行空冷，使所述合金仍然保持磁性。

[0139] 在第四组附加处理步骤中，在铸造合金之后，将合金在约1200°F-1700°F的温度下均质化约4-22小时。然后，将合金在约1400°F-1600°F的温度下加热约1-3小时，随后热轧，实现横截面减少约65％-70％。然后，将合金在约1200°F-1600°F的温度下固溶退火约1-3小时，随后进行水淬。在第四组处理步骤之后，锰重量含量至少为5％的铜-镍-锡-锰合金，特别是锰重量含量约为7％-21％的那些合金，还可以保持其磁性，或者那些镍重量含量约为8％-12％、锡重量含量约为5％-7％的那些合金还可以保持其磁性。

[0140] 在经过第四组附加处理步骤中描述的均质化、热轧和固溶退火之后，还可以在约为750°F-1200°F的温度下将所述合金时效处理约2-4小时，然后进行空冷，使所述合金仍然保持其磁性。所述时效步骤也可以在均质化、热轧和固溶退火处理步骤之后重新激活一些非磁性合金的磁性。可以将第四组附加处理步骤与该额外时效步骤的组合视为第五组附加处理步骤。

[0141] 可选地，在第四组附加处理步骤中描述的均质化、热轧和固溶退火之后，也可以冷轧合金，实现横截面减少约20％-40％，并重新激活合金的磁性。可以将第四组附加处理步骤与该额外的冷轧步骤的组合视为第六组附加处理步骤。

[0142] 另外，在经过第六组附加处理步骤中描述的均质化、热轧、固溶退火和冷轧之后，还可以在约为750°F-1200°F的温度下将所述合金时效处理约2-4小时，然后进行空冷，以重新激活所述合金的磁性。可以将第六组附加处理步骤与该额外时效步骤的组合视为第七组附加的处理步骤。

[0143] 在第八组的附加处理步骤中，在铸造合金后，将合金在约1200°F-1700°F的第一温度下均质化约5-7小时、或9-11小时、或18-22小时，然后进行空冷。然后将合金在约1200°F-1600°F的温度下加热第二时长约4小时或更长的时间(包括约6小时或更长时间)。然后，挤压所述合金，实现横截面减少约66％-90％。在第八组处理步骤之后，锰重量含量至少为7％，特别是锰重量含量约为10％-12％的的铜-镍-锡-锰合金，还可以保持其磁性。

[0144] 在经过第八组附加处理步骤中描述的均质化和挤压步骤之后，还可以在约为1200°F-1700°F的温度下将所述合金固溶退火约1-3小时，然后进行水淬。在第九组处理步骤之后，锰重量含量至少为7％，特别是锰重量含量约为10％-12％的的铜-镍-锡-锰合金，还可以保持其磁性。所述固溶退火步骤也可以重新激活一些在均质化和挤压步骤之后为非磁性的合金的磁性。可以将第八组附加处理步骤与该额外固溶退火步骤的组合视为第九组附加处理步骤。

[0145] 在第十组处理步骤中，根据第八组处理步骤挤压合金后，在约为1200°F-1700°F的温度下，将所述合金固溶退火约1-3小时。然后可选地冷加工所述合金，实现横截面减少约20％-40％。然后将合金在约600°F-1200°F的温度下时效处理约1-4小时。在更具体的实施例中，所述时效处理在约700°F-1100°F或约800°F-950°F的温度下进行，然后进行空冷。

[0146] 还可以在磁场中热处理所述合金，以改变其性能。将合金暴露于磁场中，然后加热(例如在炉中、通过红外灯或通过激光)所述合金。这可能导致合金的磁性的变化，而且其还可以被视为第十一组附加处理步骤。

[0147] 因此，所得到的磁性铜-镍-锡-锰合金可以具有各种性能的值的不同组合。磁性合金的相对磁导率(μ_r)可以至少为1.100、或至少为1.500、或至少为1.900。磁性合金的洛氏B硬度(HRB)至少为60、或至少为70、或至少为80、或至少为90。磁性合金的洛氏C硬度(HRC)至少为25、或至少为30、或至少为35。磁性合金的最大饱和磁矩(m_s)约为0.4emu-1.5emu。磁性合金的剩磁或剩余磁性(m_r)约为0.1emu-0.6emu。磁性合金的开关场分布(ΔH/Hc)约为0.3-1.0。磁性合金的矫顽力约为45-210奥斯特、或至少为100奥斯特、或小于100奥斯特。磁性合金的矩形比约为0.1-0.5，其由m_r/m_s计算而出。磁性合金的σ(即Sigma，ms/质量)约为4.5emu/g-9.5emu/g。磁性合金的电导率(％IACS)约为1.5％-15％、或约为5％-15％。磁性合金的0.2％的偏移量时的条件屈服强度约为20ksi-140ksi，包括80ksi-140ksi。磁性合金的极限拉伸强度约为60ksi-150ksi，包括80ksi-150ksi。磁性合金的伸长率a％约为4％-70％。在室温下，当使用夏比V型缺口试验(Charpy V-notch test)根据标准ASTM E23测量时，磁性合金的CVN冲击强度至少为2英尺磅(ft-lbs)至超过100ft-lbs。磁性合金的密度约为8g/cc-9g/cc。磁性合金的弹性模量约为$16*10^6$psi-$21*10^6$psi(95％置信区间)。需要考虑到这些性能的所有组合。

[0148] 在具体的实施例中，磁性合金的相对磁导率(μ_r)可以至少为1.100，其洛氏B硬度(HRB)至少为60。

[0149] 在其它实施例中，磁性合金的相对磁导率(μ_r)可以至少为1.100，其洛氏C硬度(HRC)至少为25。

[0150] 在一些实施例中，铜-镍-锡-锰合金还可以含有钴。当钴存在时，该合金中钴的重量百分比为1％-15％。

[0151] 磁性铜-镍-锡-锰合金可被制成诸如片、棒、管、线、条、板、或其它形状的基础物

品，或各种弹簧的制品。特别地，人们认为可以用更少的力移动磁性弹簧，并且所述弹簧的弹性应变高。其它制品可以选自下列制品：衬套、仪器外壳、连接器、扶正器、紧固件、钻铤、注塑模具、焊接臂、电极和锭成品。

[0152] 理想地，本发明的磁性合金的力学强度、延展性和磁性行为的平衡。诸如磁吸引距离、矫顽力、剩磁、最大饱和磁矩、磁导率和磁滞行为的磁性性能以及力学性能都可以被调整到所需的组合。

[0153] 可以相信的是，本发明的磁性铜合金处于合金的磁性将根据热处理和合金的组合物而变化的领域中。特别地，已经在一些合金的微结构内观察到金属间析出物。因此，可以认为本发明的合金在铜基质内包含离散的分散相。不受理论约束，可选地，可以将合金描述为分散在还包含镍和锰的铜基质主体中的Ni-Mn-Sn金属间化合物。

[0154] 下文进一步描述的图53-56C示出了本发明的Cu-Ni-Sn-Mn合金的各种放大视图。在这些视图中，在晶粒内能够看到针状金属间析出物。如图60A-60F所示，析出物为三组线，其取向在互成角度约60°的方向上。在这些图中，虚线强调析出物的取向。在一些实施例中，当垂直于长轴观察时，析出物的纵横比为4:1至20:1。在其它实施例中，在横截面上观察时，析出物的纵横比为1:1至4:1。

[0155] 这些磁性铜合金具有如下应用潜力。在这方面，它们具有铜合金的正常性能，例如耐腐蚀性、导电性、抗菌性以及磁性。这些应用可以包括盐水的磁过滤；水的低电位加热；水产养殖业的零部件；货币防伪线；磁力水软化剂；医疗装置或外科器械、电灼设备、定位装置/仪器；诸如浮标、浮物、框架、海撬艇、电缆、紧固件或低电流加热毯等的海洋装置；以及用于实现电磁辐射吸收目的的颜料、涂料、薄膜或箔片。此外，性能特性的其它组合有利于下列应用：诸如复合带、镶嵌带、粘合带、复合线、镶嵌线和粘合线；温度限制和控制装置；磁传感器、磁传感器目标和磁性开关装置；微电子机械系统(MEMS)、半导体和自旋运输电子装置；用于变压器和其它电子装置的磁线；电磁场(EMF)/射频干扰(RFI)屏蔽材料和需要电磁屏蔽的电信装置；薄膜涂料；需要磁性特征的复合/混合系统；以及用于制冷或加热的电磁屏蔽装置和热磁冷却装置。

[0156] 下述示例用于说明本发明提供的合金、工艺、制品和性能。所述示例仅仅是说明性的，不旨在将本发明限于下列所述的材料、条件或工艺参数。

[0157] 示例

[0158] 第一组示例

[0159] 测试了标记为A-H的八种组合物。下表A列出了这八种组合物的组成成分。随后测试中，测试了第九组合物J，并且在此简单例举了出来。组合物H是可商购的合金(ToughMet®3或“T3”)，并且组合物J也是可以商购的合金(ToughMet®2或“T2”)。可以从美国俄亥俄州梅菲尔德海茨的美题隆公司购得组合物H和J。

[0160] 表A

[0161]

组合物	镍(重量百分比%)	锡(重量百分比%)	锰(重量百分比%)	铜(重量百分比%)
A	15	8	11	66
B	15	8	5	72
C	15	8	2	75
D	11	6	20	63

E	9	6	5	80
F	9	6	20	65
G	9	6	8	77
H(T3)	15	8	0	77
J(T2)	9	6	0	85

[0162] 全面加热材料(超过5000磅),将其连续铸造为标称8英寸直径的铸件。

[0163] 图9提供了这八种组合物在下列条件下是否具有磁性的数据:(a)当为铸态时;(b)在1450°F-1630°F的温度下均质化6-14小时后;(c)执行第二次均质化步骤后;以及(d)均质化和热墩之后。"WQ"代表水淬,"HU"代表热墩(合金厚度减少约50%)。存在强力稀土磁体时,可以通过估算样本的吸引力来确定组合物是否显示磁性倾向。如图所示,在"铸态"条件下一些合金的磁性可能被"关闭(turned off)"。

[0164] 图1是在1580°F温度下均质化6小时并进行水淬后的组合物A在50倍放大倍率下蚀刻的横截面。

[0165] 图2是在1580°F温度下均质化6小时并进行水淬后的组合物B在50倍放大倍率下蚀刻的横截面。

[0166] 图3是在1580°F温度下均质化6小时并进行水淬后的组合物C在50倍放大倍率下蚀刻的横截面。

[0167] 图4是在1580°F温度下均质化6小时并进行水淬后的组合物D在50倍放大倍率下蚀刻的横截面。其状态为熔融。

[0168] 图5是在1580°F温度下均质化6小时并进行水淬后的组合物E在50倍放大倍率下蚀刻的横截面。

[0169] 图6是在1580°F温度下均质化6小时并进行水淬后的组合物F在50倍放大倍率下蚀刻的横截面。其状态为熔融。

[0170] 图7是在1580°F温度下均质化6小时并进行水淬后的组合物G在50倍放大倍率下蚀刻的横截面。

[0171] 图8是在1580°F温度下均质化6小时并进行水淬后的组合物H在50倍放大倍率下蚀刻的横截面。

[0172] 图10提供了这八种组合物在1375°F-1580°F温度下均质化6小时之后(如合金所示)是否具有磁性的数据。如图所示,随后进行固溶退火。然后,将固溶退火的合金在600°F-1100°F温度下时效处理3小时。"AC"代表空冷。如图所示,当在约为750°F温度下时效时,合金磁性发生转变,合金"启动(turned on)"/再次获得磁性。

[0173] 图11提供了这八种组合物在经过如图所示的均质化和两次热轧步骤之后是否具有磁性的数据。在这方面,热轧不是在一个步骤中完成的,因此必须重新加热材料以便热轧到所需的厚度。接下来,将这些均质化和热轧的合金在1525°F温度下固溶退火5小时,然后使用如所示的炉冷或水淬进行冷却。将固溶退火和水淬的合金在800°F温度下时效处理1-24小时。"Fce cool"代表炉冷。组合物A,D和F未经测试。这表明可以通过时间、温度或它们的组合的变化来设计磁转变温度。

[0174] 在图12中,在各种温度下将这八种组合物首先均质化、然后热轧、最后固溶退火不同时间。在1540°F温度下将组合物A均质化8-10小时,随后进行空冷,在1475°F温度下加热2小时,进行热轧使合金横截面减少约67%,然后在1525°F温度下固溶退火2小时,最后水淬。

在1580°F温度下将组合物B、C、E和H均质化6小时，随后进行空冷，在1500°F温度下加热2小时，进行热轧使合金横截面减少约67％，然后在1525°F温度下固溶退火2小时，最后水淬。在1300°F温度下将组合物D、F和G均质化20小时，不用冷却，直接进行热轧，使合金横截面减少约67％，然后在1400°F温度下固溶退火2小时，最后水淬。在这些处理之后，在600°F-1100°F温度下将现在经过固溶退火的组合物时效处理3小时，然后进行空冷。图12提供这些处理之后合金是否具有磁性的信息。当在约为750°F温度下时效处理时，中等含量的锰的合金的磁性再次发生转变。

[0175] 在图13中，将图12中所示的八种组合物经过均质化、热轧和固溶退火处理。在水淬后，冷轧所述组合物，其中，所述冷轧程度使合金横截面面积要么减少20％，要么较少37％。结果表明，冷轧没能“启动”磁性行为。接下来，将冷轧使合金横截面面积减少21％的组合物在600°F-1100°F温度下时效处理3小时，然后进行空冷。图13提供这些处理之后合金是否具有磁性的信息。然而，时效能够影响磁性。

[0176] 在图14中，将图13中冷轧程度为37％的组合物在600°F-1100°F温度下时效处理3小时，然后进行空冷。同理，时效能够影响磁性。

[0177] 在图15中，在1580°F温度下将组合物A、B、C、E、G和H均质化6小时，随后进行空冷，然后在1525°F温度下最少加热6小时，最后，挤压组合物(合金横截面面积减少为88％)。在1300°F温度下将组合物D和F均质化20小时，随后进行空冷，最后，挤压组合物，使合金横截面减少约88％。在1430°F温度下将组合物D和F再独立均质化10小时，随后进行空冷，然后在1300°F温度下最少加热6小时，最后，挤压组合物(合金横截面面积减少为88％)。在1580°F温度下将组合物J均质化4小时，随后进行空冷，然后在1500°F温度下最少加热6小时，最后挤压组合物，使合金横截面减少约88％。在组合物A-H的热挤压中，机械地向前挤压8英寸直径的坯料，使其成为直径为2-5/8英寸的棒材。在组合物J的热挤压中，机械地向前挤压6英寸直径的坯料，使其成为直径为2英寸的棒材(挤压使合金横截面减少约89％)。然后将挤压的合金在1295°F-1650°F的温度下固溶退火2小时，然后进行水淬。为简洁起见，表中仅显示了一半的固溶退火温度。图15中确定了经过上述处理之后，合金是否具有磁性。

[0178] 使用具有直接读出功能的FerroMaster仪器测量相对磁导率，根据标准EN 60404-15进行校准和操作。较高的值表示易磁化，而且最大值为1.999。大于1.999的相对磁导率超出了测量设备的范围。图16-22列出了在经过图9-15描述的处理步骤之后组合物的相对磁导率。

[0179] 使用涡流电导率仪测量电导率。图23-29列出了在经过图9-15描述的处理步骤之后组合物的电导率(％IACS)。应注意，涡流受磁性影响，因此对于磁性更高的合金/条件，涡流电导率仪的读数并不完全准确，它只能间接确认合金的磁性水平。

[0180] 还使用洛氏B或C硬度测试方法测量组合物的硬度。图30-36列出了在经过图9-15描述的处理步骤之后组合物的硬度。理想地，在加工成产品后，所述合金具有高屈服强度和高冲击韧性。

[0181] 弹性模量

[0182] 使用常规拉伸试验算法估算组合物A-J的弹性模量，所述算法可以测量出测试的第一部分期间的应力-应变曲线的斜率。平常，涉及到测试材料的拉伸弹性柔量并且与合金热处理无关的这种估算被视为是有用的。照此，在95％的置信区间内，所有组合物的的弹性

模量范围为16,000,000psi-21,000,000psi。通常，例如在该范围内的较低的模量值有益于弹簧的各种应用，例如，在电子装置连接器、柔性平台、用于RFI/EMF机柜的大位移屏蔽组件、或者包含对电磁或射频干扰敏感或可以辐射所述干扰的装置的电子盒中。结合高屈服强度，对于柔性装置，可以通过较小的力和较低的弹簧常量实现较大位移。作为对比，钢和镍合金的模量水平约为30,000,000psi，或比本发明的磁性铜合金高约40-90％。铝合金的弹性模量(13,000,000psi)明显较低，并且不具备足够的强度以提供大位移。诸如钛的其它金属和合金由于具有各向异性晶体结构，因此，基于取向，它们的模量变化很大。

[0183] 密度

[0184] 使用阿基米德法、质量/尺寸方法和其它类似技术能够估算出组合物A-J的密度，但是并不需要使用同一方法。在各种加工和热处理条件下的所有组合物的密度在约为8-9g/cm^3(0.30-0.33lbs/in^3)的范围内。

[0185] 第二组示例

[0186] 在各种温度下对组合物A-J的样本进行时效处理之后，测试组合物A-J的样本以测量它们的最大磁吸引距离(MAD，以厘米为单位)。可以通过测量强力稀土磁体受样本的影响的距离来完成所述测试。图37示出了每种组合物的最大MAD。注意，组合物H和J不含锰，所以，如预期的一样，测量得到它们的MAD为0cm。另外，作为对比，可以看出，在室温下，含有99.99％镍的样本(已知的，为铁磁材料)的MAD为9.7cm。

[0187] 第三组示例

[0188] 将一组棒材热挤压，然后进行各种固溶退火和时效处理。通过测量经过处理的样本接近强力的串悬浮稀土磁体时的首次移动距离来测量这些加工过的材料的磁性行为。这个距离R(为以cm表示的利兹勒距离(Ritzler距离))，也被称为“磁吸引距离”(MAD)。

[0189] 组合物H，即基线铜-镍-锡合金，Cu-15Ni-8Sn(ToughMet®3或“T3”)没有磁性，同时能够对所述组合物进行热处理，使其极限拉伸强度超过140ksi；与此同时，保持至少5％的可用延展性，其中所述延展性由拉伸伸长率测量而出。表B示出了与ToughMet®3进行比较，具有标称重量比Ni:Sn为1.9:1的宽范围内合金的最大强度的结果。

[0190] 表B

[0191]

组合物	镍(重量百分比%)	锡(重量百分比%)	锰(重量百分比%)	0.2%屈服强度(ksi)	极限拉伸强度(ksi)	伸长率%	硬度(HRC)	距离R(cm)
H	15	8	0	129	148	8	34.7	0.0
C	15	8	2	135	143	4	33.6	0.6
B	15	8	5	125	145	4	31.3	4.5
A	15	8	11	119	145	5.4	28.1	8.0

[0192] 表B示出了几个热处理实验的结果，并列出了在给定的峰值时效温度下获得的最大极限拉伸强度。均质化和热加工之后进行热处理，将直径为8英寸的坯料挤压成直径为2.8英寸的棒材。将合金在各种温度下固溶退火2小时，然后水淬。这些实验确立了Ni、Sn和Mn完全溶解的最低温度，如偏移量为0.2％时的最小屈服强度(YS)、极限拉伸强度(UTS)和硬度值所指示。所述固溶退火处理会产生由晶粒组成的平衡微结构，并且在晶界或晶粒内

没有析出物，如图51A所示。在固溶退火步骤之后，高温处理所述合金，然后进行拉伸试验以检查其对热循环的响应。通过这些时效处理(固溶退火和高温处理)的组合所得到的总体性能是本领域技术人员已知的“时效反应”。

[0193] 根据热处理历史，合金会通过展示最大值或最小值来对最终热处理温度的增加作出大体趋势的反应。通常，如果施加给定的温度范围，则将显示“峰值”强度；或者在伸长的情况下，具有与峰值强度大致同步的最小值。对于可沉淀硬化合金，该条件被描述为“在_°F的时效温度下，峰值时效处理_小时，然后空冷”。该条件反映了合金的状态，在该状态中纳米结构的分布使强度产生了独特的最大值。这是一个独特的状态，是唯一的能够估算各种合金的冶金状态的状态，并且，可以通过温度(T)和时间(t)的多种组合在热力学上实现所述状态。

[0194] 现在参考表B，可以说Cu-15Ni-8Sn-xMn(基于T3的)合金可以在Mn含量范围(0-20wt％)相对大的情况下达到140ksi的最小极限拉伸强度。可以预计的是，随着Mn含量的增加，以及Ni和Sn的总含量的降低，会使时效反应退化。这是因为当Ni和Sn的总量减少时，形成能够产生强度的沉淀或其它相的溶质的体积减小了。令人惊讶的是，Mn含量的增加并没有显著降低合金的极限拉伸强度。看起来，Mn的存在在极限拉伸强度中起“辅助”作用。

[0195] 这预示本发明公开的合金的力学性能和磁性性能的组合良好。合金的磁强度随着Mn含量的增加而增加，如Ritzler测量系统所估算的，显示距离R从0变化到11cm。所述Ritzler测量系统还被设计为显示在哪个距离处稀土磁体停止/开始影响合金的吸引力。这也称为磁吸引距离(MAD)。结论是尽管Ni和Sn的总含量减少，但合金中Mn的存在使合金保持高屈服强度和高极限拉伸强度，同时会影响合金的磁性。

[0196] 表B中T3基合金的一些趋势值得注意。极限拉伸强度(UTS)在很大程度上不受Mn影响，至少当Mn的含量小于11％时不受影响(UTS的变化量小于约10ksi)。屈服强度相对不受Mn含量增加的影响，但是当Mn含量在11％时，屈服强度似乎略有下降(约10ksi)。根据拉伸试验中的伸长率估算结果，延展性在Mn含量在0-11％之间存在最小值。磁吸引距离R连续地增加到约11cm。

[0197] 表C包含了几种Cu-9Ni-6Sn-xMn(基于T2的)合金(Ni:Sn比为1.5)的结果，以峰值时效条件下的力学性能和各自的磁强度为特征。在这些合金中，随着Mn含量的增加，峰值时效强度显著降低。尽管Cu-9Ni-6Sn-xMn合金没有完全表征，但是，其磁力似乎随着Mn含量的增加而增加，这类似于表B中的T3基合金(Ni:Sn比为1.9)。

[0198] 表C

[0199]

组合物	镍(重量百分比%)	锡(重量百分比%)	锰(重量百分比%)	0.2%屈服强度(ksi)	极限拉伸强度(ksi)	伸长率%	硬度(HRC)	距离(cm)
J	9	6	0	106	124	6	26.5 HRC(估算为107 HRB)	0.0
E	9	6	5	75	112	10	95.7	6.7
G	9	6	8	66	101	8	93.2	5.2
F	9	6	20	62	107	20	96.5	4.6

[0200] 表C中T2基合金的一些趋势值得注意。通过在峰值时效条件下添加Mn，强度性能显著降低。可以看出，屈服强度和极限拉伸强度也会降低，其中，屈服强度约为40ksi，极限拉伸强度约为25ksi。磁参数R显示在Mn的含量在0-8％之间时出现峰值。不幸的是，组合物F，即，锰含量为20％的合金，仅能在Mn含量超过8％时有限地洞察其力学性能和磁性性能，并且在确定时效响应之前未完全固溶退火。这是因为在超过1385°F温度下固溶退火后，如果立即水淬，合金容易裂开。

[0201] 现在参考表D，具有Ni:Sn为1.8(Cu-11Ni-6Sn-20Mn，即组合物D)的组合物在标称峰值时效下显示的屈服强度和极限拉伸强度非常低。在较高的固溶退火温度(>1385°F)的水淬期间，该组合物也有在固溶退火期间裂开的倾向。这与组合物F的行为相似，这可以表示高Mn含量下不同的冶金效应。

[0202] 表D

[0203]

组合物	镍(重量百分比%)	锡(重量百分比%)	锰(重量百分比%)	0.2%偏移量的屈服强度(ksi)	极限拉伸强度(ksi)	伸长率%	硬度(HRC)	距离(cm)
D	11	6	20	56	103	19	94.8	4.5

[0204] 当Ni:Sn的比例约在1.5-1.9的范围内时，锰会对Cu-Ni-Sn体系的力学性能产生影响。图38A-38E示出了表B、C和D的合金中的锰含量与各种力学性能的关系的五个图。这些图示出了Cu-15-Ni-8Sn-xMn(基于T3)和Cu-9Ni-6Sn-xMn(基于T2的)合金具有的基于Mn含量的峰值时效力学性能。

[0205] 从工程角度来看，结构能力和磁性行为之间的关系很重要。图39A示出了挤压成(热加工)成棒状的组合物A(即，Cu-15Ni-8Sn-11Mn合金)的磁吸引距离(MAD)和0.2％偏移量时的屈服强度之间的关系示例，其中，在1475°F或1520°F温度下固溶退火所述组合物2小时，然后进行水淬(WQ)，随后，在逐渐升高的温度下进行时效处理。在这种情况下，每个时效处理的温度约为700°F-1100°F，时间为2小时，然后进行空冷。固溶退火温度似乎不影响力学性能和磁性性能的时效反应。

[0206] 在图39A中，在近835°F时，最高屈服强度约为120ksi时，组合物A出现峰值时效。当温度约为850°F-900°F时，出现磁吸引距离的最大值，这在某种程度上有点过时效热处理特性。因此，磁吸引距离(MAD)在与达到强度峰值不同的温度下达到峰值。该图还显示，对于给定的屈服强度，仅对这些经过挤压、固溶退火和时效处理的材料进行过时效处理，就可以得到较大的磁吸引力距离MAD。

[0207] 如图39B所示，其它组合物的响应有所不同。图中示出了四种Cu-15Ni-8Sn-xMn合金的磁吸引距离(MAD)和0.2％偏移量时的屈服强度之间的关系，所述合金包括图39A所示的组合物A。可以观察到，该体系可以实现较宽范围内的强度-磁性的组合。这一发现表明，可以定制作为一个体系的合金，以解决涉及结构和磁性因素的工程问题。即，可以使用具有较宽范围的合金组合物、时效温度和时间的组合选择，以满足在最小强度下需要具有足够的磁吸引力的应用。

[0208] 图39C示出了四种Cu-9Ni-6Sn-xMn合金的磁吸引距离(MAD)和0.2％偏移量时的屈服强度之间的关系。这种关系趋势与Mn含量增加、Ni:Sn＝1.5较低的合金的趋势相似，但是

其屈服强度由于Mn的增加而显著降低。可以将磁吸引距离定制为较高的值，其可以和Ni:Sn＝1.9的合金的磁吸引距离相同。

[0209] 图39D示出了Cu-11Ni-6Sn-20Mn合金，即，组合物D的磁吸引距离(MAD)和0.2％偏移量的屈服强度之间的关系。所得的磁吸引距离与组合物F的磁吸引距离相似。

[0210] 合金F(Cu-9Ni-6Sn-20Mn)和D(Cu-11Ni-6Sn-20Mn)的磁吸引距离R的值处于中等范围内，但是根据它们在表C和D中的YS和UTS值，可以看出其强度非常低。虽然这些合金的固溶退火不充分(由于在固溶退火后立即进行水淬，导致合金裂开)。但是，时效时如果有淬火速率较低的介质，这些合金的强度-磁吸引组合范围可能更广。

[0211] 图40A-40E详细说明了上述所有合金的时效反应。图40A示出了0.2％偏移量时的屈服强度和时效温度之间的曲线图。图40B示出了极限拉伸强度(UTS)和时效温度之间的曲线图。图40C示出了伸长率(％)和时效温度之间的曲线图。图40D示出了硬度(HRC)和时效温度之间的曲线图。图40E示出了磁吸引距离和时效温度之间的曲线图。通常，除了非磁性的组合物H和J，其它组合物的力学性能和磁性行为(不包括能找到最小值的％伸长率)在时效温度范围内达到最大或“峰值”。

[0212] 所有的曲线图表明：在一个单一时效温度下，力学性能和磁吸引距离的峰值条件不一定匹配。换句话说，磁吸引距离可以在与强度峰值(YS或UTS)的温度不同的温度下达到峰值。这意味着为了提供力学性能和磁性能的组合，可以定制合金。例如，通过选择适当的合金基体并在特定的时效温度/时间组合下处理该基体，可以实现需要最小力学强度和最小磁吸引距离的应用。可以通过一种工艺制作一系列具有独特且可预测的强度和磁性强度的组合的合金，所述工艺包括铸造、均质化、热加工、固溶退火和不同温度下时间充足的时效，以实现目标磁性强度和磁吸引力的组合。

[0213] 第四组示例

[0214] 微结构检查

[0215] 在所有处理步骤中都要检查微结构以确保每个工艺完成其预期的功能。使用微结构检查作为比较和对比各种合金的处理结果的一种方法。可以通过眼睛和诸如立体显微镜法、光学金相学法、共焦激光扫描显微镜(CLSM)法、扫描电子显微镜(SEM)法和扫描透射电子显微镜(STEM)法等各种方法检查微结构。使用X射线衍射(XRD)测定晶体结构。

[0216] 在立体显微镜法、光学金相学、CLSM法、SEM法和XRD法中，样本制备包括：切片；然后使用越来越细的介质进行研磨和抛光以产生镜面抛光表面。可以以抛光态检查样本。为了增强某些相和晶界，随后使用硝酸铁、盐酸和水溶液[$Fe(NO_3)_3$+HCl+H_2O]蚀刻抛光的样本。然后，可以在蚀刻条件下检查样本。在STEM法中，制备样本需要使用一种特殊的聚焦离子束(FIB)研磨样本的技术，以生成埃级厚度的箔样本(其厚度用埃计量)。

[0217] 固溶退火处理

[0218] 固溶退火被设计为用以消除之前加工步骤的影响，其允许成分进入固溶体，并通过快速冷却将这些成分保持在溶液中。可以将固溶退火与将金属返回到“空白状态”情况进行比较，从而可以通过诸如冷加工和附加的热处理等多种方式处理金属以达到期望的力学性能。

[0219] 在五种不同的温度下对所有组合物进行固溶退火，并通过光学显微镜检查微结构。所有固溶退火材料显示出大体等轴的奥氏体微结构，其通常含有退火双晶。并且没有析

出物。图51A示出了经过在1500°F温度下固溶退火的组合物G的纵向显微图像。在蚀刻条件下显示该特定样本，而且使用具有亮场照明的金相显微镜在200x放大倍率下拍摄该图像。图51B示出了500x放大倍率下，组合物G的微结构。这些微结构是在固溶退火条件下检查的所有材料的代表，显示出了由双晶或晶界限定的无特征晶粒内部构造。

[0220] 接下来，扫描透射电子显微镜(STEM)使用透射电子(TE)成像来检查在1520°F进行固溶退火的组合物A。图52示出了250,000x放大倍率下，组合物A的透射电子图像。此处，也没有明显的析出物。但是，应该注意到位错。位错表示晶体结构中的线性缺陷。线缺陷被称为边缘位错；螺线中的缺陷称为螺旋位错。或者，线缺陷和螺线缺陷的组合被称为混合位错。

[0221] 时效硬化

[0222] 时效被设计为用于通过适度高温热处理来增强材料的性能。时效引发的性能增强往往归因于成分的析出或相变。

[0223] 在4至9个不同的温度下对所有组合物进行时效处理。测试时效材料的力学性能、韧性和硬度，产生每种性能的时效响应曲线。这些曲线如图40A-40E所示。根据时效曲线中的三个位置选择每种组合物的三个样本进行微结构检查：低(“欠时效”)，高(“峰值时效”)和低(“过时效”)。

[0224] 在欠时效条件下，实验组合物C和基线组合物H和J显示出大体等轴的奥氏体微结构，其类似于固溶退火样本。从欠时效-峰值时效-过时效过程中，组合物H和J的微结构从晶界偶尔有珠光体析出物到完全转变成珠光体微结构。

[0225] 相反，当时效时，实验组合物A、B、D、E、F和G中显示出新的晶内析出物。因此，出现了三组取向在互成标称角度为60°的方向上的线，并且在较低的放大倍数下(比如，低于500x的放大倍数)观察时，生成了几何图案。在不包含双晶的晶粒中，统一的几何图案在整个晶粒中很明显。相邻的晶粒显示出取向稍微不同的几何图案。当存在双晶时，双晶内的几何图案与母粒的图案的取向略有不同。在一些实验组合物中，从欠时效时条件到峰值时效条件再到过时效条件的过程中，晶内析出物的感知量增加了。

[0226] 图53示出了时效微结构的一个示例。该图示出了在蚀刻条件下的组合物F，其中，当温度为910°F时对所述组合物F进行峰值时效。使用具有亮场照明的金相显微镜在500x放大倍率下拍摄图像。显示的晶内析出物的几何图案为紧密间隔的暗线。该微结构代表时效实验组合物A、B、D、E、F和G。

[0227] 借助三维点对点激光扫描，共聚焦激光扫描显微镜(CLSM)可以增强地形特征。三维点对点激光扫描可通过电脑将所述地形特征重构成单个图像。为了更好地显现新相的几何图案，使用CLSM检查选择的实验组合物A、F和G的样本。

[0228] 图54A示出了500x放大倍率下，峰值时效温度为910°F的组合物F的CLSM图像。图54B示出了1500x放大倍率下，峰值时效温度为910°F的组合物F的CLSM图像。在较高的放大倍率下，之前大体为线条的析出物变成了取向在几何图案中的微小的针状析出物。

[0229] 图54C示出了500x放大倍率下，峰值时效温度为835°F的组合物A的CLSM图像。图54D示出了1500x放大倍率下，峰值时效温度为835°F的组合物A的CLSM图像。位于几何图案中的微小的针状析出物与组合物F的析出物相似。

[0230] 图54E示出了500x放大倍率下，过时效温度为1100°F的组合物F的CLSM图像。图54F

示出了1500x放大倍率下，过时效温度为1100°F的组合物F的CLSM图像。这里新相析出物的几何图案的针状特性尤其明显。

[0231] 扫描电子显微镜(SEM)用于检查实验组合物A和F以及基线组合物H的蚀刻时效样本。图55A示出了1500x放大倍率下，过时效温度为1000°F的组合物A的SEM图像。析出物的几何图形很明显。图55B示出了10,000x放大倍率下，过时效温度为1000°F的组合物F的SEM图像。晶粒内的析出物的针状(acicular/needle-shaped)性质很明显。在一些时效样本中，沿着晶界，能够注意到形状不规则的析出物和偶尔的珠光体集落。

[0232] 图55C示出了3000x放大倍率下，过时效温度为1100°F的组合物F的SEM图像。图55D示出了10,000x放大倍率下，过时效温度为1100°F的组合物F的SEM图像。此处，可以看到同样的几何图案。在图55C中也可以沿着右边的晶界，在下部晶粒中观察到双晶界。析出物的针状特性很明显。在图55D中，浅色的针状相似乎是从深色的蚀刻基底突出。沿着晶界，形状不规则的析出物仍然很明显。

[0233] 已经参考上文提到了“几何图案”。在图60A-60F中，将图53、54A-54F、55A和55C所示的图像上画上了线条，以示出/证实几何图案中的三组线的标称角度为60°的角之间的关系。

[0234] 接下来，选择对在温度为910°F时被稍微过时效处理的实验组合物A的样本，通过扫描透射电子显微镜(STEM)进行检查。使用透射电子(TE)和Z对比度(也称为ZC或原子序数对比度)成像在高达1,800,000X的放大倍率下检查箔片样本。图56A示出了20,000X放大倍率下组合物A的ZC图像。出现的析出物和图55A和55B所示的SEM图像中的析出物非常类似。但是，使用STEM可以更容易看出本图中析出物的针状特性。在ZC成像中，析出物的较浅的颜色表示析出物所含的单个/多个元素的原子序数比基材所含的元素的原子序数高。

[0235] 图56B示出了50,000X放大倍率下组合物A的ZC图像。图56C是50,000X放大倍率下的示图，所述示图不使用TE成像。利用薄膜样本的埃级薄膜特性(其厚度用埃计量)，高能电子能够通过箔片，从而产生类似于射线照片(X射线图像)的TE图像。图56C中的一系列(约六个)析出物(被框起来)的取向看起来接近指向观察者的轴线(终点)。这个观察点表明析出物的形状是扁棒。

[0236] 通过X射线衍射(XRD)的晶体结构

[0237] 接下来，从挤出棒中选取样本进行XRD测试。集中采用半径中等的棒材作为径向和横向样本。第一组样本仅进行固溶退火，而第二组样本先进行固溶退火然后进行时效处理。X射线衍射(XRD)用于确定这些样本的晶体结构(原子排列)和晶格参数(原子间距)。下面的表E中示出了样本。还应注意，组合物H不含锰。

[0238] 表E

[0239]

编号	组合物	原形	磁吸引距离(cm)	固溶退火温度(°F)	时效温度(°F)
14	A	棒	1.7	1520	-
6	A	棒	11.3	1475	910
15	E	棒	1.0	1400	-
7	E	棒	9.5	1400	910
17	H	棒	0.0	1475	-
16	H	棒	0.0	1475	715

[0240] 图57比较了样本14和6(即组合物A)。“R”表示径向样本，“T”表示横向样本。X射线光谱显示组合物A在固溶退火条件下具有约为3.6埃(Å)晶格参数的面心立方(FCC)结构(见左图)。然而，在进行时效时，新的FCC相显而易见，其具有约为6.1 Å的晶格参数，并且占FCC结构的重量百分比为14-15％。时效样本(样本6)的峰值表示新相，在图57中，用箭头标记新相。虽然新相的峰值位置相对母相发生了位移，但是它们的晶面相同，这表明它们只有晶格参数不同。

[0241] 图58比较了样本15和7(即组合物E)。组合物E在固溶退火条件下也具有约为3.6埃(Å)晶格参数的FCC结构(见左图)。在时效组合物E时，新的FCC相显而易见，其具有约为3.0 Å的晶格参数，并且占FCC结构的重量百分比为10-11％。时效样本(样本7)的峰值表示新相，在图58中，用箭头标记新相。

[0242] 最后，图59比较了样本17和16。组合物H在固溶退火和时效条件下均具有约为3.6埃(Å)晶格参数的面心立方(FCC)晶体结构。换句话说，时效后没有新相。在图57-59所示的光谱对中，当比较R和T取向样本时，相、晶格参数和相百分比一致。在时效的组合物A和E中，通过XRD鉴别出来的新相与针状析出物有关，所述析出物可通过光学显微镜法、CLSM法、SEM和STEM从几何图案中鉴别出。

[0243] 磁吸引距离(MAD)

[0244] 在挤压、固溶退火和时效条件下测量组合物H、A和E的MAD。组合物H是一种非磁性合金(其MAD总为0cm)，可以通过亚稳态硬化实现所述合金的时效。图41A示出了组合物A在挤压态、固溶退火和时效条件下的MAD。应该注意，其MAD值从固溶退火到时效条件下明显增加。组合物A是一种包含11％Mn的合金。在固溶退火条件下，其有一定的磁性(MAD为1.7-5.7cm)，而且其YS、UTS和硬度较低。但是在时效条件下，其磁性较强(MAD值为3.2-11.3cm)，而且其YS、UTS和硬度都会增加。图41B示出了组合物E在挤压态、固溶退火和时效条件下的MAD。应该再次注意，其MAD值从固溶退火到时效条件下明显增加。相似地，组合物E是一种包含5％Mn的合金。在固溶退火条件下，其稍有磁性(MAD为1.0-1.4cm)，而且其YS、UTS和硬度较低。但是在时效条件下，其磁性较强(MAD值为2.2-9.5cm)，而且其YS、UTS和硬度都会增加。

[0245] 微结构和晶体结构的观察概述

[0246] 通过光学显微镜观察到固溶退火的实验组合物A-G和基线组合物H和J的微结构为奥氏体，并通过XRD证实其具有FCC晶体结构。实验组合物A-G在完全固溶退火条件下的磁性较弱。基线组合物H和J没有磁性(其MAD为0cm)。

[0247] 时效时，实验组合物C和基线组合物H和J仍然保持为奥氏体。巧合的是，组合物C在时效条件下仅磁性较弱，基线组合物H和J在时效条件下没有磁性。相反，实验组合物A、B、D、E、F和G在时效条件下显示出新的晶内析出物。通过光学显微镜和较低放大倍率的CLSM可以看到，新的析出物显示为三组暗线，其取向在彼此成60°角的方向上，从而生成了几何图案。实验组合物A、B、D、E、F和G在时效条件下磁性显著(通过MAD可以发现)。

[0248] 在CLSM、SEM和STEM中的放大倍率大于1000x时，可以观察到，新析出物的几何图案由针状颗粒组成。在50,000x放大倍率下使用STEM时，针状颗粒看起来是扁棒状。通过XRD，证实这种新的析出物(相)的晶体结构为FCC结构。虽然新析出物的峰值位置相对它们的母

相发生了位移，但是它们的晶面相同(都是FCC)，这表明它们的晶格参数不同。

[0249] 根据1982年美国材料信息学会(ASM International)公布的由J.R.戴维斯(J.R.Davis)编纂的“ASM材料工程词典”，“魏德曼(Widmanstätten)结构”被定义为“一种由形成的新相沿着母体固溶体的某些晶面而形成几何图案的结构。在晶体结构上，新相中晶格的取向与母相中晶格的取向有关。”与母相的FCC晶体结构相比，新相的几何图案和FCC晶体结构表明，新相以Widmanstätten花纹模式分布。通过MAD，磁性行为从“无”或“弱”到特别明显的增加过程也与时效条件下新的晶内相的存在一致，这表明新相影响实验组合物A、B、D、E、F和G的磁性。

[0250] 当在锰含量大于2％的组合物中开始出现峰值或过时效性能时，存在一种新的析出物会突出显现的倾向。新的析出物均匀分布在晶粒内(即，晶内(intragranularly))。在金相平面视图中，可以看到“线”的三个主要方向，无疑地，这和晶体结构有关。在中等放大倍率(>1,000X)下，线的几何图案由析出物构成，所述析出物的形状为针状棒体。在中等放大倍率下，针状析出物的横截面为类椭圆形，但是，在高放大倍率(>30,000X)下，针状析出物的横截面看起来更像一个方形面，其可能为矩形或平行四边形。在横截面中，析出物的宽厚比约为(1-3)：1，析出物的长厚比约为9:1。应该注意，析出物不是片状、球状、条状或长方体状。

[0251] 第五组示例

[0252] 可以使用振动样品磁强计(VSM)测量基本磁性的特征。在使用VSM期间，使用电磁体将磁场施加到振动样本，并且可以根据拾波线圈中的感应电压计算样本的磁矩。可以通过施加磁场来确定样本的磁滞行为，其中，施加磁场时，先在一个方向上施加，然后在相反的方向上施加磁场。从磁滞回线得出的一些关键性能包括：(1)最大饱和磁矩，m_s；(2)“剩磁”，m_r，其为去除外部磁场后样本的剩余磁矩(或样本保持其磁化强度的能力)；和(3)“矫顽力”H_c，指为了使样本去磁所需的磁场强度或磁化力。可以从这些关键性能中得出其它磁性特征，如：矩形比(m_r/m_s)和开关场分布(SFD；ΔH/Hc)。

[0253] 基于MAD来筛选时效条件下的轧制板和挤出棒，并且通过VSM在3个方向上测试选择的样本。样本代表在两种样式(板和棒)下具有各种处理参数的五种组合物。挤出棒的样本从具有中等半径的挤出棒之中选择，并且恰当地朝向3个主要方向(纵向、横向和径向)上。下表F中显示了样本1-13。“SA Temp”表示固溶退火温度。“CR”表示冷轧百分比。

[0254] 表F

[0255]

编号	组合物	样式	密度 (g/cc)	磁吸引距离(cm)	SA Temp (°F)	CR(%)	时效温度(°F)
1	A	棒		9.7	1475	0	835
2	A	棒		9.5	1520	0	870
3	E	棒	8.78	9.5	1500	0	870
4	G	棒	8.62	8.5	1400	0	850
5	G	棒	8.65	8.5	1500	0	850
6	A	棒	8.61	11.3	1475	0	910
7	E	棒	8.78	9.5	1400	0	910
8	A	板	8.66	8.8	1525	0	900
9	A	板	8.61	6.7	1525	21	800
10	D	板	8.23	6.9	1400	21	800
11	E	板	8.83	7.3	1525	21	900
12	F	板	8.17	7.6	1400	21	800
13	A	板		7.2	1525	37	900

[0256] 图42示出了通过两种样式(棒和板)和组合物形成的的磁吸引距离的柱状图。如图所示,通常,棒材的磁吸引距离高于板材的磁吸引距离。

[0257] 磁滞回线在纵向、横向和垂直方向(径向)上非常相似。为了简单起见,仅呈现横向上的数据。图43示出了按照样式(棒和板)分类的每个样本的磁矩(m,以emu度量)与磁场强度(H,以奥斯特(Oersted)度量)的对比图,例如,所述图可以为磁滞曲线。所有样本都显示出可测量的磁性行为,并具有较窄的磁滞回线,这表明磁力换向(通过施加磁场实现)时能量损失很小。

[0258] 显示关键磁性的一种流行方式是仅绘制磁滞回线的第二象限。该象限中的数据被称为材料的“去磁曲线”,其包含材料的基本性能信息(剩磁和矫顽力)。剩磁或剩余磁矩(mr)是曲线与y轴交叉的位置;矫顽力(Hc)是曲线穿过x轴的绝对值的位置。图44示出了一组(2条)按样式(棒和板)区分开的样本的退磁曲线。下表G列出了所测试的五种组合物(“Comp”)(不考虑样本样式和处理)中的每一种组合物具有最高剩磁的样本的横向取向的磁性,以及其它关键性能。“m_s”是最大饱和磁矩。“SQ”是矩形比。“Sigma”是每单位质量的最大饱和磁矩。“SFD”是开关场分布。“MAD”是磁吸引距离。

[0259] 表G

[0260]

Comp	编号	式	mr (emu)	Hc (Oe)	ms (emu)	SQ (m_r/m_s)	Sigma (emu/g)	SFD (ΔH/Hc)	MAD (cm)
A	8	板	0.5087	117.9	1.406	0.3619	8.688	0.7896	8.8
D	10	板	0.1679	167.8	0.6299	0.2666	6.644	0.8043	6.9
E	7	棒	0.2185	142.9	0.5912	0.3696	5.010	0.7354	9.5
F	12	板	0.2069	197.8	0.6797	0.3044	6.247	0.7601	7.6
G	4	棒	0.2309	125.4	0.6567	0.3516	4.800	0.7646	8.5

[0261] 图45-50示出了表F中列举的所有样本在三个取向(纵向、径向和横向)上各种测量结果的柱状图。图45示出了样本的剩磁或剩余磁矩(m_r)的柱状图。剩磁的取值范围约为0.1-0.6emu。图46示出了样本的矫顽力(Hc)的柱状图。矫顽力的取值范围约为45-210奥斯特。图47示出了样本的最大饱和磁矩(m_s)的柱状图。最大饱和磁矩的取值范围约为0.4-1.5emu。图48示出了样本的矩形比的柱状图。矩形比的取值范围约为0.1-0.5。图49示出了样本的Sigma的柱状图。Sigma的取值范围约为4.5-9.5emu/g。图50示出了样本的开关场分布(ΔH/Hc)的柱状图。开关场分布的取值范围约为0.3-1.0。

[0262] 居里温度数据

[0263] 还可以使用VSM来确定板和棒样本的居里温度。居里温度是铁磁材料变成顺磁材料的温度。在热磁测试之前,在纵轴上用72千奥斯特(kOe)的强磁场磁化样本。将每个样本放置在真空或惰性保护环境中,同时在沿纵向施加的+10kOe磁场中将样本从室温加热到1650°F。将磁化(M)记录作为温度(T)的函数。利用所得的M-T热磁曲线来估算居里温度。居里温度的误差高达±40°F。在表G中显示估算的居里温度。应该注意,在试验期间样本10和12(分别为组合物D和F的板状样本)被熔化了。

[0264] 表G

[0265]

编号	组合物	样式	估算的居里温度°F
6	A	棒	174
8	A	板	176
9	A	板	176
10	D*	板	203
3	E	棒	176
7	E	棒	172
11	E	板	162
12	F*	板	203
4	G	棒	189
5	G	棒	172

[0266] 在测试期间被熔化的样本

[0267] 第六组示例

[0268] 制备了一些铜-镍-锡-锰-钴合金。如下表H所示,两种含钴合金在铸态条件下具有磁性。因此,钴的存在不会损害磁性。

[0269] 表H

[0270]

组合物	铜(重量百分比%)	镍(重量百分比%)	锡(重量百分比%)	锰(重量百分比%)	钴(重量百分比%)	是否具有磁性
F	65	9	6	20	0	是
F6	68	9	3	20	13	是
F7	68	8	4	20	1	是

[0271] 第七组示例

[0272] 存在强力稀土磁体时,对选择的两种组合物的时效样本进行热处理。热处理时,将

材料在均匀的磁场中进行热处理。人们认为所述工艺能在高温下强化磁畴的取向，从而增强室温下的磁性能。样本取向平行于3000高斯的均匀磁场。将样本加热，保温约20分钟，随后缓慢冷却至室温。然后使用VSM在纵向上测试样本。

[0273] 当规定了所述磁性处理时，每种组合物会经过两次处理。一种处理是如上所述施加磁场，另一种处理是不加磁场。热处理条件包括低于和高于各自居里温度的温度条件和几个高温条件。编号为12的样本由组合物F制成，具有相对较高的m_s，m_r和Hc，并且其Mn含量很高。编号为13的样本由组合物A制成，其具有合适强度的Hc和中等含量的Mn。在比居里温度低约120°F和高约300°F的热处理条件下，比如，在约为212°F、约为345°F和约为570°F的条件下，施加磁场的组合物和未施加磁场的组合物的磁性能几乎没有差异(变化约为0-12％)。经过温度约为930°F的热处理后，与预处理状态相比，在磁场中进行热处理的样本的磁性能和没有在磁场中进行热处理的样本的磁性能的变化显著。结果如表I所示。

[0274] 表I

[0275]

编号	组合物	是否施加磁场?	m_r的变化	m_s的变化	Hc的变化
12	F	否	-93％	-83％	-75％
12	F	是	-97％	-72％	-90％
13	A	否	-82％	-25％	-81％
13	A	是	-54％	-12％	-66％

[0276] 可以看出，当单独进行热处理时，磁性特征会显著降低。与预处理状态相比，在没有施加磁场时，组合物A的磁性变化较大；施加磁场后，组合物A的磁性变化较小。组合物F的磁性变化结果有时大有时小。这表明晶体结构发生了热变化。因此，合金的磁性可以表示成组成物以及制造过程中的温度和磁场的函数。

[0277] 这也表明本发明的磁性铜合金可能适用于热辅助磁记录(HAMR)。在HAMR中，将热源短暂地施加到记录介质(盘)上，以减小记录头在施加的磁场下的矫顽力。这会允许存储介质具有更高的各向异性和更小的晶粒。然后在施加的磁场取向存在的情况下，快速冷却加热区域，并对记录的数据进行编码。热源(通常是激光)在写入过程期间直接在纪录头的前面产生足够的热量，以允许纪录头的磁场“切换”介质内的晶粒的取向。

[0278] 虽然，已经参考示例性实施例对本发明进行了描述，但是很显然，在阅读和理解上述详细描述后，其它技术人员也可对本发明进行修改和变更，其目的是将本发明解释为包括在所附权利要求或其等值范围之内的所有此类修改和变更。

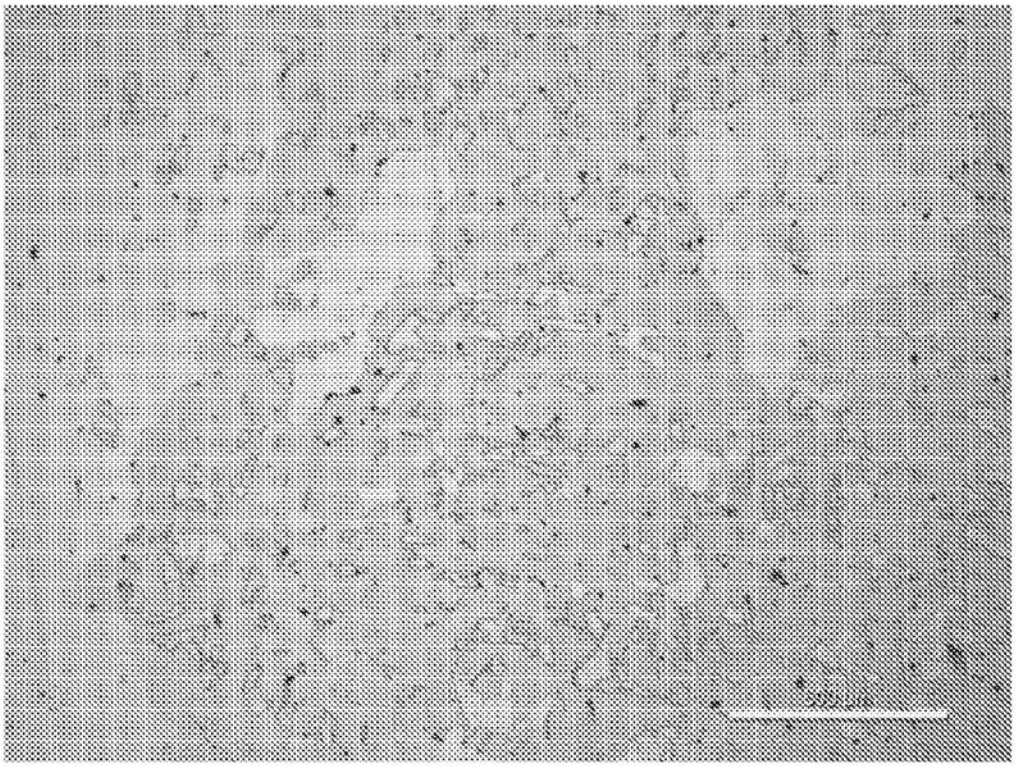


图1

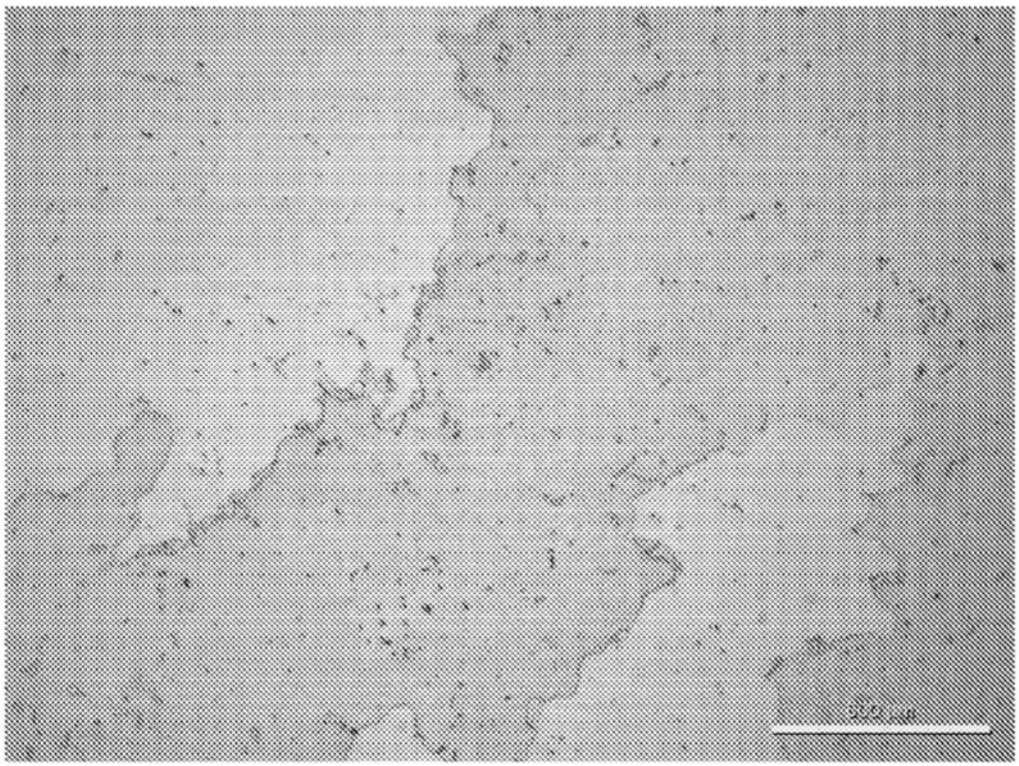


图2

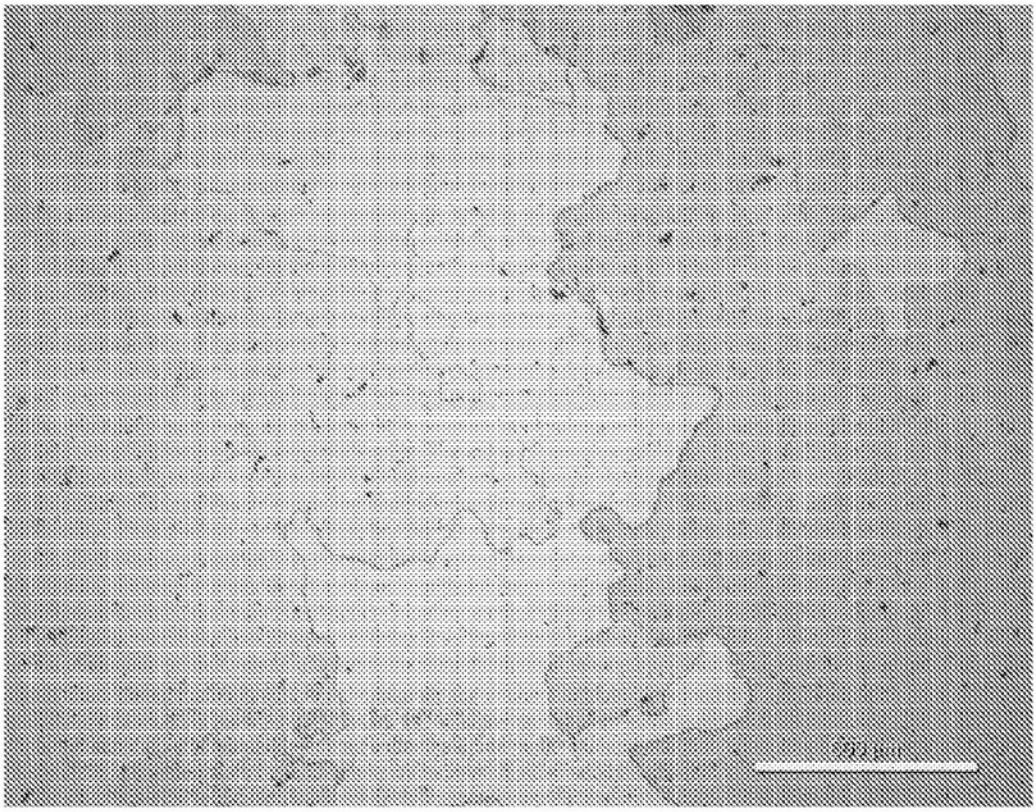


图3

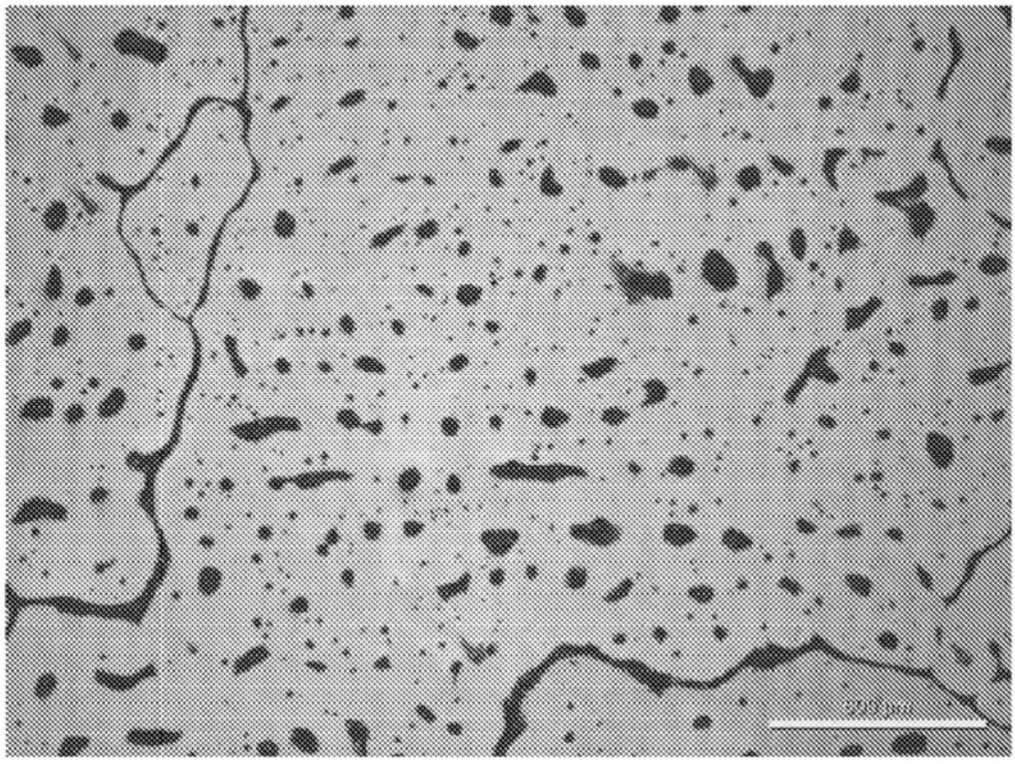


图4

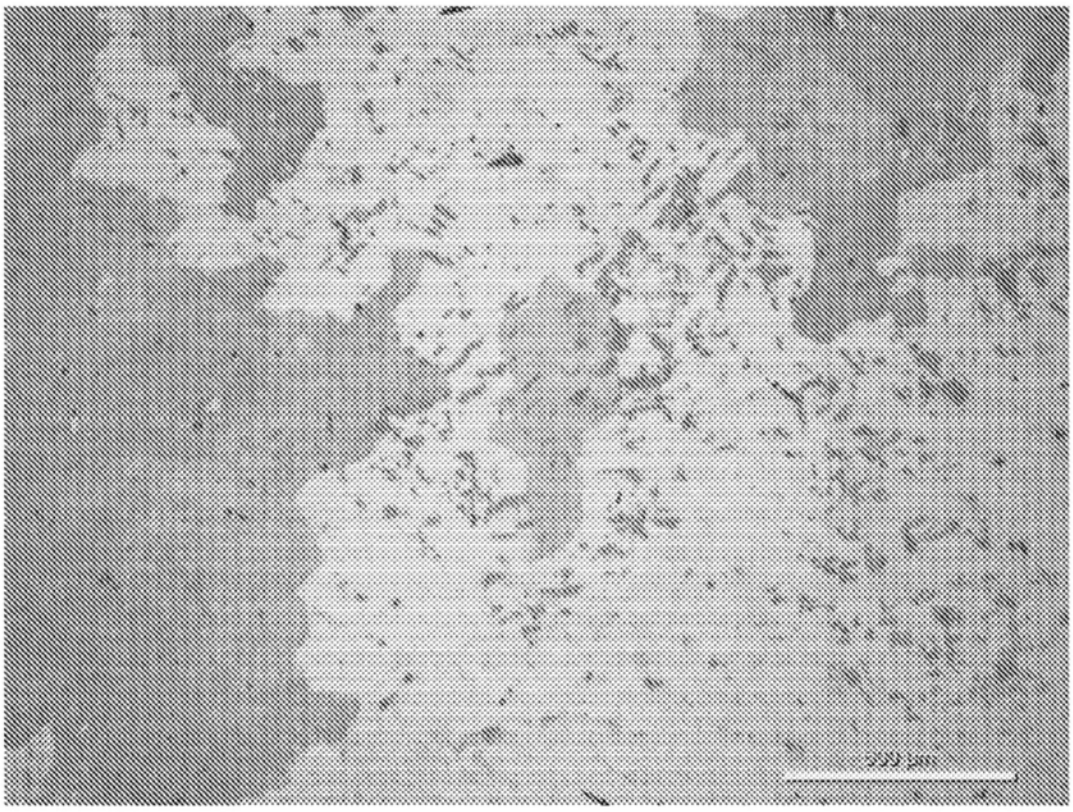


图5

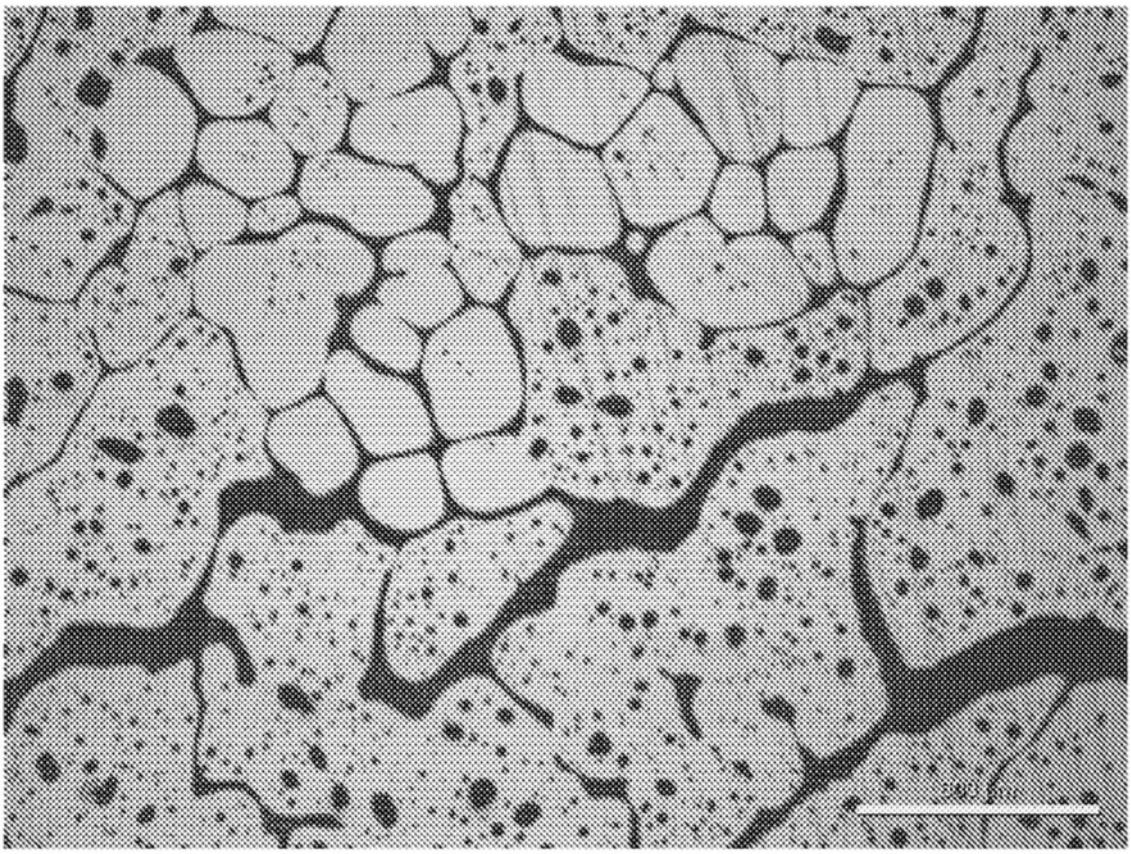


图6

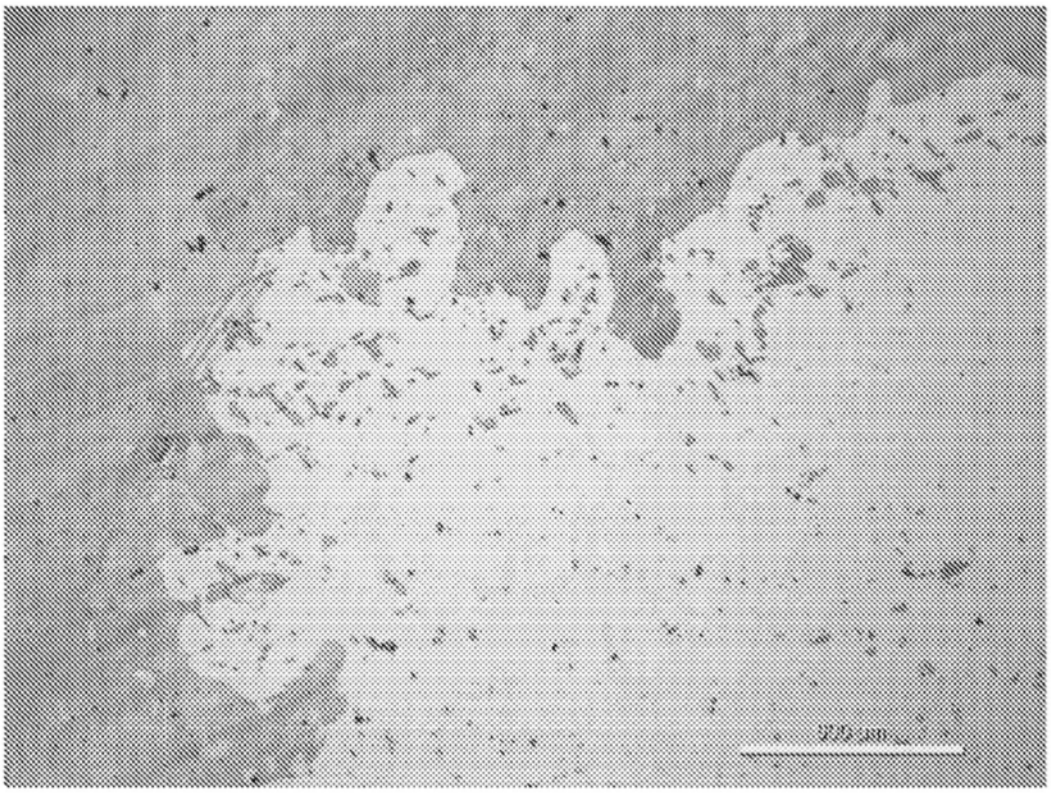


图7

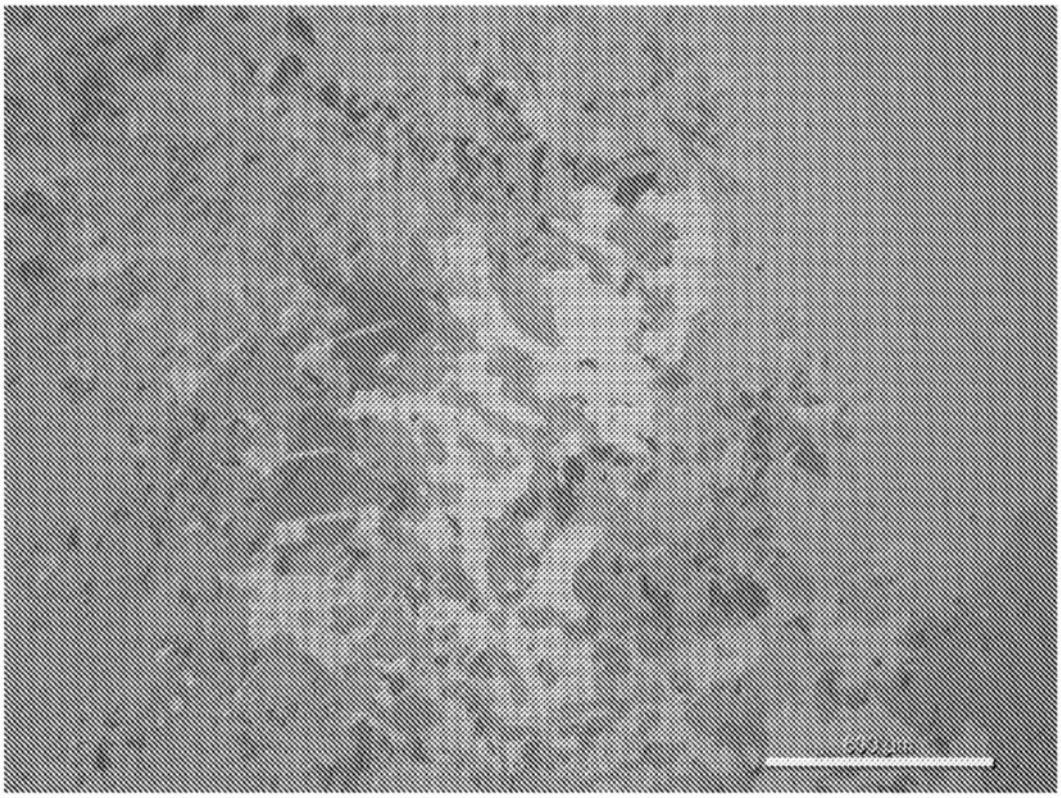


图8

材料	毛坯铸件	均质化					两步均质化	均质化+热墩（减少约50%）			
		1630°F, 6 hrs + WQ	1580°F, 6 hrs + WQ	1525°F, 10 hrs +WQ	1450°F, 10 hrs + WQ	1450°F, 14 hrs + WQ	1450°F, 14 hrs + WQ, + 1525°F, 10 hrs + WQ	1630°F, 6 hrs + HU + WQ	1580°F, 6 hrs + HU + WQ	1525°F, 10 hrs + HU + WQ	1450°F, 10 hrs + HU + WQ
A	是	轻微	否	否	轻微	否/轻微	否	轻微	否	轻微	是
B	是	否	否	否	否	-	-	否	否	否	否
C	否	否	否	否	否	-	-	否	否	否	否
D	是	是	是	轻微	否	否/轻微	否/轻微	是	是	轻微	轻微
E	是	否	否	否	否	-	-	否	否	否	否
F	是	是	是	是	轻微	否	是	是	是	是	轻微
G	是	否	否	否	否	否	否	否	否	否	否
H	否	否	否	否	否	-	-	否	否	否	否

图9

材料	均质化			均质化+固溶退火		均质化+固溶退火+时效					
	1580°F, 6 hrs + 空冷	1540°F, 6 hrs + 空冷	1375°F, 16 hrs + 空冷	固溶退火 1525°F, 2 hrs +WQ	固溶退火 1400°F, 2 hrs +WQ	时效 600°F, 3 hrs + 空冷	时效 700°F, 3 hrs + 空冷	时效 800°F, 3 hrs + 空冷	时效 900°F, 3 hrs + 空冷	时效 981°F, 3 hrs +空冷	时效 1100°F, 3 hrs +空冷
A	-	是	-	否	-	否	否	是	是	是	是
B	否	-	-	否	-	否	否	轻微	是	是	轻微
C	否	-	-	否	-	否	否	否	否	否	否
D	-	-	否	-	否	否	否	是	是	是	是
E	否	-	-	否	-	否	否	是	是	是	是
F	-	-	否	-	否	否	否	是	是	是	是
G	-	-	否	-	否	否	否	是	是	是	是
H	否	-	-	否	-	否	否	否	否	否	否

图10

材料	均质化+热轧（减少约67%）	均质化+热轧+固溶退火		均质化+热轧+固溶退火+时效					
	1580°F, 6 hrs, AC + 1525°F, 2 hrs + 热轧 + 1525°F, 30 min 再次加热 + 热轧	固溶退火 1525°F, 5 hrs + 炉冷	固溶退火 1525°F, 5 hrs +WQ*	时效 800°F, 1 hr +空冷	时效 800°F, 2 hrs +空冷	时效 800°F, 4 hrs +空冷	时效 800°F, 8 hrs +空冷	时效 800°F, 16 hrs +空冷	时效 800°F, 24 hrs +空冷
A	-	-	-	-	-	-	-	-	-
B	否	轻微	轻微	否/轻微	轻微/是	是	轻微/是	是	是
C	否	否	否	否	否	否	否	否	否
D	-	-	-	-	-	-	-	-	-
E	轻微	是	是	否/轻微	是	是	是	是	是
F	-	-	-	-	-	-	-	-	-
G	轻微	是	是	否/轻微	是	是	是	是	是
H	否	否	否	否	否	否	否	否	否

图11

材料	均质化+热轧+固溶退火	均质化+热轧+固溶退火+时效					
	不同变化	时效 600°F, 3 hrs +AC	时效 700°F, 3 hrs +空冷	时效 800°F, 3 hrs +空冷	时效 900°F, 3 hrs +空冷	时效 1000°F, 3 hrs +空冷	时效 1100°F, 3 hrs +空冷
A	否	否	否	是	是	是	是
B	否	否	否	是	是	是	轻微
C	否	否	否	否	否	否	否
D	是	是	是	是	是	是	是
E	否	轻微	否	是	是	是	是
F	是	是	是	是	是	是	是
G	是	是	是	是	是	是	是
H	否	否	否	否	否	否	否

图12

材料	均质化+热轧+固溶退火+冷轧		均质化+热轧+固溶退火+冷轧+时效（冷轧程度21%）					
	21% CR ("½ H")	37% CR ("H")	时效 600°F, 3 hrs + 空冷	时效 700°F, 3 hrs + 空冷	时效 800°F, 3 hrs + 空冷	时效 900°F, 3 hrs + 空冷	时效 1000°F, 3 hrs + 空冷	时效 1100°F, 3 hrs + 空冷
A	否	否	轻微	是	是	是	是	是
B	否	否	否	轻微	是	是	是	轻微
C	否	否	否	否	否	否	否	否
D	是	是	是	是	是	是	是	是
E	否	否	轻微	是	是	是	是	是
F	是	轻微	是	是	是	是	是	是
G	轻微	轻微	是	是	是	是	是	是
H	否	否	否	否	否	否	否	否

图13

材料	均质化+热轧+固溶退火+冷轧+时效（冷轧程度37%）					
	时效 600°F, 3 hrs +空冷	时效 700°F, 3 hrs +空冷	时效 800°F, 3 hrs +空冷	时效 900°F, 3 hrs +空冷	时效 1000°F, 3 hrs +空冷	时效 1100°F, 3 hrs +空冷
A	轻微	是	是	是	是	是
B	否	是	是	是	是	轻微
C	否	否	否	否	否	否
D	是	是	是	是	是	是
E	轻微	是	是	是	是	是
F	是	是	是	是	是	是
G	是	是	是	是	是	是
H	否	否	否	否	否	否

图14

材料	均质化+挤压（88%）	均质化+挤压+固溶退火							
	不同变化	固溶退火 1295°F, 2 hrs + WQ	固溶退火 1335°F, 2 hrs + WQ	固溶退火 1385°F, 2 hrs + WQ	固溶退火 1400°F, 2 hrs + WQ	固溶退火 1430°F, 2 hrs + WQ	固溶退火 1480°F, 2 hrs + WQ	固溶退火 1520°F, 2 hrs + WQ	固溶退火 1570°F, 2 hrs + WQ
A	是	是	是	是	-	是	轻微	否	否
B	否	否	否	否	-	否	否	否	否
C	否	否	否	否	-	否	否	否	否
D	是	是	是	轻微/是	-	轻微	轻微	否	否
E	否	否	否	否	否	否	否	否	否
F	是	是	轻微	轻微/是	-	轻微	轻微	否	否
G	否	是	否	否	否	否	否	否	否
H	否	否	否	否	-	否	否	否	否
J	否	-	-	-	否	-	-	-	-

图15

材料	毛坯铸件	均质化					两步均质化	均质化+热墩（减少约50%）			
		1630°F, 6 hrs + WQ	1580°F, 6 hrs + WQ	1525°F, 10 hrs +WQ	1450°F, 10 hrs + WQ	1450°F, 14 hrs + WQ	1450°F, 14 hrs + WQ, + 1525°F, 10 hrs + WQ	1630°F, 6 hrs + HU + WQ	1580°F, 6 hrs + HU + WQ	1525°F, 10 hrs + HU + WQ	1450°F, 10 hrs + HU + WQ
A	> 1.999	1.005	1.004	1.005	1.029						
B	> 1.999	1.005	1.005	1.003	1.000						
C	1.000	1.005	1.005	1.000	1.001						
D	> 1.999	> 1.999	> 1.999	1.025	1.004						
E	> 1.999	1.005	1.001	1.001	1.002						
F	> 1.999	> 1.999	> 1.999	1.054	1.002						
G	> 1.999	1.004	1.004	1.002	1.002						
H	1.005	1.005	1.005	1.000	1.000						

图16

材料	均质化			均质化+固溶退火		均质化+固溶退火+时效					
	1580°F, 6 hrs + 空冷	1540°F, 6 hrs + 空冷	1375°F, 16 hrs + 空冷	固溶退火 1525°F, 2 hrs +WQ	固溶退火 1400°F, 2 hrs +WQ	时效 600°F, 3 hrs + 空冷	时效 700°F, 3 hrs + 空冷	时效 800°F, 3 hrs + 空冷	时效 900°F, 3 hrs + 空冷	时效 981°F, 3 hrs + 空冷	时效 1100°F, 3 hrs + 空冷
A	N/A	N/A	N/A	1.006	-	1.007	1.042	1.430	1.990	1.590	1.450
B	N/A	N/A	N/A	1.001	-	1.001	1.006	1.185	1.145	1.029	1.007
C	N/A	N/A	N/A	1.000	-	1.001	1.001	1.000	1.001	1.001	1.001
D	N/A	N/A	N/A	-	1.004	1.005	1.045	1.310	> 1.999	1.524	1.950
E	N/A	N/A	N/A	1.001	-	1.001	1.017	1.162	1.900	1.630	1.895
F	N/A	N/A	N/A	-	1.003	1.004	1.021	1.333	1.666	1.230	1.985
G	N/A	N/A	N/A	-	1.001	1.003	1.020	1.236	> 1.999	1.885	1.925
H	N/A	N/A	N/A	1.000	-	1.001	1.000	1.001	1.001	1.000	1.000

图17

材料	均质化+热轧（总体减少约67%）	均质化+热轧+固溶退火		均质化+热轧+固溶退火*+时效					
	1580°F, 6 hrs, 空冷 + 1525°F, 2 hrs + 热轧 + 1525°F, 30 min 再次加热 + 热轧	固溶退火 1525°F, 5 hrs + 炉冷	固溶退火 1525°F, 5 hrs +WQ*	时效 800°F, 1 hr + 空冷	时效 800°F, 2 hrs + 空冷	时效 800°F, 4 hrs + 空冷	时效 800°F, 8 hrs + 空冷	时效 800°F, 16 hrs + 空冷	时效 800°F, 24 hrs + 空冷
A	-	-	-	-	-	-	-	-	-
B				1.025	1.067	1.524	1.551	1.449	1.973
C				1.001	1.001	1.002	1.002	1.002	1.002
D	-	-	-	-	-	-	-	-	-
E				1.115	1.242	1.915	1.978	1.480	1.694
F	-	-	-	-	-	-	-	-	-
G				1.103	1.485	1.034	1.862	1.278	1.125
H				1.001	1.001	1.001	1.001	1.001	1.001

图18

材料	均质化+热轧+固溶退火	均质化+热轧+固溶退火+时效					
	不同变化	时效 600°F, 3 hrs +空冷	时效 700°F, 3 hrs +空冷	时效 800°F, 3 hrs +空冷	时效 900°F, 3 hrs +空冷	时效 1000°F, 3 hrs +空冷	时效 1100°F, 3 hrs +空冷
A	1.007	1.013	1.029	1.684	> 1.999	> 1.999	1.679
B	1.000	1.003	1.009	1.256	1.234	1.015	1.002
C	1.001	1.001	1.001	1.001	1.001	1.001	1.001
D	1.159	1.118	1.206	1.243	1.371	1.856	1.763
E	1.001	1.003	1.012	1.217	1.281	1.903	1.750
F	1.049	1.054	1.326	1.402	1.485	1.649	> 1.999
G	1.167	1.245	1.096	1.620	> 1.999	1.736	1.795
H	1.000	1.002	1.001	1.000	1.000	1.001	1.000

图19

材料	均质化+热轧+固溶退火+冷轧		均质化+热轧+固溶退火+冷轧+时效 (21% CR)					
	21% CR ("½ H")	37% CR ("H")	时效 600°F, 3 hrs +空冷	时效 700°F, 3 hrs +空冷	时效 800°F, 3 hrs +空冷	时效 900°F, 3 hrs +空冷	时效 1000°F, 3 hrs +空冷	时效 1100°F, 3 hrs +空冷
A	1.002	1.002	1.015	1.904	> 1.999	> 1.999	1.762	1.501
B	1.001	1.001	1.002	1.009	1.721	1.049	1.011	1.007
C	1.001	1.000	1.001	1.002	1.001	1.001	1.001	1.001
D	1.090	1.091	1.124	1.713	> 1.999	> 1.999	1.512	1.513
E	1.001	1.001	1.014	1.392	1.941	1.972	1.756	1.843
F	1.034	1.020	1.101	1.407	> 1.999	> 1.999	1.544	1.836
G	1.024	1.036	1.054	1.678	1.869	1.675	1.482	1.505
H	1.001	1.000	1.001	1.001	1.000	1.000	1.000	1.001

图20

材料	均质化+热轧+固溶退火+冷轧+时效 (37% CR)					
	时效 600°F, 3 hrs +空冷	时效 700°F, 3 hrs +空冷	时效 800°F, 3 hrs +空冷	时效 900°F, 3 hrs +空冷	时效 1000°F, 3 hrs +空冷	时效 1100°F, 3 hrs +空冷
A	1.031	1.916	> 1.999	> 1.999	1.702	1.291
B	1.008	1.197	1.746	1.034	1.013	1.004
C	1.001	1.002	1.001	1.002	1.001	1.001
D	1.128	1.751	> 1.999	1.681	1.456	1.432
E	1.038	1.510	1.691	>1.999	1.584	1.607
F	1.076	1.712	1.913	1.067	1.431	1.901
G	1.176	1.718	1.883	1.671	1.507	1.328
H	1.001	1.000	1.000	1.000	1.001	1.001

图21

材料	均质化+挤压+固溶退火						
	固溶退火 1295°F, 2 hrs + WQ	固溶退火 1335°F, 2 hrs + WQ	固溶退火 1385°F, 2 hrs + WQ	固溶退火 1430°F, 2 hrs + WQ	固溶退火 1480°F, 2 hrs + WQ	固溶退火 1520°F, 2 hrs + WQ	固溶退火 1570°F, 2 hrs + WQ
A	1.893	1.633	1.410	1.270	1.083	1.030	1.006
B	1.002	1.001	1.001	1.001	1.002	1.002	1.002
C	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
D	-	-	-	-	-	-	-
E	1.002	1.002	1.002	1.002	1.001	1.002	1.002
F	-	-	-	-	-	-	-
G	1.208	1.010	1.002	1.001	1.001	1.001	1.002
H	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

图22

材料	毛坯铸件	均质化					两步均质化	均质化+热墩（减少约50%）			
		1630° F, 6 hrs + WQ	1580° F, 6 hrs + WQ	1525° F, 10 hrs +WQ	1450° F, 10 hrs + WQ	1450° F, 14 hrs + WQ	1450°F, 14 hrs + WQ, + 1525°F, 10 hrs + WQ	1630° F, 6 hrs + HU + WQ	1580°F , 6 hrs + HU + WQ	1525°F , 10 hrs + HU + WQ	1450°F , 10 hrs + HU + WQ
A	< 0.80	2.39	2.69	2.76	< 0.80	2.25	2.72				
B	4.52	4.07	4.07	4.12	4.10	-	-				
C	6.68	5.25	5.26	5.24	5.28	-	-				
D	< 0.80	< 0.80	< 0.80	1.60	1.77	1.75	1.66				
E	< 0.80	4.88	4.90	4.90	4.98	-	-				
F	< 0.80	< 0.80	< 0.80	< 0.80	1.87	1.72	< 0.80				
G	< 0.80	3.78	3.79	3.81	3.79	3.84	3.86				
H	6.64	6.29	6.32	6.32	6.45	-	-				

图23

材料	均质化			均质化+固溶退火		均质化+固溶退火+时效					
	1580°F, 6 hrs + 空冷	1540°F, 6 hrs + 空冷	1375°F, 16 hrs + 空冷	固溶退火 1525°F, 2 hrs +WQ	固溶退火 1400°F, 2 hrs +WQ	时效 600°F, 3 hrs + 空冷	时效 700°F, 3 hrs + 空冷	时效 800°F, 3 hrs + 空冷	时效 900°F, 3 hrs + 空冷	时效 981°F, 3 hrs + 空冷	时效 1100°F, 3 hrs + 空冷
A	-	< 0.80	-	2.77	-	2.87	2.60	< 0.80	< 0.80	< 0.80	< 0.80
B	4.16	-	-	4.02	-	4.51	4.43	4.08	< 0.80	5.93	5.90
C	5.45	-	-	5.25	-	5.90	6.40	6.45	7.23	8.06	7.63
D	-	-	1.91	-	1.95	1.94	1.84	1.75	< 0.80	< 0.80	< 0.80
E	4.90	-	-	4.93	-	5.19	4.94	4.76	< 0.80	< 0.80	< 0.80
F	-	-	1.95	-	1.92	1.92	1.90	1.58	< 0.80	< 0.80	< 0.80
G	-	-	3.84	-	3.86	3.88	3.67	3.58	< 0.80	< 0.80	< 0.80
H	6.78	-	-	6.33	-	7.12	7.90	8.61	10.10	9.79	9.36

图24

材料	均质化+热轧（总体减少约67%）	均质化+热轧+固溶退火		均质化+热轧+固溶退火*+时效					
	1580°F, 6 hrs, 空冷 + 1525°F, 2 hrs + 热轧 + 1525°F, 30 min 再次加热+ 热轧	固溶退火 1525°F, 5 hrs + 炉冷	固溶退火 1525°F, 5 hrs +WQ*	时效 800°F, 1 hr +空冷	时效 800°F, 2 hrs +空冷	时效 800°F, 4 hrs +空冷	时效 800°F, 8 hrs +空冷	时效 800°F, 16 hrs +空冷	时效 800°F, 24 hrs +空冷
A	-	-	-	-	-	-	-	-	-
B				4.27	4.05	< 0.80	4.37	< 0.80	< 0.80
C				6.31	6.46	6.70	6.97	7.30	7.84
D	-	-	-	-	-	-	-	-	-
E				4.70	4.49	4.01	< 0.80	< 0.80	< 0.80
F	-	-	-	-	-	-	-	-	-
G				3.79	3.53	3.18	< 0.80	< 0.80	< 0.80
H				8.08	9.31	10.5	11.4	11.6	11.7

图25

材料	均质化+热轧+固溶退火	均质化+热轧+固溶退火+时效					
	不同变化	时效 600°F, 3 hrs + 空冷	时效 700°F, 3 hrs + 空冷	时效 800°F, 3 hrs + 空冷	时效 900°F, 3 hrs + 空冷	时效 1000°F, 3 hrs + 空冷	时效 1100°F, 3 hrs + 空冷
A	2.84	2.94	2.79	< 0.80	< 0.80	< 0.80	< 0.80
B	4.11	4.83	4.74	3.95	< 0.80	6.51	5.06
C	5.37	6.30	6.49	6.64	8.83	8.49	7.72
D	< 0.80	< 0.80	< 0.80	< 0.80	< 0.80	< 0.80	< 0.80
E	4.99	5.43	5.21	4.57	< 0.80	< 0.80	< 0.80
F	1.52	1.56	1.56	< 0.80	< 0.80	< 0.80	< 0.80
G	< 0.80	< 0.80	< 0.80	< 0.80	< 0.80	< 0.80	< 0.80
H	6.39	7.29	7.88	10.9	10.7	10.2	9.45

图26

材料	均质化+热轧+固溶退火+冷轧		均质化+热轧+固溶退火+冷轧+时效 (21% CR)					
	21% CR ("½ H")	37% CR ("H")	时效 600°F, 3 hrs +空冷	时效 700°F, 3 hrs + 空冷	时效 800°F, 3 hrs +空冷	时效 900°F, 3 hrs +空冷	时效 1000°F, 3 hrs +空冷	时效 1100°F, 3 hrs +空冷
A	2.80	2.80	2.84	< 0.80	< 0.80	< 0.80	< 0.80	< 0.80
B	4.14	4.11	4.50	4.49	< 0.80	5.85	6.33	6.05
C	5.29	5.29	5.77	6.41	7.18	8.80	8.54	7.86
D	< 0.80	1.68	< 0.80	< 0.80	< 0.80	< 0.80	< 0.80	< 0.80
E	4.89	4.86	5.25	< 0.80	< 0.80	4.71	< 0.80	< 0.80
F	1.67	1.80	< 0.80	< 0.80	< 0.80	< 0.80	< 0.80	< 0.80
G	3.73	3.31	3.70	< 0.80	< 0.80	< 0.80	< 0.80	< 0.80
H	6.37	6.16	6.92	7.70	9.83	10.2	9.67	9.13

图27

材料	均质化+热轧+固溶退火+冷轧+时效 (37% CR)					
	时效 600°F, 3 hrs + 空冷	时效 700°F, 3 hrs + 空冷	时效 800°F, 3 hrs + 空冷	时效 900°F, 3 hrs + 空冷	时效 1000°F, 3 hrs + 空冷	时效 1100°F, 3 hrs + 空冷
A	2.74	< 0.80	< 0.80	< 0.80	< 0.80	< 0.80
B	4.55	< 0.80	< 0.80	6.05	6.70	6.37
C	5.93	6.65	7.91	8.89	8.59	7.96
D	< 0.80	< 0.80	< 0.80	< 0.80	< 0.80	< 0.80
E	5.06	< 0.80	< 0.80	4.59	< 0.80	< 0.80
F	< 0.80	< 0.80	< 0.80	< 0.80	< 0.80	< 0.80
G	< 0.80	< 0.80	< 0.80	< 0.80	< 0.80	< 0.80
H	7.11	8.32	11.4	10.7	10.1	9.30

图28

材料	均质化+挤压	均质化+挤压+固溶退火						
	Homog 1580°F, 6 hrs, 空冷 + 1525°F, 6 hrs min + 挤压	固溶退火 1295°F, 2 hrs + WQ	固溶退火 1335°F, 2 hrs + WQ	固溶退火 1385°F, 2 hrs + WQ	固溶退火 1430°F, 2 hrs + WQ	固溶退火 1480°F, 2 hrs + WQ	固溶退火 1520°F, 2 hrs + WQ	固溶退火 1570°F, 2 hrs + WQ
A	< 0.80	< 0.80	< 0.80	< 0.80	< 0.80	2.50	2.77	2.81
B	4.35	4.24	4.40	4.39	4.14	4.11	4.12	4.12
C	5.77	5.63	5.67	5.55	5.39	5.31	5.31	5.34
D	-	-	-	-	-	-	-	-
E	4.95	4.86	4.80	4.95	4.96	4.94	4.96	4.99
F	-	-	-	-	-	-	-	-
G	3.84	< 0.80	3.77	3.84	3.84	3.85	3.86	3.87
H	6.77	7.65	7.10	7.10	6.58	6.36	6.35	6.37

图29

材料	毛坯铸件	均质化					两步均质化	均质化+热墩（减少约50%）			
		1630°F, 6 hrs + WQ	1580°F, 6 hrs + WQ	1525°F, 10 hrs +WQ	1450°F, 10 hrs + WQ	1450°F, 14 hrs + WQ	1450°F, 14 hrs + WQ, + 1525°F, 10 hrs + WQ	1630°F, 6 hrs + HU + WQ	1580°F, 6 hrs + HU + WQ	1525°F, 10 hrs + HU + WQ	1450°F, 10 hrs + HU + WQ
A	97.9 HRB	57.5 HRB	62.8 HRB	62.4 HRB	64.2 HRB	64.5 HRB	62.4 HRB	N/A	N/A	N/A	N/A
B	94.7 HRB	59.9 HRB	58.8 HRB	51.2 HRB	59.3 HRB	-	-	N/A	N/A	N/A	N/A
C	98.8 HRB	57.9 HRB	54.4 HRB	54.6 HRB	57.6 HRB	-	-	N/A	N/A	N/A	N/A
D	69.5 HRB	75.6 HRB	66.6 HRB	48.1 HRB	51.8 HRB	56.1 HRB	53.0 HRB	N/A	N/A	N/A	N/A
E	87.4 HRB	53.5 HRB	51.8 HRB	48.5 HRB	50.9 HRB	-	-	N/A	N/A	N/A	N/A
F	64.8 HRB	63.4 HRB	69.4 HRB	45.1 HRB	46.0 HRB	49.0 HRB	58.3 HRB	N/A	N/A	N/A	N/A
G	79.1 HRB	47.9 HRB	44.4 HRB	44.8 HRB	62.9 HRB	47.4 HRB	49.0 HRB	N/A	N/A	N/A	N/A
H	93.4 HRB	76.0 HRB	63.6 HRB	62.8 HRB	49.0 HRB	-	-	N/A	N/A	N/A	N/A

图30

材料	均质化			均质化+固溶退火		均质化+固溶退火+时效					
	1580°F, 6 hrs + 空冷	1540°F, 6 hrs + 空冷	1375°F, 16 hrs + 空冷	固溶退火 1525°F, 2 hrs +WQ	固溶退火 1400°F, 2 hrs +WQ	时效 600°F, 3 hrs + 空冷	时效 700°F, 3 hrs + 空冷	时效 800°F, 3 hrs + 空冷	时效 900°F, 3 hrs + 空冷	时效 981°F, 3 hrs + 空冷	时效 1100°F, 3 hrs + 空冷
A	-	77.2 HRB	-	69.1 HRB	-	80.6 HRB	76.2 HRB	100.8 HRB	102.8 HRB	21.4 HRC	95.8 HRB
B	76.1 HRB	-	-	62.2 HRB	-	89.5 HRB	95.6 HRB	100.6 HRB	101.0 HRB	97.0 HRB	91.8 HRB
C	74.2 HRB	-	-	62.4 HRB	-	94.0 HRB	101.8 HRB	31.9 HRC	103.2 HRB	96.3 HRB	90.1 HRB
D	-	-	61.2 HRB	-	61.3 HRB	65.7 HRB	66.3 HRB	80.9 HRB	97.4 HRB	97.4 HRB	92.6 HRB
E	59.4 HRB	-	-	54.6 HRB	-	67.6 HRB	59.0 HRB	68.5 HRB	88.8 HRB	85.1 HRB	83.7 HRB
F	-	-	54.2 HRB	-	58.5 HRB	58.9 HRB	60.0 HRB	79.4 HRB	94.9 HRB	95.9 HRB	90.4 HRB
G	-	-	53.8 HRB	-	52.8 HRB	62.0 HRB	59.0 HRB	75.5 HRB	95.1 HRB	93.8 HRB	88.5 HRB
H	83.0 HRB	-	-	67.6 HRB	-	95.2 HRB	32.6 HRC	37.5 HRC	94.0 HRB	91.9 HRB	87.5 HRB

图31

材料	均质化+热轧（总体减少约67%）	均质化+热轧+固溶退火		均质化+热轧+固溶退火* +时效					
	1580°F, 6 hrs, 空冷 + 1525°F, 2 hrs + 热轧 + 1525°F, 30 min 再次加热+ 热轧	固溶退火 1525°F, 5 hrs + 炉冷	固溶退火 1525°F, 5 hrs +WQ*	时效 800°F, 1 hr + 空冷	时效 800°F, 2 hrs + 空冷	时效 800°F, 4 hrs + 空冷	时效 800°F, 8 hrs + 空冷	时效 800°F, 16 hrs + 空冷	时效 800°F, 24 hrs + 空冷
A	-	-	-	-	-	-	-	-	-
B				93.6 HRB	94.4 HRB	97.7 HRB	37.7 HRC	35.5 HRC	34.0 HRC
C				29.7 HRC	28.8 HRC	30.9 HRC	32.9 HRC	30.6 HRC	33.3 HRC
D	-	-	-	-	-	-	-	-	-
E				76.4 HRB	81.3 HRB	89.8 HRB	90.3 HRB	98.6 HRB	99.3 HRB
F	-	-	-	-	-	-	-	-	-
G				64.2 HRB	80.8 HRB	85.0 HRB	100.9 HRB	100.3 HRB	94.1 HRB
H				33.3 HRC	31.1 HRC	90.3 HRB	98.1 HRB	94.7 HRB	95.5 HRB

图32

材料	均质化+热轧+固溶退火	均质化+热轧+固溶退火+时效					
	不同变化	时效 600°F, 3 hrs +AC	时效 700°F, 3 hrs +AC	时效 800°F, 3 hrs +AC	时效 900°F, 3 hrs +AC	时效 1000°F, 3 hrs +AC	时效 1100°F, 3 hrs +AC
A	62.3 HRB	86.2 HRB	76.3 HRB	96.6 HRB	31.3 HRC	100.4 HRB	95.9 HRB
B	64.5 HRB	94.1 HRB	96.3 HRB	28.8 HRC	102.6 HRB	97.3 HRB	92.6 HRB
C	65.0 HRB	96.5 HRB	101.0 HRB	31.3 HRC	26.1 HRC	95.0 HRB	87.8 HRB
D	76.1 HRB	79.5 HRB	78.5 HRB	91.6 HRB	88.5 HRB	89.5 HRB	89.0 HRB
E	54.2 HRB	73.2 HRB	60.2 HRB	71.8 HRB	92.6 HRB	87.3 HRB	83.5 HRB
F	72.0 HRB	71.9 HRB	70.9 HRB	83.8 HRB	89.3 HRB	90.8 HRB	86.6 HRB
G	77.8 HRB	84.2 HRB	87.2 HRB	95.8 HRB	94.0 HRB	90.8 HRB	85.6 HRB
H	66.5 HRB	95.4 HRB	30.1 HRC	101.1 HRB	97.4 HRB	91.0 HRB	86.4 HRB

图33

材料	均质化+热轧+固溶退火+冷轧		均质化+热轧+固溶退火+冷轧+时效 (21% CR)					
	21% CR ("½ H")	37% CR ("H")	时效 600°F, 3 hrs + 空冷	时效 700°F, 3 hrs + 空冷	时效 800°F, 3 hrs + 空冷	时效 900°F, 3 hrs + 空冷	时效 1000°F, 3 hrs + 空冷	时效 1100°F, 3 hrs + 空冷
A	93.6 HRB	96.3 HRB	98.2 HRB	40.0 HRC	39.1 HRC	35.7 HRC	27.6 HRC	22.0 HRC
B	94.6 HRB	27.6 HRC	22.4 HRC	26.4 HRC	35.7 HRC	31.5 HRC	101.5 HRB	95.6 HRB
C	92.4 HRB	24.8 HRC	22.5 HRC	33.1 HRC	37.1 HRC	29.0 HRC	97.9 HRB	92.3 HRB
D	94.7 HRB	28.3 HRC	98.0 HRB	27.7 HRC	31.8 HRC	29.1 HRC	22.4 HRC	96.1 HRB
E	93.3 HRB	21.2 HRC	100.2 HRB	30.7 HRC	31.1 HRC	102.0 HRB	95.8 HRB	90.9 HRB
F	94.7 HRB	101.5 HRB	91.9 HRB	26.9 HRC	27.6 HRC	100.7 HRB	20.2 HRC	93.9 HRB
G	90.6 HRB	25.5 HRC	97.4 HRB	27.0 HRC	28.5 HRC	100.8 HRB	96.7 HRB	88.9 HRB
H	94.6 HRB	26.7 HRC	99.1 HRB	32.3 HRC	27.6 HRC	94.7 HRB	90.8 HRB	84.6 HRB

图34

材料	均质化+热轧+固溶退火+冷轧+时效 (37% CR)					
	时效 600°F, 3 hrs + 空冷	时效 700°F, 3 hrs + 空冷	时效 800°F, 3 hrs + 空冷	时效 900°F, 3 hrs + 空冷	时效 1000°F, 3 hrs + 空冷	时效 1100°F, 3 hrs + 空冷
A	31.0 HRC	41.2 HRC	39.3 HRC	28.8 HRC	28.1 HRC	23.2 HRC
B	33.4 HRC	37.9 HRC	39.0 HRC	32.8 HRC	101.6 HRB	98.0 HRB
C	33.5 HRC	39.7 HRC	38.0 HRC	29.3 HRC	99.1 HRB	94.0 HRB
D	27.5 HRC	35.2 HRC	33.4 HRC	29.7 HRC	24.1 HRC	94.0 HRB
E	30.3 HRC	33.8 HRC	31.3 HRC	102.5 HRB	94.8 HRB	91.5 HRB
F	25.6 HRC	32.5 HRC	32.3 HRC	27.2 HRC	22.1 HRC	91.9 HRB
G	29.4 HRC	36.4 HRC	32.2 HRC	26.7 HRC	94.6 HRB	88.4 HRB
H	35.3 HRC	41.3 HRC	23.1 HRC	97.8 HRB	92.1 HRB	87.8 HRB

图35

材料	均质化+挤压 (88%)	均质化+挤压+固溶退火							
	不同变化	固溶退火 1295°F, 2 hrs + WQ	固溶退火 1335°F, 2 hrs + WQ	固溶退火 1385°F, 2 hrs + WQ	固溶退火 1400°F, 2 hrs + WQ	固溶退火 1430°F, 2 hrs + WQ	固溶退火 1480°F, 2 hrs + WQ	固溶退火 1520°F, 2 hrs + WQ	固溶退火 1570°F, 2 hrs + WQ
A	91.9 HRB	91.4 HRB	89.8 HRB	86.0 HRB	-	81.9 HRB	73.2 HRB	71.7 HRB	71.7 HRB
B	79.1 HRB	87.4 HRB	84.3 HRB	79.1 HRB	-	74.4 HRB	72.0 HRB	72.6 HRB	72.7 HRB
C	86.6 HRB	84.7 HRB	81.4 HRB	78.3 HRB	-	72.3 HRB	69.5 HRB	68.7 HRB	69.4 HRB
D	78.2 HRB	82.0 HRB	78.9 HRB	67.9 HRB	-	64.2 HRB	62.9 HRB	-	-
E	59.8 HRB	68.9 HRB	60.1 HRB	58.4 HRB	58.4 HRB	59.2 HRB	59.0 HRB	59.1 HRB	59.7 HRB
F	69.6 HRB	75.0 HRB	69.8 HRB	63.9 HRB	-	61.1 HRB	60.0 HRB	-	-
G	57.1 HRB	74.7 HRB	57.8 HRB	55.5 HRB	54.6 HRB	55.4 HRB	55.1 HRB	53.5 HRB	53.5 HRB
H	80.8 HRB	83.6 HRB	81.4 HRB	79.6 HRB	-	76.4 HRB	73.5 HRB	72.8 HRB	73.6 HRB
J	82.6 HRB	-	-	-	54.7 HRB	-	-	-	-

图36

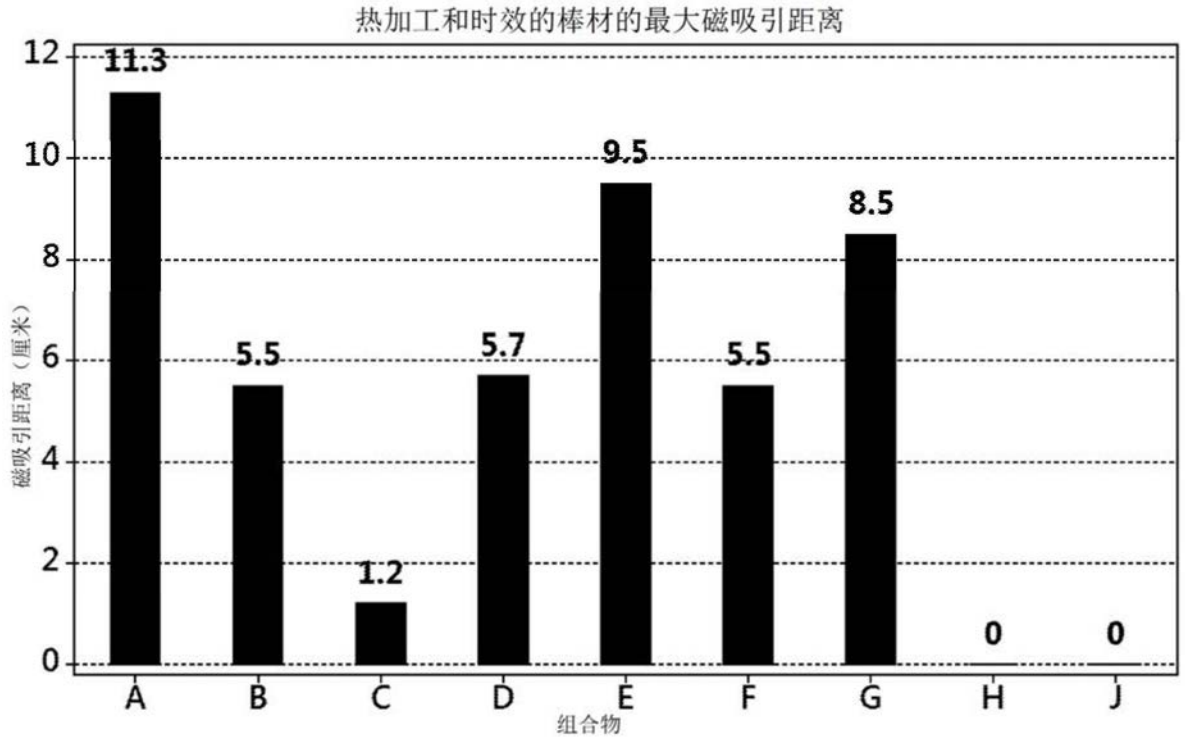


图37

图 38A

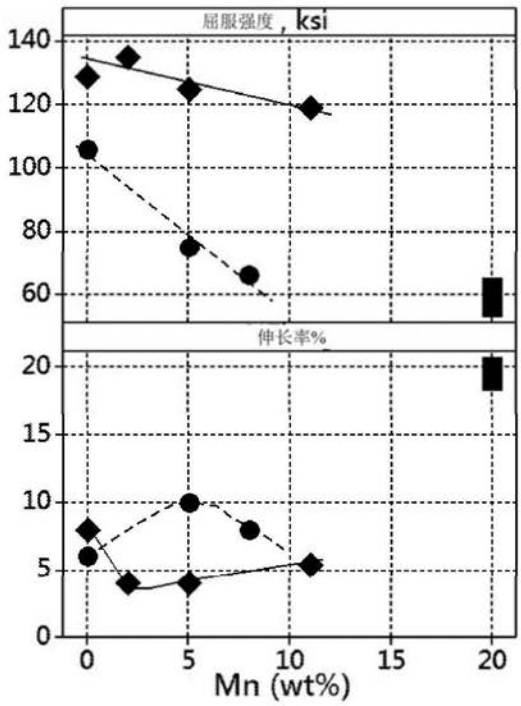


图 38C

图 38B

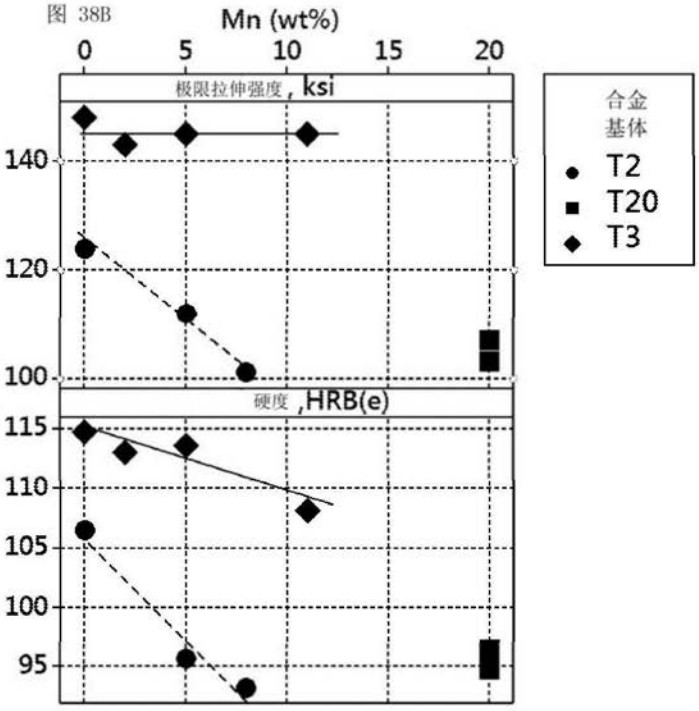


图 38D



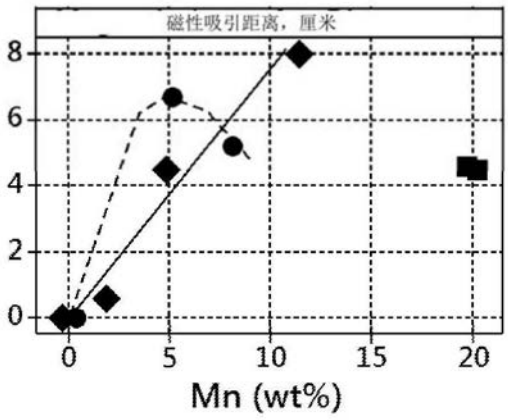


图38E

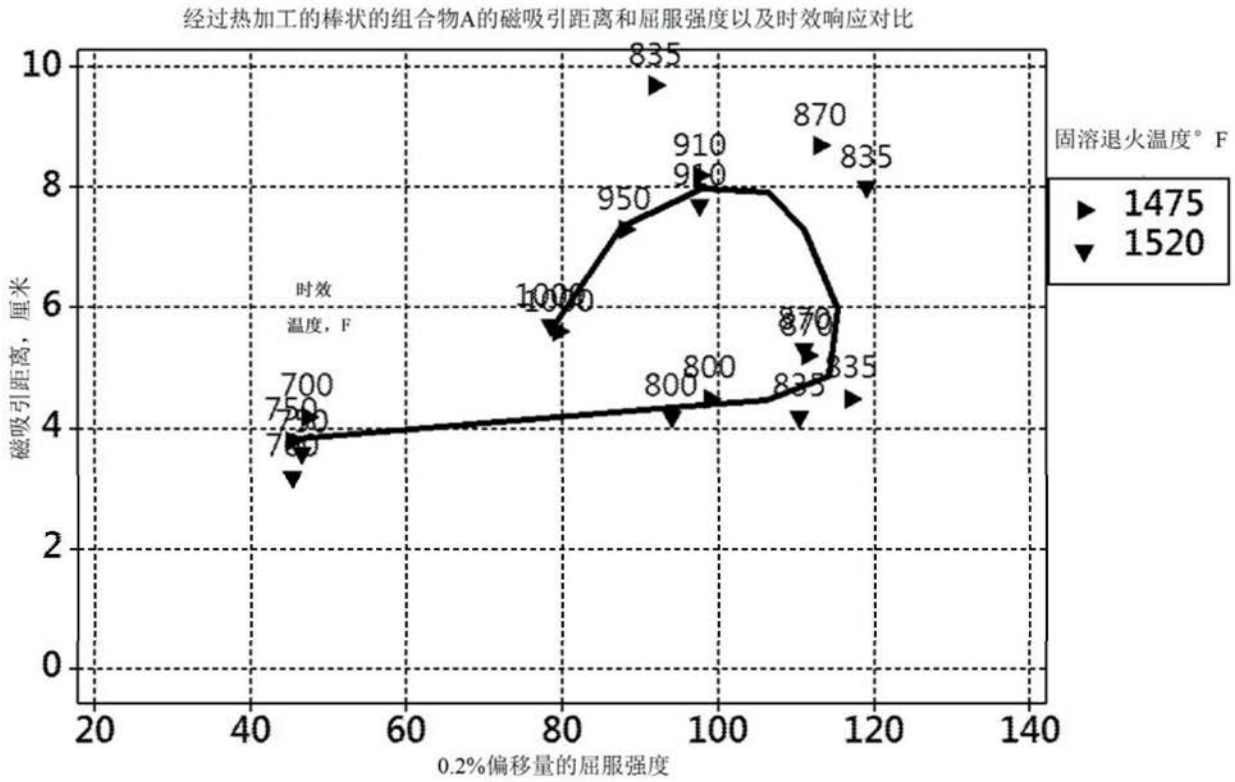

经过热加工的棒状的组合物A的磁吸引距离和屈服强度以及时效响应对比
磁吸引距离，厘米
0.2%偏移量的屈服强度
固溶退火温度° F
1475
1520
时效
温度，F
835
870
910
950
1000
800
700
750

图39A

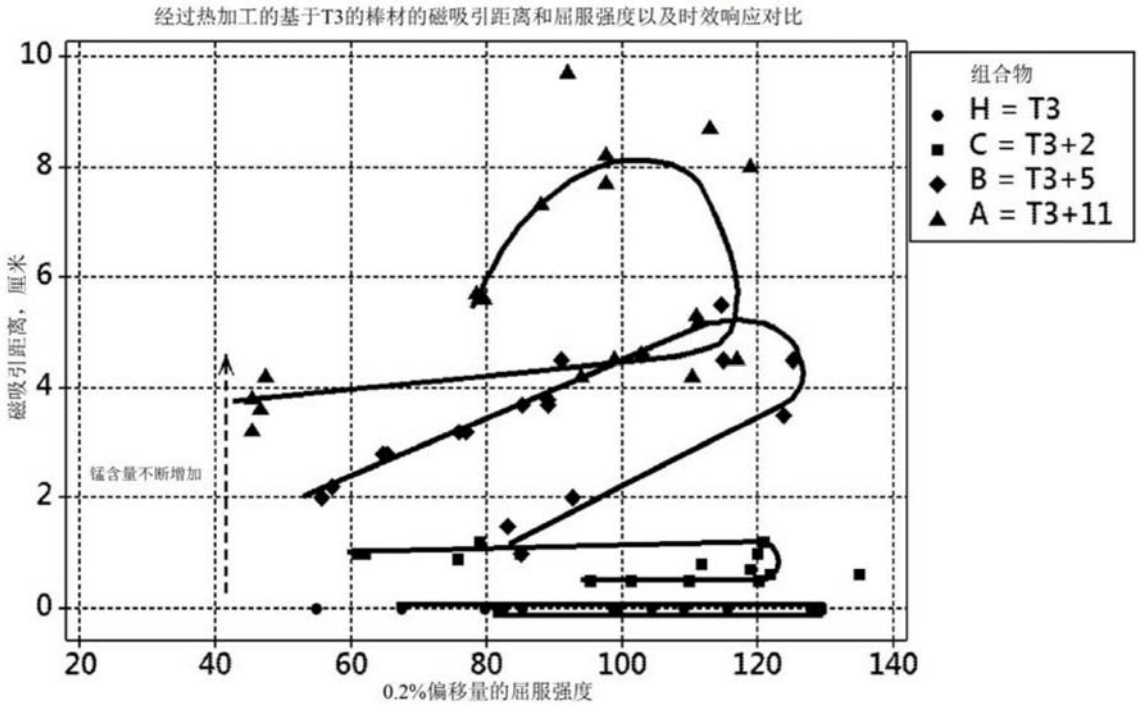

经过热加工的基于T3的棒材的磁吸引距离和屈服强度以及时效响应对比
磁吸引距离，厘米
0.2%偏移量的屈服强度
组合物
H = T3
C = T3+2
B = T3+5
A = T3+11
锰含量不断增加

图39B

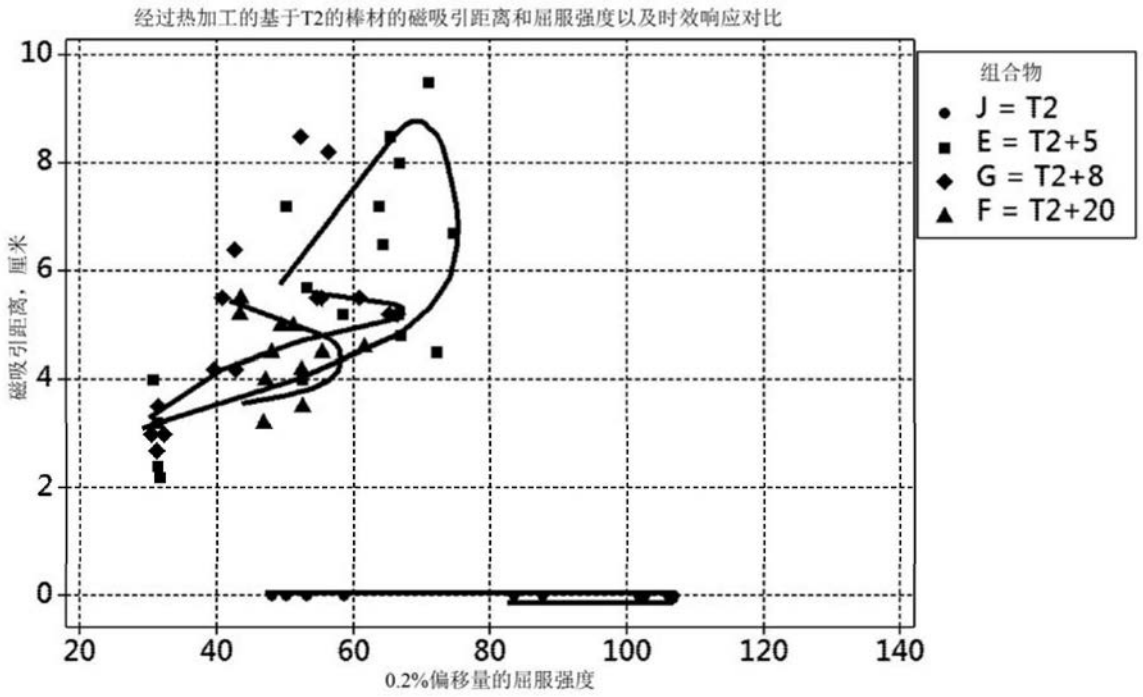

经过热加工的基于T2的棒材的磁吸引距离和屈服强度以及时效响应对比
磁吸引距离，厘米
0.2%偏移量的屈服强度
组合物
J = T2
E = T2+5
G = T2+8
F = T2+20

图39C

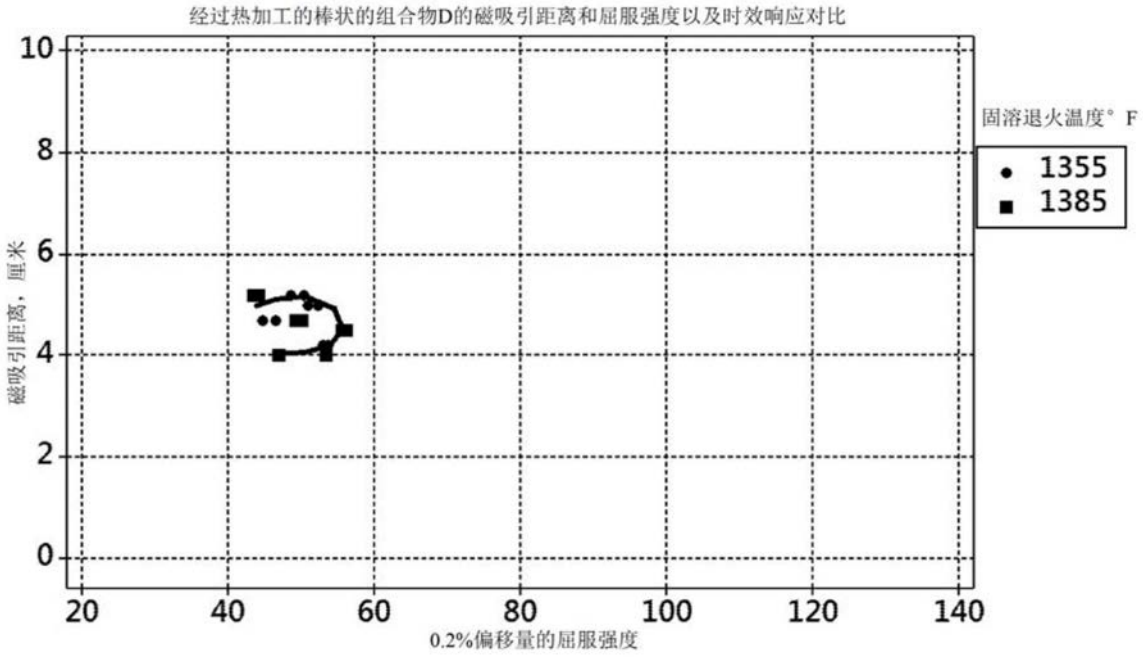

经过热加工的棒状的组合物D的磁吸引距离和屈服强度以及时效响应对比
磁吸引距离，厘米
0.2%偏移量的屈服强度
固溶退火温度° F
1355
1385

图39D

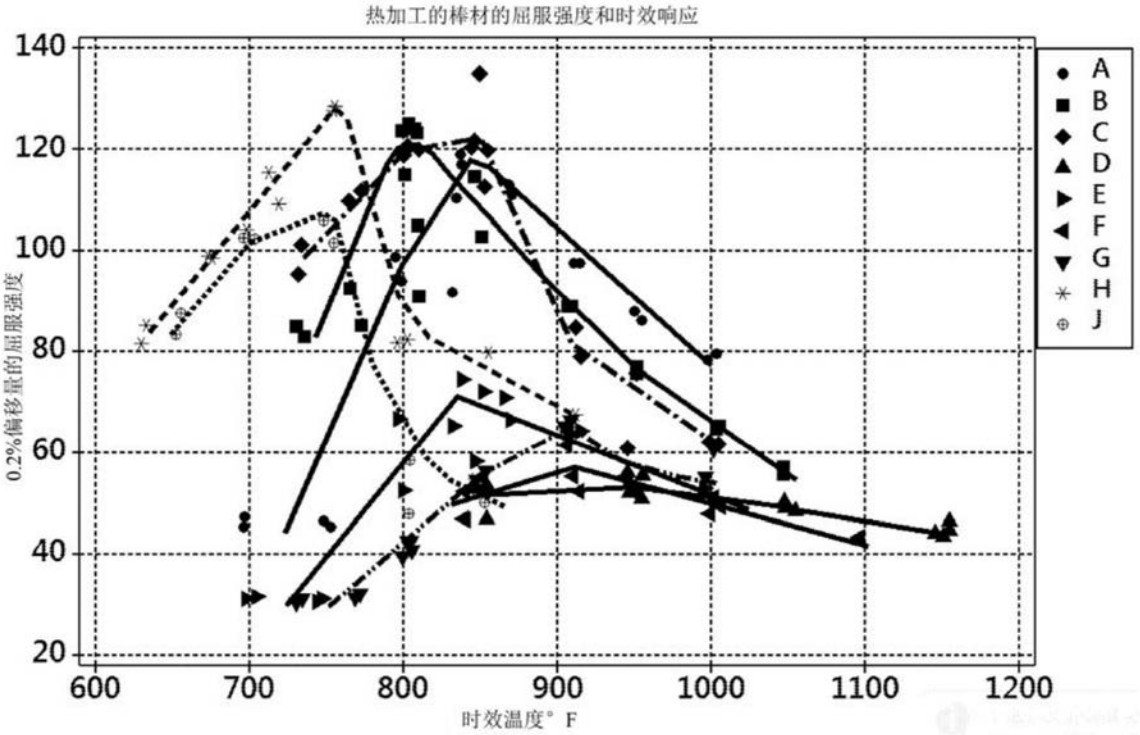

热加工的棒材的屈服强度和时效响应
0.2%偏移量的屈服强度
时效温度° F
A
B
C
D
E
F
G
H
J

图40A

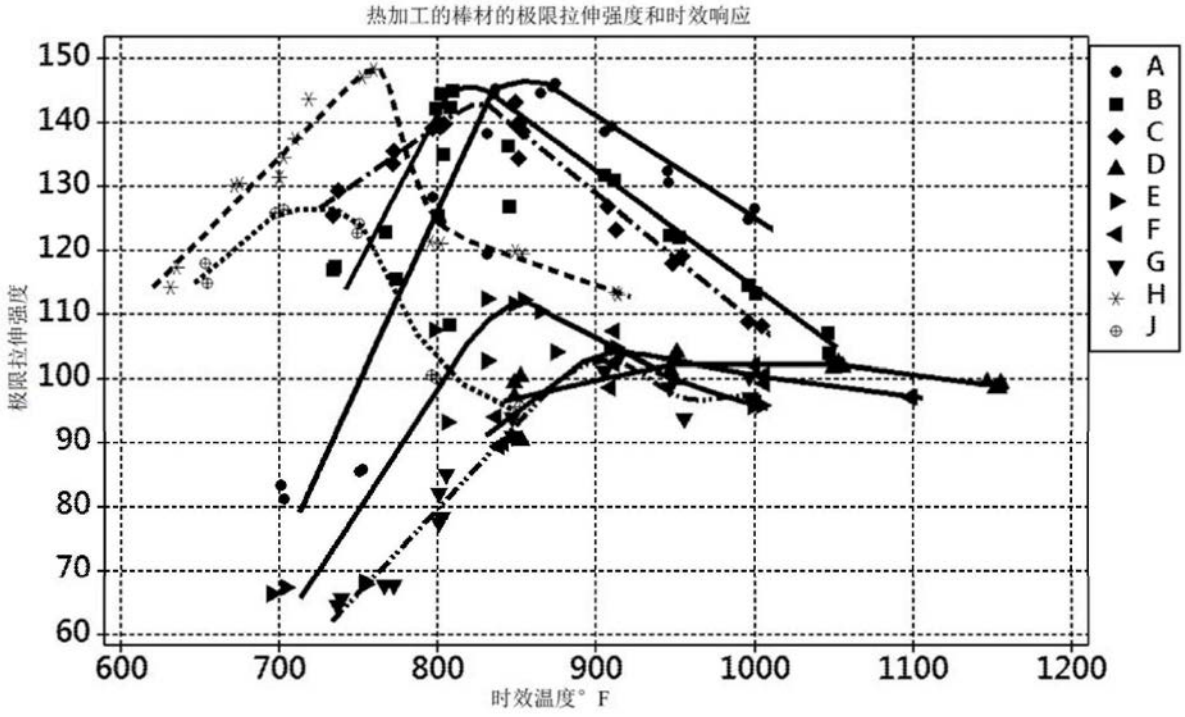

热加工的棒材的极限拉伸强度和时效响应
极限拉伸强度
时效温度° F
A
B
C
D
E
F
G
H
J

图40B

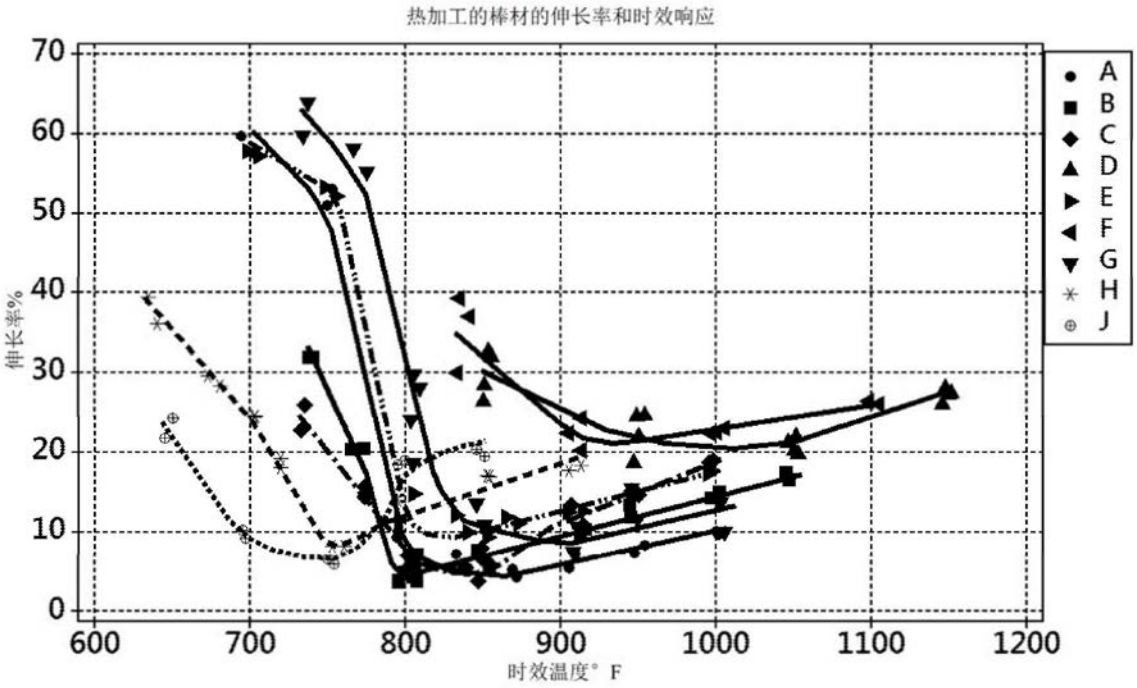

热加工的棒材的伸长率和时效响应
伸长率%
时效温度° F
A
B
C
D
E
F
G
H
J

图40C

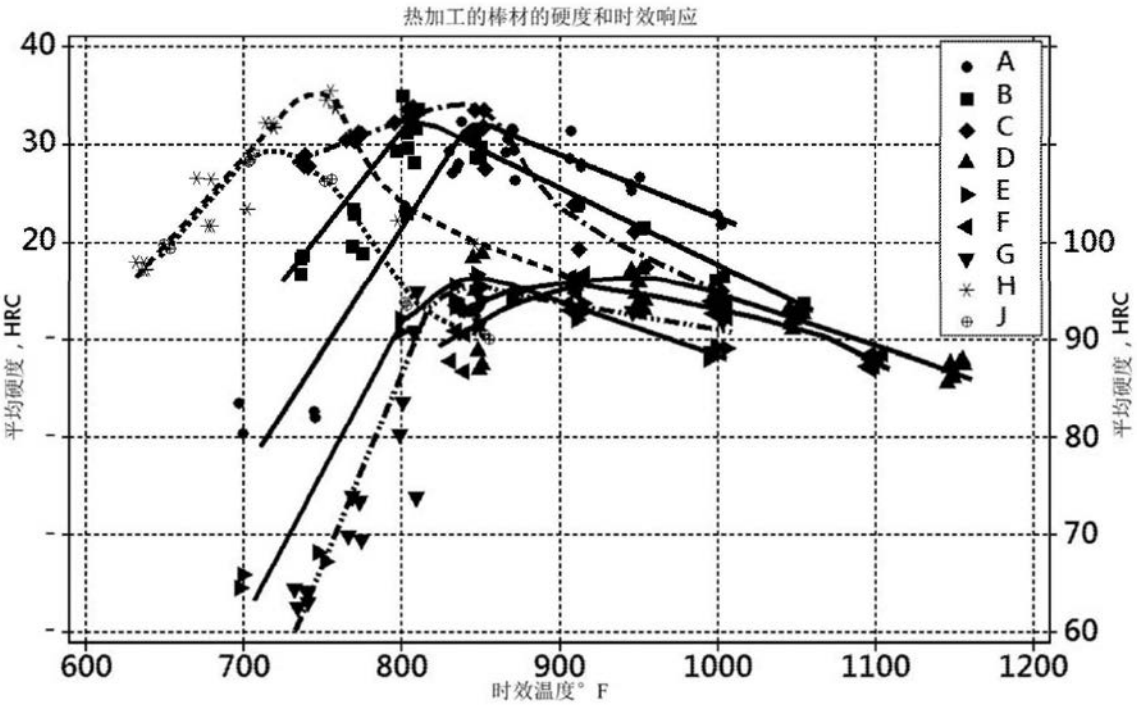

热加工的棒材的硬度和时效响应
平均硬度，HRC
平均硬度，HRC
时效温度° F
A
B
C
D
E
F
G
H
J

图40D

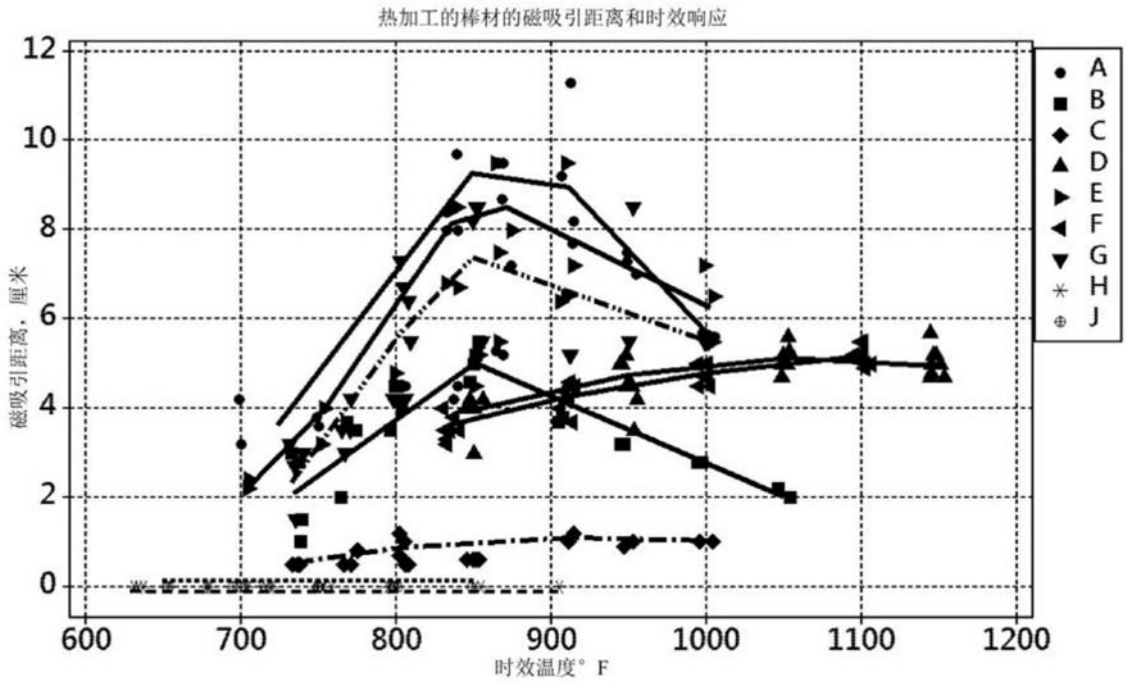

热加工的棒材的磁吸引距离和时效响应
磁吸引距离，厘米
时效温度° F
A
B
C
D
E
F
G
H
J

图40E

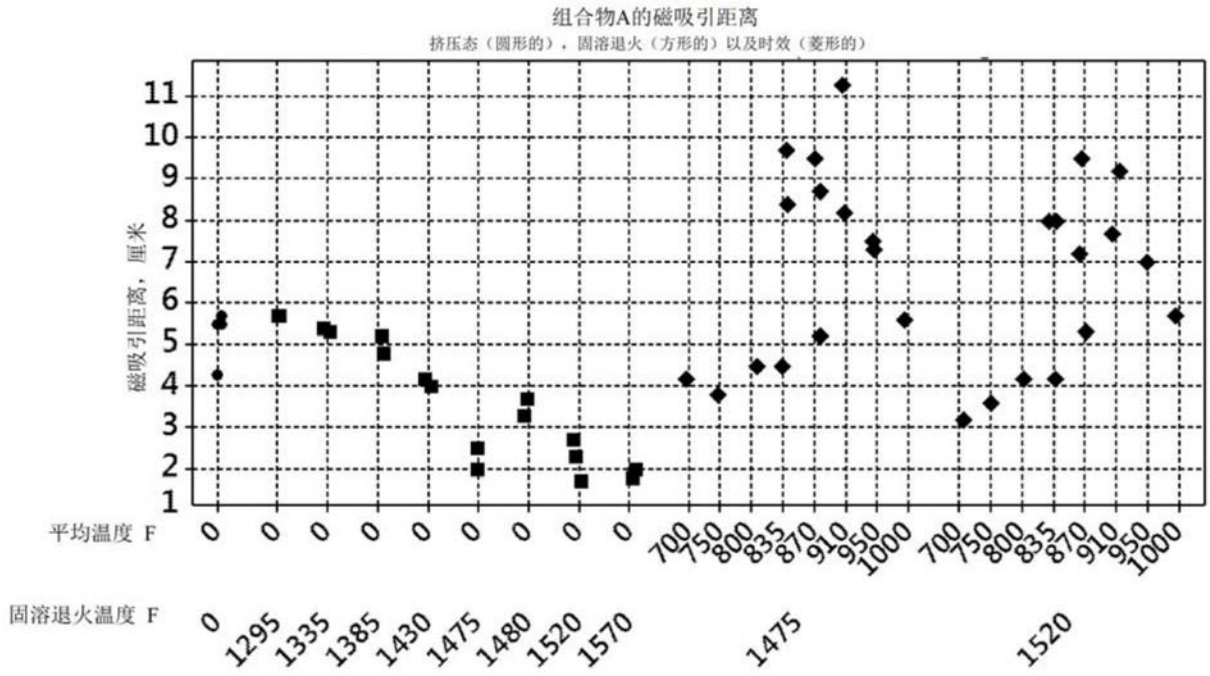

组合物A的磁吸引距离
挤压态（圆形的），固溶退火（方形的）以及时效（菱形的）
磁吸引距离，厘米
平均温度 F
固溶退火温度 F

图41A

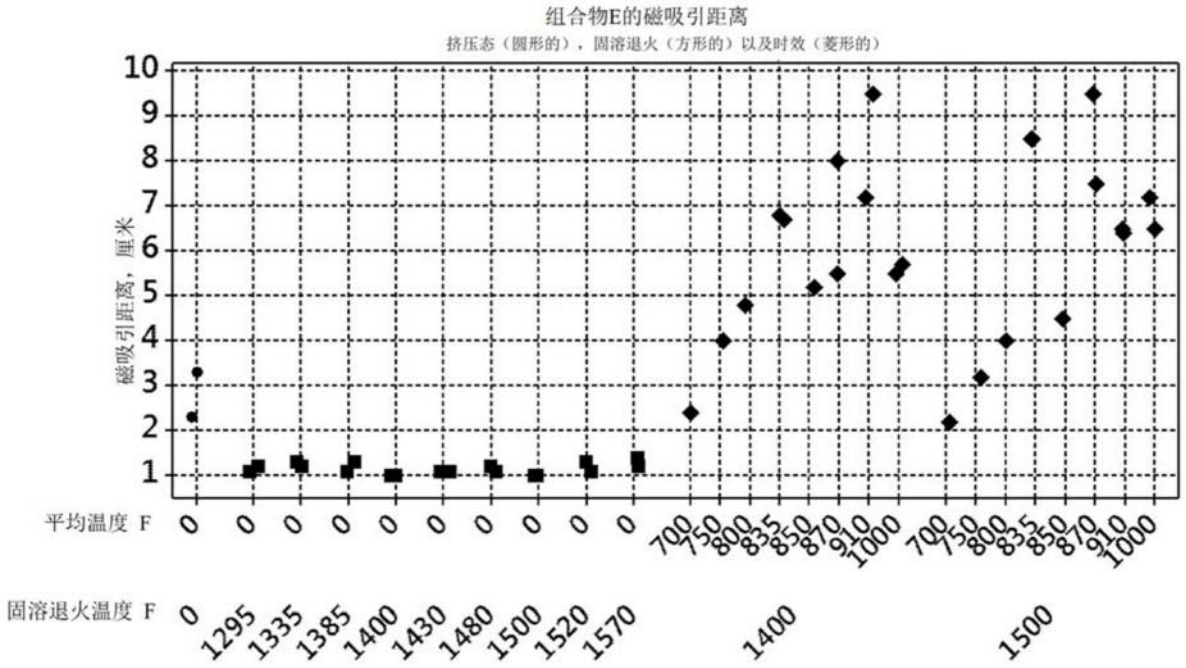

组合物E的磁吸引距离
挤压态（圆形的），固溶退火（方形的）以及时效（菱形的）
磁吸引距离，厘米
平均温度 F
固溶退火温度 F

图41B

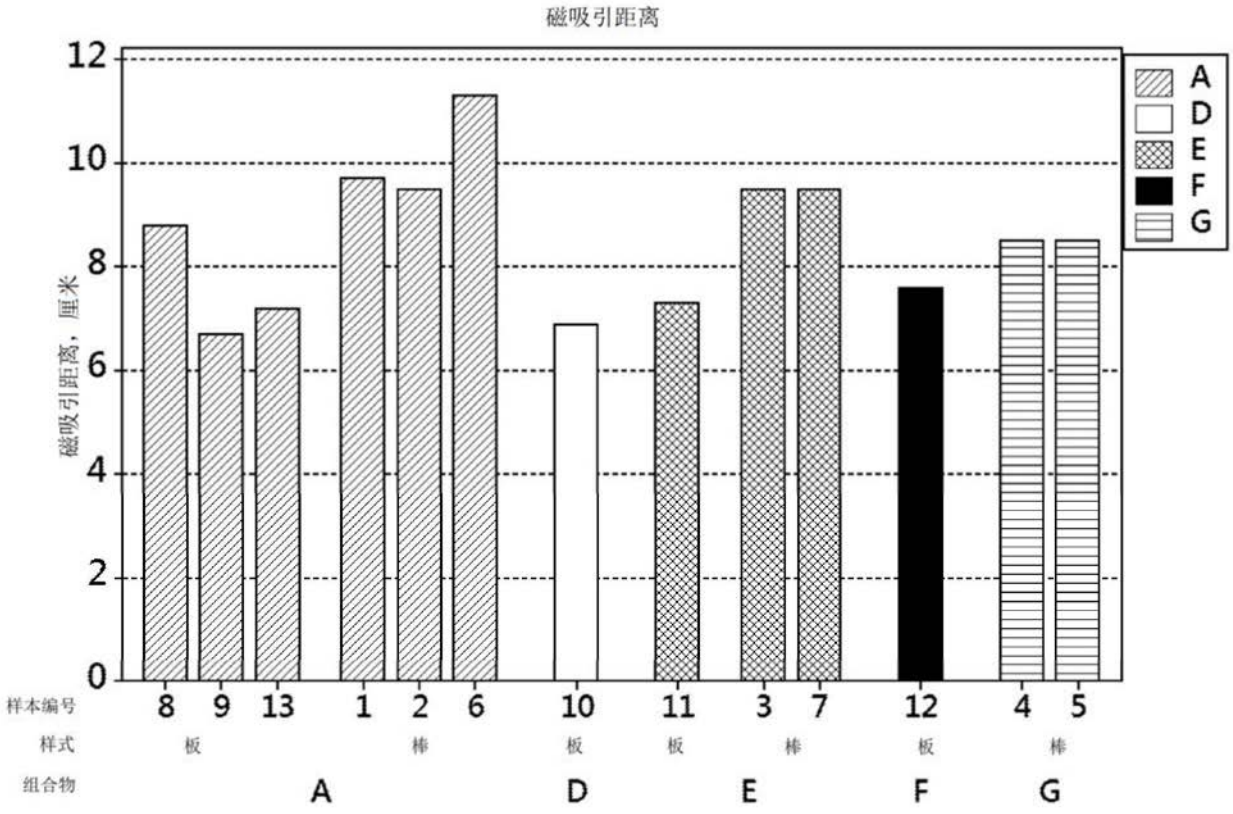

磁吸引距离
磁吸引距离，厘米
A
D
E
F
G
样本编号
样式
组合物
板
棒

图42

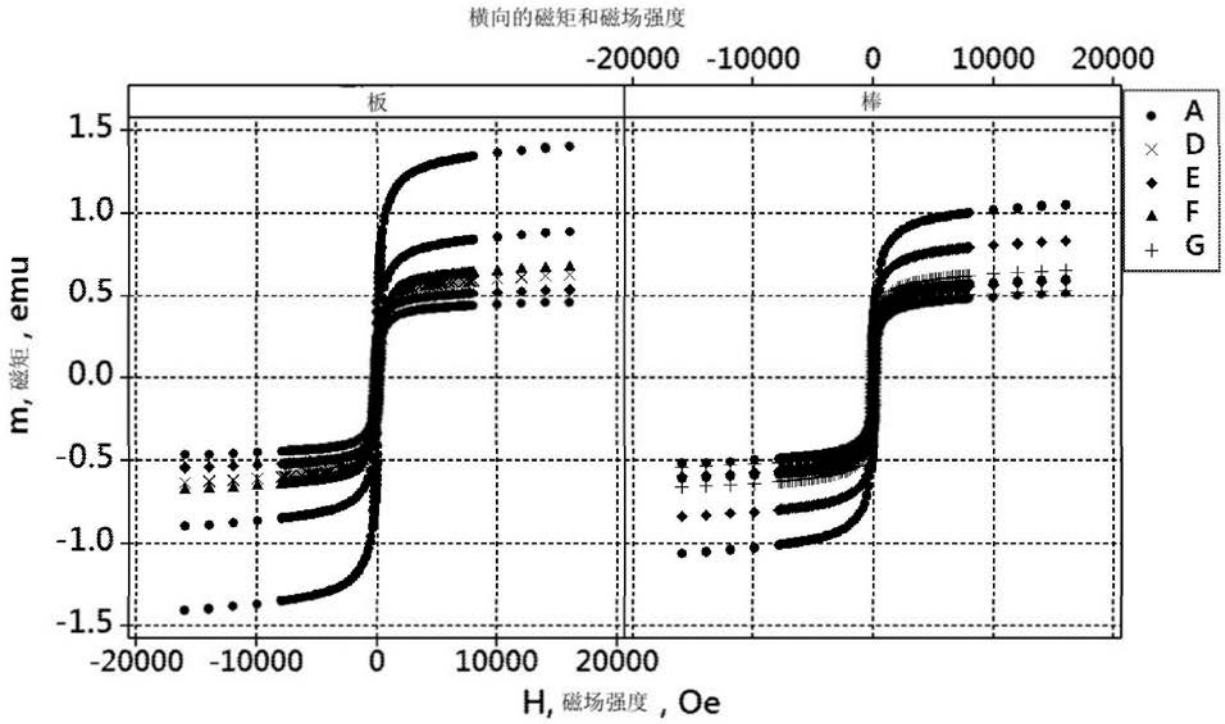

横向的磁矩和磁场强度
板
棒
A
D
E
F
G
m, 磁矩 , emu
H, 磁场强度 , Oe

图43

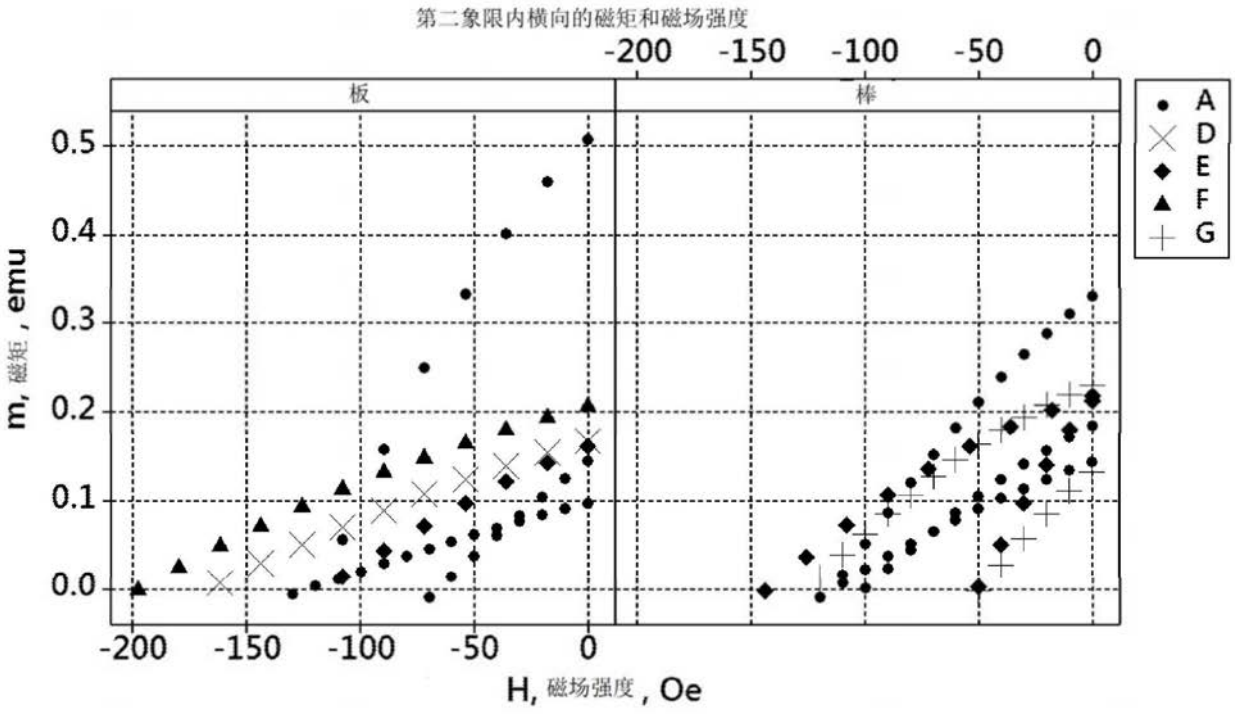

第二象限内横向的磁矩和磁场强度
板
棒
A
D
E
F
G
m, 磁矩 , emu
H, 磁场强度 , Oe

图44

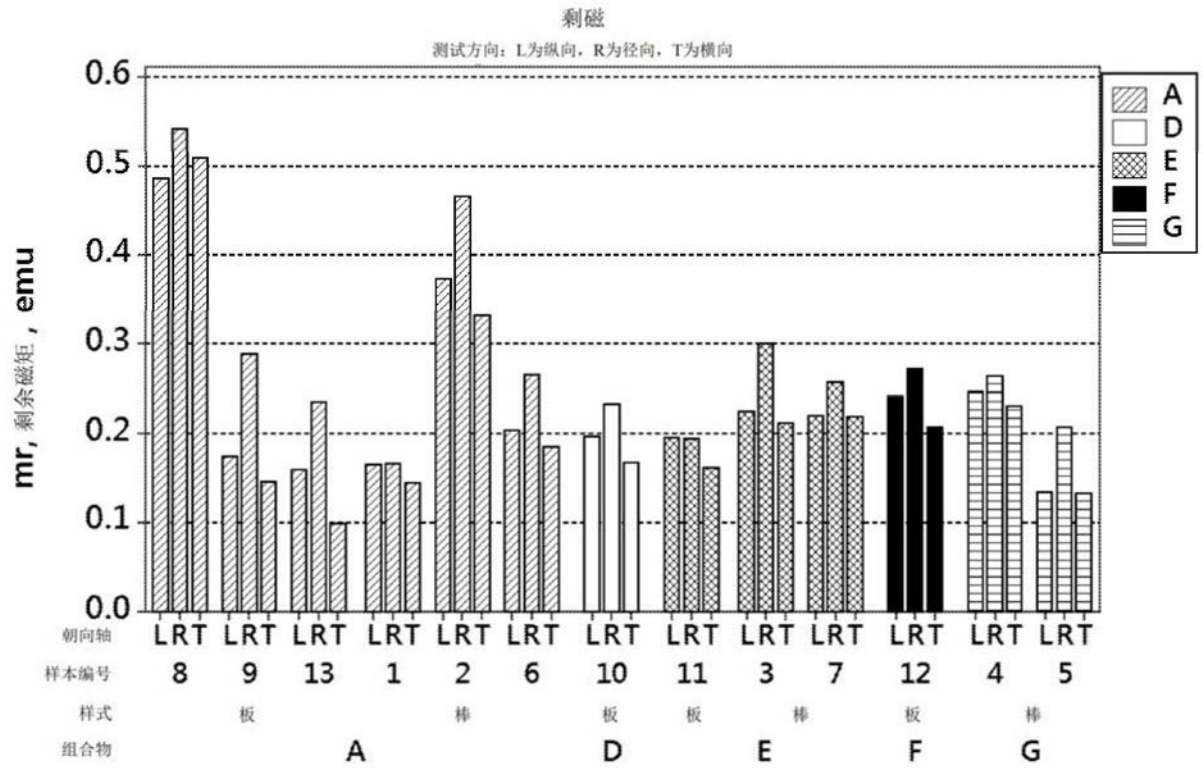

剩磁
测试方向：L为纵向，R为径向，T为横向
mr，剩余磁矩，emu
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0.0
A
D
E
F
G
朝向轴 LRT LRT LRT LRT LRT LRT LRT LRT LRT LRT LRT LRT LRT
样本编号 8 9 13 1 2 6 10 11 3 7 12 4 5
样式 板 棒 板 板 棒 板 棒
组合物 A D E F G

图45

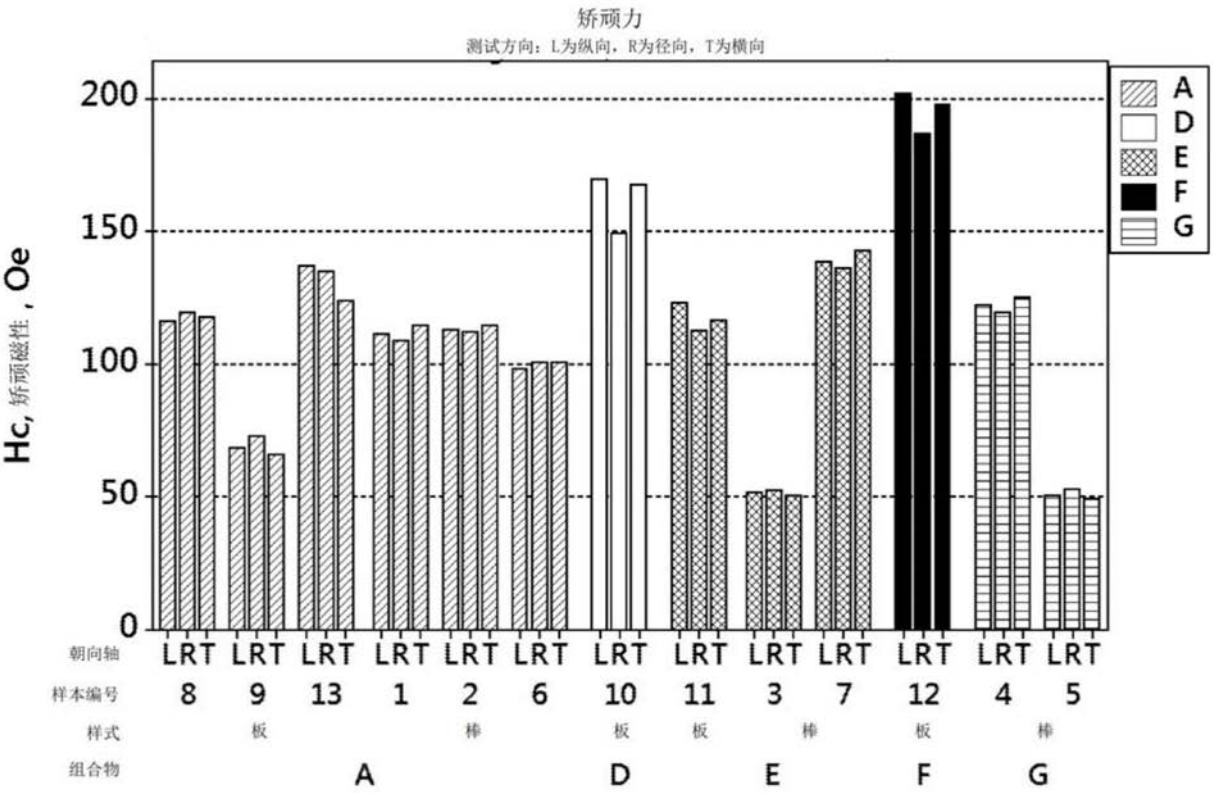

矫顽力
测试方向：L为纵向，R为径向，T为横向
Hc，矫顽磁性，Oe
200
150
100
50
0
A
D
E
F
G
朝向轴 LRT LRT LRT LRT LRT LRT LRT LRT LRT LRT LRT LRT LRT
样本编号 8 9 13 1 2 6 10 11 3 7 12 4 5
样式 板 棒 板 板 棒 板 棒
组合物 A D E F G

图46

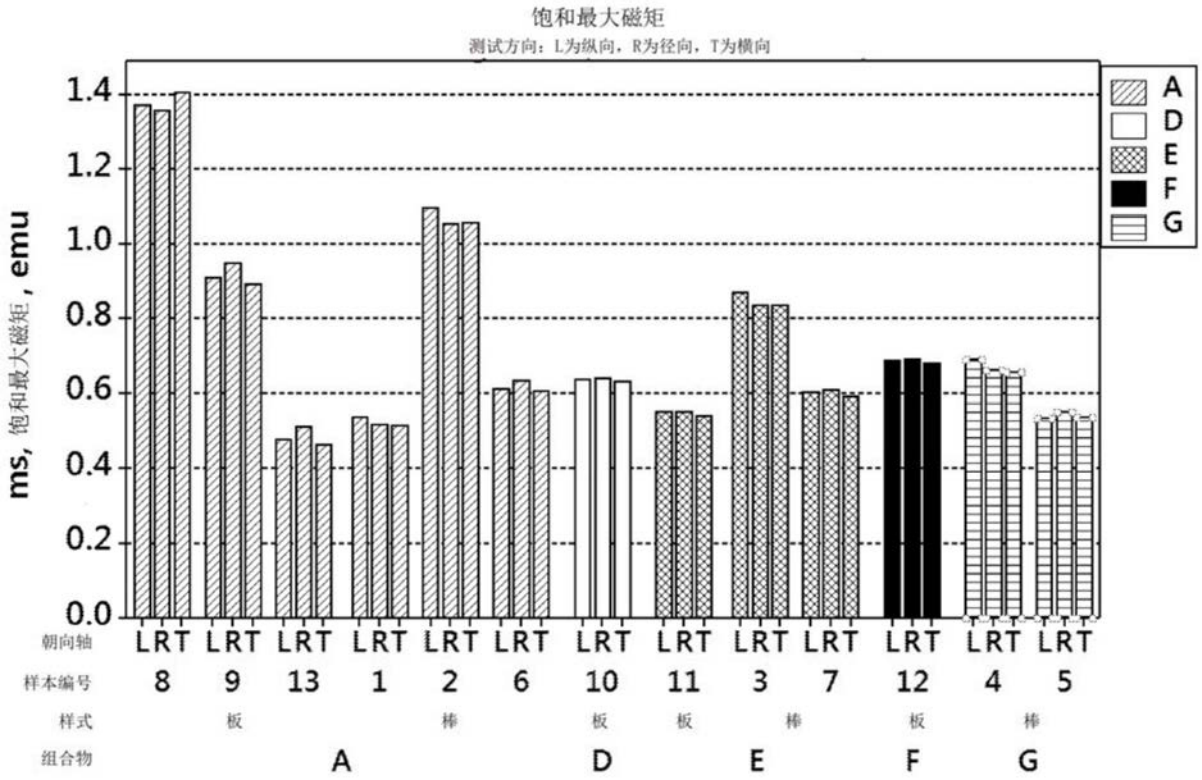

饱和最大磁矩
测试方向：L为纵向，R为径向，T为横向
ms，饱和最大磁矩，emu
1.4
1.2
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0
A
D
E
F
G
朝向轴 LRT LRT LRT LRT LRT LRT LRT LRT LRT LRT LRT LRT LRT
样本编号 8 9 13 1 2 6 10 11 3 7 12 4 5
样式 板 棒 板 板 棒 板 棒
组合物 A D E F G

图47

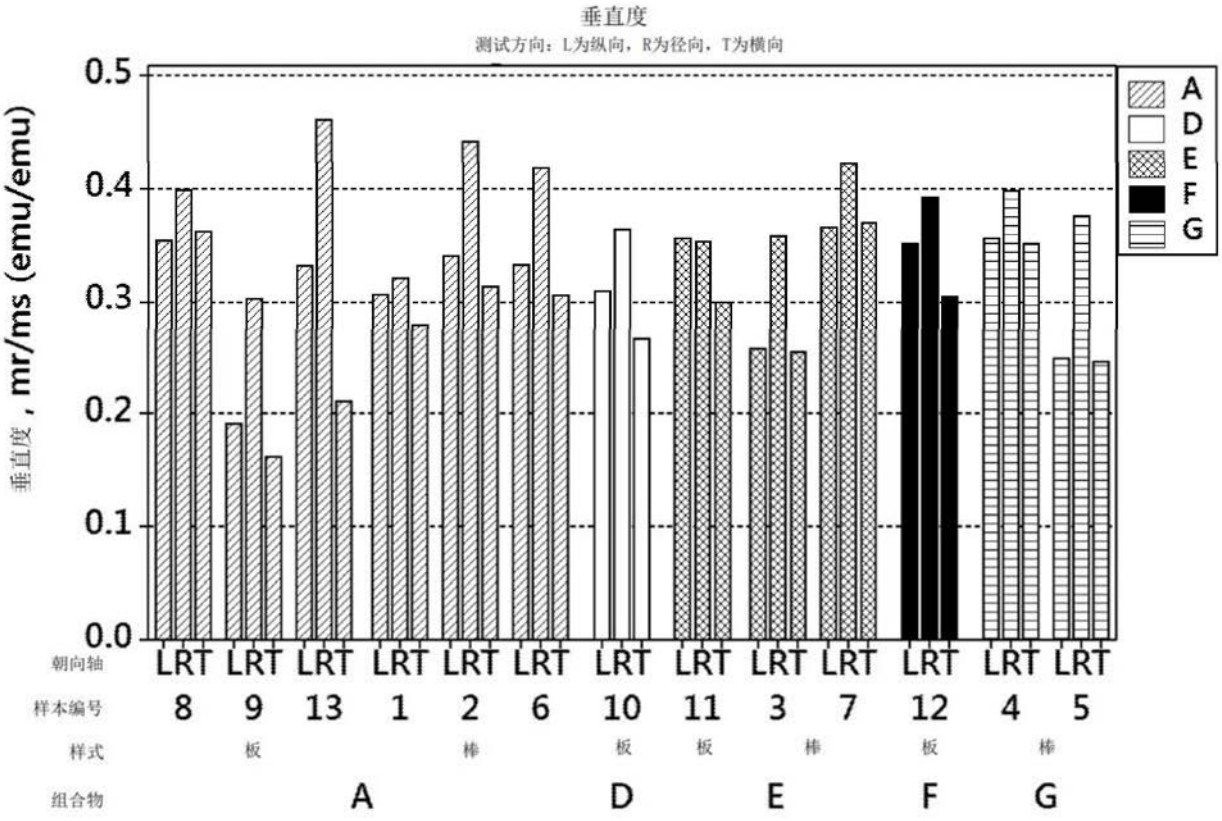

垂直度
测试方向：L为纵向，R为径向，T为横向
垂直度，mr/ms (emu/emu)
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0.0
A
D
E
F
G
朝向轴
样本编号
样式
组合物
LRT
8 9 13 1 2 6 10 11 3 7 12 4 5
板 棒 板 板 棒 板 棒
A D E F G

图48

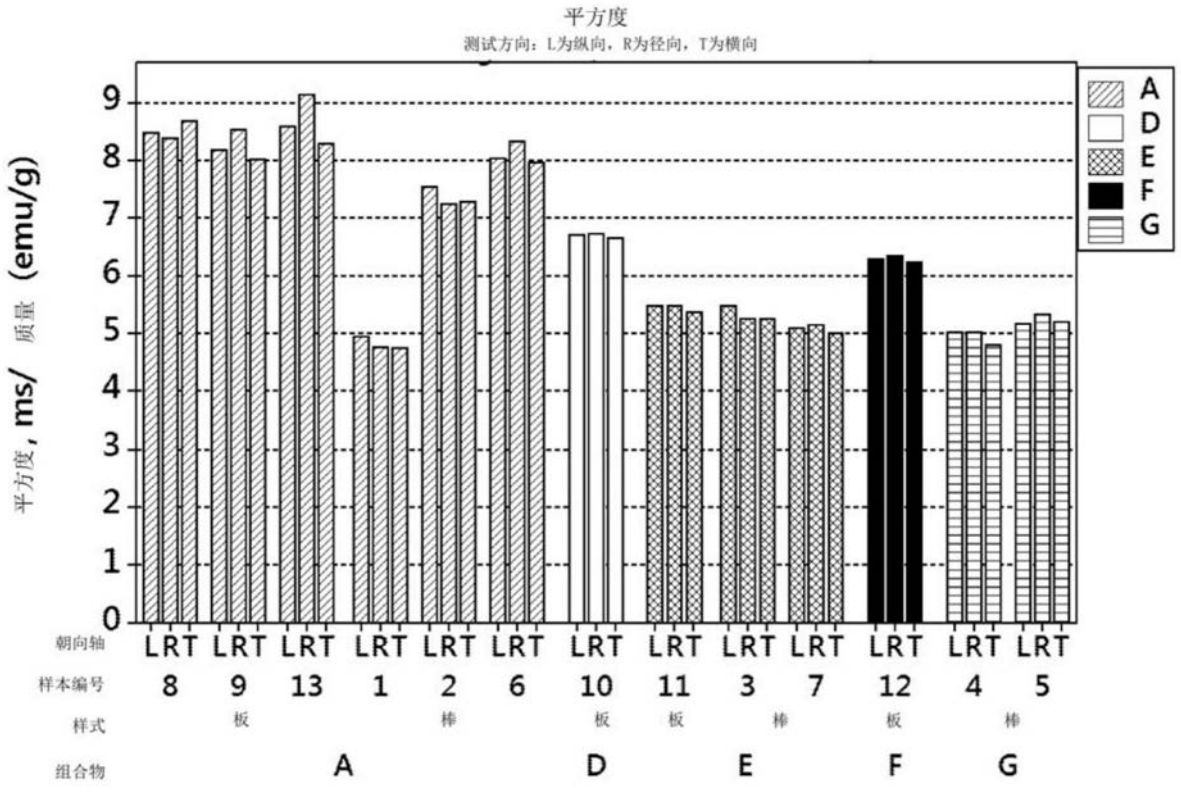

平方度
测试方向：L为纵向，R为径向，T为横向
平方度，ms/ 质量 (emu/g)
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
A
D
E
F
G
朝向轴
样本编号
样式
组合物
LRT
8 9 13 1 2 6 10 11 3 7 12 4 5
板
棒
A
D
E
F
G

图49

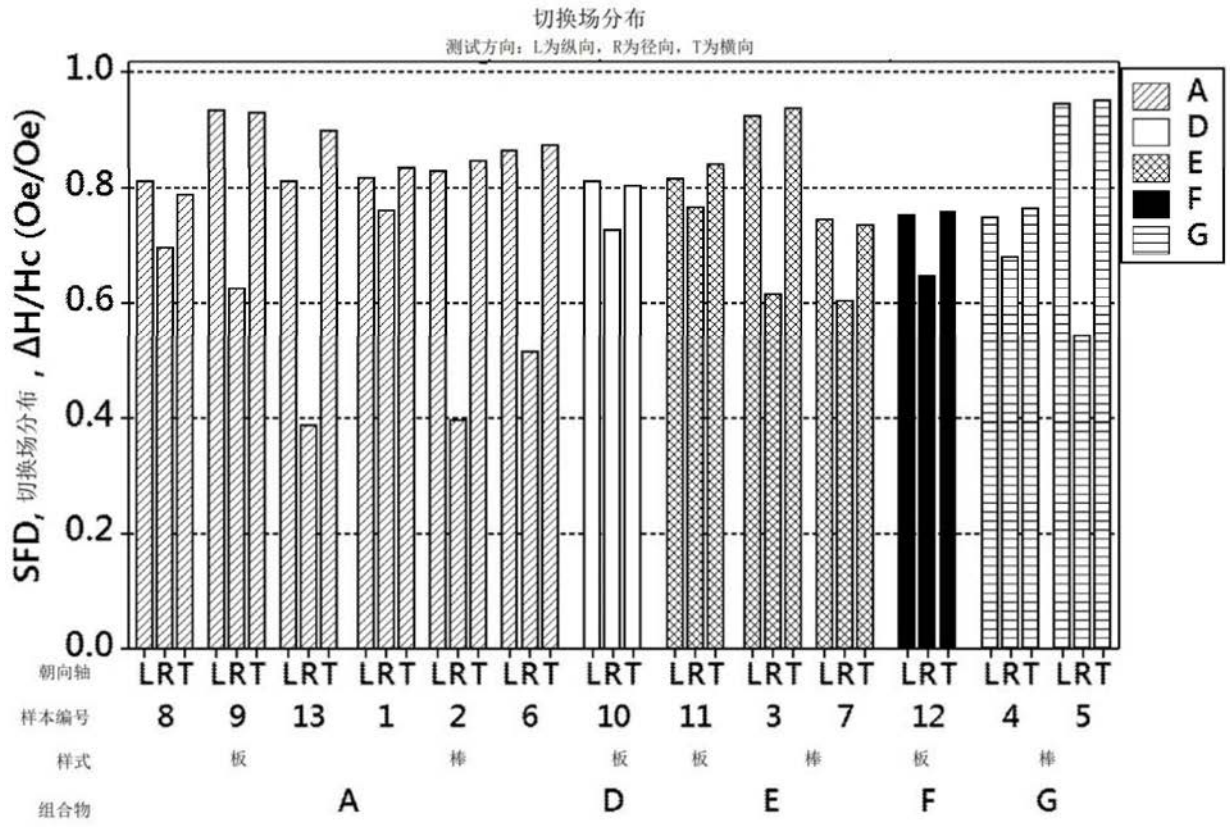

切换场分布
测试方向：L为纵向，R为径向，T为横向
SFD, 切换场分布 , ΔH/Hc (Oe/Oe)
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0
A
D
E
F
G
朝向轴
样本编号
样式
组合物
LRT
8 9 13 1 2 6 10 11 3 7 12 4 5
板
棒
A
D
E
F
G

图50

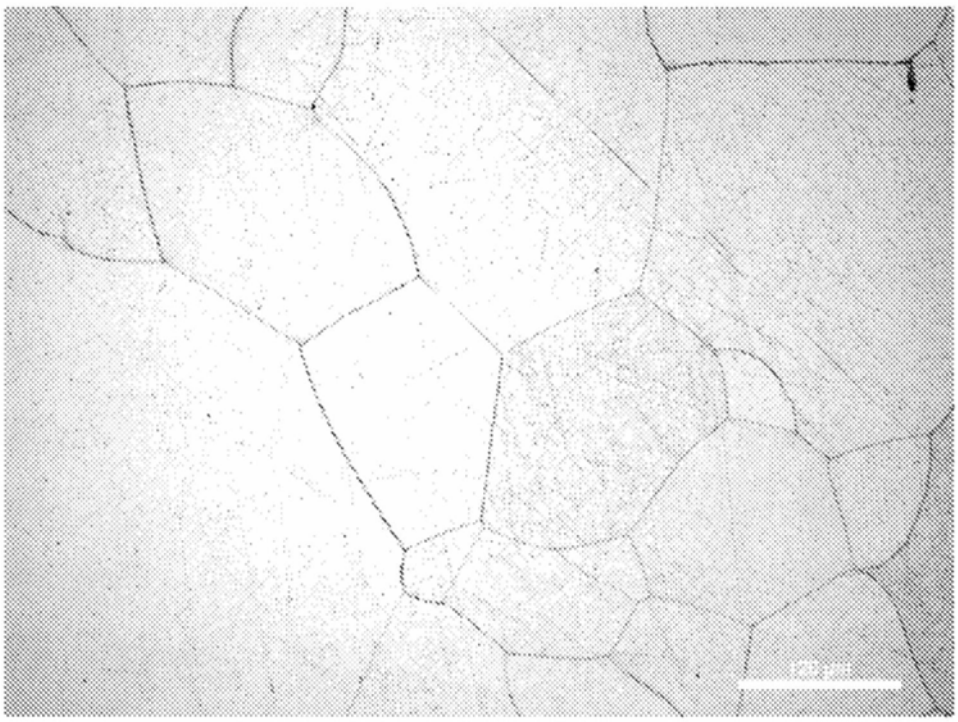


图51A

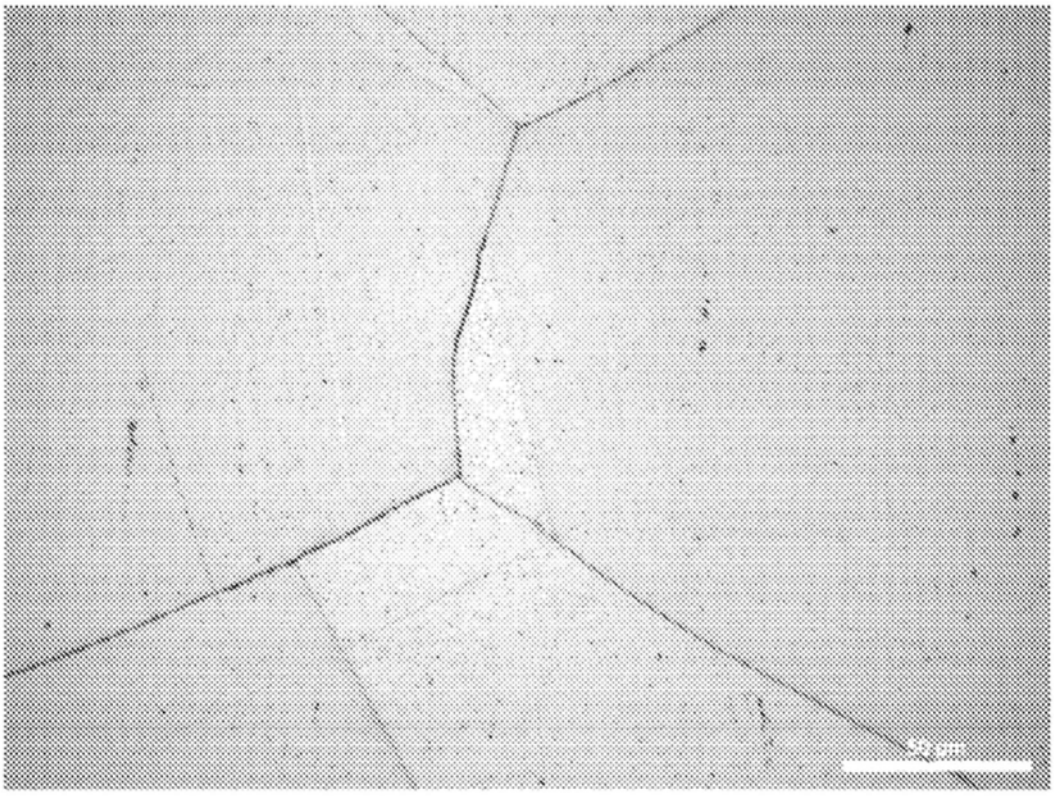


图51B

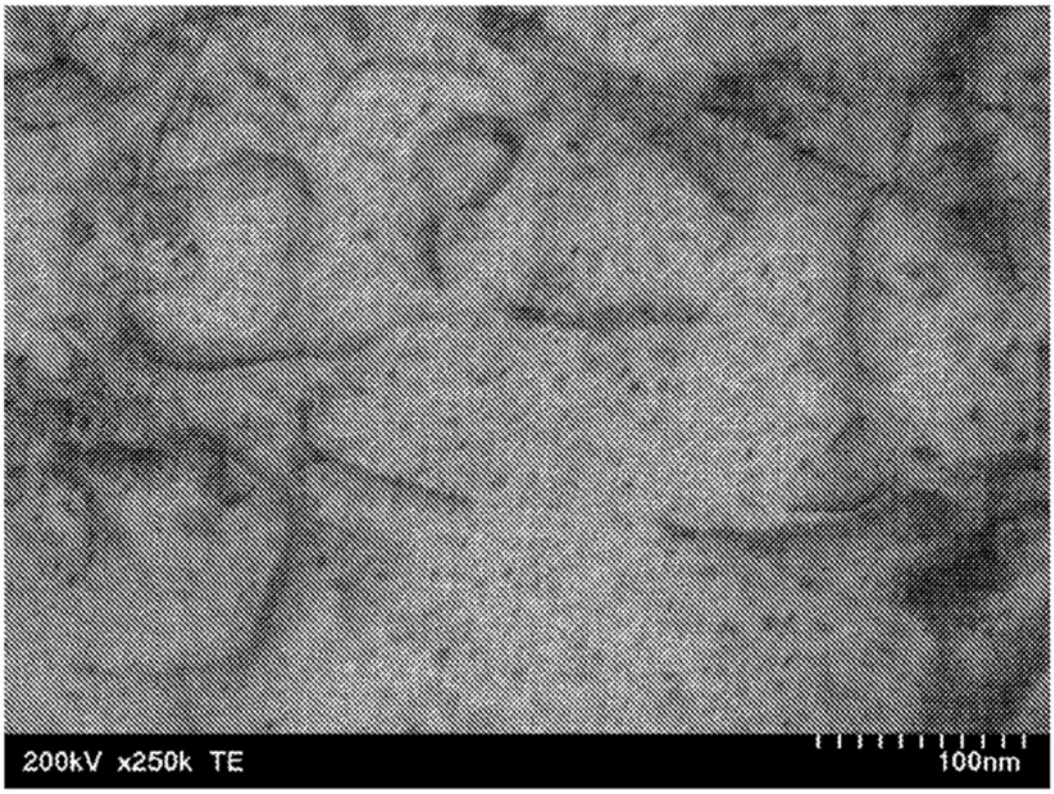


图52

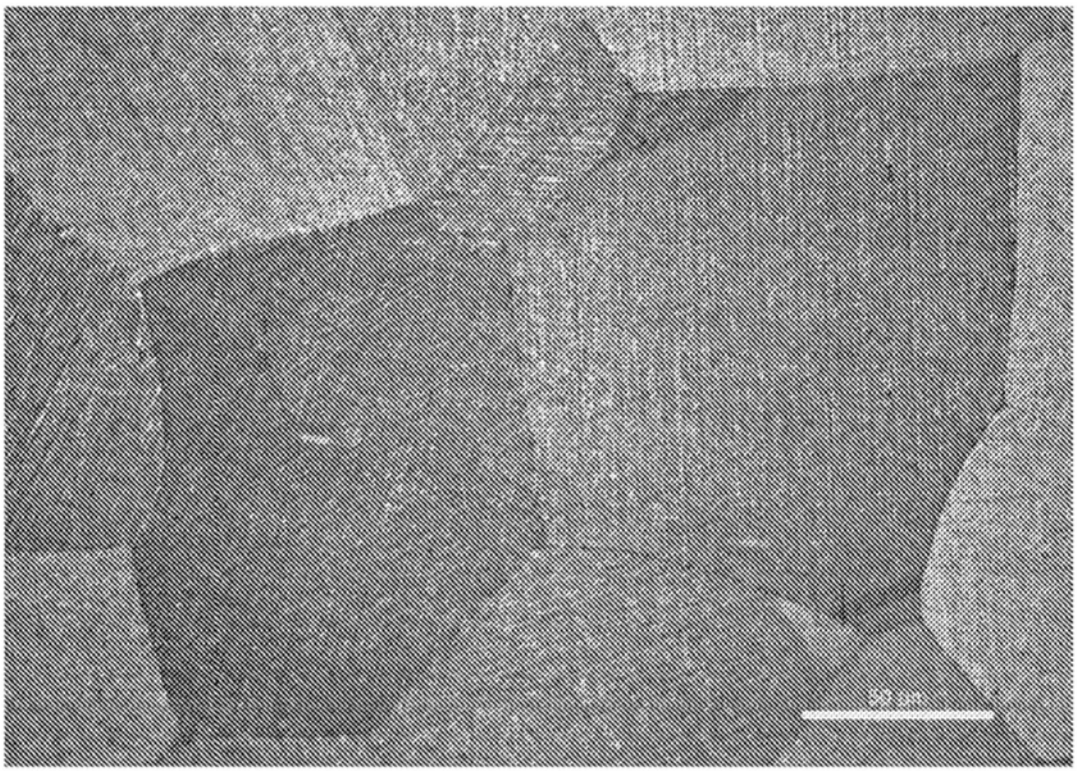


图53

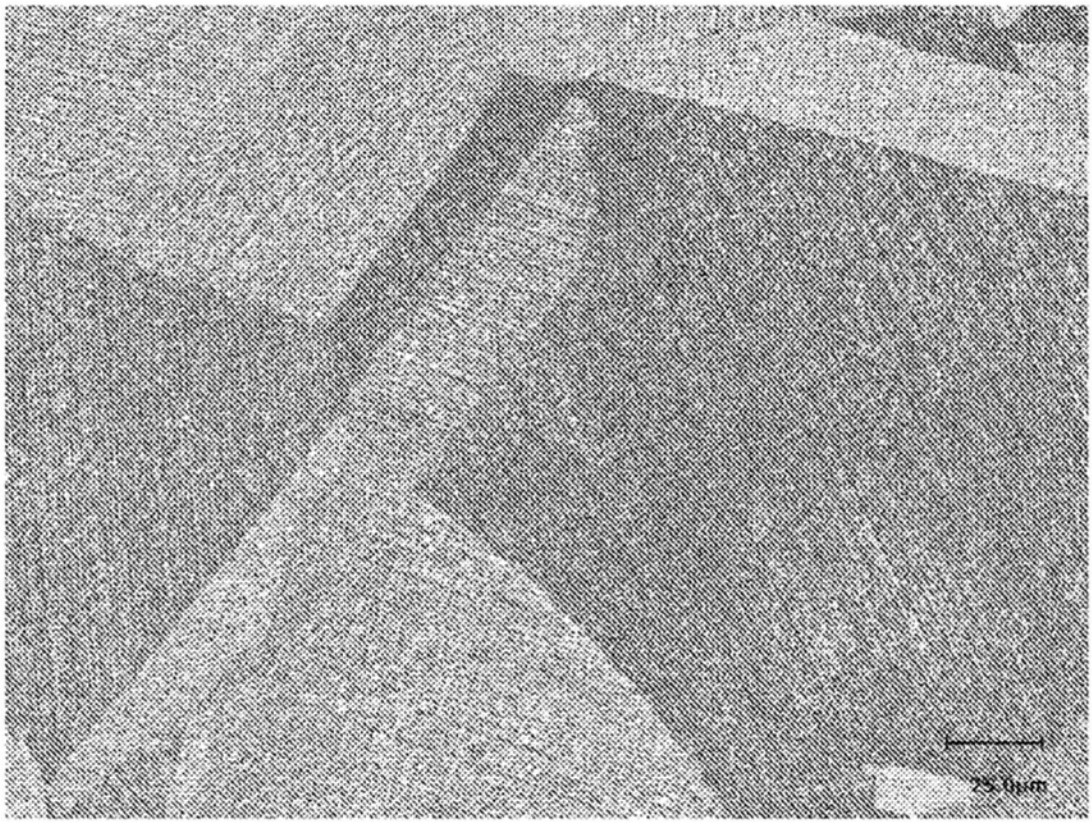


图54A

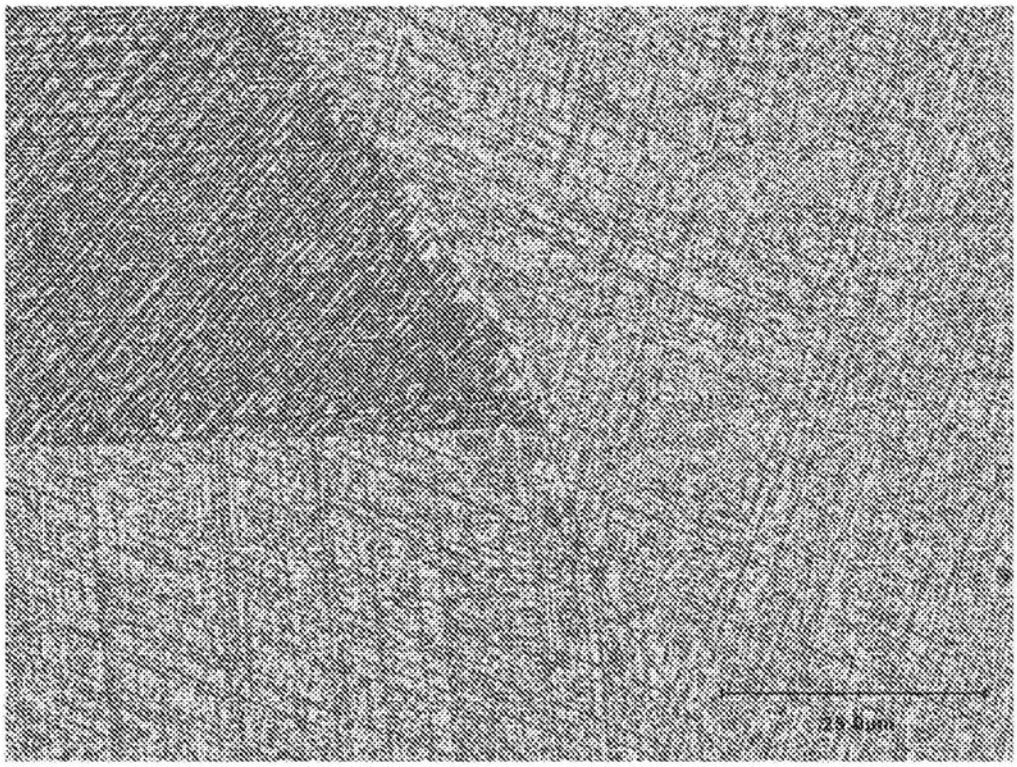


图54B

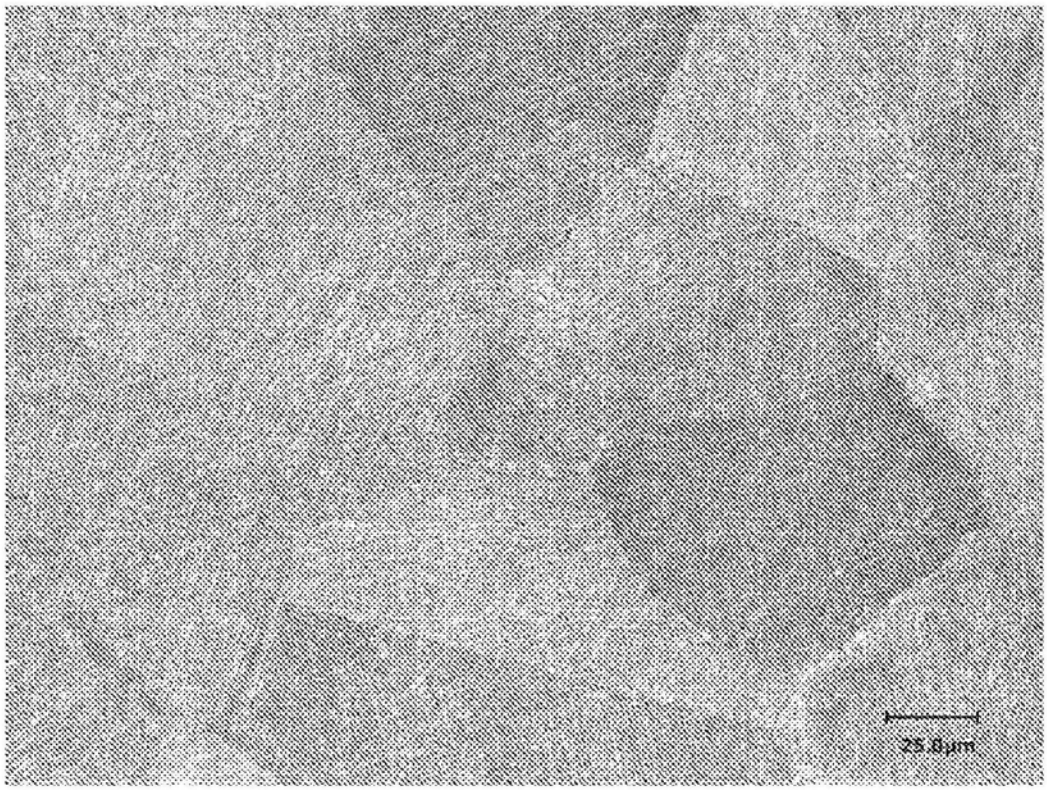


图54C

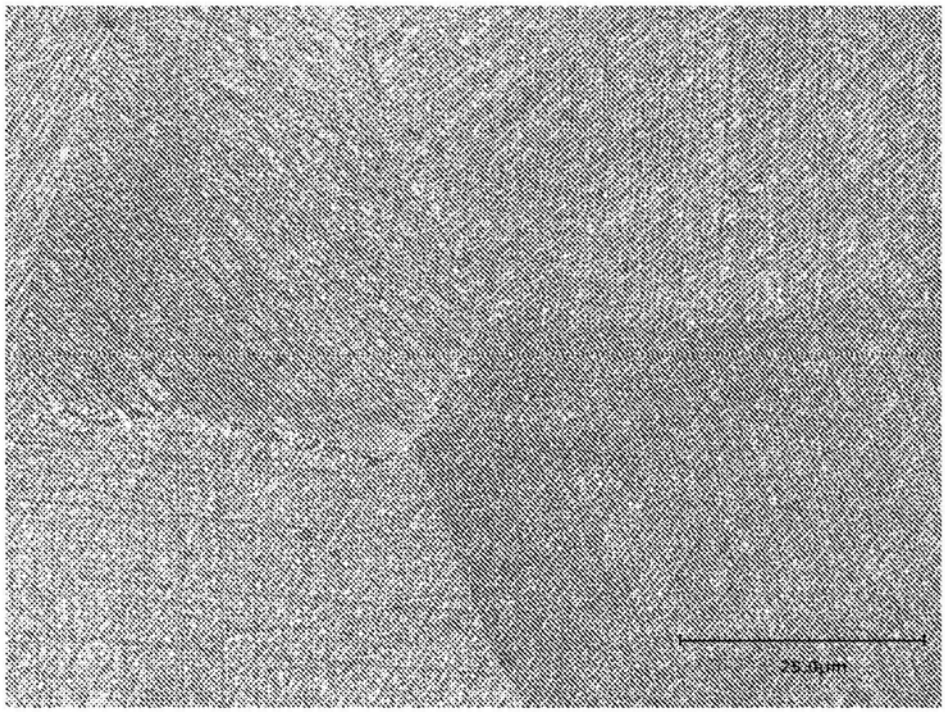


图54D

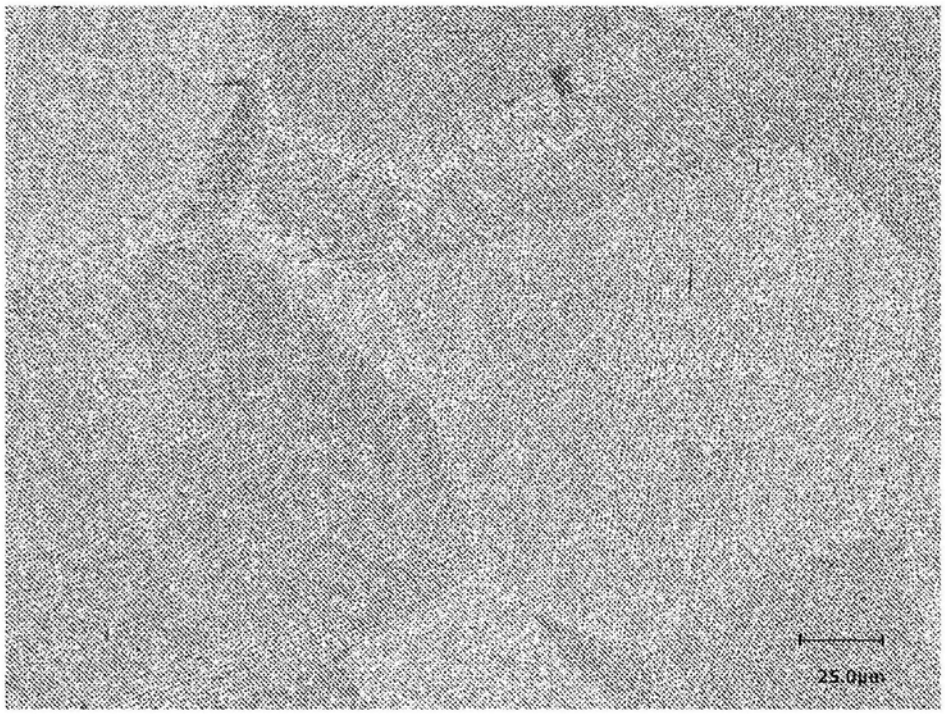


图54E

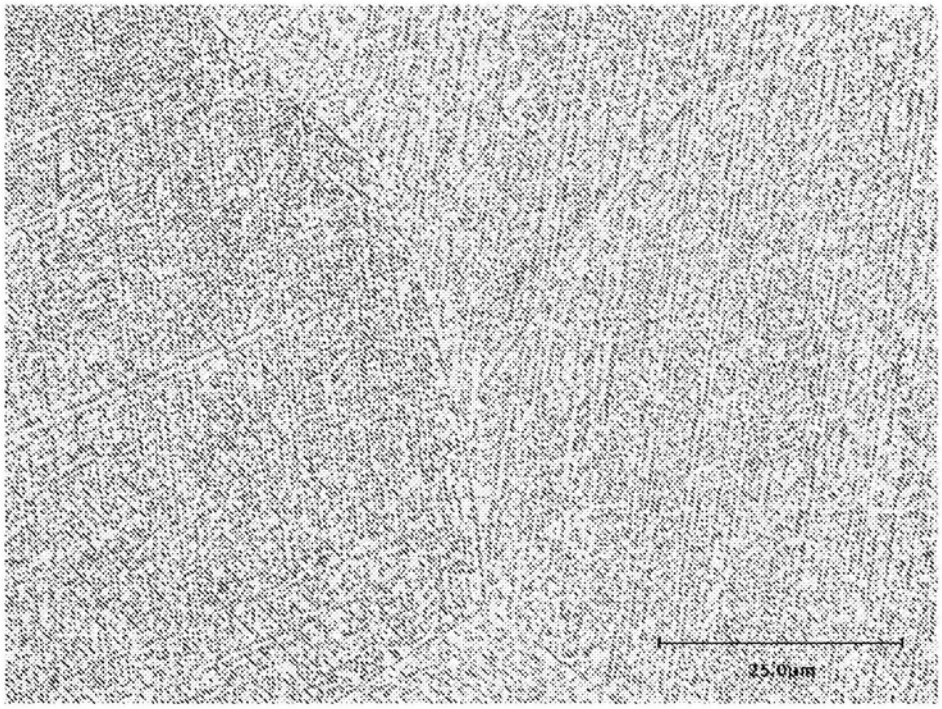

25.0μm

图54F

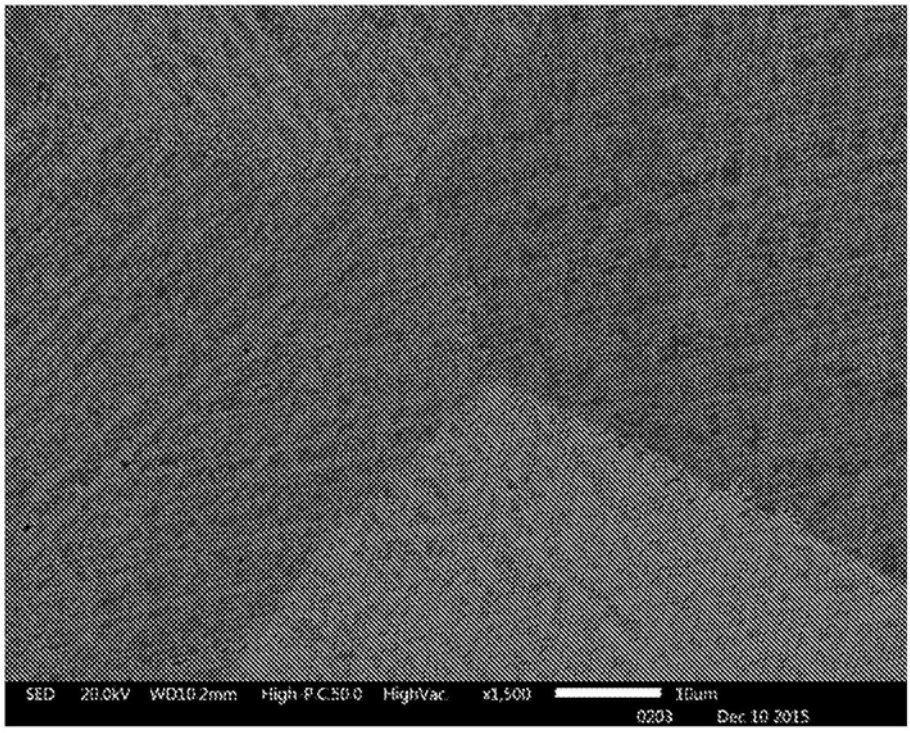

SED 20.0kV WD10.2mm High P.C.50.0 HighVac x1,500 10um
0203 Dec 10 2015

图55A

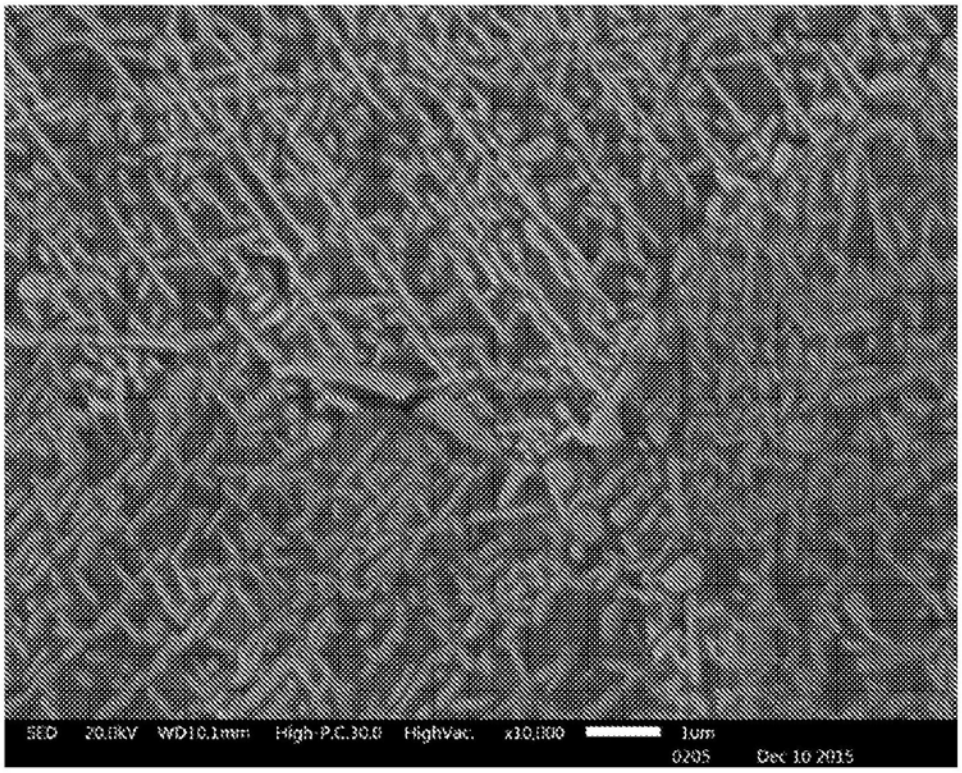

SED 20.0kV WD10.1mm High P.C.30.0 HighVac. x10,000 1um
0205 Dec 10 2015

图55B

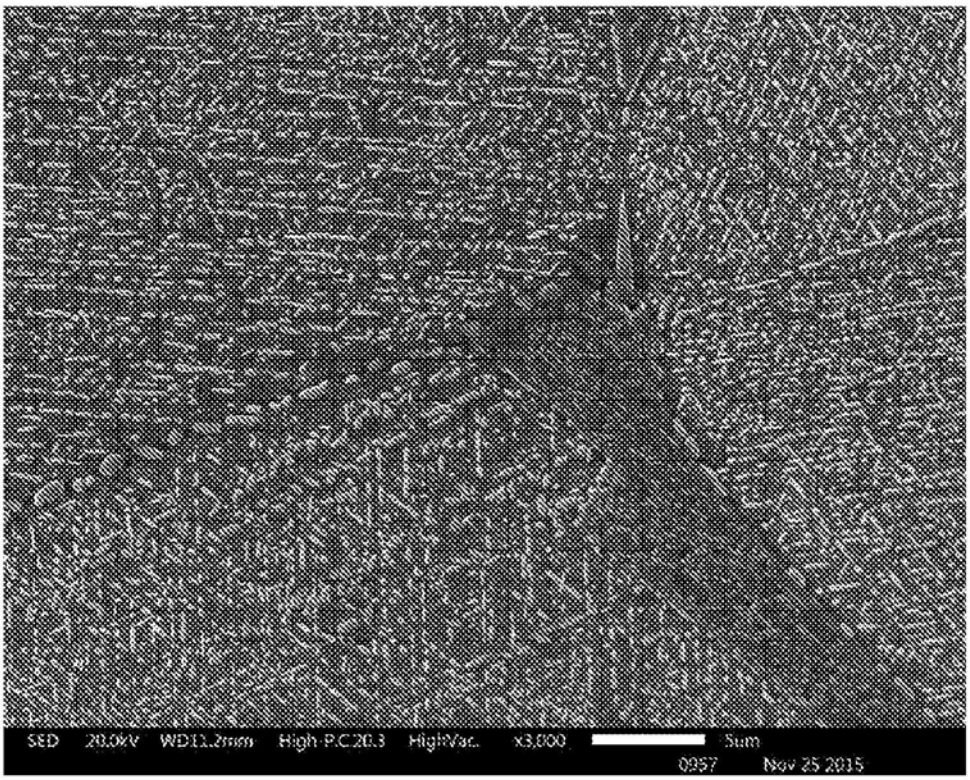

SED 20.0kV WD11.2mm High P.C.20.3 HighVac. x3,000 5um
0957 Nov 25 2015

图55C

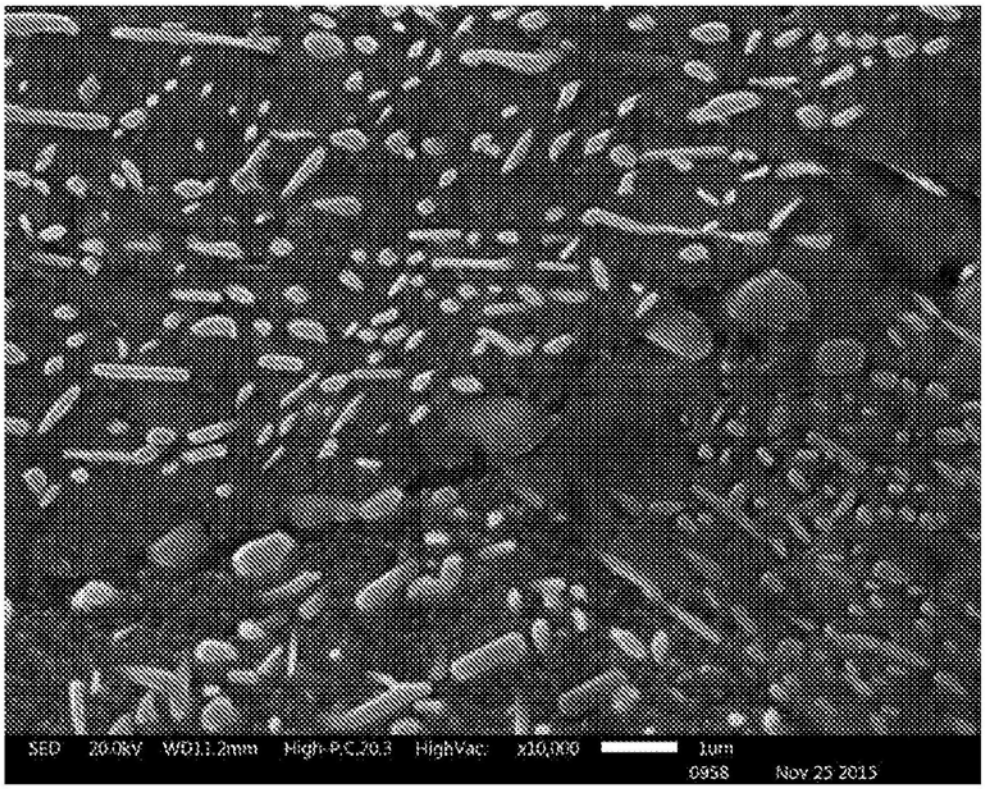

SED 20.0kV WD11.2mm High-P.C.20.3 HighVac: x10,000 1um
0958 Nov 25 2015

图55D

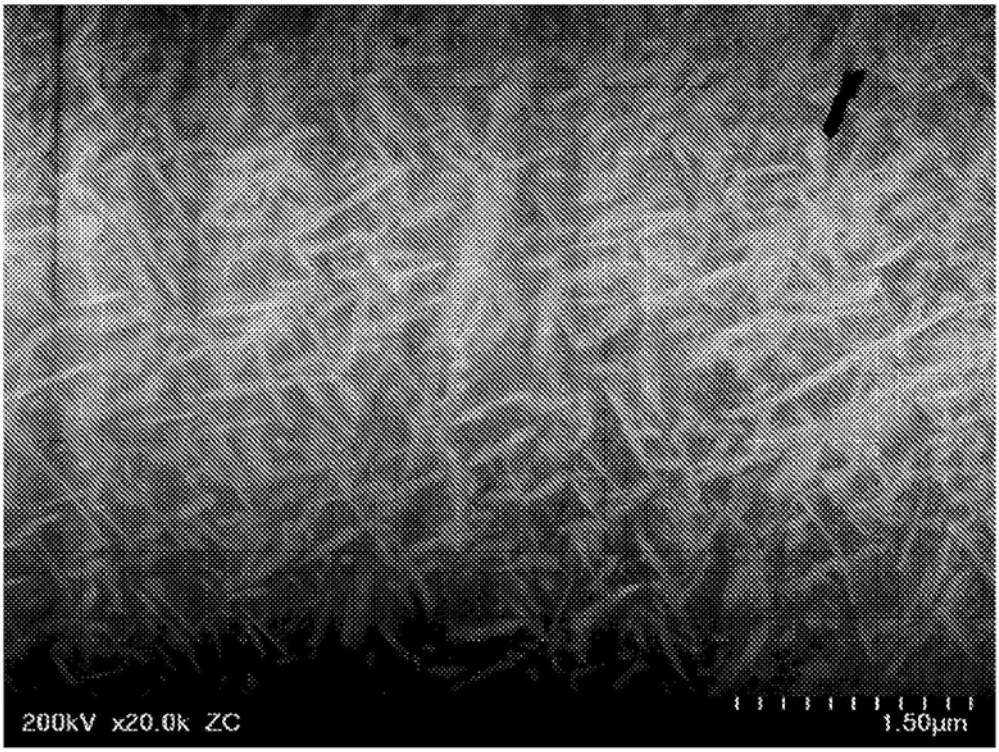

200kV x20.0k ZC
1.50μm

图56A



图56B

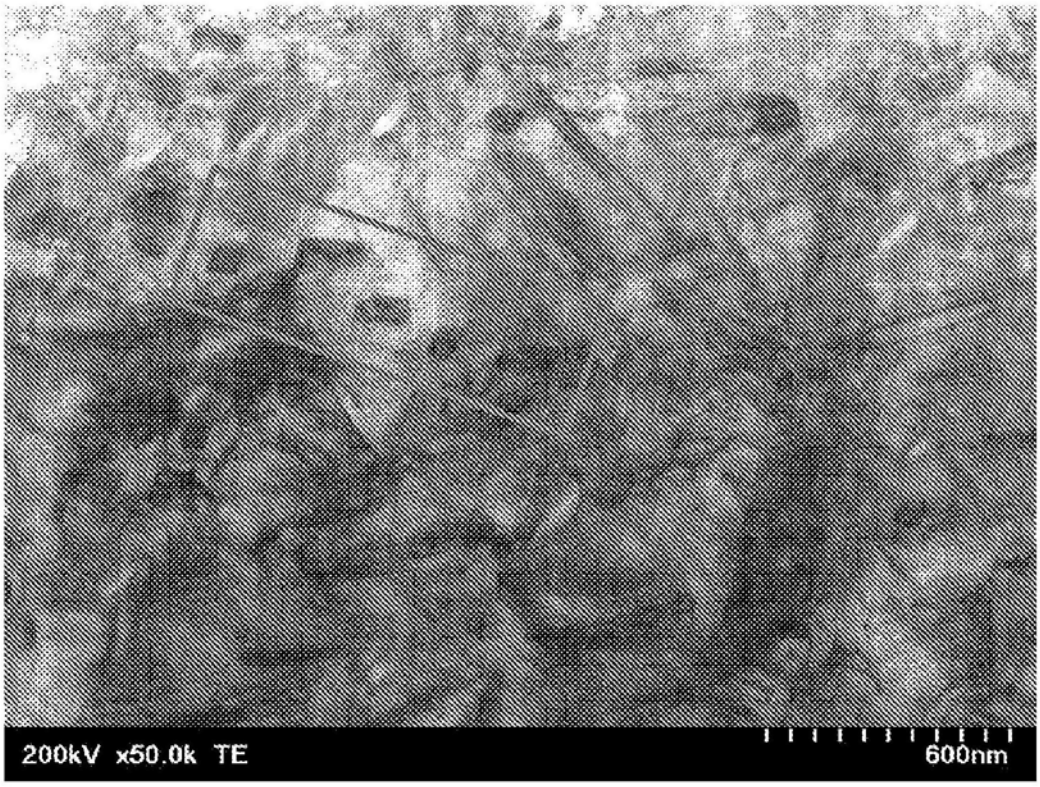


图56C

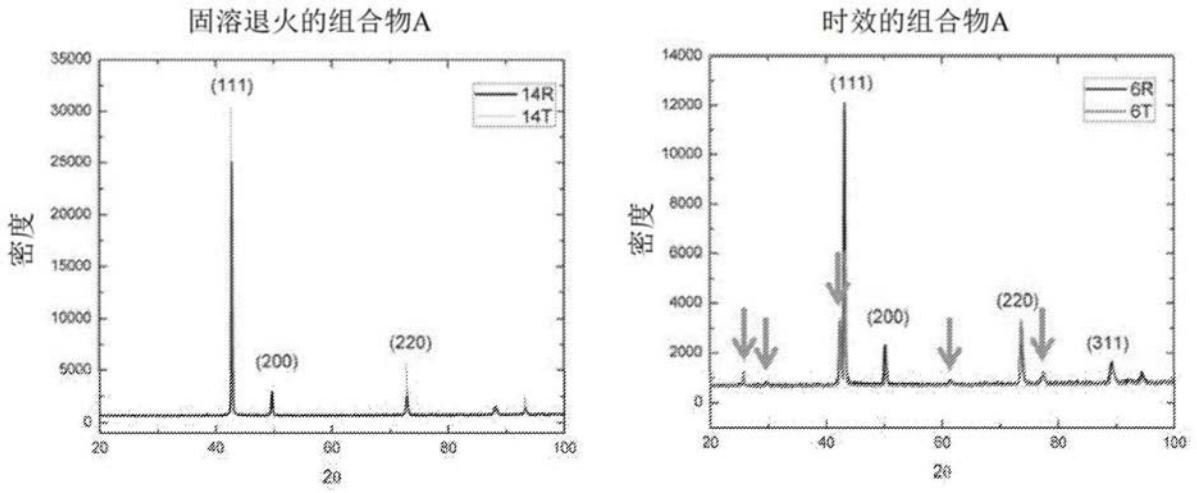

固溶退火的组合物A
密度
2θ
(111)
(200)
(220)
14R
14T
时效的组合物A
密度
2θ
(111)
(200)
(220)
(311)
6R
6T

图57

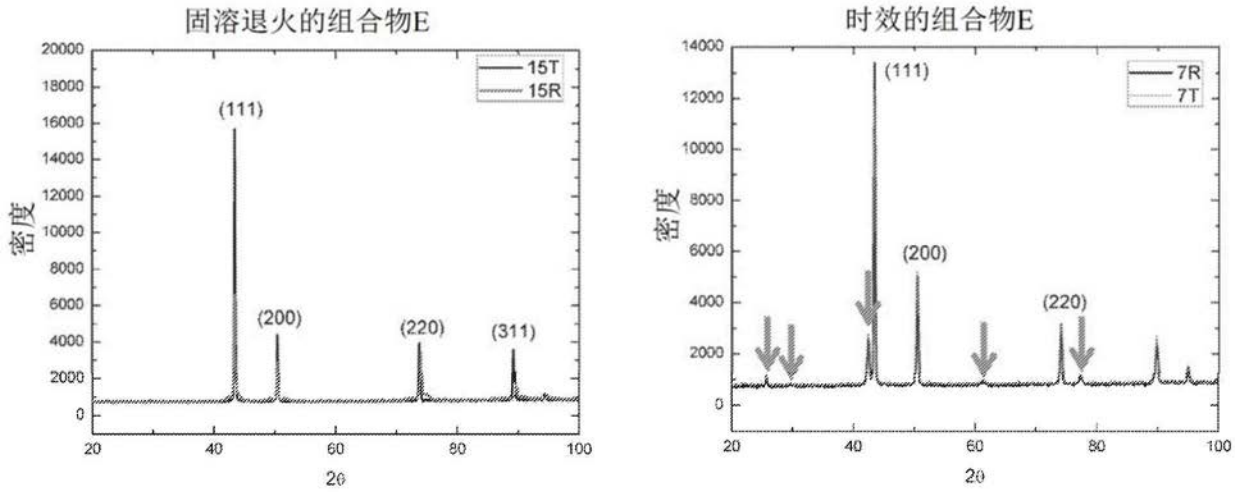

固溶退火的组合物E
密度
2θ
(111)
(200)
(220)
(311)
15T
15R
时效的组合物E
密度
2θ
(111)
(200)
(220)
7R
7T

图58

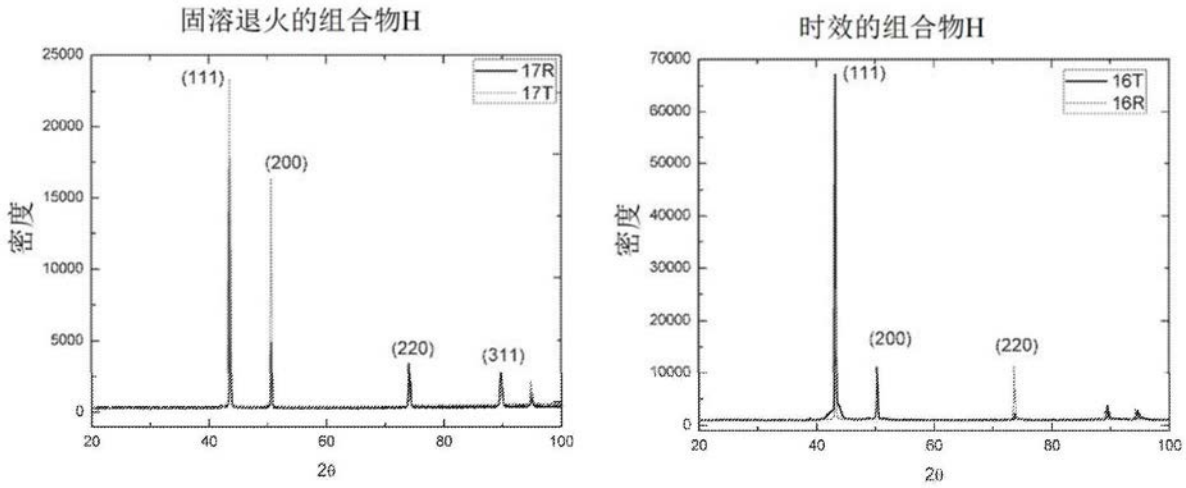

固溶退火的组合物H
密度
2θ
17R
17T
(111)
(200)
(220)
(311)
时效的组合物H
16T
16R
(111)
(200)
(220)

图59

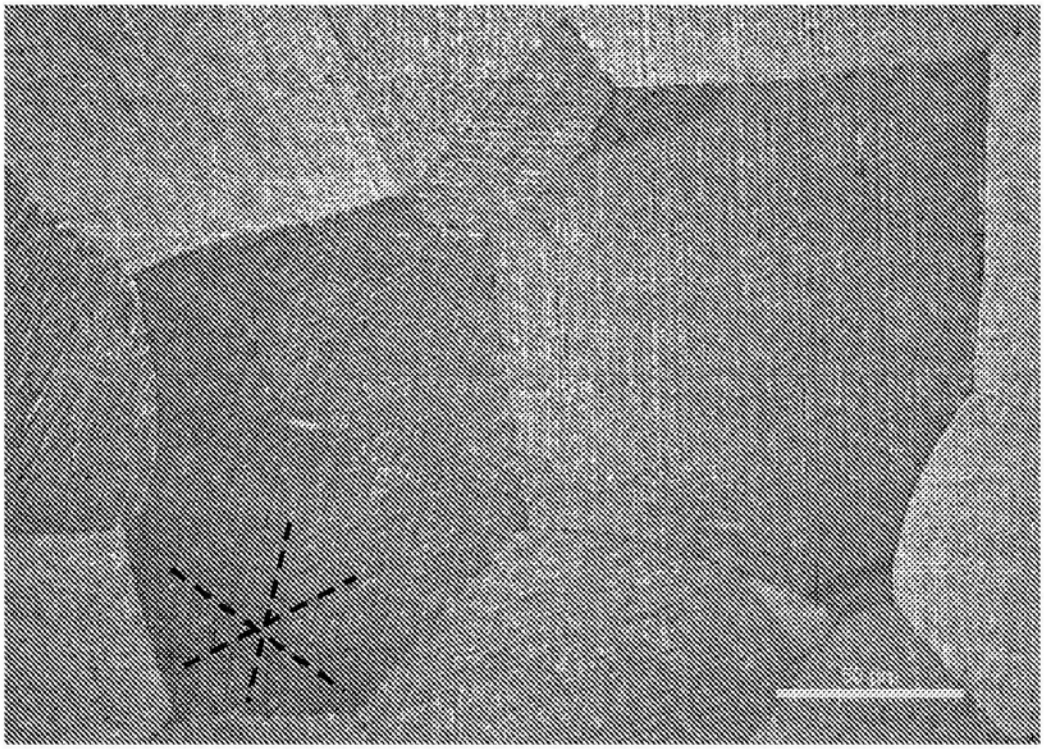


图60A

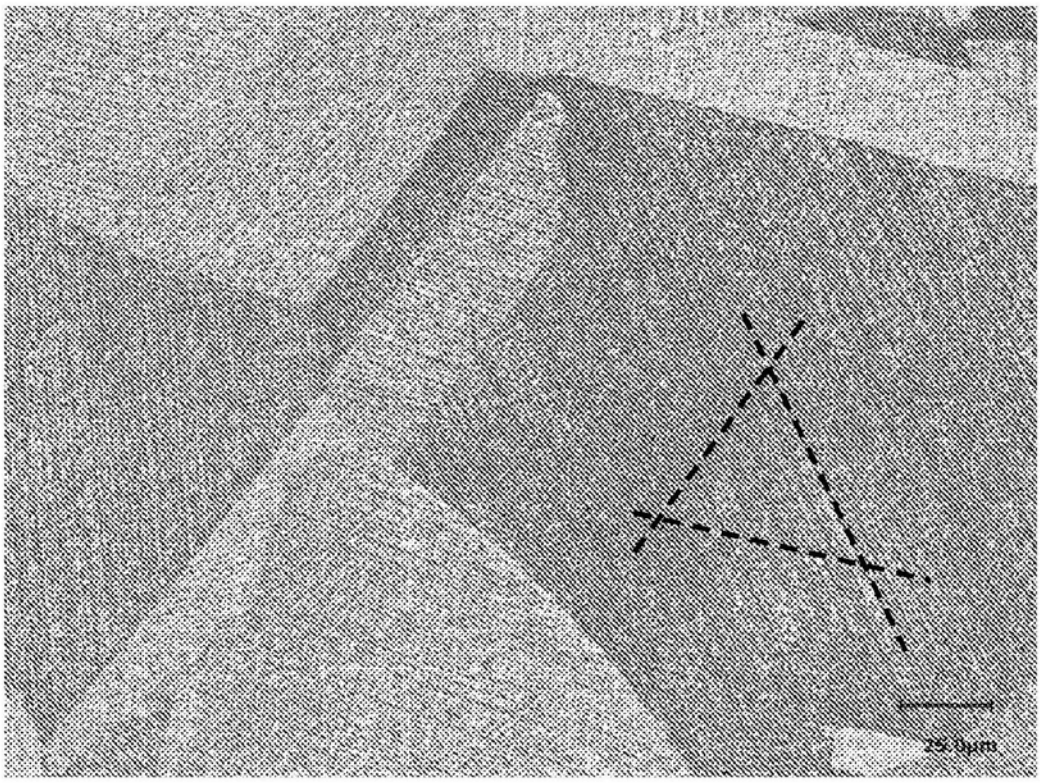


图60B

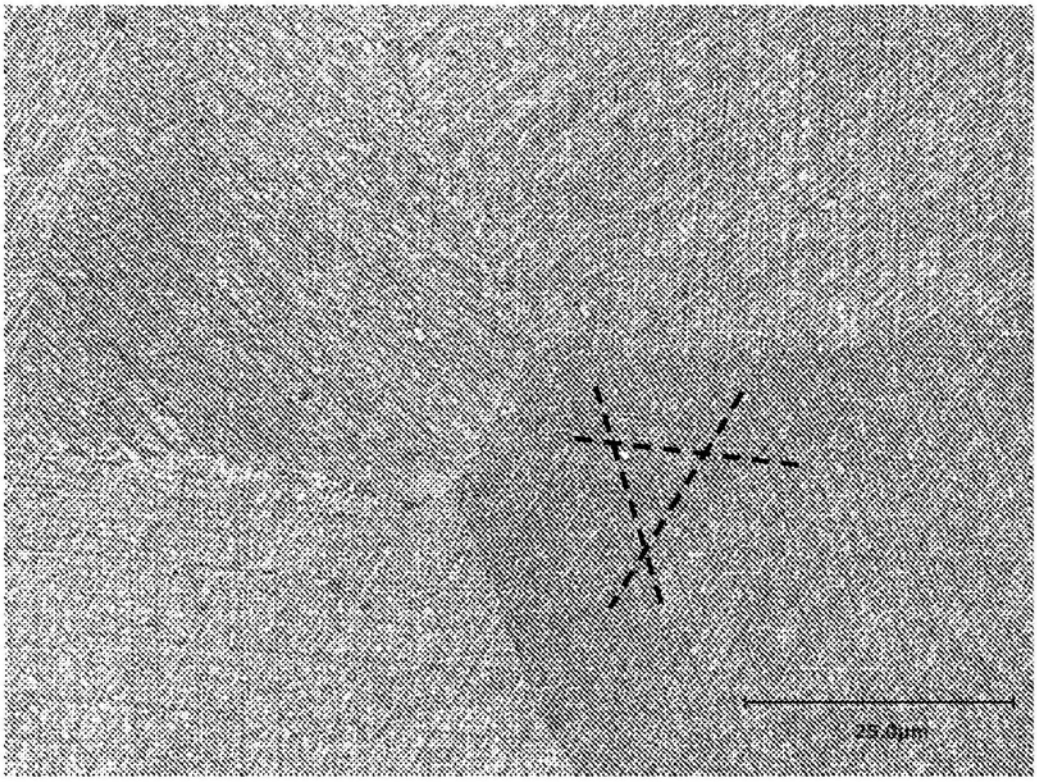


图60C

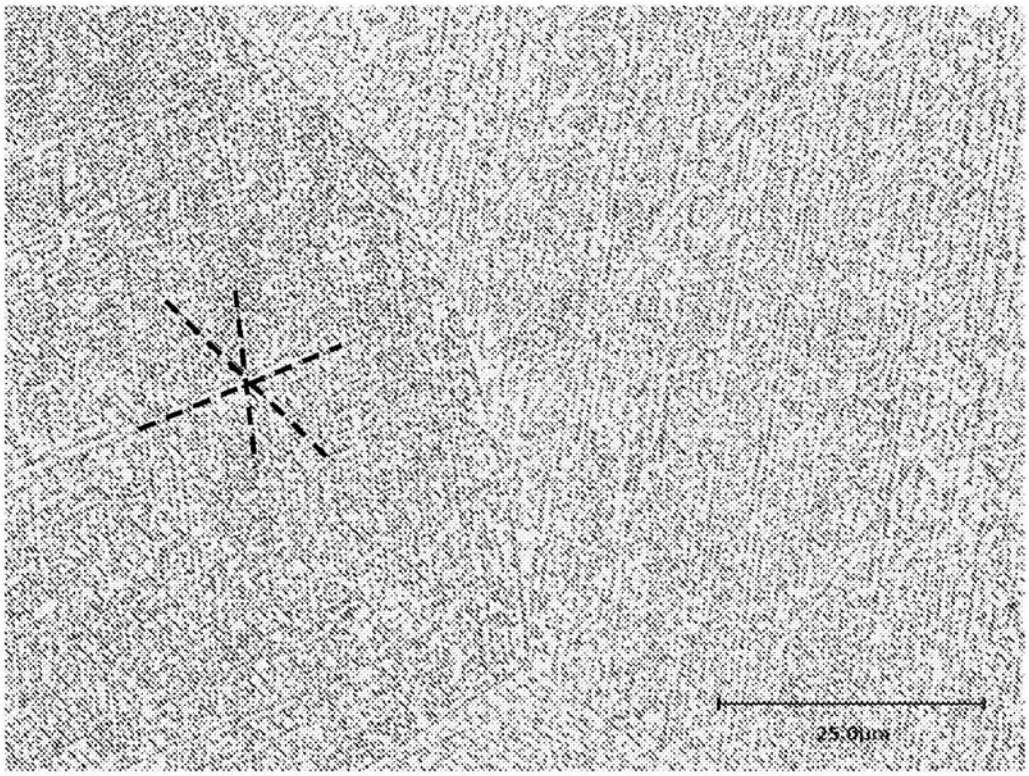


图60D

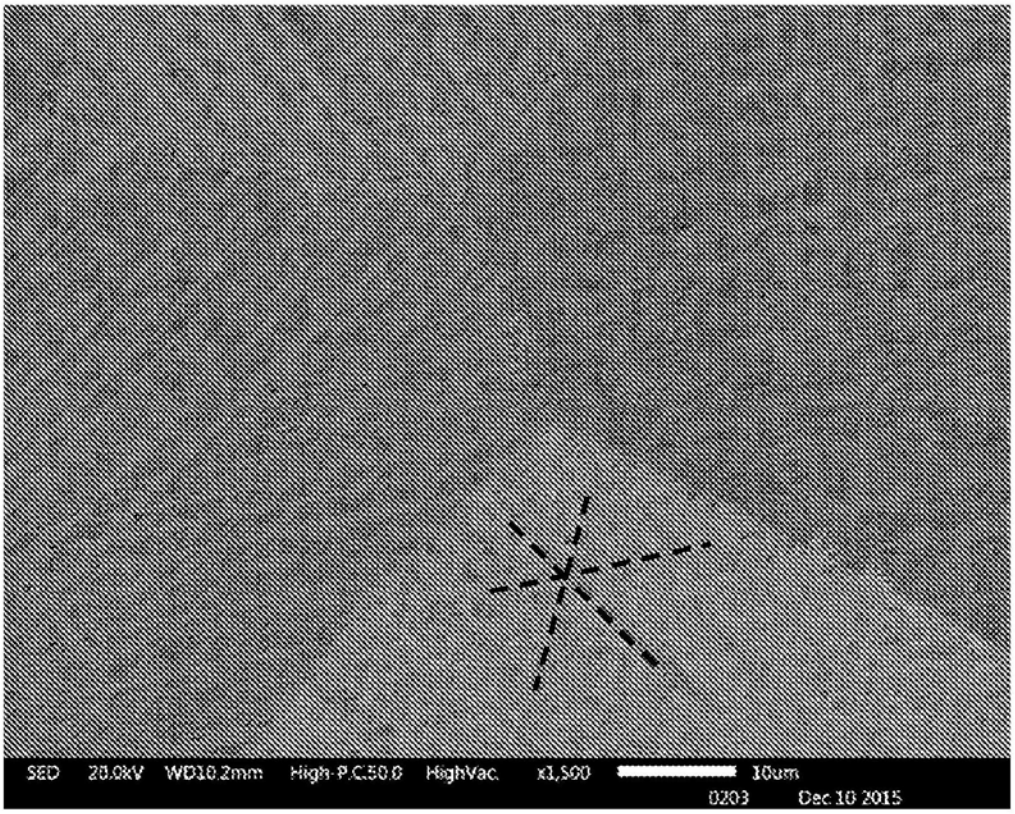

SED 20.0kV WD10.2mm High-P.C.50.0 HighVac. x1,500 10um
0203 Dec 10 2015

图60E

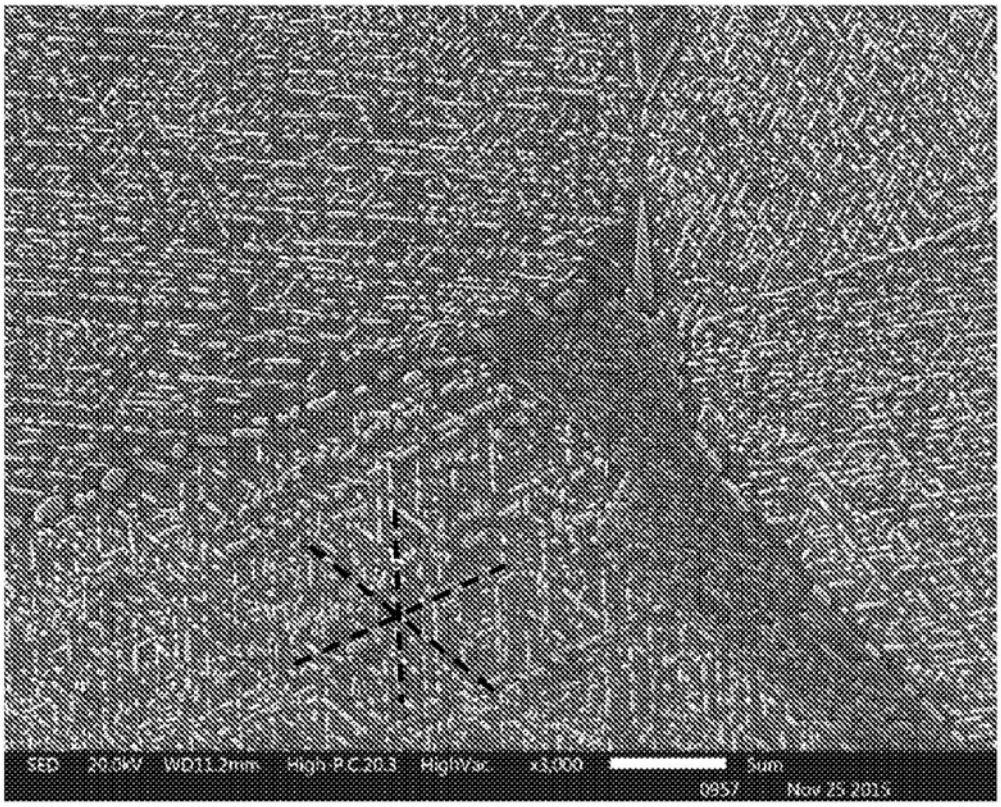

SED 20.0kV WD11.2mm High P.C.30.3 HighVac x3,000 5μm
0857 Nov 25 2015

图60F