



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 111032890 A

(43)申请公布日 2020.04.17

(21)申请号 201880052664.9

(74)专利代理机构 北京市联德律师事务所
11361

(22)申请日 2018.08.16

代理人 黄大正 张来光

(30)优先权数据

62/546,491 2017.08.16 US

(51)Int.Cl.

G22B 21/00(2006.01)

(85)PCT国际申请进入国家阶段日

G22B 21/06(2006.01)

2020.02.13

(86)PCT国际申请的申请数据

PCT/US2018/000178 2018.08.16

(87)PCT国际申请的公布数据

W02019/035909 EN 2019.02.21

(71)申请人 美铝美国公司

地址 美国宾夕法尼亚州

(72)发明人 严新炎 F·卡伦

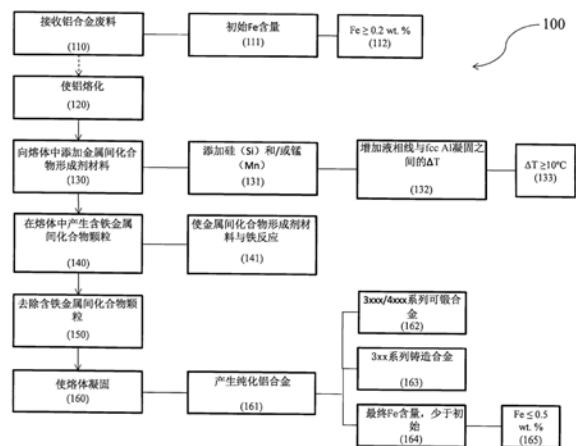
权利要求书2页 说明书14页 附图18页

(54)发明名称

再循环铝合金的方法及其纯化方法

(57)摘要

本公开涉及通过以下方式从铝合金废料生产纯化铝合金的方法:生产铝合金废料的熔体,添加一种或多种金属间化合物形成剂材料,生产含铁金属间化合物颗粒,去除含铁金属间化合物颗粒,以及使低铁熔体凝固。



1. 一种方法,其包括:
 - (a) 使铝合金废料熔化,从而产生熔体,其中所述铝合金废料包含初始铁含量,其中所述初始铁含量是至少0.20wt.%的铁(Fe);
 - (b) 向所述熔体添加金属间化合物形成剂材料,其中所述金属间形成剂材料包含硅(Si)、锰(Mn)或Si和Mn两者;
 - (c) 由于所述添加步骤(b),在所述熔体中产生含铁金属间化合物颗粒;
 - (d) 从所述熔体去除所述含铁金属间化合物颗粒中的至少一些,从而产生低铁熔体;
 - (e) 使所述低铁熔体凝固,从而从所述低铁熔体产生纯化铝合金,其中所述纯化铝合金包含纯化的铁含量,其中所述纯化的铁含量少于所述初始铁含量。
2. 如权利要求1所述的方法,其中所述金属间化合物形成剂材料包含硅,并且其中所述添加步骤(b)包括添加足够量的硅以产生所述低铁熔体,其中所述低铁熔体包含至少3wt.%的Si。
3. 如前述权利要求中任一项所述的方法,其中所述纯化铝合金是3xx铝铸造合金或4xxx可锻铝合金中的一种。
4. 如前述权利要求中任一项所述的方法,其中所述纯化铝合金包含不大于0.35wt.%的铁(Fe)。
5. 如前述权利要求中任一项所述的方法,其中所述纯化铝合金包含不大于0.20wt.%的铁(Fe)。
6. 如前述权利要求中任一项所述的方法,其中所述纯化铝合金包含不大于0.15wt.%的铁(Fe)。
7. 如前述权利要求中任一项所述的方法,其中所述金属间化合物形成剂材料包含硅和锰两者,并且其中所述添加步骤(b)包括添加足够量的硅和锰以产生所述低铁熔体,其中所述低铁熔体包含不大于1.8wt.%的锰(Mn)。
8. 如权利要求1所述的方法,其中所述纯化铝合金是3xxx可锻铝合金。
9. 如前述权利要求中任一项所述的方法,其中所述产生步骤包括:
 - (i) 将所述熔体从第一温度冷却至第二温度,从而产生所述含铁金属间化合物颗粒。
10. 如权利要求9所述的方法,其包括:

在等于或低于所述第二温度下,完成所述去除步骤。
11. 如权利要求10所述的方法,其中所述去除步骤包括过滤所述熔体和沉降所述熔体中的至少一种。
12. 如权利要求11所述的方法,其中所述去除包括使用耐火过滤材料进行过滤。
13. 如权利要求10所述的方法,其中所述第二温度比fcc铝的凝固温度高至少10°C。
14. 如权利要求13所述的方法,其中所述凝固步骤(e)包括:

将所述熔体从所述第二温度冷却至低于所述低铁熔体的固相线温度。
15. 如权利要求14所述的方法,其中所述第一温度是所述液相线温度,并且其中所述液相线温度比所述第二温度高至少10°C。
16. 如前述权利要求中任一项所述的方法,其包括:

向所述熔体添加合金添加物。
17. 如权利要求16所述的方法,其包括:

在所述去除步骤(d)之后,完成所述添加合金添加物的步骤。

18.如权利要求17所述的方法,其中所述合金添加物包含铜(Cu)和镁(Mg)中的至少一种。

19.如前述权利要求中任一项所述的方法,其中所述纯化的铁含量比所述初始铁含量少至少10%。

20.如前述权利要求中任一项所述的方法,其中所述纯化的铁含量比所述初始铁含量少至少25%。

21.如前述权利要求中任一项所述的方法,其中所述纯化的铁含量比所述初始铁含量少至少60%。

再循环铝合金的方法及其纯化方法

背景技术

[0001] 铝合金可用于多种应用。一些铝合金也是可再循环的 (recyclable), 并且再循环那些铝合金保护了能源。在美国和加拿大, 每年再循环超过500万吨铝。

发明内容

[0002] 概括地, 本公开涉及从铝合金废料 (scrap) 生产纯化铝合金的方法。在一个实施方案中, 所生产的铝合金是3xx铝铸造合金。在另一个实施方案中, 所生产的铝合金是3xxx或4xxx可锻 (wrought) 铝合金中的一种。总体上, 本文描述的用于生产纯化铝合金的方法包括使铝合金废料熔化, 向熔体添加一种或多种金属间化合物形成剂材料 (intermetallic former material), 并且使金属间化合物形成剂材料 (比如Si和/或Mn) 与铝合金废料的元素铁反应, 从而产生含铁金属间化合物颗粒。随后可以去除 (例如, 通过过滤) 所产生的含铁金属间化合物颗粒。金属间化合物形成剂材料Si和/或Mn的添加还可以导致产生具有增加量的Si和/或Mn的合金, 导致产生3xx铝铸造合金, 或导致产生3xxx或4xxx可锻铝合金中的一种。向熔体添加金属间化合物形成剂材料可以导致用于去除金属间化合物颗粒的温度窗口 (temperature window) 增加, 这可以相应增加可去除的含铁金属间化合物颗粒的体积分数。因此, 向熔体添加金属间化合物形成剂材料可以促进生产合适的最终用途合金, 可以促进在工业上可适用的温度窗口中从铝废料去除铁, 并且可以促进铝合金中铁含量的降低。

[0003] 在一个实施方案中并且现在参考图1a, 通过常规方法使铝废料熔化 (120), 并且可以向熔体添加金属间化合物形成剂材料 (130)。金属间化合物形成剂材料的添加可以导致产生含铁金属间化合物颗粒 (140), 比如通过使金属间化合物形成剂材料与熔体内的铁的反应 (141)。在其形成之后或期间, 可以通过任何合适的方法 (例如但不限于过滤或沉降) 去除含铁金属间化合物颗粒 (150)。最终, 使熔体凝固 (160) 并且产生纯化铝合金 (161)。

[0004] 更具体地并且现在参考图1b, 可以接收具有初始铁 (Fe) 含量 (111) 的铝合金废料用于再循环 (110)。例如, 初始铁含量可以是至少0.2wt. %的铁 (Fe) (112)。在一个实施方案中, 初始铁含量是至少0.3wt. %的铁 (Fe)。在另一个实施方案中, 初始铁含量是至少0.4wt. %的铁 (Fe)。在又一个实施方案中, 初始铁含量是至少0.5wt. %的铁 (Fe)。在另一个实施方案中, 初始铁含量是至少0.6wt. %的铁 (Fe)。在又一个实施方案中, 初始铁含量是至少0.7wt. %的铁 (Fe)。在另一个实施方案中, 初始铁含量是至少0.8wt. %的铁 (Fe)。在又一个实施方案中, 初始铁含量是至少0.9wt. %的铁 (Fe)。在另一个实施方案中, 初始铁含量是至少1.0wt. %的铁 (Fe)。在又一个实施方案中, 初始铁含量是至少1.5wt. %的铁 (Fe)。在另一个实施方案中, 初始铁含量是至少2.0wt. %的铁 (Fe)。在另一个实施方案中, 初始铁含量是至少2.5wt. %的铁 (Fe)。在又一个实施方案中, 初始铁含量是至少3.0wt. %的铁 (Fe)。

[0005] 通过常规方法使铝合金废料熔化 (120), 并且可以向熔体添加金属间化合物形成剂材料比如硅 (Si) 和/或锰 (Mn) (131)。金属间化合物形成剂材料的添加足以在熔体中产生含铁金属间化合物颗粒 (140), 比如通过Si和/或Mn与熔体中的铁之间的反应 (141)。生产可

以由于将熔体从第一温度冷却至第二温度而发生。在一些实施方案中,第一温度是熔体的液相线温度。在其他实施方案中,第一温度大于熔体的液相线温度。在一些实施方案中,第二温度大于fcc铝的凝固温度。在一些实施方案中,第二温度低于fcc铝的凝固温度并且高于熔体的固相线温度。金属间化合物形成剂材料的添加(130)可以足以实现熔体的液相线温度与fcc铝的凝固温度之间的差(例如,纯化温度窗口 ΔT)的增加(132)。在这方面,含铁金属间化合物颗粒可以在温度窗口中形成。通常,由于金属间化合物形成剂材料的添加(130),第一温度与第二温度之间的温度窗口是至少 10°C (133)。在温度窗口内(并且有时在等于或低于第二温度下),可以通过包括但不限于熔体的过滤和沉降的方法去除金属间化合物颗粒(150)。去除(150)之后,之后使现在的低铁熔体凝固(160)(例如,冷却至低铁熔体的固相线温度以下)。由于金属间化合物形成剂材料的添加(130)、含铁金属间化合物颗粒的产生(140)和至少一些含铁金属间化合物颗粒的去除(150),使低铁熔体凝固(160)产生纯化铝合金(161)。在一个实施方案中,可以产生3xxx或4xxx可锻铝合金中的一种(162)。在另一个实施方案中,可以产生3xx铸造铝合金(163)。由于含铁颗粒的去除(150),纯化铝合金的铁含量可以少于初始铁含量(164)。例如,纯化铝合金的铁含量可以是不大于0.5wt.%的铁(Fe)(165)。

[0006] 如上所描述,向熔体添加金属间化合物形成剂材料(131),并且在熔体中产生含铁金属间化合物颗粒(140)。在一个实施方案中,可以在熔体中形成具有 $\text{Al}_{15}(\text{Fe}:\text{Mn})_3\text{Si}_2$ 的组成的金属间化合物颗粒,并且温度窗口可以处在熔体的液相线与fcc铝的凝固温度之间。在这方面, $\text{Al}_{15}(\text{Fe}:\text{Mn})_3\text{Si}_2$ 颗粒可以在液相线之下凝固(即, $\text{Al}_{15}(\text{Fe}:\text{Mn})_3\text{Si}_2$ 是在液相线之下形成的第一种固体)。在一个实施方案中,由于金属间化合物形成剂材料Si和/或Mn的添加,含铁金属间化合物颗粒 $\text{Al}_{15}(\text{Fe}:\text{Mn})_3\text{Si}_2$ 被去除(150),并且在熔体的液相线与fcc铝的凝固温度之间的温度窗口是至少 10°C (133)。

[0007] 可以以多种形式接收铝合金废料(110)。例如,可以以汽车废料、航空航天废料、饮料罐废料、电子废料、市政废料等形式接收铝合金废料,其中铝合金可以具有工业实用性。在这方面,铝合金废料可以从任何类型的废料(例如,混合流(mixed stream)废料)集聚的。在一个实施方案中,铝合金废料是混合流铝合金废料。类似地,废料铝合金可以作为铸锭、坯料的铸造或部件的成型铸造的常规生产中的一部分产生。在这方面,铝合金废料可以由至少第一废料和第二废料构成,其中第一废料和第二废料是异质的(例如,具有相对不同的组成)。在一些实施方案中,铝合金废料至少包含具有相对不同组成的第一废料和第二废料。

[0008] 熔化(120)可以通过任何合适的方法(比如本领域中已知的常规方法)来完成。在熔化(120)之后,金属间化合物形成剂材料的添加可以在任何合适的时间进行。例如,添加可以(a)在熔化之前、(b)废料熔化期间或(c)在废料高于其液相线温度之后(例如,在熔化之后)进行。此外,可以以任何合适的形式添加金属间化合物形成剂材料。例如,可以以相对纯的形式添加一种或多种金属间化合物形成剂材料。例如,可以以相对纯的硅的形式添加硅,并且可以以相对纯的锰的形式添加锰。另外,含金属间化合物形成剂材料的合金可以用作金属间化合物形成剂材料的来源。例如,可以添加含硅铝合金或含锰铝合金以增加熔体的硅和/或锰含量。在一个实施方案中,可以以锰中间合金(master alloy)(例如, $\text{Mn} > 10\text{wt.}\%$,其余部分基本上是铝)的形式添加金属间化合物形成剂材料锰。

[0009] 除了相对纯形式的金属间化合物形成剂材料之外,也可以以废料本身的形式添加金属间化合物形成剂材料。例如,铝合金废料可以至少包含第一废料和第二废料。在这方面,第一废料可以是铝合金废料,该铝合金废料具有不足以实现含铁金属间化合物颗粒的去除的金属间化合物形成剂材料。第二废料可以是铝合金废料,该铝合金废料具有(当与至少第一废料组合时)足以实现含铁金属间化合物颗粒的去除的金属间化合物形成剂材料。此外,本文描述的方法可以不限于添加至少第一废料和第二废料。例如,第一废料和第二废料可以包括铝合金废料,并且可以以其他形式添加另外的金属间化合物形成剂材料以实现相对于至少第一废料和第二废料,含铁金属间化合物颗粒的去除和/或增加的去除。

[0010] 如上所指出,金属间化合物形成剂(例如,硅(Si)和/或锰(Mn)(131))的添加可以足以实现熔体的液相线温度与fcc铝的凝固温度之间的差(本文有时称为“纯化温度窗口”)的增加(132)。可以在至少10°C的纯化温度窗口(133)中去除含铁金属间化合物颗粒。在一个实施方案中,纯化温度窗口是至少15°C。在另一个实施方案中,纯化温度窗口是至少20°C。在又一个实施方案中,纯化温度窗口是至少30°C。在另一个实施方案中,纯化温度窗口是至少40°C。在又一个实施方案中,纯化温度窗口是至少50°C。在另一个实施方案中,纯化温度窗口是至少60°C。在又一个实施方案中,纯化温度窗口是至少70°C。在另一个实施方案中,纯化温度窗口是至少80°C。在又一个实施方案中,纯化温度窗口是至少100°C。

[0011] 在其产生之后或期间,可以通过合适的方法(例如但不限于过滤或沉降和其组合)去除含铁金属间化合物颗粒(150)。例如,可以使用多种过滤器(比如由耐火过滤材料制成的过滤器)进行含铁金属间化合物颗粒的过滤。合适的耐火过滤材料可以包括但不限于氧化铝、二氧化硅、碳化硅、氮化硅、氧化钙、石墨、碳等。在一些实施方案中,通过过滤去除含铁金属间化合物颗粒,其中过滤包括至少一种耐火过滤材料。在这方面,可以在一个过滤器中使用多种耐火过滤材料以促进含铁金属间化合物颗粒从熔体的去除。美国专利号5,126,047中公开了一些合适的耐火过滤器。

[0012] 本文描述的方法可以通常导致具有纯化的铁含量的凝固的(160)纯化铝合金(161),其中纯化的铁含量少于铝合金废料的初始铁含量(164)。在一种方法中,方法可以导致具有比铝合金废料少至少10%的铁的纯化铝合金。通过非限制性实施例,可以将具有0.8wt.%的初始铁含量的铝合金废料纯化至具有少10%的铁。因此,在该非限制性实施例中,纯化的铁含量将是 $0.8\text{wt.}\% * (100\% - 10\%) = 0.72\text{wt.}\%$ 的铁(Fe)。在一个实施方案中,纯化的铁含量比初始铁含量少15%。在另一个实施方案中,纯化的铁含量比初始铁含量少20%。在又一个实施方案中,纯化的铁含量比初始铁含量少25%。在另一个实施方案中,纯化的铁含量比初始铁含量少35%。在又一个实施方案中,纯化的铁含量比初始铁含量少45%。在另一个实施方案中,纯化的铁含量比初始铁含量少60%。在又一个实施方案中,纯化的铁含量比初始铁含量少75%。在另一个实施方案中,纯化的铁含量比初始铁含量少85%。

[0013] 在另一种方法中,纯化铝合金可以包含不大于1.80wt.%的铁(Fe)(165)。在一个实施方案中,纯化铝合金包含不大于1.5wt.%的铁(Fe)。在另一个实施方案中,纯化铝合金包含不大于1.2wt.%的铁(Fe)。在又一个实施方案中,纯化铝合金包含不大于1.0wt.%的铁(Fe)。在另一个实施方案中,纯化铝合金包含不大于0.8wt.%的铁(Fe)。在又一个实施方案中,纯化铝合金包含不大于0.5wt.%的铁(Fe)。在另一个实施方案中,纯化铝合金包

含不大于0.40wt.%的铁(Fe)。在又一个实施方案中,纯化铝合金包含不大于0.35wt.%的铁(Fe)。在另一个实施方案中,纯化铝合金包含不大于0.30wt.%的铁(Fe)。在又一个实施方案中,纯化铝合金包含不大于0.25wt.%的铁(Fe)。在另一个实施方案中,纯化铝合金包含不大于0.20wt.%的铁(Fe)。在又一个实施方案中,纯化铝合金包含不大于0.15wt.%的铁(Fe)。在另一个实施方案中,纯化铝合金包含不大于0.12wt.%的铁(Fe)。在又一个实施方案中,纯化铝合金包含不大于0.10wt.%的铁(Fe)。

[0014] 关于凝固(160),纯化铝合金(161)可以从低铁熔体铸造为成型铸造部件,或可以铸造为铸锭/坯料。也可以在以后的时间将铸造的铸锭或坯料重新熔化以用于成型铸造。另外,可以将铸造的铸锭或坯料重新熔化,并且与其他材料组合以产生目标铝合金组成。例如,可以添加相对纯的铝,和/或可以添加其他合金添加物(addition)以产生所希望的铝合金。可以例如通过热加工和/或冷加工经由轧制、锻造、挤出中的任何一种,以及通过压缩和/或拉伸进行的应力消除来加工铸造的铸锭或坯料。纯化铝合金的成型铸造可以包括任何合适的成型铸造方法,包括永久铸模锻造(permanent mold casting)、高压压铸(high pressure die casting)、砂模铸造、熔模铸造(investment casting)、挤压铸造和半固态铸造等。

[0015] 纯化铝合金可以是基于Si的铝合金。例如,基于Si的铝合金可以包括3xx铸造铝合金或4xxx可锻铝合金。作为本文描述的纯化方法的一部分,可以向熔体添加硅(Si),并且随后,至少一些硅(Si)可以保留在纯化铝合金中。纯化铝合金可以总体上包含至少3.0wt.%的硅(Si)。在一个实施方案中,纯化铝合金包含至少4.0wt.%的硅(Si)。在另一个实施方案中,纯化铝合金包含至少5.0wt.%的硅(Si)。在又一个实施方案中,纯化铝合金包含至少6.0wt.%的硅(Si)。在另一个实施方案中,纯化铝合金包含至少6.5wt.%的硅(Si)。在又一个实施方案中,纯化铝合金包含至少7.0wt.%的硅(Si)。在另一个实施方案中,纯化铝合金包含至少7.5wt.%的硅(Si)。在又一个实施方案中,纯化铝合金包含至少8.5wt.%的硅(Si)。在另一个实施方案中,纯化铝合金包含至少9.0wt.%的硅(Si)。在一个实施方案中,纯化铝合金包含不大于23.0wt.%的硅(Si)。在另一个实施方案中,纯化铝合金包含不大于20.0wt.%的硅(Si)。在又一个实施方案中,纯化铝合金包含不大于15.0wt.%的硅(Si)。

[0016] 如本文所用,“3xx铝合金”意指包含作为主要合金成分的硅(Si)的铝铸造合金,如美国铝业协会(Aluminum Association)文件“Designations and Chemical Composition Limits for Aluminum Alloys in the Form of Castings and Ingot”(2009)(又称“粉色单(Pink Sheets)”)所定义的。

[0017] 如本文所用,“4xxx铝合金”意指包含作为主要合金成分的硅(Si)的可锻铝合金,如美国铝业协会文件“International Alloy Designations and Chemical Composition Limits for Wrought Aluminum and Wrought Aluminum Alloys”(2015)(又称“青色单(Teal Sheets)”)所定义的。

[0018] 在一个实施方案中,本文描述的用于生产纯化铝合金的方法用于生产与共同拥有的美国专利公开号2013/0105045中公开的铝合金一致的铝合金。在另一个实施方案中,本文描述的用于生产纯化铝合金的方法用于生产与共同拥有的美国专利公开号2017/0016092中公开的铝合金一致的铝合金。在又一个实施方案中,本文描述的用于生产纯化

铝合金用于生产共同拥有的WIPO国际公开号2017/027734中公开的铝合金一致的铝合金。

[0019] 纯化铝合金可以是基于Mn的铝合金。例如,基于Mn的铝合金可以包括4xxx可锻铝合金。作为本文描述的纯化方法的一部分,可以向熔体添加锰(Mn),并且随后,至少一些锰(Mn)可以保留在纯化铝合金中。纯化铝合金可以总体上包含至少0.05wt.%的锰(Mn)。在一个实施方案中,纯化铝合金包含至少0.10wt.%的锰(Mn)。在另一个实施方案中,纯化铝合金包含至少0.20wt.%的锰(Mn)。在又一个实施方案中,纯化铝合金包含至少0.30wt.%的锰(Mn)。在另一个实施方案中,纯化铝合金包含至少0.40wt.%的锰(Mn)。在一个实施方案中,纯化铝合金包含不大于1.8wt.%的锰(Mn)。在另一个实施方案中,纯化铝合金包含不大于1.5wt.%的锰(Mn)。在又一个实施方案中,纯化铝合金包含不大于1.2wt.%的锰(Mn)。在另一个实施方案中,纯化铝合金包含不大于0.9wt.%的锰(Mn)。在又一个实施方案中,纯化铝合金包含不大于0.8wt.%的锰(Mn)。在另一个实施方案中,纯化铝合金包含不大于0.7wt.%的锰(Mn)。在又一个实施方案中,纯化铝合金包含不大于0.4wt.%的锰(Mn)。

[0020] 如本文所用,“3xxx铝合金”意指包含作为主要合金成分的锰(Mn)的可锻铝合金,如美国铝业协会文件“International Alloy Designations and Chemical Composition Limits for Wrought Aluminum and Wrought Aluminum Alloys”(2015)(又称“青色单”)所定义的。

[0021] 另外,如本文所用,术语“3xxx铝合金”或“4xxx铝合金”仅指的是组成而不是任何相关的加工,即,如本文所用,3xxx铝合金或4xxx铝合金不需要是被视为3xxx或4xxx铝合金组成的可锻产品。

[0022] 为促进生产合适的铝合金产品,可以向熔体添加其他合金添加物,比如(a)在去除含铁金属间化合物颗粒之前向熔体添加和/或(b)在去除含铁金属间化合物颗粒之后向熔体添加。可替代地,可以在重新熔化纯化铝合金(c)期间或(d)之后(比如在成型铸造或铸造成铸锭/坯料之前)添加其他合金添加物。可以添加合金添加物以定制纯化铝合金的物理特性(例如,拉伸特性;韧性;抗腐蚀性;其他)。

[0023] 如本文所用,“其他合金添加物”或“合金添加物”意指可以有意添加到熔体(例如,以产生预选的目标组成并且最终产生预选的凝固合金产品)的除铝、硅、铁和锰以外的元素。可以添加其他合金添加物以促进实现所预选的目标组成的所希望的物理特性。其他合金添加物元素包括铬(Cr)、镍(Ni)、锌(Zn)、钛(Ti)、锡(Sn)和锶(Sr)等。在一个实施方案中,合金添加物包含铜(Cu)或镁(Mg)中的至少一种。

[0024] 可以从纯化铝合金生产部件。例如,可以使用纯化铝合金来成型铸造部件。由纯化铝合金制成的部件可以用于任何合适的应用,比如汽车、航空航天、工业或商业运输应用等中的任何一种。在一个实施方案中,纯化铝合金部件是汽车零件(例如,白车身(body-in-white,BIW)零件;悬挂零件)。在一个实施方案中,纯化铝合金部件包括在汽车中。在一个实施方案中,纯化铝合金部件是航空航天部件。在一个实施方案中,纯化铝合金部件包括在航空航天载具中。在一个实施方案中,纯化铝合金部件是工业部件。在一个实施方案中,纯化铝合金部件是商业运输部件。在一个实施方案中,纯化铝合金部件包括在商业运输载具中。

[0025] 金属间化合物形成剂材料的定制添加的使用(任选地与其他合金添加物一起)促进从铝合金废料生产预定的低铁铝合金。在一个实施方案中并且现在参考图1c,使用本文

描述的方法预选目标纯化铝合金组成 (210) 用于生产。在这方面,所预选的目标组成可以是 3xx 铸造铝合金,或 3xxx 或 4xxx 可锻铝合金中的一种。基于预选步骤和铝合金废料的组成,可以向铝合金废料添加特定量的金属间化合物形成剂材料 (220)。可以在添加特定量的金属间化合物形成剂材料和/或其他合金添加物之前确定铝合金废料组成 (221)。以这种方式,特定量的金属间化合物形成剂材料可以足以实现含铁金属间化合物颗粒的去除 (225)。可以使用任何合适的方法选择可以添加的金属间化合物形成剂材料的特定量。在这方面,可以基于实验结果来选择或者可以基于再循环模拟 (例如,建模) 等来选择金属间化合物形成剂材料的添加。例如,可以利用模拟数据库来计算金属间化合物形成剂材料的适当量,所述适当量足以实现含铁金属间化合物颗粒的去除。在使用本文描述的方法去除含铁金属间化合物颗粒 (225) 和/或使用任何其他合金添加物 (222) 之后,可以产生具有预选的目标组成的纯化铝合金。如可以理解的,目标组成可以被认为是组成范围。

附图说明

- [0026] 图1a是生产纯化铝合金的实施方案。
- [0027] 图1b是使用金属间化合物形成剂材料硅 (Si) 和/或锰 (Mn) 生产纯化铝合金的实施方案。
- [0028] 图1c是生产具有预选的目标组成的纯化铝合金的实施方案。
- [0029] 图2a是以300x放大倍率拍摄的铸态 (as-cast) MIC6[®] 合金的显微照片。
- [0030] 图2b是以3000x放大倍率拍摄的铸态 MIC6[®] 合金的显微照片。
- [0031] 图3a是由 Pandat[®] 生成的实施例1的 MIC6[®] 合金的凝固路径图,其中固体分数为从0至1。
- [0032] 图3b是由 Pandat[®] 生成的实施例1的 MIC6[®] 合金的凝固路径图,其中固体分数为从0至0.2。
- [0033] 图4a是由 Pandat[®] 生成的实施例1的 MIC6[®]、合金1和合金2的凝固路径图,其中固体分数为从0至1。
- [0034] 图4b是由 Pandat[®] 生成的实施例1的 MIC6[®]、合金1和合金2的凝固路径图,其中固体分数为从0至0.2。
- [0035] 图5是由 Pandat[®] 生成的凝固路径图和液态铝中的液态铝Mn和Fe组成的曲线图,其中固体分数为从0至1。
- [0036] 图6a是等值线图,其展示了在再循环模拟中添加金属间化合物形成剂材料Si和Mn对最低可能铁含量的影响。
- [0037] 图6b是等值线图,其展示了在再循环模拟中添加金属间化合物形成剂材料Si和Mn对纯化温度窗口的影响。
- [0038] 图6c是等值线图,其展示了在再循环模拟中添加合金添加物Cu和Mg对最低可能铁含量的影响。
- [0039] 图6d是等值线图,其展示了在再循环模拟中添加合金添加物Cu和Mg对纯化温度窗口的影响。

- [0040] 图7是实施例3的再循环模拟的数据表,其示出了固相分数、液态铝组成和沉淀相。
- [0041] 图8是实施例4的再循环模拟的数据表,其示出了固相分数、液态铝组成和沉淀相。
- [0042] 图9是实施例5的再循环模拟的数据表,其示出了固相分数、液态铝组成和沉淀相。
- [0043] 图10是实施例6的再循环模拟的数据表,其示出了固相分数、液态铝组成和沉淀相。
- [0044] 图11是实施例7的再循环模拟的数据表,其示出了固相分数、液态铝组成和沉淀相。

具体实施方式

[0045] 实施例1

[0046] 将可再循环的 **MIC6[®]** 铝合金铸造成铸锭。表1a给出了铝合金 **MIC6[®]** 的典型组成。

[0047] 表1a: 铝合金 **MIC6[®]** 的组成

元素	组成 (wt.%)
Si	1.05
Fe	0.53
Cu	1.3
Mn	0.75
Mg	1.65
Zn	2.5
Cr	0.16
Al	其余

[0049] 拍摄铸态铝合金的显微照片。图2a和图2b中分别示出了在300x和3000x放大倍率下拍摄的显微照片。如所示,铝合金的铸态显微结构含有金属间化合物相。金属间化合物相展现了中文手写体样 (Chinese script-like) 结构,并且使用SEM-EDX分析被鉴定为 $Al_{15}(Fe:Mn)_3Si_2$ 。通过以下方式进一步确认金属间化合物相的组成:使用表1中给出的组成构建 **Pandat[®]** 相图,并且分析凝固路径。如图3a至图3b中所示的由 **Pandat[®]** 构建的相图展示了凝固路径。如图3b所示,存在2.5°C的小的纯化温度窗口,其中形成不存在固态铝的固体金属间化合物 $Al_{15}(Fe:Mn)_3Si_2$ 。原则上,可以在2.5°C温度窗口中从液相分离(例如,通过过滤)金属间化合物 $Al_{15}(Fe:Mn)_3Si_2$ 颗粒。然而,实际上,温度窗口(2.5°C)太小而无法实现显著的分选。

[0050] 向 **MIC6[®]** 合金添加金属间化合物形成剂硅和锰改变凝固路径。如表1b和图4a-4b所示,添加锰(“合金1”)以及硅和锰的组合(“合金2”)增加了纯化温度窗口(ΔT)和金属间化合物 $Al_{15}(Fe:Mn)_3Si_2$ 的固体分数。

[0051] 表1b: 金属间化合物形成剂对合金 **MIC6[®]** 的影响

合金	组成, wt%								ΔT (°C)	$Al_{15}(Fe:Mn)_3Si_2$ 固相分数 (v/v%)
	Si	Mn	Cu	Fe	Mg	Zn	Cr	Al		
[0052] MIC6	1.05	0.75	1.3	0.53	1.65	2.5	0.16	其余	2.5	0.02
合金1	1.05	2.00	1.3	0.53	1.65	2.5	0.16	其余	43.5	3.77
合金2	8.00	2.00	1.3	0.53	1.65	2.5	0.16	其余	97.3	6.1

[0053] 图5中示出了合金2的固体分数、整体铝(bulk aluminum)中的铁和锰组成以及相变温度。如所展示,金属间化合物 $Al_{15}(Fe:Mn)_3Si_2$ 在大约690°C时开始形成。在592°C时,固态铝(fcc)与金属间化合物相和液相形成平衡。因此,存在从592°C至690°C的大约97°C的温度窗口,其中金属间化合物 $Al_{15}(Fe:Mn)_3Si_2$ 颗粒可以从不存在固态铝的液态铝相分离。这种大约97°C的纯化温度窗口足以从整体液态铝分离金属间化合物颗粒。在一种方法中,纯化温度窗口是至少10°C以便从整体液态铝分离金属间化合物颗粒。

[0054] 如图5所示,可以通过添加金属间化合物形成剂并且去除金属间化合物 $Al_{15}(Fe:Mn)_3Si_2$ 颗粒来降低整体铝中的铁。如所展示,在fcc铝的凝固点(592°C)处,铝中的铁浓度从0.53wt.%降低至大约0.05wt.%。然而,在不去除固态铝的情况下实现整体铝中0.05wt.%的铁的分离是非常不可能的。因此,在一种方法中,在高于铝凝固温度(例如,高10°C-20°C)下(例如,通过过滤)去除金属间化合物颗粒,从而避免固态铝的去除。

[0055] 实施例2

[0056] 通过添加金属间化合物形成剂并且去除含铁金属间化合物颗粒而进行的铝合金纯化可以对多种铝合金进行。在这方面,针对其他常见铝合金组成构建可再循环能力过程模型。利用热力学模拟软件 **Pandat**[®] 和附带的铝热力学数据库 **PanAluminum**[®] 来构建过程模型。如下面更详细描述,针对每种铝合金组成选择金属间化合物形成剂。金属间化合物形成剂和铝合金的混合物提供了具有总体组成的过程模型。**Pandat**[®] 利用总体组成来确定混合物的最低铁浓度和相应的纯化温度窗口(ΔT)。

[0057] 针对每种再循环过程选择金属间化合物形成剂。通过Java计算机脚本选择金属间化合物形成剂的质量,所述Java计算机脚本将金属间化合物形成剂的量与实现良好分离结果的模拟数据库中的组成相匹配。在这种方法中,基于使 ΔT 最大化并且使铁浓度最小化来选择金属间化合物形成剂的质量。模拟数据库包含使用下表2中提供的元素和组成的每种组合进行的11,520个模拟。

[0058] 表2:模拟数据库的元素和组成

元素	组成 (wt. %)
Fe	0.5; 0.75, 1.0; 1.25, 1.5
Mn	0.1, 0.5; 1.0; 1.5; 2.0; 2.5
Si	1.0, 4.0, 7.0, 10.0, 13.0, 16.0, 19.0, 22.0
Mg	0.1; 0.4; 0.7
Cu	0.1, 0.25, 1.25, 2.25
Zn	0.1, 0.5; 1.5; 2.5

[0059]

[0060] 然后使用所述11,520个模拟来构建等值线图。图6a-6b示出了对于具有2.25wt.%的Cu、0.7wt.%的Mg、0.5wt.%的Zn的铝合金的等值线图,所述等值线图展示了作为金属间化合物形成剂的Mn和Si对铁浓度和纯化温度窗口的影响。如所展示,增加Si和Mn含量降低铁浓度并且增加纯化温度窗口。对于所示的Si和Mn含量范围和给定的组成,铁浓度从0.10wt.%变化至约0.70wt.%,并且纯化温度窗口从20°C变化至约100°C。图6c-6d示出了对于具有2.0wt.%的Mn、10.0wt.%的Si和0.5wt.%的Zn的铝合金的等值线图,所述等值线图展示了Cu和Mg对最低可能铁浓度和纯化温度窗口的影响。如所展示,增加Cu和Mg含量降低铁浓度并且增加纯化温度窗口。对于所示的Cu和Mg含量范围和给定的组成,铁浓度从0.11wt.%变化至约0.14wt.%,并且纯化温度窗口从94°C变化至约104°C。

[0061] 实施例3

[0062] 使用实施例2的模拟方法学,对具有下表3b所示组成的合金(“合金3”)进行模拟。(1)以锰中间合金(85wt.%的Al和15wt.%的Mn)的形式和(2)以纯硅的形式添加锰和硅的金属间化合物形成剂。模拟产生在600.2°C的温度下约0.10wt.%的最低可能铁组成,提供约77°C的纯化温度窗口。模拟显示,当在高于铝凝固温度大约10°C-20°C下进行过滤时,通过去除金属间化合物相将实现具有0.13-0.17wt.%的铁的最终合金组成。下表3a中提供了合金3和金属间化合物形成剂的质量。表3b中给出了合金3的组成、熔体组成(合金3和金属间化合物形成剂的总体组成)和纯化后的最终熔体组成。图7中示出了再循环模拟的完整数据集。

[0063] 表3a:实施例3的材料的质量

材料	质量(磅)
合金3	1000
15%Al-85%Mn中间合金	11.2
纯硅	91.8

[0065] 表3b:实施例3的过程组成

[0066]

元素	合金3组成 (wt. %)	纯化前的熔体组成 (wt. %)	纯化后的熔体组成 (wt. %)
Si	0.75	9.00	8.94
Fe	0.57	0.52	0.13 - 0.17
Cu	0.20	0.18	0.19
Mn	1.03	1.80	0.63 - 0.74
Mg	0.50	0.45	0.47 - 0.48
Cr	0.09	0.08	0.08
Ni	0.05	0.05	0.05
Zn	0.12	0.11	0.12
Ti	0.05	0.04	0.04
Zr	0.02	0.01	0.01

[0067] 实施例4

[0068] 使用实施例2的方法学,对具有下表4b所示组成的两种合金(“合金4a”和“合金4b”)的混合物进行模拟。合金4a是典型的6061铝合金。(1)以锰中间合金(85wt.%的Al和15wt.%的Mn)的形式和(2)以纯硅的形式添加金属间化合物形成剂锰和硅。还添加纯铜以将合金中的铜水平提高至大约1.0wt.%。模拟产生在约594.9°C的温度下约0.08wt.%的最低可能铁组成,提供约105°C的纯化温度窗口。模拟显示,当在高于铝凝固温度大约10°C-20°C下进行过滤时,通过去除金属间化合物相将实现具有0.11-0.14wt.%的铁的最终合金组成。下表4a中提供了合金4a、合金4b、Mn中间合金、纯Si和纯铜的质量。表4b中给出了合金4a、合金4b的组成,熔体组成(合金4a、合金4b、Mn中间合金、纯Si和纯铜的总体组成)和纯化后的最终熔体组成。图8中给出了再循环模拟的更完整数据集。

[0069] 表4a: 实施例4的材料的质量

[0070]

材料	质量(磅)
合金4a	400
合金4b	600
15%Al-85%Mn中间合金	10.7
纯硅	96
纯铜	8

[0071] 表4b: 实施例4的过程组成

[0072]

元素	合金4a组成 (wt.%)	合金4b组成 (wt.%)	纯化前的熔体 组成 (wt.%)	纯化后的熔体组 成 (wt.%)
Si	0.6	0.82	9.27	9.25-9.26
Fe	0.7	0.23	0.37	0.11-0.14
Cu	0.275	0.42	1.03	1.07
Mn	0.15	0.99	1.40	0.58-0.69
Mg	1.00	0.42	0.58	0.4-0.6
Cr	0.20	0.045	0.10	0.10
Ni	0.00	0.05	0.03	0.03
Zn	0.25	0.05	0.12	0.12
Ti	0.15	0.134	0.13	0.04

[0073] 实施例5

[0074] 使用实施例2的方法学,对具有下表5b所示组成的两种合金(“合金5a”和“合金5b”)的混合物进行模拟。(1)以锰中间合金(85wt.%的Al和15wt.%的Mn)的形式和(2)以纯硅的形式添加金属间化合物形成剂锰和硅。模拟产生在约592.7°C的温度下约0.08wt.%的最低可能铁组成,提供约84°C的纯化温度窗口。模拟显示,当在高于铝凝固温度大约10°C-20°C下进行过滤时,通过去除金属间化合物相将实现具有0.10-0.13wt.%的铁的最终合金组成。下表5a中提供了合金5a、合金5b、Mn中间合金和纯Si的质量。表5b中给出了合金5a、合金5b的组成,熔体组成(合金5a、合金5b、Mn中间合金和纯Si的总体组成)和纯化后的最终熔体组成。图9中给出了再循环模拟的更完整数据集。

[0075] 表5a:实施例5的材料的质量

[0076]

材料	质量(磅)
合金5a	400
合金5b	600
15%Al-85%Mn中间合金	15
纯硅	110

[0077] 表5b:实施例5的过程组成

[0078]

元素	合金5a组成 (wt. %)	合金5b组成 (wt. %)	纯化前的熔体组成 (wt. %)	纯化后的熔体组成 (wt. %)
Si	0.75	0.82	10.48	10.48
Fe	0.57	0.53	0.49	0.10-0.12
Cu	0.2	0.11	0.13	0.14
Mn	1.03	1.03	2.05	0.64-0.74
Mg	0.5	0.0488	0.20	0.21
Cr	0.085	0.05	0.06	0.06
Ni	0.05	0.05	0.04	0.04
Zn	0.12	0.087	0.09	0.10
Ti	0.049	0.05	0.04	0.03
Zr	0.015	0.046	0.03	0.03

[0079] 实施例6

[0080] 使用实施例2的方法学,对具有下表6b所示组成的两种合金(“合金6a”和“合金6b”)的混合物进行模拟。以纯硅的形式添加金属间化合物形成剂硅。模拟产生在约597.9°C的温度下约0.10wt. %的最低可能铁组成,提供约67°C的纯化温度窗口。模拟显示,当在高于铝凝固温度大约10°C-20°C下进行过滤时,通过去除金属间化合物相将实现具有0.12-0.16wt. %的铁的最终合金组成。下表6a中提供了合金6a、合金6b和纯Si的质量。表6b中给出了合金6a、合金6b的组成,熔体组成(合金6a、合金6b和纯Si的总体组成)和纯化后的最终熔体组成。图10中给出了再循环模拟的更完整数据集。

[0081] 表6a: 实施例6的材料的质量

[0082]

材料	质量(磅)
合金6a	400
合金6b	600
纯硅	77.5

[0083] 表6b: 实施例6的过程组成

[0084]

元素	合金6a组成 (wt. %)	合金6b组成 (wt. %)	纯化前的熔体组 成 (wt. %)	纯化后的熔体 组成 (wt. %)
Si	1.5	2.35	9.06	9.05-9.06
Fe	0.22	0.25	0.22	0.12-0.16
Cu	0.53	0.45	0.45	0.46
Mn	0.92	1.05	0.93	0.63-0.74
Mg	0.35	0	0.13	0.13
Cr	0.06	0	0.02	0.02
Ni	0.05	0.03	0.04	0.04
Zn	0.75	0.8	0.72	0.73
Ti	0.07	0.1	0.08	0.04
Zr	0.007	0.01	0.01	0.01

[0085] 实施例7

[0086] 使用实施例2的方法学,对具有下表7b所示组成的合金(“合金7”)进行模拟。以纯硅的形式添加金属间化合物形成剂硅。还添加纯铜以将合金中的铜水平提高至大约1.9wt.%。模拟产生在约595.1°C的温度下约0.09wt.%的最低可能铁组成,提供约100°C的纯化温度窗口。模拟显示,当在高于铝凝固温度大约10°C-20°C下进行过滤时,通过去除金属间化合物相将实现具有0.12-0.15wt.%的铁的最终合金组成。下表7a中提供了合金7、Mn中间合金和纯Si的质量。表7b中给出了合金7的组成、熔体组成(合金7、纯硅和纯铜的总体组成)和纯化后的最终熔体组成。图11中给出了再循环模拟的更完整数据集。

[0087] 表7a: 实施例7的材料的质量

[0088]

材料	质量(磅)
合金7	1000
纯硅	92
纯铜	16

[0089] 表7b: 实施例7的过程组成

[0090]

元素	合金7组成 (wt. %)	纯化前的熔体组成 (wt. %)	纯化后的熔体 组成 (wt. %)
Si	0.82	9.04	9.04-9.05
Fe	0.23	0.21	0.12-0.15
Cu	0.42	1.82	1.84-1.85
Mn	0.99	0.89	0.89
Mg	0.042	0.04	0.04
Cr	0.045	0.04	0.04
Ni	0.05	0.05	0.05
Zn	0.05	0.05	0.05
Ti	0.134	0.12	0.12
Zr	0.055	0.05	0.05

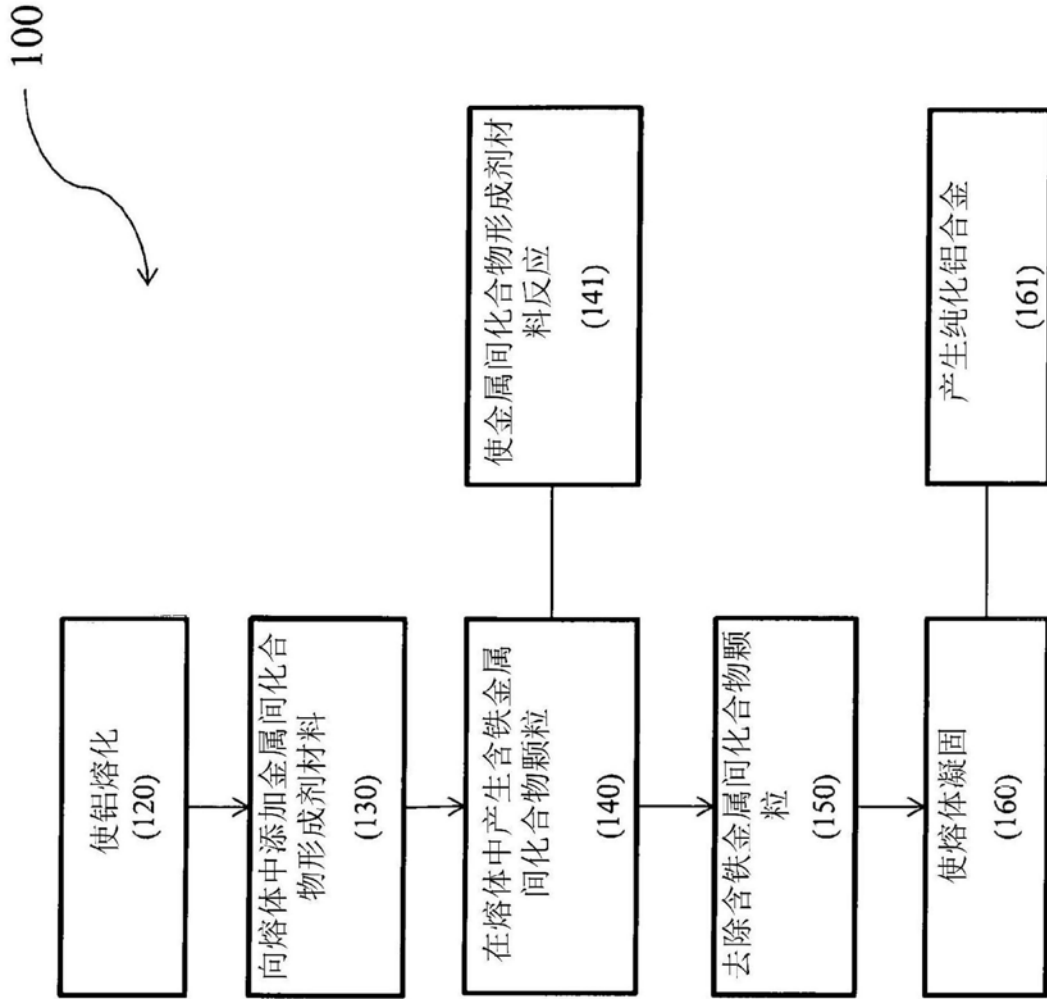


图1a

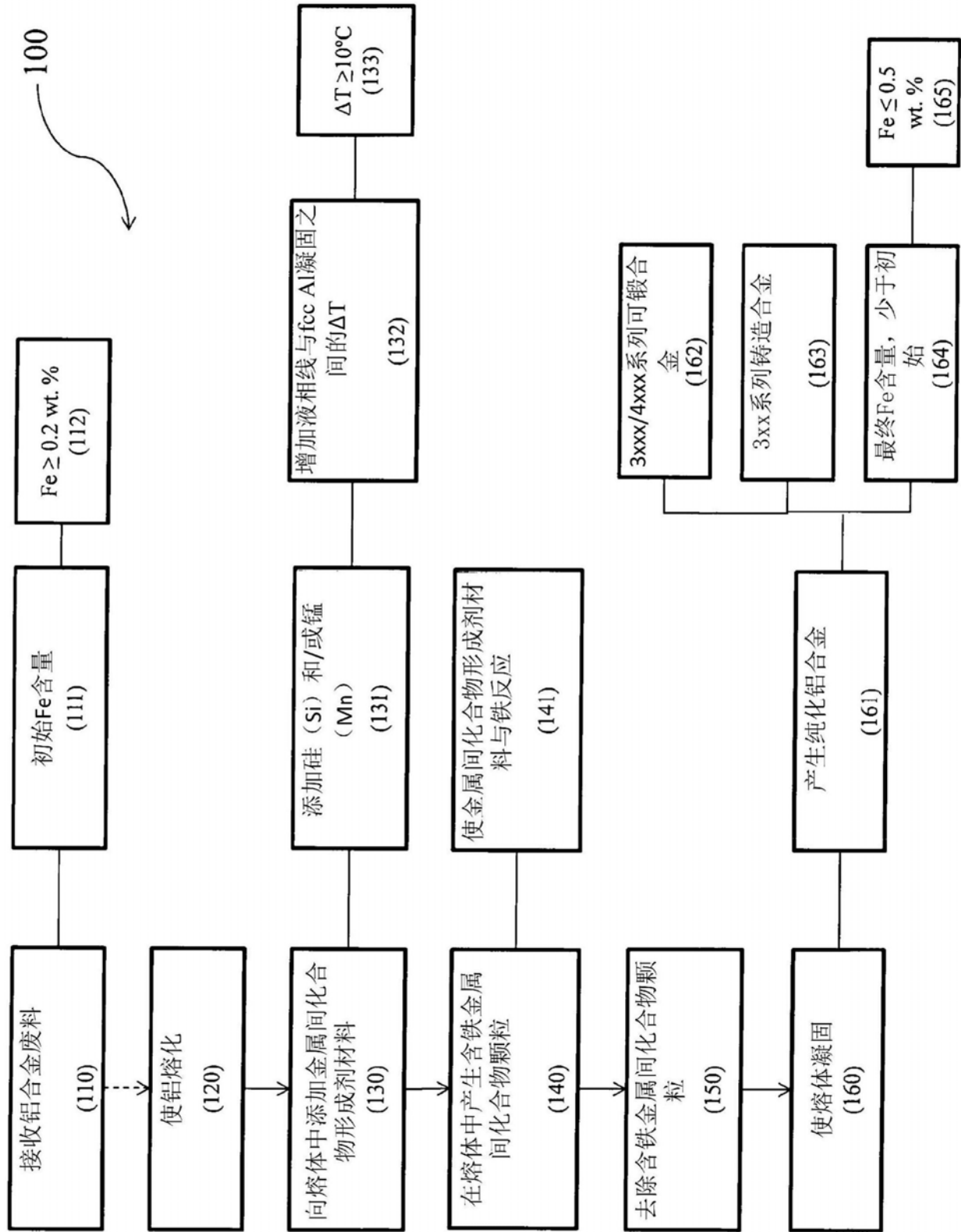


图1b

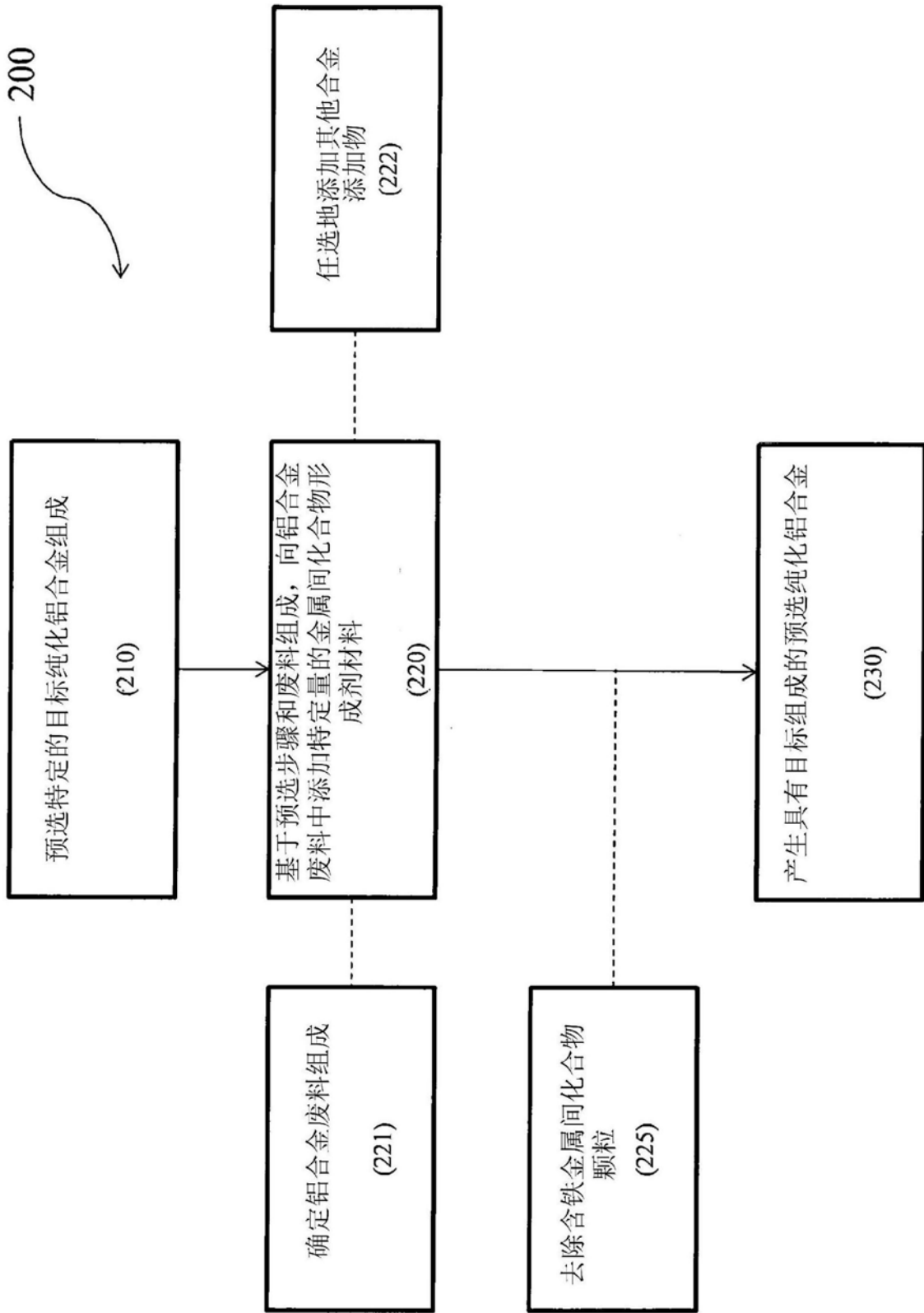


图1c

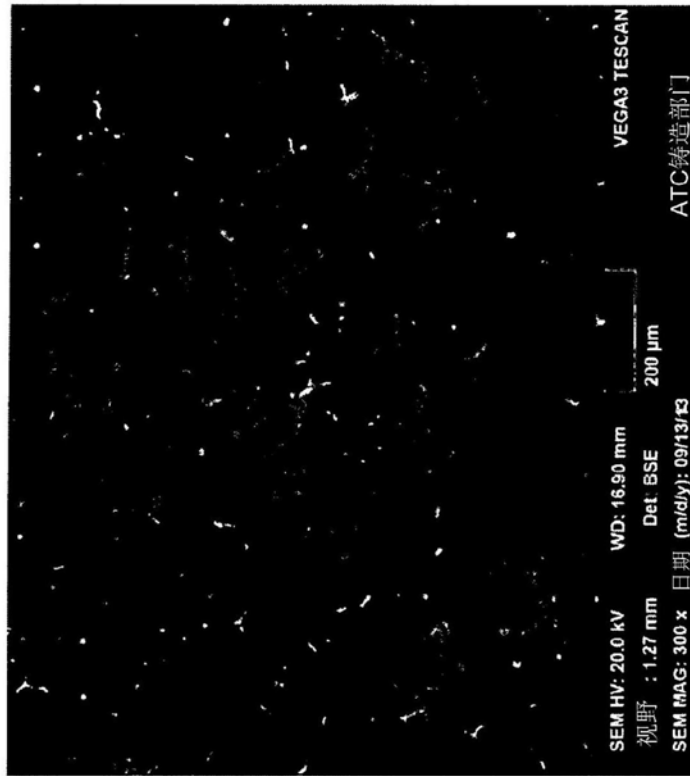


图2a



图2b

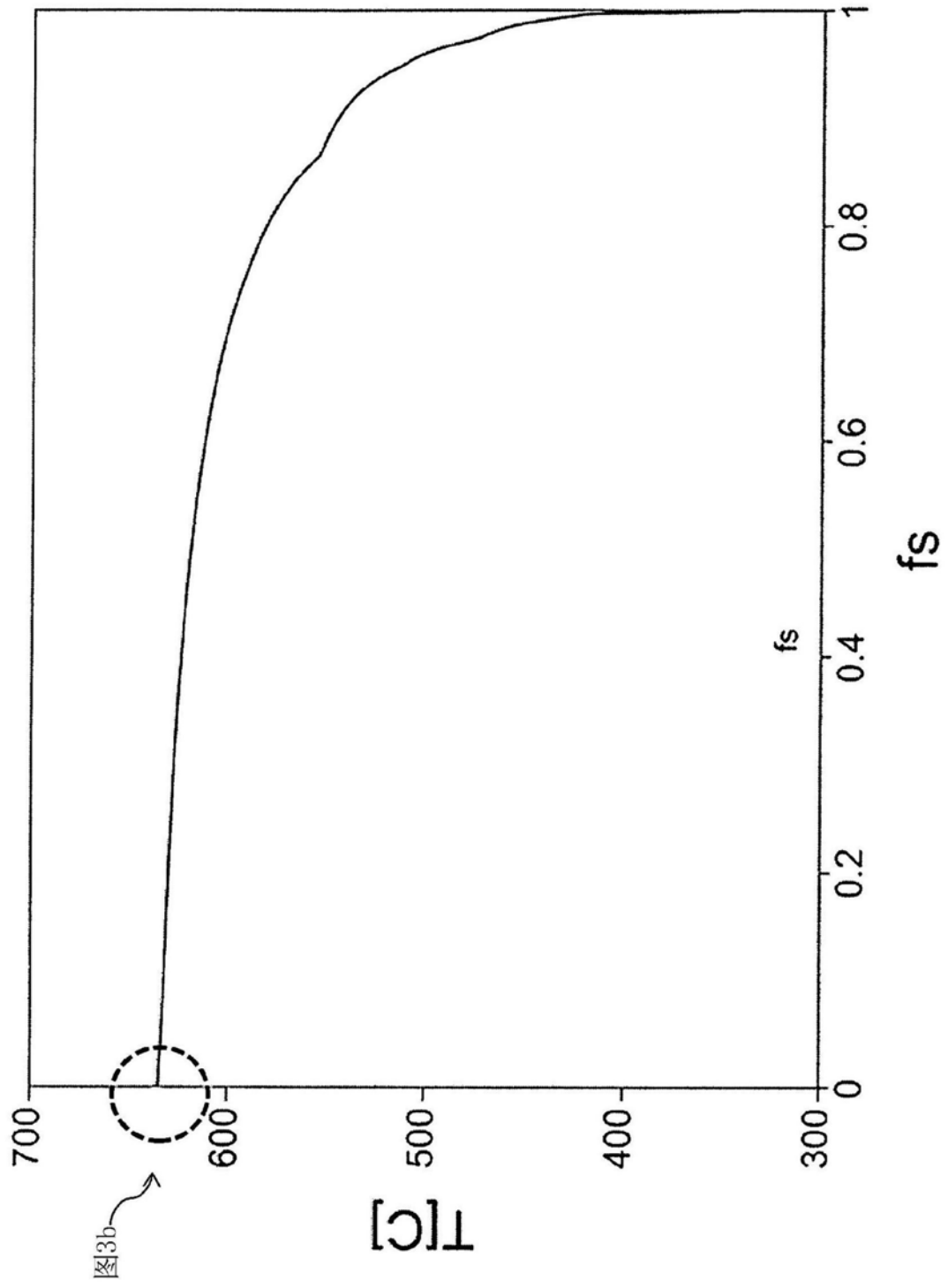


图3a

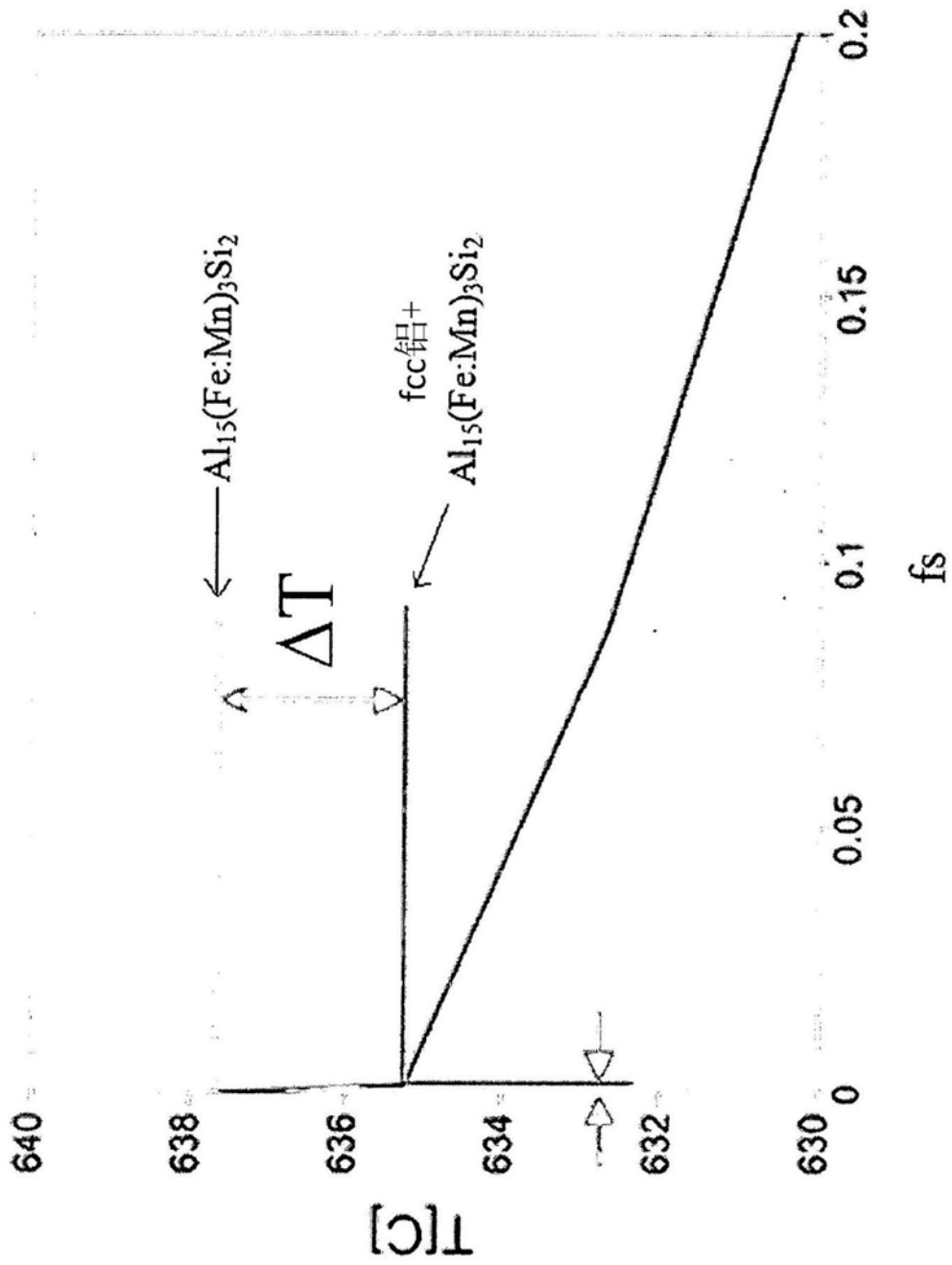


图3b

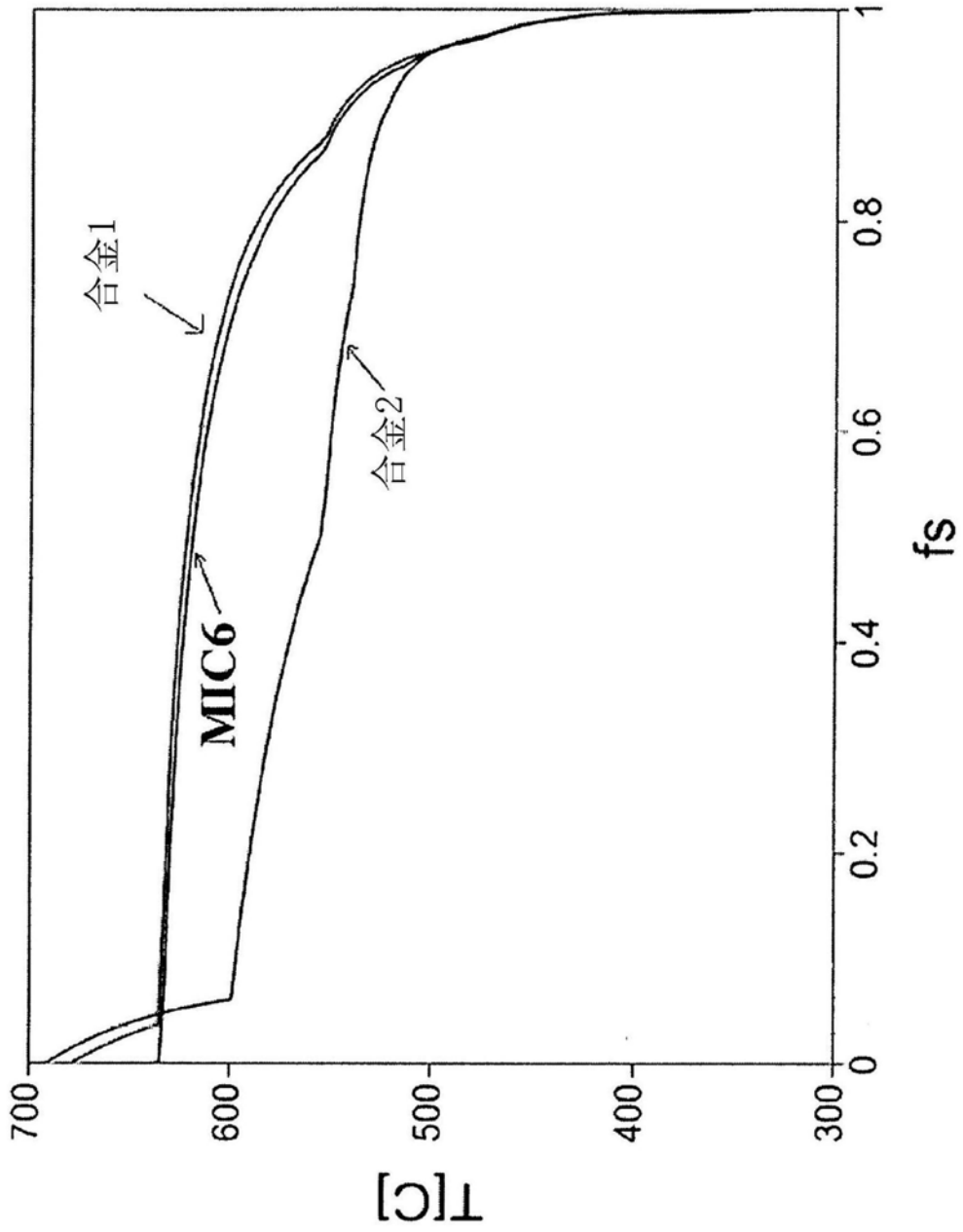


图4a

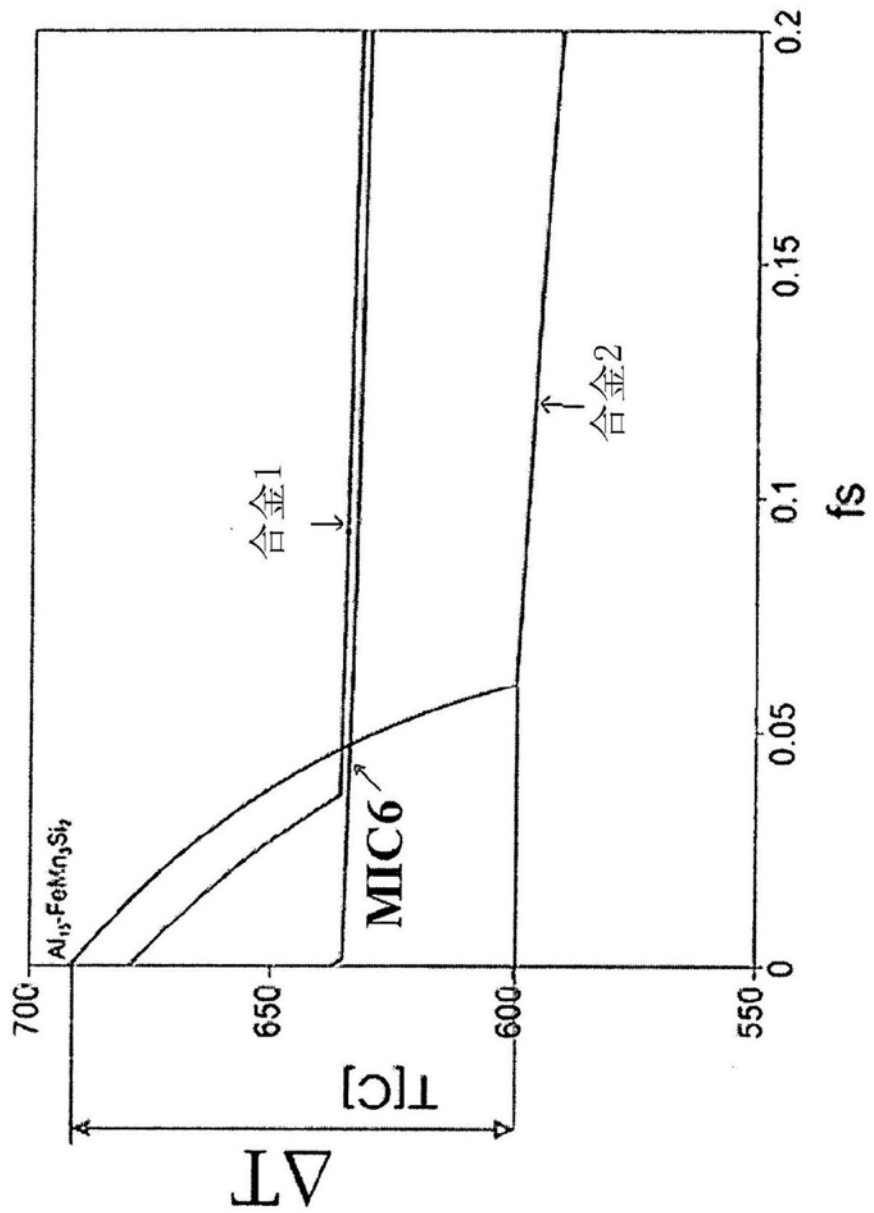


图4b

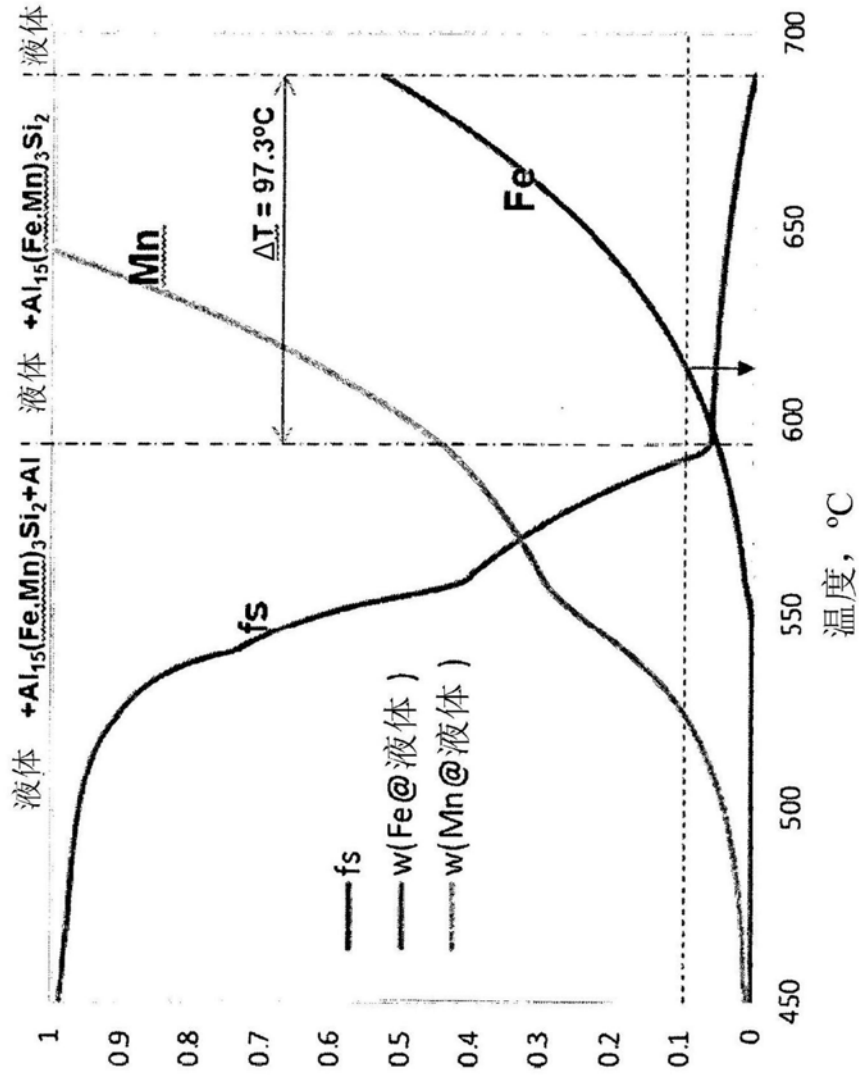


图5

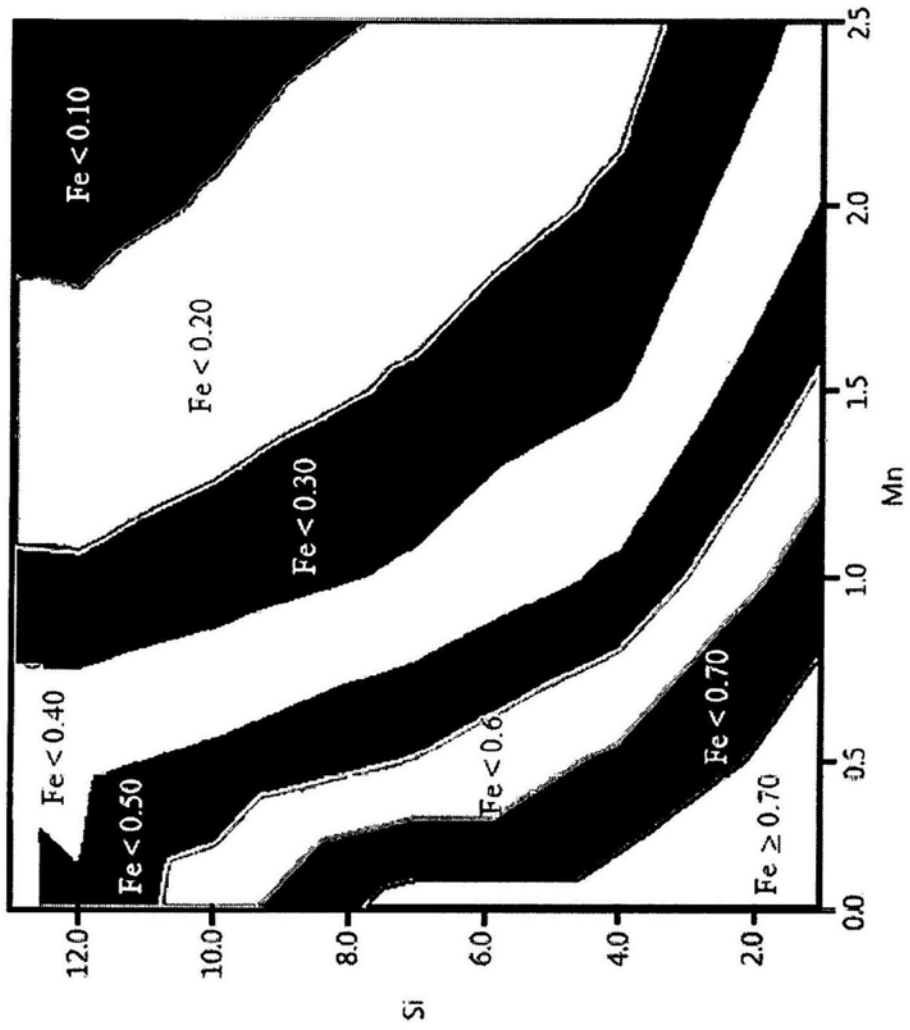


图6a

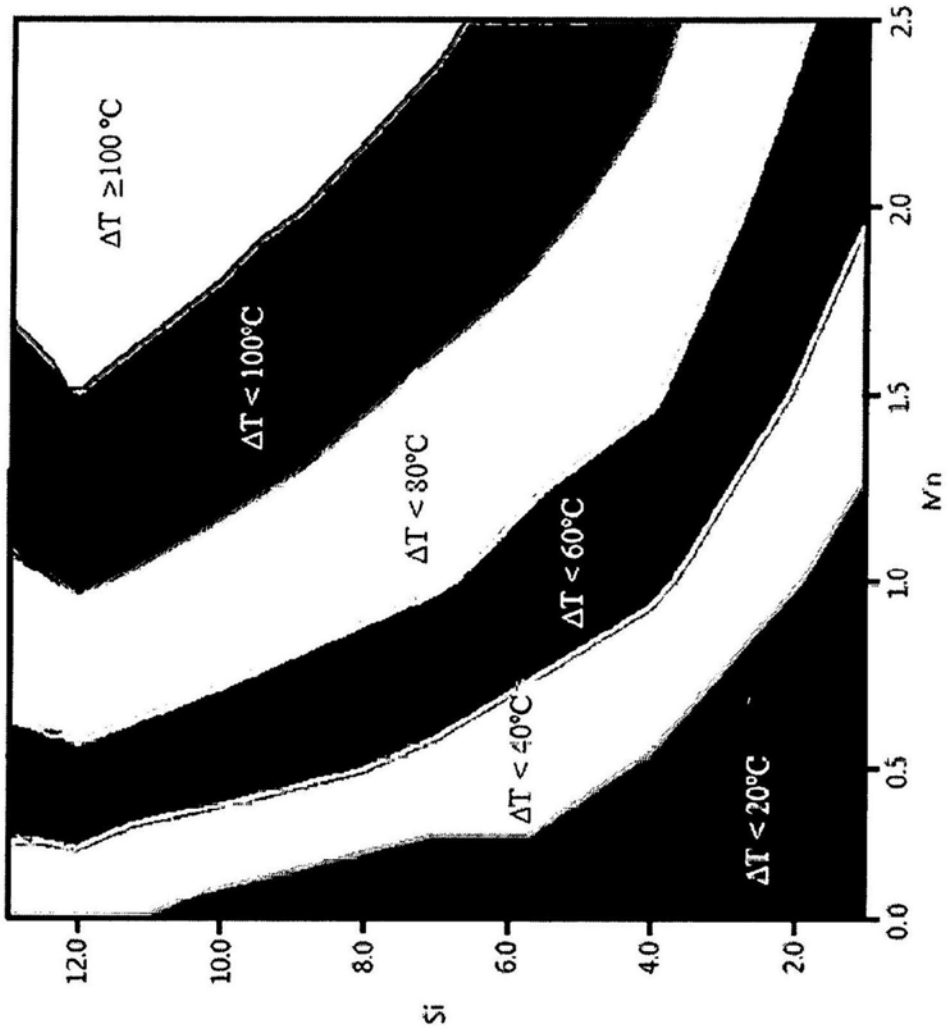


图6b

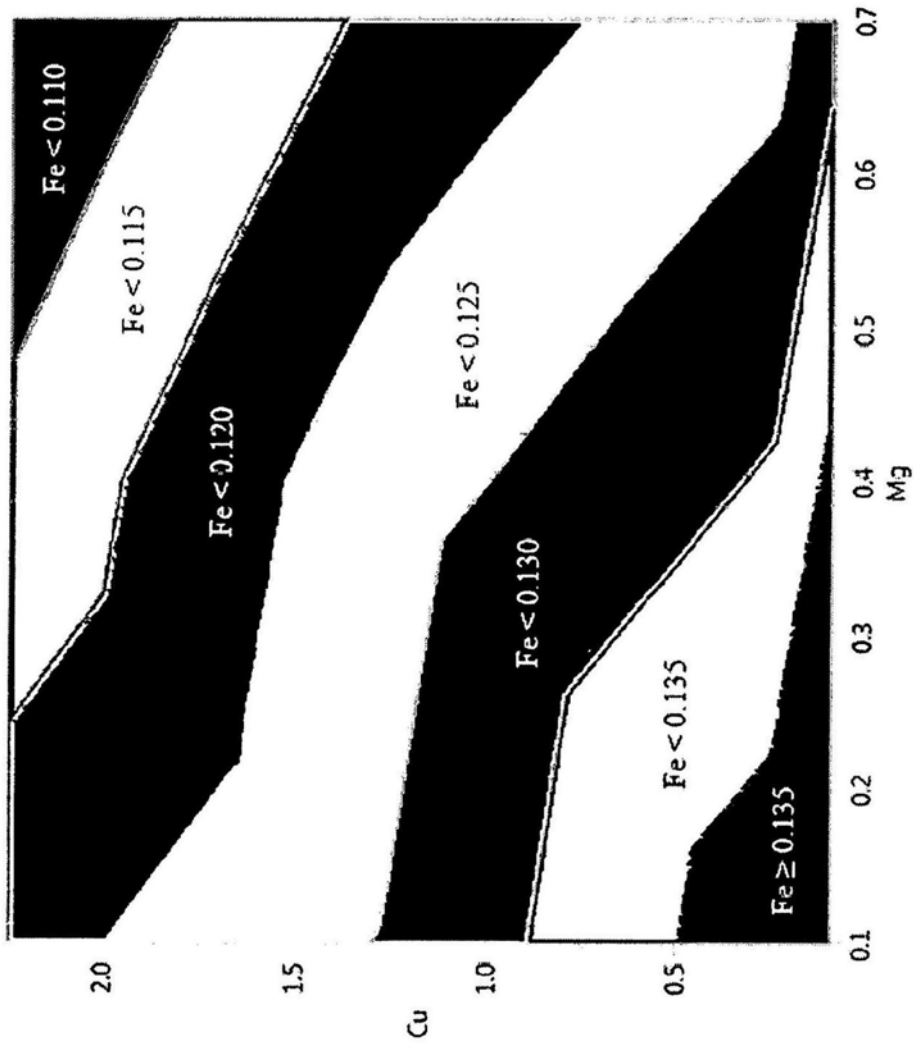


图6c

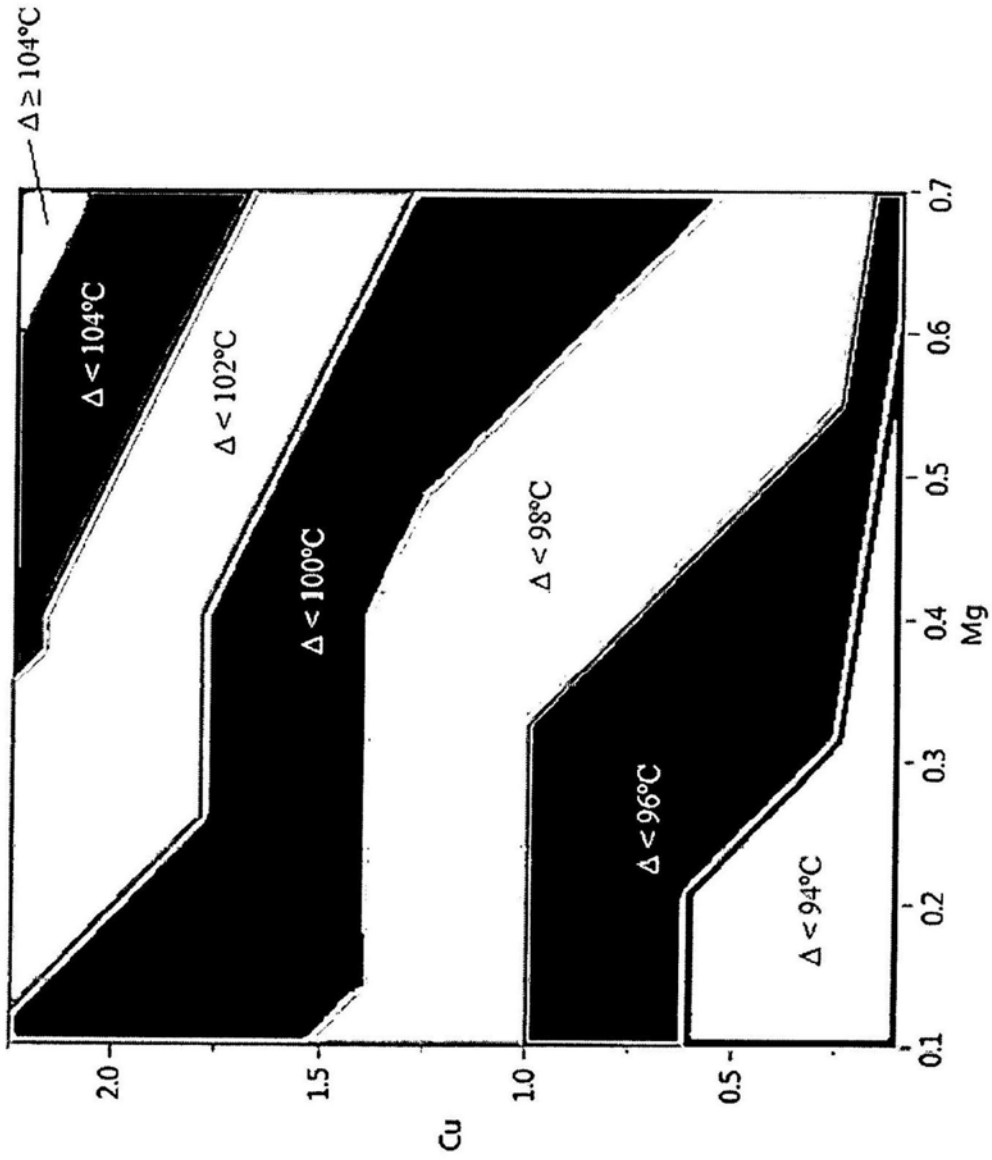


图6d

实施例3

T (°C)	固相分数	相	液体元素组成 (wt. %)										
			Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Ni	Si	Ti	Zn	Zr	
677	0	液体, Al ₁₅ (Fe:Mn) ₃ Si ₂	0.08	0.18	0.52	0.45	1.8	0.05	9	0.04	0.11	0.01	
628.3	0.038	液体, Al ₁₅ (Fe:Mn) ₃ Si ₂	0.08	0.19	0.2	0.47	0.84	0.05	8.95	0.04	0.12	0.01	
625.8	0.039	液体, Al ₁₅ (Fe:Mn) ₃ Si ₂	0.08	0.19	0.19	0.47	0.81	0.05	8.95	0.04	0.12	0.01	
623.2	0.04	液体, Al ₁₅ (Fe:Mn) ₃ Si ₂	0.08	0.19	0.18	0.47	0.77	0.05	8.95	0.04	0.12	0.01	
620.6	0.042	液体, Al ₁₅ (Fe:Mn) ₃ Si ₂ , Al ₃ Ti	0.08	0.19	0.17	0.47	0.74	0.05	8.94	0.04	0.12	0.01	
618.1	0.043	液体, Al ₁₅ (Fe:Mn) ₃ Si ₂ , Al ₃ Ti	0.08	0.19	0.16	0.47	0.71	0.05	8.94	0.04	0.12	0.01	
615.5	0.044	液体, Al ₁₅ (Fe:Mn) ₃ Si ₂ , Al ₃ Ti	0.08	0.19	0.15	0.47	0.68	0.05	8.94	0.04	0.12	0.01	
613	0.045	液体, Al ₁₅ (Fe:Mn) ₃ Si ₂ , Al ₃ Ti	0.08	0.19	0.14	0.47	0.65	0.05	8.94	0.04	0.12	0.01	
610.4	0.046	液体, Al ₁₅ (Fe:Mn) ₃ Si ₂ , Al ₃ Ti	0.08	0.19	0.13	0.48	0.63	0.05	8.94	0.04	0.12	0.01	
607.8	0.047	液体, Al ₁₅ (Fe:Mn) ₃ Si ₂ , Al ₃ Ti	0.08	0.19	0.12	0.48	0.6	0.05	8.94	0.03	0.12	0.01	
605.3	0.048	液体, Al ₁₅ (Fe:Mn) ₃ Si ₂ , Al ₃ Ti	0.08	0.19	0.12	0.48	0.57	0.05	8.93	0.03	0.12	0.01	
602.7	0.049	液体, Al ₁₅ (Fe:Mn) ₃ Si ₂ , Al ₃ Ti	0.08	0.19	0.11	0.48	0.55	0.05	8.93	0.03	0.12	0.01	
600.2	0.077	液体, Al ₁₅ (Fe:Mn) ₃ Si ₂ , fcc Al	0.08	0.2	0.1	0.49	0.53	0.05	9.16	0.02	0.12	0.01	
597.6	0.109	液体, Al ₁₅ (Fe:Mn) ₃ Si ₂ , fcc Al	0.08	0.2	0.1	0.5	0.52	0.06	9.44	0.01	0.12	0.01	

图7

实施例4

T (°C)	固相分数	相	液体元素组成(wt. %)										
			Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Ni	Si	Ti	Zn		
699.9	0.000	液体, Al ₃ Ti	0.1	1.03	0.37	0.58	1.4	0.03	9.27	0.12	0.12	0.12	
658.9	0.002	液体, Al ₁₅ (Fe:Mn) ₃ Si ₂ , Al ₃ Ti	0.1	1.03	0.36	0.58	1.38	0.03	9.28	0.07	0.12	0.12	
625.7	0.025	液体, Al ₁₅ (Fe:Mn) ₃ Si ₂ , Al ₃ Ti	0.1	1.06	0.18	0.6	0.82	0.03	9.26	0.04	0.12	0.12	
623.1	0.026	液体, Al ₁₅ (Fe:Mn) ₃ Si ₂ , Al ₃ Ti	0.1	1.06	0.17	0.6	0.78	0.03	9.26	0.04	0.12	0.12	
620.5	0.027	液体, Al ₁₅ (Fe:Mn) ₃ Si ₂ , Al ₃ Ti	0.1	1.06	0.16	0.6	0.75	0.03	9.26	0.04	0.12	0.12	
618.0	0.029	液体, Al ₁₅ (Fe:Mn) ₃ Si ₂ , Al ₃ Ti	0.1	1.07	0.15	0.6	0.72	0.03	9.26	0.04	0.12	0.12	
615.4	0.030	液体, Al ₁₅ (Fe:Mn) ₃ Si ₂ , Al ₃ Ti	0.1	1.07	0.14	0.6	0.69	0.03	9.26	0.04	0.12	0.12	
612.9	0.031	液体, Al ₁₅ (Fe:Mn) ₃ Si ₂ , Al ₃ Ti	0.1	1.07	0.13	0.6	0.66	0.03	9.26	0.04	0.12	0.12	
610.3	0.032	液体, Al ₁₅ (Fe:Mn) ₃ Si ₂ , Al ₃ Ti	0.1	1.07	0.13	0.6	0.63	0.03	9.26	0.03	0.12	0.12	
607.7	0.033	液体, Al ₁₅ (Fe:Mn) ₃ Si ₂ , Al ₃ Ti	0.1	1.07	0.12	0.6	0.61	0.03	9.26	0.03	0.12	0.12	
605.2	0.034	液体, Al ₁₅ (Fe:Mn) ₃ Si ₂ , Al ₃ Ti	0.1	1.07	0.11	0.6	0.58	0.03	9.25	0.03	0.12	0.12	
602.6	0.035	液体, Al ₁₅ (Fe:Mn) ₃ Si ₂ , Al ₃ Ti	0.1	1.07	0.1	0.6	0.56	0.03	9.25	0.03	0.13	0.13	
600.1	0.036	液体, Al ₁₅ (Fe:Mn) ₃ Si ₂ , Al ₃ Ti	0.1	1.07	0.1	0.61	0.53	0.03	9.25	0.03	0.13	0.13	
597.5	0.037	液体, Al ₁₅ (Fe:Mn) ₃ Si ₂ , Al ₃ Ti, AlCrSi(Ti)	0.1	1.08	0.09	0.61	0.51	0.03	9.25	0.03	0.13	0.13	
594.9	0.056	液体, Al ₁₅ (Fe:Mn) ₃ Si ₂ , Al ₃ Ti, AlCrSi(Ti), fcc铝	0.09	1.09	0.08	0.62	0.49	0.03	9.41	0.02	0.13	0.13	
592.4	0.086	液体, Al ₁₅ (Fe:Mn) ₃ Si ₂ , Al ₃ Ti, AlCrSi(Ti), fcc铝	0.09	1.12	0.08	0.63	0.48	0.03	9.66	0.01	0.13	0.13	

图8

实施例5

T (°C)	固相分数	相	液体元素组成(wt. %)										
			Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Ni	Si	Ti	Zn	Zr	
677.2	0.000	液体, Al ₁₅ (Fe:Mn) ₃ Si ₂	0.06	0.13	0.49	0.2	2.05	0.04	10.48	0.04	0.09	0.03	
613.2	0.049	液体, Al ₁₅ (Fe:Mn) ₃ Si ₂ , Al ₃ Ti	0.064	0.138	0.128	0.212	0.767	0.042	10.477	0.035	0.095	0.032	
610.6	0.050	液体, Al ₁₅ (Fe:Mn) ₃ Si ₂ , Al ₃ Ti	0.064	0.138	0.121	0.212	0.735	0.042	10.477	0.033	0.096	0.032	
608	0.051	液体, Al ₁₅ (Fe:Mn) ₃ Si ₂ , Al ₃ Ti	0.064	0.138	0.114	0.213	0.703	0.043	10.476	0.032	0.096	0.032	
605.5	0.052	液体, Al ₁₅ (Fe:Mn) ₃ Si ₂ , Al ₃ Ti	0.064	0.138	0.107	0.213	0.673	0.043	10.476	0.031	0.096	0.032	
602.9	0.053	液体, Al ₁₅ (Fe:Mn) ₃ Si ₂ , Al ₃ Ti	0.064	0.139	0.101	0.213	0.644	0.043	10.475	0.03	0.096	0.032	
600.4	0.054	液体, Al ₁₅ (Fe:Mn) ₃ Si ₂ , Al ₃ Ti	0.064	0.139	0.095	0.213	0.616	0.043	10.474	0.029	0.096	0.032	
597.8	0.055	液体, Al ₁₅ (Fe:Mn) ₃ Si ₂ , Al ₃ Ti	0.064	0.139	0.089	0.214	0.589	0.043	10.474	0.027	0.096	0.032	
595.2	0.056	液体, Al ₁₅ (Fe:Mn) ₃ Si ₂ , Al ₃ Ti	0.064	0.139	0.084	0.214	0.563	0.043	10.473	0.026	0.096	0.032	
592.7	0.059	液体, Al ₁₅ (Fe:Mn) ₃ Si ₂ , Al ₃ Ti, fcc Al	0.064	0.139	0.079	0.214	0.539	0.043	10.491	0.025	0.096	0.032	
590.1	0.093	液体, Al ₁₅ (Fe:Mn) ₃ Si ₂ , fcc Al	0.064	0.144	0.075	0.221	0.525	0.044	10.823	0.022	0.099	0.033	

图9

实施例6

T (°C)	固相分数	相	液体元素组成 (wt. %)										
			Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Ni	Si	Ti	Zn		
664.5	0	液体, Al ₃ Ti	0.02	0.45	0.22	0.13	0.93	0.04	9.06	0.08	0.72		
621.0	0.007	液体, Al ₁₅ (Fe:Mn) ₃ Si ₂ , Al ₃ Ti	0.02	0.454	0.17	0.131	0.775	0.04	9.06	0.042	0.726		
618.4	0.008	液体, Al ₁₅ (Fe:Mn) ₃ Si ₂ , Al ₃ Ti	0.02	0.454	0.16	0.131	0.743	0.04	9.059	0.04	0.727		
615.8	0.009	液体, Al ₁₅ (Fe:Mn) ₃ Si ₂ , Al ₃ Ti	0.02	0.455	0.151	0.131	0.713	0.04	9.057	0.039	0.728		
613.3	0.011	液体, Al ₁₅ (Fe:Mn) ₃ Si ₂ , Al ₃ Ti	0.02	0.456	0.141	0.132	0.684	0.041	9.056	0.037	0.729		
610.7	0.012	液体, Al ₁₅ (Fe:Mn) ₃ Si ₂ , Al ₃ Ti	0.02	0.456	0.133	0.132	0.655	0.041	9.055	0.036	0.73		
608.2	0.013	液体, Al ₁₅ (Fe:Mn) ₃ Si ₂ , Al ₃ Ti	0.02	0.457	0.124	0.132	0.628	0.041	9.053	0.035	0.731		
605.6	0.014	液体, Al ₁₅ (Fe:Mn) ₃ Si ₂ , Al ₃ Ti	0.02	0.457	0.116	0.132	0.602	0.041	9.052	0.033	0.732		
603.0	0.015	液体, Al ₁₅ (Fe:Mn) ₃ Si ₂ , Al ₃ Ti	0.02	0.458	0.109	0.132	0.577	0.041	9.051	0.032	0.733		
600.5	0.016	液体, Al ₁₅ (Fe:Mn) ₃ Si ₂ , Al ₃ Ti	0.02	0.458	0.101	0.132	0.553	0.041	9.05	0.031	0.733		
597.9	0.044	液体, Al ₁₅ (Fe:Mn) ₃ Si ₂ , fcc Al	0.02	0.47	0.096	0.136	0.536	0.042	9.276	0.019	0.748		
595.4	0.076	液体, Al ₁₅ (Fe:Mn) ₃ Si ₂ , fcc Al	0.02	0.484	0.091	0.139	0.521	0.043	9.548	0.011	0.764		

图10

实施例7

T (°C)	固相分数	相	液体元素组成(wt. %)									
			Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Ni	Si	Ti	Zn	Zr
695.0	0	液体, Al ₃ Ti	0.04	1.82	0.21	0.04	0.89	0.05	9.04	0.12	0.05	0.05
620.7	0.007	液体, Al ₁₅ (Fe:Mn) ₃ Si ₂ , Al ₃ Ti	0.04	1.83	0.17	0.04	0.76	0.05	9.05	0.04	0.05	0.05
618.2	0.008	液体, Al ₁₅ (Fe:Mn) ₃ Si ₂ , Al ₃ Ti	0.04	1.84	0.16	0.04	0.73	0.05	9.05	0.04	0.05	0.05
615.6	0.009	液体, Al ₁₅ (Fe:Mn) ₃ Si ₂ , Al ₃ Ti	0.04	1.84	0.15	0.04	0.70	0.05	9.05	0.04	0.05	0.05
613.0	0.011	液体, Al ₁₅ (Fe:Mn) ₃ Si ₂ , Al ₃ Ti	0.04	1.84	0.14	0.04	0.67	0.05	9.05	0.04	0.05	0.05
610.5	0.012	液体, Al ₁₅ (Fe:Mn) ₃ Si ₂ , Al ₃ Ti	0.04	1.84	0.13	0.04	0.64	0.05	9.05	0.03	0.05	0.05
607.9	0.013	液体, Al ₁₅ (Fe:Mn) ₃ Si ₂ , Al ₃ Ti	0.04	1.85	0.12	0.04	0.61	0.05	9.04	0.03	0.05	0.05
605.4	0.014	液体, Al ₁₅ (Fe:Mn) ₃ Si ₂ , Al ₃ Ti	0.04	1.85	0.12	0.04	0.59	0.05	9.04	0.03	0.05	0.05
602.8	0.015	液体, Al ₁₅ (Fe:Mn) ₃ Si ₂ , Al ₃ Ti	0.04	1.85	0.11	0.04	0.56	0.05	9.04	0.03	0.05	0.05
600.2	0.016	液体, Al ₁₅ (Fe:Mn) ₃ Si ₂ , Al ₃ Ti	0.04	1.85	0.1	0.04	0.54	0.05	9.04	0.03	0.05	0.05
597.7	0.016	液体, Al ₁₅ (Fe:Mn) ₃ Si ₂ , Al ₃ Ti	0.04	1.86	0.1	0.04	0.52	0.05	9.04	0.03	0.05	0.05
595.1	0.043	液体, Al ₁₅ (Fe:Mn) ₃ Si ₂ , fcc Al	0.04	1.90	0.09	0.04	0.50	0.05	9.25	0.02	0.05	0.05
592.6	0.073	液体, Al ₁₅ (Fe:Mn) ₃ Si ₂ , fcc Al	0.04	1.95	0.09	0.04	0.49	0.05	9.5	0.01	0.05	0.05

图11