

铝合金的铸造过程中凝固前沿的形貌和位置的测定方法

本申请是以 CN 申请号为 2023118341090，申请日为 2023 年 12 月 28 日的中国申请为基础，并主张其优先权，该 CN 申请的公开内容再次作为整体引入本申请中。

技术领域

本发明涉及铝合金铸造技术领域，具体而言，涉及一种铝合金的铸造过程中凝固前沿的形貌和位置的测定方法。

背景技术

当前，供挤压和轧制变形用的铝合金扁铸锭和圆铸锭多采用直接水冷半连续铸造的方式制备生产，该工艺的主要特点是液态金属熔体连续地通过结晶器，依靠结晶器实现金属的凝固并约束成型。在该工艺生产过程中，铸锭上部被结晶前沿和铸锭敞露液面所包围的液体金属区域称之为液穴（即凝固前沿）。铸锭液穴的形状决定着铸锭断面金属结晶速度的变化，而液穴的深度则直接反映了铸锭制备过程中的凝固时间和凝固速度，因此，准确测定和调整铸造过程凝固前沿形貌和位置是反应和控制铸锭质量的重要指标和手段。

常用的测量凝固前沿形貌和位置的方法为点插法，即在铸造过程中采用细丝或探棒自金属液面垂直插入熔体内部，直至触碰至固相为止，然后抽出，通过测量不同位置插入丝或探棒的长度来测算铸造过程凝固前沿位置。此方法虽简便易行，但测量精确度受操作人员经验和探棒垂直度影响，误差较大，不能准确反映凝固前沿位置变化。若铸造条件或工艺改变，则误差值更大。为弥补插丝法测量带来的误差，热电偶法应运而生。该方法是在铸造过程中，向铸锭内部不同位置在线埋入金属热电偶，热电偶随铸锭一起凝固，依靠不同位置热电偶的温度变化来反映铸造过程凝固前沿形貌和位置。该方法测量液穴数值准确，能够定量反映其形貌和位置变化。但采用金属热电偶法操作复杂，测量完成后铸锭只能报废处理，成本较高。在测量高强度 7xxx 和 2xxx 硬铝合金铸锭时，因埋入热电偶增加了铸锭内部应力集中点，可能导致铸锭开裂甚至迸裂现象发生，应用领域受到一定的限制。

发明内容

本发明的主要目的在于提供一种铝合金的铸造过程中凝固前沿的形貌和位置的测试方法，以解决现有技术中测量凝固前沿的形貌和位置的方法存在误差大、成本高的问题。

为了实现上述目的，根据本发明的一个方面，提供了一种铝合金的铸造过程中凝固前沿的形貌和位置的测定方法，该测定方法包括：将晶粒细化剂进行预热处理，得到预热后晶粒细化剂；在铸造过程的 A 时刻，将预热后晶粒细化剂与流过流槽的铝合金熔体混合并连续注入铸造模具中进行凝固成型，得到铝合金铸锭；其中，A 时刻对应的铸造模具中铝合金铸锭距离铸造模具底部的最大高度记为 H，H 高度处铸造模具的横截面的中心点记为 O 中心点；

经过 O 中心点并沿铸造方向将铝合金铸锭的一部分依次进行纵剖、抛光、腐蚀后,即可显现铸造过程的 A 时刻凝固前沿的形貌和位置,被纵剖的部分铝合金铸锭距离铸造模具底部的最大高度记为 L,沿垂直于铸造方向的铸造模具的截面直径记为 ϕ ,被纵剖的部分铝合金铸锭的长度为 $H'=L-H$, H' 为 $0.1\phi\sim 2\phi$ 。

进一步地,上述预热后晶粒细化剂的质量与铸造模具的截面直径 ϕ 满足以下关系:预热后晶粒细化剂的质量 $=10^{-3}\times(0.5\sim 2.5)\rho\pi v_{\text{cast}}(t_B-t_A)\phi^2$,其中, ρ 表示铝合金熔体的密度, t_A 表示 A 时刻的时间,A 时刻的后一时刻为 B 时刻,B 时刻的时间表示为 t_B , v_{cast} 表示铸造模具中的铸造速度。

进一步地,上述预热后晶粒细化剂与流过流槽的铝合金熔体的质量比为 2~10:1kg/t。

进一步地,上述铸造过程中,铸造速度为定值之后的铸造过程为稳定阶段,在稳定阶段的不同时刻分别加入预热后晶粒细化剂,测试稳定阶段不同时刻的凝固前沿的形貌和位置,其中,被纵剖的部分铝合金铸锭的厚度 H' 为 $1\phi\sim 2\phi$,和/或稳定阶段的凝固前沿的深度为 $0.5\phi\sim 1.5\phi$ 。

进一步地,上述铸造过程中,铸造速度为定值之前的铸造过程为初始阶段,在初始阶段的不同时刻分别加入预热后晶粒细化剂,测试初始阶段不同时刻的凝固前沿的形貌和位置,其中,被纵剖的部分铝合金铸锭的厚度为 H' 为 $0.1\phi\sim 1\phi$,和/或初始阶段的凝固前沿的深度为 $0\sim 1\phi$ 。

进一步地,上述预热的温度为 $350\sim 450^{\circ}\text{C}$ 。

进一步地,上述铝合金的型号为 7050 或 2024。

进一步地,上述铝合金的铸造过程包括:将铝原料锭依次进行熔炼、精炼、除气、静置处理,得到铝合金熔体;将铝合金熔体进行半连续铸造,得到铝合金铸锭;半连续铸造过程包括依次进行的连续初始阶段和连续稳定阶段;铝合金熔体的温度为 $720\sim 740^{\circ}\text{C}$,和/或连续初始阶段的铸造速度为 $30\sim 60\text{mm/min}$,在 $1\text{min}\sim 3\text{min}$ 内铸造速度线性增加至 $100\sim 125\text{mm/min}$ 后,结束连续初始阶段,进入连续稳定阶段。

进一步地,采用冷却水对半连续铸造的过程进行冷却,冷却水的流量为 $4\sim 6\text{m}^3/\text{h}$,冷却水的温度为 $20\sim 28^{\circ}\text{C}$ 。

进一步地,上述晶粒细化剂为杆状晶粒细化剂,杆状晶粒细化剂选自 Al-5Ti-B、Al-3Ti-B、Al-3Ti-0.15C 中的任意一种或多种,和/或杆状晶粒细化剂的长度为 $10\sim 20\text{cm}$ 。

应用本发明的技术方案,与传统凝固前沿形貌和位置测量方法相比,本发明的测试方法主要是在铸造过程中通过过量添加晶粒细化剂的方式(在铝合金熔体中有本领域所需常规添加量的晶粒细化剂),利用晶粒细化剂的增强细化作用及细化效果的差异,将被纵剖的部分铝合金铸锭经过抛光、腐蚀后,利用晶粒尺寸的差异实现铸造过程凝固前沿形貌和位置的清晰显示。采用本发明的测试方法后可避免传统插入法测量凝固前沿的深度时带来的人为误差,

本申请中凝固前沿的形貌和位置得以更直观显示，测量结果的准确程度得以明显提高，从而能够更精准反映铝合金熔体凝固过程中铝合金铸锭断面金属结晶速度、凝固前沿的凝固时间和凝固速度，从而依据测试结果调整铝合金熔体凝固过程中的凝固时间和凝固速度，进而有助于提高铝合金铸锭的质量。且以上测试方法操作方便，易于实现，极大地降低了成本。

附图说明

构成本申请的一部分的说明书附图用来提供对本发明的进一步理解，本发明的示意性实施例及其说明用于解释本发明，并不构成对本发明的不当限定。在附图中：

图 1 示出了根据本申请的实施例 1 提供一种铝合金的铸造过程中凝固前沿的形貌和位置的测试流程示意图；

图 2 示出了根据本申请的实施例 1 提供一种 7050 铝合金的铸造过程（连续稳定阶段）中凝固前沿的形貌和位置的示意图；

图 3 出了根据本申请的对比例 2 提供一种采用热电偶法测试凝固前沿深度的示意图。

其中，以上附图包括以下附图标记：

- 1、铝合金熔体 1；2、晶粒细化剂；3、铝合金铸锭；4、凝固前沿；5、流槽。

具体实施方式

需要说明的是，在不冲突的情况下，本申请中的实施例及实施例中的特征可以相互组合。下面将参考附图并结合实施例来详细说明本发明。

如本申请背景技术所分析的，凝固前沿的形状决定着铝合金铸锭断面金属结晶速度的变化，而凝固前沿的深度则直接反映了凝固前沿铸锭制备过程中的凝固时间和凝固速度，因此，准确测定和调整铝合金铸造过程中凝固前沿的形貌和位置是反应和控制铝合金铸锭质量的重要指标和手段，然而，现有技术中测量凝固前沿的形貌和位置的方法存在误差大、成本高的问题，为了解决以上问题，本申请提供了一种铝合金的铸造过程中凝固前沿的形貌和位置的测试方法。

在本申请的一种典型的实施方式中，提供了一种铝合金的铸造过程中凝固前沿的形貌和位置的测定方法，该测定方法包括：将晶粒细化剂进行预热处理，得到预热后晶粒细化剂；在铸造过程的 A 时刻，将预热后晶粒细化剂与流过流槽的铝合金熔体混合并连续注入铸造模具中进行凝固成型，得到铝合金铸锭；其中，A 时刻对应的铸造模具中铝合金铸锭距离铸造模具底部的最大高度记为 H，H 高度处铸造模具的横截面的中心点记为 O 中心点；经过 O 中心点并沿铸造方向将铝合金铸锭的一部分依次进行纵剖、抛光、腐蚀后，即可显现铸造过程的 A 时刻凝固前沿的形貌和位置，被纵剖的部分铝合金铸锭距离铸造模具底部的最大高度记

为 L ，沿垂直于铸造方向的铸造模具的截面直径记为 ϕ ，被纵剖的部分铝合金铸锭的长度为 $H'=L-H$ ， H' 为 $0.1\phi\sim 2\phi$ 。

与传统凝固前沿形貌和位置测量方法相比，本发明的测试方法主要是在铸造过程中通过过量添加晶粒细化剂的方式（在铝合金熔体中有本领域所需常规添加量的晶粒细化剂），利用晶粒细化剂的增强细化作用及细化效果的差异，将被纵剖的部分铝合金铸锭经过抛光、腐蚀后，利用晶粒尺寸的差异实现铸造过程凝固前沿形貌和位置的清晰显示。采用本发明的测试方法后可避免传统插入法测量凝固前沿的深度时带来的人为误差，本申请中凝固前沿的形貌和位置得以更直观显示，测量结果的准确程度得以明显提高，从而能够更精准反映铝合金熔体凝固过程中铝合金铸锭断面金属结晶速度、凝固前沿的凝固时间和凝固速度，从而依据测试结果调整铝合金熔体凝固过程中的凝固时间和凝固速度，进而有助于提高铝合金铸锭的质量。且以上测试方法操作方便，易于实现，极大地降低了成本。

此外，加入的预热后晶粒细化剂能够迅速熔化，并与被测铝合金铸锭一并在铸造模具内凝固成型。具体的，晶粒细化剂从流槽 5 末端加入并与流槽 5 内流动的铝合金熔体混合，并随铝合金熔体一起进入铸造模具内凝固。通过碱液或酸液腐蚀铝合金铸锭中心纵剖面后进行观察，其中的碱液为 20%~30%NaOH 溶液，其中的酸液为 10%~20% HNO_3 溶液。

在本申请的一种实施例中，上述预热后晶粒细化剂的质量与铸造模具的截面直径 ϕ 满足以下关系：预热后晶粒细化剂的质量 $= 10^{-3} \times (0.5 \sim 2.5) \rho \pi v_{\text{cast}} (t_B - t_A) \phi^2$ ，其中， ρ 表示铝合金熔体的密度， t_A 表示 A 时刻的时间，A 时刻的后一时刻为 B 时刻，B 时刻的时间表示为 t_B ， v_{cast} 表示铸造模具中的铸造速度。

晶粒细化剂加入量与被测铝合金铸锭的大小规格有关，铝合金铸锭的规格越大，铝合金熔体在流槽 5 内的流速越快，晶粒细化剂的加入量就越多。优选的以上预热后晶粒细化剂的质量与铸造模具的截面直径 ϕ 满足以下关系，更有助于发挥晶粒细化剂对不同大小规格的铝合金铸锭的增强细化差异，从而实现对不同大小规格的铝合金铸锭的凝固前沿形貌和位置的测试。

在本申请的一种实施例中，上述预热后晶粒细化剂与流过流槽的铝合金熔体的质量比为 2~10:1kg/t。

根据以上比例并随着铝合金熔体的流动添加晶粒细化剂，更有利于发挥晶粒细化剂细化差异的均匀性和稳定性，从而提高凝固前沿形貌和位置本身的清晰度。

依照测量目的不同，可在铸造过程的不同阶段连续注入晶粒细化剂，从而能够反映铸造过程的不同阶段凝固前沿的形貌和位置的变化，具体如下：

在本申请的一种实施例中，上述铸造过程中，铸造速度为定值之后的铸造过程为稳定阶段，在稳定阶段的不同时刻分别加入预热后晶粒细化剂，测试稳定阶段不同时刻的凝固前沿的形貌和位置，其中，被纵剖的部分铝合金铸锭的厚度 H' 为 $1\phi\sim 2\phi$ ，和/或稳定阶段的凝固前沿的深度为 $0.5\phi\sim 1.5\phi$ 。

控制被纵剖的部分铝合金铸锭的厚度在以上范围内，从而有助于更完整的反映稳定阶段中不同时刻凝固前沿的形貌和位置的变化，优选稳定阶段的凝固前沿的深度在以上范围内，准确地反映了铸造过程中施加在线退火的开始位置，以获得铸造过程成型及疏松控制的平衡。

在本申请的一种实施例中，上述铸造过程中，铸造速度为定值之前的铸造过程为初始阶段，在初始阶段的不同时刻分别加入预热后晶粒细化剂，测试初始阶段不同时刻的凝固前沿的形貌和位置，其中，被纵剖的部分铝合金铸锭的厚度为 H 为 $0.1\phi\sim 1\phi$ ，和/或初始阶段的凝固前沿的深度为 $0\sim 1\phi$ 。

控制被纵剖的部分铝合金铸锭的厚度在以上范围内，从而有助于更完整的反映初始阶段中不同时刻凝固前沿的形貌和位置的变化，优选初始阶段的凝固前沿的深度在以上范围内，准确地反映了铸造过程中施加在线退火的开始位置，以获得铸造过程成型及疏松控制的平衡。

在本申请的一种实施例中，上述预热处理的温度为 $350\sim 450^{\circ}\text{C}$ 。

对晶粒细化剂进行预热处理能够确保晶粒细化剂在流槽 5 的末端加入时迅速熔化，通过电阻炉将晶粒细化剂预热至以上温度后保温，从而更有助于提高以上测试方法的准确性和高效性。

在本申请的一种实施例中，上述铝合金的型号为 7050 或 2024 中的任意一种。

优选的以上型号的铝合金更适合通过本申请的以上测试方法得到铸造过程中不同时刻凝固前沿的形貌和位置。

在本申请的一种实施例中，上述铝合金的铸造过程包括：将铝原料锭依次进行熔炼、精炼、除气、静置处理，得到铝合金熔体；将铝合金熔体进行半连续铸造，得到铝合金铸锭；半连续铸造过程包括依次进行的连续初始阶段和连续稳定阶段；铝合金熔体的温度为 $720\sim 740^{\circ}\text{C}$ ，和/或连续初始阶段的铸造速度为 $30\sim 60\text{mm/min}$ ，在 $1\sim 3\text{min}$ 内铸造速度线性增加至 $100\sim 125\text{mm/min}$ 后，结束连续初始阶段，进入连续稳定阶段。

控制铝合金的铸造过程为半连续铸造，并控制铸造速度在以上范围内，更有助于匹配本申请的以上测试方法，从而简单、便捷的得到半连续铸造过程中不同时刻凝固前沿的形貌和位置，当然，本领域技术人员也可以根据实际情况调控以上具体条件，在此不再赘述。

在本申请的一种实施例中，采用冷却水对半连续铸造的过程进行冷却，冷却水的流量为 $4\sim 6\text{m}^3/\text{h}$ ，冷却水的温度为 $20\sim 28^{\circ}\text{C}$ 。

控制冷却水的流量和温度在以上范围内，使本申请铝合金熔体的凝固速度更匹配本申请的以上测试方法，从而有利于进一步地提高本申请的以上测试方法的准确性。

在本申请的一种实施例中，上述晶粒细化剂为杆状晶粒细化剂，杆状晶粒细化剂选自 Al-5Ti-B、Al-3Ti-B、Al-3Ti-0.15C 中的任意一种或多种，和/或杆状晶粒细化剂的长度为 $10\sim 20\text{cm}$ 。

优选的以上晶粒细化剂具有优良的细化效果，且在被加入流槽 5 后能够更快速的熔化。

以下将结合实施例，进一步说明本申请的有益效果。

实施例 1

参考图 1 所示的铝合金的铸造过程中凝固前沿的形貌和位置的测试流程示意图进行测试：

本发明的测试量方法主要包括以下 5 个阶段：

1) 晶粒细化剂 2 的选择和预热：本实施例待测铸锭为 7050 合金圆铸锭铸造过程，选择 Al-5Ti-B 作为晶粒细化剂，放入电阻炉内预热能够通过增强晶粒细化效果显示铸造过程凝固前沿的形貌和位置。晶粒细化剂的预热：在铸造开始前，为确保晶粒细化剂加入流槽末端熔体后能迅速熔化，利用电阻炉将多根长度为 10~20cm 的杆状晶粒细化剂 Al-5Ti-B，放入电阻炉内并预热至 450℃ 后保温。

2) 熔炼及熔体处理：将工业纯铝锭及其合金铸锭放入 700℃ 的感应炉内熔炼，合金熔化后转入保温静置炉内，并对铝合金熔体 1 进行炉内精炼、除气和其他处理，静置 10~20 分钟，待熔体温度降至 720℃ 时进行半连续铸造。

3) 杆状晶粒细化剂加入：在本实施例中，待检测铸造过程凝固前沿形貌和位置的铸锭为 $\phi 154\text{mm}$ 的 7050 圆铸锭，该铸锭半连续铸造工艺为：

在半连续铸造开始前，设定冷却水流量变化范围为 $6\text{m}^3/\text{h}$ ，铸造机的初始铸造速度为 $60\text{mm}/\text{min}$ ，铸造过程开始后速度线性增加至 $100\text{mm}/\text{min}$ ，铸锭长度为 1000mm 时进入连续稳定阶段，将预热好的晶粒细化剂加入流槽 5 末端熔体内，其中，预热后晶粒细化剂的质量 $= 10^{-3} \times 0.5 \rho \pi v_{\text{cast}} (t_B - t_A) \phi^2$ ，即预热后晶粒细化剂的质量为 5kg ，此时纪录结晶器内铝合金铸锭距离结晶器底部的最大距离为 1900mm ，预热好的晶粒细化剂随流槽 5 内铝合金熔体一起进入结晶器内。

4) 凝固前沿形貌和位置显示：

铸造结束后，取铝合金铸锭 3 的 $900\sim 1100\text{mm}$ 段后沿中心线纵剖，经抛光、30%NaOH 溶液进行腐蚀后的凝固前沿 4 形貌和位置如附图 2 所示，经测量凝固前沿深度约为 78mm 。

实施例 2

与实施例 1 的区别在于，铸造模具的截面直径 ϕ 为 50mm ，铸造速度 v_{cast} 为 $100\text{mm}/\text{min}$ ，预热后晶粒细化剂的质量 $= 10^{-3} \times 2.5 \rho \pi v_{\text{cast}} (t_B - t_A) \phi^2$ ，即预热后晶粒细化剂的质量为 2.6kg ，铸造结束后，取铝合金铸锭 3 的 $950\sim 1050\text{mm}$ 段后沿中心线纵剖，经抛光、30%NaOH 溶液进行腐蚀后的凝固前沿 4 形貌和位置的测量，经测量凝固前沿深度约为 25mm 。

实施例 3

与实施例 1 的区别在于，铸造模具的截面直径 ϕ 为 200mm ，铸造速度 v_{cast} 为 $100\text{mm}/\text{min}$ ，预热后晶粒细化剂的质量 $= 10^{-3} \times 2.5 \rho \pi v_{\text{cast}} (t_B - t_A) \phi^2$ ，即预热后晶粒细化剂的质量为 8kg ，铸

铸造结束后,取铝合金铸锭3的850~1150mm段后沿中心线纵剖,经抛光、30%NaOH溶液进行腐蚀后的凝固前沿4形貌和位置的测量,经测量凝固前沿深度约为100mm。

实施例4

与实施例1的区别在于,预热后晶粒细化剂与流过流槽的铝合金熔体的质量比为2:1kg/t,铸造结束后,取铝合金铸锭3的900~1100mm段后沿中心线纵剖,经抛光、30%NaOH溶液进行腐蚀后的凝固前沿4形貌和位置的测量,经测量凝固前沿深度约为78mm。

实施例5

与实施例1的区别在于,预热后晶粒细化剂与流过流槽的铝合金熔体的质量比为10:1kg/t,铸造结束后,取铝合金铸锭3的900~1100mm段后沿中心线纵剖,经抛光、30%NaOH溶液进行腐蚀后的凝固前沿4形貌和位置的测量,经测量凝固前沿深度约为78mm。

实施例6

与实施例1的区别在于,预热后晶粒细化剂与流过流槽的铝合金熔体的质量比为1:1kg/t,铸造结束后,取铝合金铸锭3的900~1100mm段后沿中心线纵剖,经抛光、30%NaOH溶液进行腐蚀后的凝固前沿4形貌和位置的测量,经测量凝固前沿深度约为78mm。

实施例7

1) 晶粒细化剂2的选择和预热:本实施例待测铸锭为7050合金圆铸锭铸造过程,选择Al-5Ti-B作为晶粒细化剂,放入电阻炉内预热能够通过增强晶粒细化效果显示铸造过程凝固前沿的形貌和位置。晶粒细化剂的预热:在铸造开始前,为确保晶粒细化剂加入流槽末端熔体后能迅速熔化,利用电阻炉将多根长度为10~20cm的杆状晶粒细化剂Al-5Ti-B,放入电阻炉内并预热至450℃后保温。

2) 熔炼及熔体处理:将工业纯铝锭及其合金铸锭放入700℃的感应炉内熔炼,合金熔化后转入保温静置炉内,并对铝合金熔体1进行炉内精炼、除气和其他处理,静置10~20分钟,待熔体温度降至720℃时进行半连续铸造。

3) 杆状晶粒细化剂加入:在本实施例中,待检测铸造过程凝固前沿形貌和位置的铸锭为 $\phi 154\text{mm}$ 的7050圆铸锭,该铸锭半连续铸造工艺为:

在半连续铸造开始前,设定冷却水流量变化范围为 $6\text{m}^3/\text{h}$,铸造机的初始铸造速度为 $60\text{mm}/\text{min}$,1min后,在进入稳定阶段之前将预热好的晶粒细化剂加入流槽5末端熔体内,其中,预热后晶粒细化剂的质量 $=10^{-3} \times 0.7\rho \pi v_{\text{cast}}(t_B - t_A)\phi^2$,即细化剂的质量为3kg,此时纪录结晶器内铝合金铸锭距离结晶器底部的最大距离为500mm,预热好的晶粒细化剂随流槽5内铝合金熔体一起进入结晶器内。

4) 凝固前沿形貌和位置显示:

铸造结束后，取铝合金铸锭 3 的 0~150mm 段后沿中心线纵剖，经抛光、30%NaOH 溶液进行腐蚀后的凝固前沿 4 形貌和位置的测量，经测量凝固前沿深度约为 20mm。

对比例 1

常用的测量凝固前沿形貌和位置的方法为点插法，即在铸造过程中采用细丝或探棒自金属液面垂直插入熔体内部，直至触碰至固相为止，然后抽出，通过测量不同位置插入丝或探棒的长度来测算铸造过程凝固前沿位置。表 1 中给出了采用点插法 5 次测得的凝固前沿深度值。

表 1

次数	1	2	3	4	5
凝固前沿深度	85mm	75mm	69mm	81mm	72mm

对比例 2

为弥补插丝法测量带来的误差，热电偶法应运而生。该方法是在铸造过程中，向铸锭内部不同位置在线埋入金属热电偶，热电偶随铸锭一起凝固，依靠不同位置热电偶的温度变化来反映铸造过程凝固前沿形貌和位置。该方法测量液穴数值准确，能够定量反映其形貌和位置变化。如图 3 中给出的采用热电偶法测得的凝固前沿的深度为 77mm，其中 T_L 为液相线温度， T_S 为固相线温度。

需要说明的是，对比例 2 测试凝固前沿的深度的方法准确性高，但采用金属热电偶法操作复杂，测量完成后铸锭只能报废处理，且因埋入热电偶增加了铸锭内部应力集中点，可能导致铸锭开裂甚至迸裂现象发生，应用领域受到一定的限制。

实施例 6 中预热后晶粒细化剂由于加入的量相对较低，使得凝固前沿显示的没有实施例 1、5、6 清晰。

从以上的描述中，可以看出，本发明上述的实施例实现了如下技术效果：

与传统凝固前沿形貌和位置测量方法相比，本发明的测试方法主要是在铸造过程中通过过量添加晶粒细化剂的方式（在铝合金熔体中有本领域所需常规添加量的晶粒细化剂），利用晶粒细化剂的增强细化作用及细化效果的差异，将被纵剖的部分铝合金铸锭经过抛光、腐蚀后，利用晶粒尺寸的差异实现铸造过程凝固前沿形貌和位置的清晰显示。采用本发明的测试方法后可避免传统插入法测量凝固前沿的深度时带来的人为误差，本申请中凝固前沿的形貌和位置得以更直观显示，测量结果的准确程度得以明显提高，从而能够更精准反映铝合金熔体凝固过程中铝合金铸锭断面金属结晶速度、凝固前沿的凝固时间和凝固速度，从而依据测试结果调整铝合金熔体凝固过程中的凝固时间和凝固速度，进而有助于提高铝合金铸锭的质量。且以上测试方法操作方便，易于实现，极大地降低了成本。

以上仅为本发明的实施例而已，并不用于限制本发明，对于本领域的技术人员来说，本发明可以有各种更改和变化。凡在本发明的精神和原则之内，所作的任何修改、等同替换、改进等，均应包含在本发明的保护范围之内。

1. 一种铝合金的铸造过程中凝固前沿的形貌和位置的测定方法，其特征在于，所述测定方法包括：

将晶粒细化剂进行预热处理，得到预热后晶粒细化剂；

在所述铸造过程的 A 时刻，将所述预热后晶粒细化剂与流过流槽的铝合金熔体混合并连续注入铸造模具中进行凝固成型，得到铝合金铸锭；

其中，所述 A 时刻对应的所述铸造模具中所述铝合金铸锭距离所述铸造模具底部的最大高度记为 H，H 高度处所述铸造模具的横截面的中心点记为 O 中心点；

经过所述 O 中心点并沿铸造方向将所述铝合金铸锭的一部分依次进行纵剖、抛光、腐蚀后，即可显现所述铸造过程的所述 A 时刻凝固前沿的形貌和位置，被纵剖的部分所述铝合金铸锭距离所述铸造模具底部的最大高度记为 L，沿垂直于铸造方向的所述铸造模具的截面直径记为 ϕ ，被纵剖的部分所述铝合金铸锭的长度为 $H'=L-H$ ， H' 为 $0.1\phi\sim 2\phi$ 。

2. 根据权利要求 1 所述的测定方法，其特征在于，所述预热后晶粒细化剂的质量与所述铸造模具的所述截面直径 ϕ 满足以下关系：所述预热后晶粒细化剂的质量 $= 10^{-3} \times (0.5\sim 2.5) \rho \pi v_{\text{cast}} (t_B - t_A) \phi^2$ ，其中， ρ 表示所述铝合金熔体的密度， t_A 表示所述 A 时刻的时间，所述 A 时刻的后一时刻为 B 时刻，所述 B 时刻的时间表示为 t_B ， v_{cast} 表示所述铸造模具中的铸造速度。
3. 根据权利要求 1 或 2 所述的测定方法，其特征在于，所述预热后晶粒细化剂与流过流槽的所述铝合金熔体的质量比为 $2\sim 10:1\text{kg/t}$ 。
4. 根据权利要求 1 或 2 所述的测定方法，其特征在于，所述铸造过程中，铸造速度为定值之后的铸造过程为稳定阶段，在所述稳定阶段的不同时刻分别加入所述预热后晶粒细化剂，测试所述稳定阶段不同时刻的凝固前沿的形貌和位置，其中，被纵剖的部分所述铝合金铸锭的厚度 H' 为 $1\phi\sim 2\phi$ ，和/或所述稳定阶段的凝固前沿的深度为 $0.5\phi\sim 1.5\phi$ 。
5. 根据权利要求 1 或 2 所述的测定方法，其特征在于，所述铸造过程中，铸造速度为定值之前的铸造过程为初始阶段，在所述初始阶段的不同时刻分别加入所述预热后晶粒细化剂，测试所述初始阶段不同时刻的凝固前沿的形貌和位置，其中，被纵剖的部分所述铝合金铸锭的厚度为 H' 为 $0.1\phi\sim 1\phi$ ，和/或所述初始阶段的凝固前沿的深度为 $0\sim 1\phi$ 。
6. 根据权利要求 1 或 2 所述的测定方法，其特征在于，所述预热处理的温度为 $350\sim 450^\circ\text{C}$ 。
7. 根据权利要求 1 或 2 所述的测定方法，其特征在于，所述铝合金的型号为 7050 或 2024。
8. 根据权利要求 1 或 2 所述的测定方法，其特征在于，所述铝合金的铸造过程包括：

将铝原料锭依次进行熔炼、精炼、除气、静置处理，得到铝合金熔体；

将所述铝合金熔体进行半连续铸造，得到所述铝合金铸锭；

所述半连续铸造过程包括依次进行的连续初始阶段和连续稳定阶段；

铝合金熔体的温度为 720~740℃，和/或所述连续初始阶段的铸造速度为 30~60mm/min，在 1min~3min 内所述铸造速度线性增加至 100~125mm/min 后，结束所述连续初始阶段，进入所述连续稳定阶段。

9. 根据权利要求 8 所述的测定方法，其特征在于，采用冷却水对所述半连续铸造的过程进行冷却，所述冷却水的流量为 4~6m³/h，所述冷却水的温度为 20~28℃。
10. 根据权利要求 1 或 2 所述的测定方法，其特征在于，所述晶粒细化剂为杆状晶粒细化剂，所述杆状晶粒细化剂选自 Al-5Ti-B、Al-3Ti-B、Al-3Ti-0.15C 中的任意一种或多种，和/或所述杆状晶粒细化剂的长度为 10~20cm。