

# 大型铸锻件文集

第二十三集

上海重型机械厂技术情报组编

唐大猷

1978.3 上海

## 目 录

|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| 1. 镇静钢钢锭中的 A 及 V 偏析.....      | 1   |
| 2. 钢中大型非金属夹杂物的来源与去除.....      | 19  |
| 3. 控制大钢锭致密性与均质性的原理.....       | 35  |
| 4. 断裂韧性与夹杂物分布.....            | 57  |
| 5. 鲍勒电渣补浇——生产高质量锻件钢锭的新方法..... | 66  |
| 6. 时效硬化型奥氏体非磁性钢的强化.....       | 78  |
| 7. 爆炸强化奥氏体钢的组织与性能.....        | 98  |
| 8. 铸锭在锻压时开裂.....              | 104 |

## 镇静钢钢锭的A和V偏析

AXET HULTGREN

在镇静钢钢锭内出现的几种宏观偏析中，A偏析（亦称A偏析，倒V偏析，鬼线，或阴影带）和V偏析已引起人们特别注意。由于组织中有显著的不连续性，这种不连续性，一般均认为是缺陷。虽经许多年的研究和讨论，对于这种缺陷的形成机理仍存有争议。本文中提出了A偏析，即鬼线的形成的新的理论，对V偏析也作了探讨。在讨论之前，先综述一下以前的有关文献，新近发表的著作的许多见解在这些文献中占有重要地位。

### 文 献 综 述

A. W. 和 H. Brearley 提出，当金属冷却时，正在生长的柱状晶粒的前沿形成不纯金属的液封，并由内下较纯液体冷却时成核的晶粒所禁锢。这种液体层在凝固时会形成鬼线。一个粘土模浇铸的钢锭，内含的鬼线几乎可达到钢锭的外表。这是因为柱状晶粒增长条件不利的缘故。高的浇铸温度，有利于柱状晶粒增长，迫使鬼线更加接近于钢锭轴线。用下下由钢制成，上下用粘土制成的锭模浇铸的钢锭，其鬼线从下下的内向转变为上下的转变区域的外向。H. Brearley 指出，钢锭热铸时，V孔穴较大。补救的办法是用锥度尽可能大的锭模低温浇铸。

钢铁研究协会小组委员会提出的关于钢锭不均匀性的一系列报告中，提出和讨论了大型钢锭的截面上出现的许多鬼线的情况。图1是这些报告中的一个报告的实例，显示一个10吨钢锭的宏观浸蚀的纵截面。可以看到鬼线向内陡峭向上，接近冒口处鬼线转向外。在中心区域有V偏析。用砂模浇铸的305毫米（12英寸）的方锭中，出现的鬼线都是从非常接近边表面起始。相仿，鬼线源于柱状晶粒前沿所形成的不纯液体，并因较低的密度而开始上升时，增长着的晶粒缠结或串成线状物质。钢锭内出现鬼线的区域有一环状形式，它的内

界大体上呈截头的圆锥或角锥形状。至于V偏析的形成，大家认为，在凝固的后期，当在钢锭头下的钢水和偏析会被拉下到其他钢水的较狭窄的轴向沟槽内。这样，偏析材料就产生V形区。在后文的讨论中

Brearley 不同意这种解说，指出紧结冒口下部的中央区域常常是没有V偏析的事实。

Hultgren 调查了四个12英寸的1.10%碳钢方锭，没有发现鬼线。然而，在一个9英寸的低温浇铸方钢锭中，在中间区域有A形细纹（图2右）。这种类型的偏析称为A组织。V偏析存在于所有的锥度为2-10%所调查的钢锭中。增加锥度到20-25%，V偏析逐渐消失，代之以V组织（图2左）。降低浇注温度，有同样的效果。在中央顶下区域，一般没有V偏析。包括浇注温度和钢锭锥度的效果在内的这些V偏析的见解与上述

Brarley的说法是一致的。结论是，V偏析是中心下分中向上移动的V形区的凝固收缩所产生的各种应力而引起变形的结果，凝固程度向轴线减少。小的锥度意味着这个区域的大的高度，因而在狭窄间隙中补注钢水输送困难。因此，应力将会撕裂晶粒的聚合，引起孔穴，使偏析钢水全下或下分注入孔穴。

Badenheuer 认为，鬼线（阴影带）是由气泡后留下的偏析钢液缓缓上升通过液/固混合物造成的。Hultgren 已叙述过这种现象的一个例子（图3）。在Badenheuer 文章发表后的讨论中，在镇静钢锭中用以说明出现鬼线的许多气泡的存在，认为是借不住的。



图1 10吨钢锭的宏观浸蚀截面

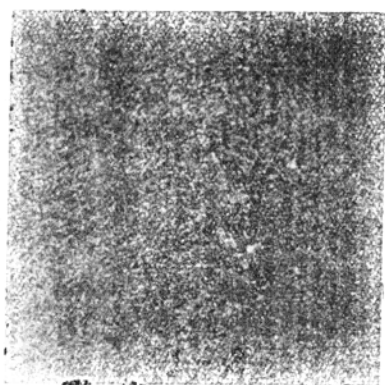


图2 9英寸方锭截面上  
以A及V组织



图3 气泡历历上升所形成  
的偏析条纹

那时，显然忽视了接近钢锭冒口钢水池的鬼线是向外转的（图1），它不太允许气泡运动，这种倾向倒不如说，因凝固前沿要变化它的斜度。鬼线可能对凝固前沿保持某些角度关系。

Hatjielel 叙述了一只13英寸的低温浇铸方锭，这个方锭没有发现鬼线，但是，根据他的叙述，显然含有Hultgren所说的这种A组织。V偏析在这个钢锭中也没有发现，这个钢锭的碳度为1.3%。

Larsen认为，V和A偏析的形成中有一个因素可能是浓度变化的结果，即钢水一定要流入树枝状结晶之间以补偿凝固中的体积收缩。但是这个意见，没有进一步发见。

Marburg强调宽高比对V偏析形成的重要作用，并且认为，所说的收缩变形的机理可能只适用于小比例的钢锭，特别是小钢锭。

Gray反对有关V偏析的收缩变形的意见，而是认为，V现象源于沉积晶粒的状况。

Charles在讨论鬼线形成时认为，在温度梯度下降柱状晶增长的后期，当晶粒的“分枝”出现时，前沿变成“长而尖”，这样，偏

析钢水就陷入中间区域。

Andrews 和 Gomer 在大型钢锭凝固过程中不时地加入放射性同位素，借以研究不断前进的凝固前沿的形状及位置和鬼线的分布。他们的结论（如图4所示）是液流在侧壁下降的主循环系统在钢锭下部较小部分钢水中转向内向，激引起反方向的第二个循环系统。这个见解与 Blank 和 Pickering 所图示的在大型钢锭不同部分中分布的氧化物夹杂的形式是一致的。根据 Andrews 和 Gomer（图4），由于凝固继续进行，上下快速循环系统向上和向中心后退收缩。当液固界面从边沿向内和从角上向上移动，下部激引起的系统也逐渐收缩成较小的体积。在研究不断前进的凝固前沿的形状中，发现原来从边前沿到底前沿的平滑的拐角过渡，变成了不规则的过渡（图4和5），当前沿向上和向内推进的一个相当的时期里，过渡区一直是不规则的，直到后来重新变成平滑，前沿呈一尖锥形。从图5中可以看出，鬼线与不规则的过渡转变区有关。图6是一张4吨钢锭的照片，它表明，鬼线与A组织和V组织结合在一起，V组织在中心区。鬼线是由主循环系统的下降的液流中被推出的偏析钢液形成，并混入正在前进的侧界面，如图4中的大箭头所示。当循环液流上升时，在下部系统的循环液流中同样会形成V偏析（图4）。

Kohn 在他的大钢锭研究中，使用与 Andrews 和 Gomer 相同的方法，得到凝固时前沿轮廓的变化不规则性的同样的结果。认为V组织和V偏析与从底部逐渐长大的沉积晶粒的宝塔形小山顶有关，V偏析是与偶而小山崩塌有关系。

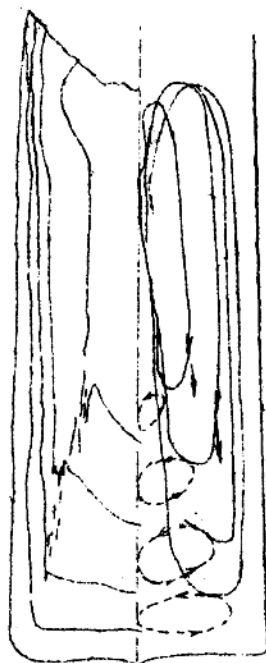


图4 大型钢锭的凝固前沿和循环钢水流前进情况

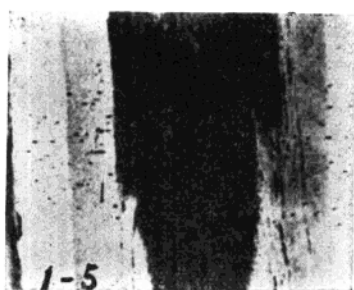


图5 1.5吨钢锭凝固前沿  
的转变区域的不规则  
形状

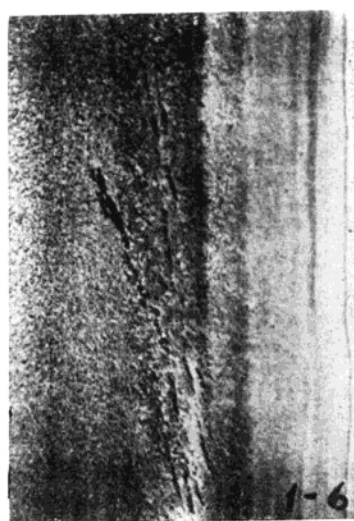


图6 4吨钢锭的鬼线，A组  
织和V组织

A.和J. Pokorny 在他们收集铁合金的优良组织的照片时，提供有关钢锭凝固有价值的详细情况。图7表明一个大钢锭的柱状和柱枝状区域。在后一种区域内，有一些小的鬼线。图8示出了与中间区域的A组织结合在一起的一些普通鬼线。这个钢锭的中心区域示于图9中。两个连续下分之间的界线是明显的，并且呈尖锥形状。两下分之一是由极小的晶粒组成。这些作者们认为，形成鬼线的汽泡理论是可能的。

在实验室范围内的一些研究（包括非金属物质的结晶过程）中，有一些也是值得提及的。

Carlsson 和 Hultgren 发现，以适当速度凝固的硬脂特锭子中，形成一种晶粒延长的表白区，这个区域与钢锭中的柱状晶粒区相类似。在熔融的硬脂特连续流一百流过锭模（向上或向下）一百凝固的锭子中，晶杆有偏离垂直于等温线的倾向，它常常与流的方向相反。在钢锭中，柱状晶杆通常表现为向上的倾向。这常常是由向下的



图7 3.5吨钢锭的柱状  
和柱枝状区域

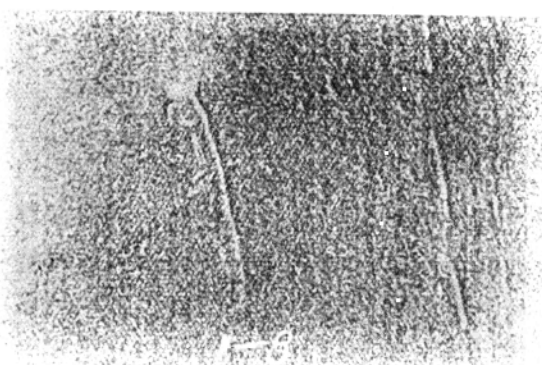


图8 3.5吨钢锭的鬼线  
和A组织

液流造成的，与硬脂特锭的情况相符，但是确有偏离等温线的情况。

McDonald 和 Hunt 从氯化铵水溶液的结晶实验得出结论，A 偏析是在一定条件下上升的液流通过增长着晶粒的侧壁的结果。在钢锭中，由于溶质浓缩，密度降低也会出现类似通过生长着的柱状区的偏析液流。虽然两种情况有某些相似，但仍难将这些结论与对流下降钢水流扫过钢锭中增长着的柱状侧晶粒的前沿的情况相一致。

Ohno 以氯化铵水溶液的相同的实验发现在侧壁与等轴区域之间有撕裂缝。这些裂缝与钢锭中的鬼线类似。

Hultgren 和 Carlsson 用70%棕榈，30%硬脂特和



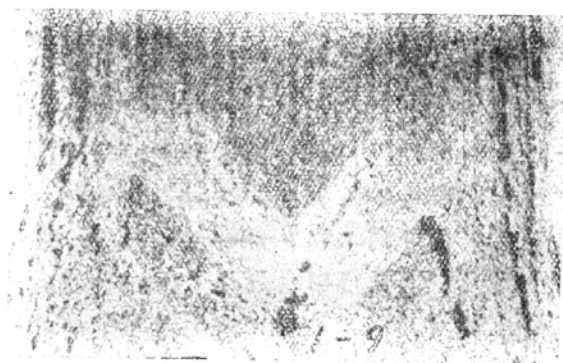


图9 3.5吨钢锭中心区的硫印

5%油酸进行实验，浇注温度为 $60^{\circ}\text{C}$ ，在6英寸的方模中凝固很怏。如图10所示，在侧壁前沿有弯形斜孔穴。他们相仿，这是怏沉的浮动晶粒前沿上的偶附物与突起下间的向外来补给液流的偏析液体相结合的结果。

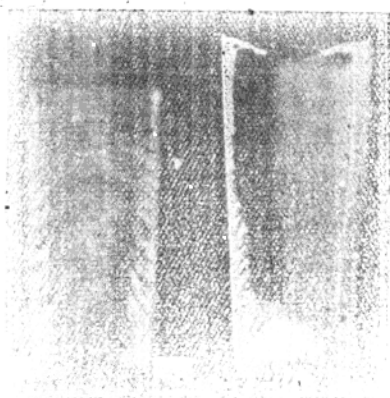


图10 硬脂铸锭

- a. 模垫以棉花。  
5天凝固。
- b. 模的三边垫衬，  
右边不垫。6  
小时后流干。

### 凝固的初期

在述及 A 和 V 偏析之前, 先对钢锭的凝固初期的某些特性作一简要的考虑。这些问题的详尽讨论可阅看有关金属凝固的会议文献汇编。

注入锭模过程包含着钢水的下分冷却, 对流和冷热钢水混合的紊流。混合后的钢水的温度在液相温度以下的一个值上马上完全均匀一致。冷却钢水中成核的晶粒, 形成一层小的激冷晶外壳和许多浮动晶粒。液体混合过程中, 浮动晶粒大下重熔。冷铸时, 混合后有无数小的浮动晶粒当下, 热铸情况下, 当下的数量减少。在从模壁和顶下继续冷却时, 出现如下过程:

1. 从激冷晶粒中, 柱状树枝晶粒选择有利方位的晶粒, 即多少垂直于表面的立方体轴晶粒, 优先发片成长。

2. 边壁的冷却使邻近的流动液体层下降, 这样就产生液体的对流循环, 钢锭底下上液体是向内对流循环的, 中心区域上是向上对流循环的, 顶下是向外对流循环的。这种运动的产生是因为外下渐渐冷却, 而中心区域没有冷却致使浓度差异的结果。

3. 混合后当下的浮动晶粒随液体循环, 因此, 每当他们经过向下和向内的循环路线就生长另外的身。顶下线路上的冷却可能是略微的。

4. (a) 冷铸后当下的无数小的晶粒有一个比较大的总表面区。因而, 凝固的余热使其缓缓地个别增长。因此形状是球形的, 如所观察到的那样, 只有一些树枝晶的略微倾向。(b) 另一方面, 热铸以后, 当下很少的一些晶粒增长较快, 形成枝晶骨架。在枝晶骨架周围运动的液体实际上不存在温度梯度, 晶粒在 6 个立方体轴方向平等生枝, 即形成等轴晶。

5. 由于冷却是在循环液中进行, 另外的浮动晶粒是由以下的一个或几个设想的过程产生: 过冷的结果, 产生不均质或均质的成核, 和枝晶碎片从柱状区分离, 包括被粉碎的或被熔化的顶下渣壳。据认为, 这种另外增加的晶粒在循环过程中也随着增长。

### 柱状晶粒区

柱状晶粒顺着枝晶骨架成长，主枝沿着最大温度梯度发晶成十字形轴，每一轴包括两个相交的片瓣，而付枝形成细杆，在两个其它立方体轴方向交错，据推测，这是固态比液态有较高的热传导性的结果。因此，柱状晶粒的枝晶轮廓一般与等轴枝晶轮廓不同。在与钢锭表面平行的那些下分中，晶杆为明显的直角十字形，垂直于表面的下分内，晶杆为明显的直线形，十字形的片瓣晶杆在近轴处被割断的地方，偶而加宽成带状。在这一下分中，细的付枝类似梯子的横档。这类组织正如图 11 所示。如前所述，在钢锭各边的柱状生长时，晶杆一般趋势是向上发晶。有一些晶杆长得过大，因此，晶杆的间隔增加。柱状生长过程中，速度减慢，周围液体中的浓缩的溶质有时间通过扩散建立晶粒前沿的偏析液区。这种情况的本身就减慢生长。

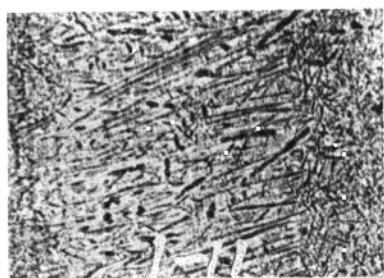


图 11 柱状晶粒 5 吨  
钢锭

### 分枝的柱状晶粒区

图 7 是从一个 3.5 吨钢锭的表面拍摄的照片，它显示出一个由良好制备而生长得很好的有趣的组织。在一个 20 毫米表面柱状区之后，紧跟一个 60 毫米柱状区。前者的晶杆表现为向下倾斜，这显然是浇注时激引起的上升对流液流作用的结果，而后者的晶杆则向上倾斜，与水平约成 25 度角度。再后紧接的是一大片区域，内含大型柱状晶晶粒区，晶杆方向不一。在这些区域中有一些晶粒区保持第二种区域的晶杆倾斜方向。这些晶粒区的这种表现是因为晶杆与偏析带交结在

一起的统放，形成一种柱状鬼线。

有人认为，第二区域的大多数柱状晶粒在第三区域生长时它们的前沿下分突然弯曲或折断。在它们的新方向中，这些骨架仍断续生长，大部分保持它们的柱状轮廓，这在它们的组织中可辨认得出。在下一节关于鬼线更全面的讨论中，认为这里所说的鬼线，是进给流当它被已无方向的骨架阻碍时仍沿着不弯曲的晶杆推进的结果。

在文献中，“分枝柱状区”一词有时是指鬼线下端的可能的基体。根据特有的“晶杆和梯子横档”组织，图7的无方向区表示它们的柱状源。本例中晶杆向上的较大的斜度似乎证明，向下的对流的液流比生长着的晶粒的前进速度快，这就提供使晶杆变形或破坏所需的力和时间，原来支持晶杆的力无疑是薄弱的。

### 鬼线

当柱状晶粒在钢锭的各边生长时，凝固时的收缩要向外抽拉骨架之间和中间进给液体的正常液流。同时，骨架前下将被下降的对流液流冲去。对流和进给流相合成之后的液流（在晶杆前沿和紧后前沿之前）具有向外倾斜的方向。进给流在降低了的速度上继续向外流。由于柱状骨架系敞开又平行的结构，这股液流很少遇到阻力。因此，很少收缩变形，在柱状区的主要下分很少见到缩孔。下下柱状区中也是类似情况。

假定有一个足够高的浇注温度，原来带很少晶粒的循环液体已渐渐获得更多的晶粒，且晶粒已分枝地生长。由于晶杆前沿的液流向外偏离，浮动的晶粒将开始粘附在尖端上和尖端之间，这是一种随着晶粒的生长和增殖而增加的倾向。在粘附物的任何位置上，形成的突起下能捕捉更多的晶粒。由于液流的方向，这些增加的晶粒将优先在粘附的第一群上积聚，但是有一些可能粘附在它的旁边，而很少在它的下分。纵截面上看到的这种情况，梗概地示于图12之中。附着的晶粒骨架，与柱状晶杆间隔比较，是紧密地生枝的，当然方向是混乱的。这就妨碍液流通过晶粒骨架，因而液流在该群的界面上激发出一股加速的进给流，特别是在它上分的加速的进给流。这个局下的加速流在粘附群后的柱状区域扩大开来，形成进料沟，并由于流速增加，从柱

状前沿区和从浮动晶粒的母液中吸收偏析液体，将立即重熔它所流过的枝晶的枝，从而扩大进给流沟。快速的局下的液流容易将更多的晶粒拉到进给流沟口，晶粒在它的下边订当，这就可能给进给流沟一个陡坡。沟口上聚集的晶粒可能下分或全下级以后的进给沟流所重熔。先前形成的进给流沟将提供一个狭窄范围的柱状前沿区。以后，其它的进给流沟以相同的方式由粘附着的晶粒开始，柱状前沿区的外下由第一沟供给，以此类推。当前要讨论的是进给流沟的起源似乎是在铜锭的底角附近开始，此外，既然晶粒是在下降过程中生长，那末在铜锭的较高下位上，后来就会侧前沿上出现偶然的粘附物。换言之，进给流沟出现的下位越高，则开始于侧表面下越深。

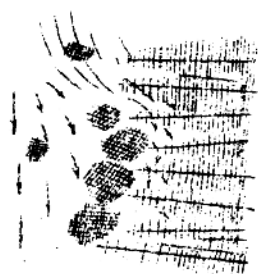


图12 柱状晶粒前沿粘附的树枝晶浮动晶粒。强进给流的路线

在上述过程中，各边的柱状区立即订止生长，而前沿则因连续的浮动晶粒粘附其上而向前发已。在继续不断的对流液流和进料流的情况下，现有的进给流沟将向内和向上生长，沟口与前沿齐步前进。等轴区的外下是由浮动晶粒附在前沿而形成。这样形成的错综复杂的晶界间和枝晶间的通路系统，可能在这个区域留下无数微小的缩孔。

随着某些进给流沟的前进，所有沟槽都通入冒口金属熔池（图1）这可能在转化了的条件下，出现在前进的后期。由于沟槽通路在前边，对流运动可能继续着，但是速度很慢，而且晶粒可能交松散也积聚。当接近顶下熔池，前沿向外转，有关的进流沟跟着转可能在沟口上晶粒运动的影响下，甚至达到它们本身也外转的程度（图1）。在沉降晶粒的中心横中结束的进流沟（图8）将在以后讨论。

当所说的这类进给流沟凝固时，这些沟槽就转化为鬼线。凝固的进行是由开始点起直到顶下，由于沟槽液体的较多的偏析组织，它的凝固要迟于固液混合物的周围集聚体的凝固。正如A和J. Pokorny

所指出的和图8所示的，适当的宏观浸蚀后的鬼线可能表现为外百较纯的暗的浸蚀带和里百偏析的亮的浸蚀带，后者常含有孔穴。由于沟槽液体的凝固主要是在从钢锭边的冷却情况下出现的，估计这就是纯——不纯和缩孔的顺序。暗和亮的地带之间的平滑的分界线就是进给液流凝固过程中液体运动的结果。可以假定进流沟在前进中偶然会偏离直线通路，走向与流的方向有局下变化的各种方向，因此一种长的连续的鬼线可能作为钢锭的纵截面中的一排分散带出现。当钢水是在粘土或砂模中浇铸，柱状晶粒的缓慢生长被离表面不远的粘附着的浮动晶粒所阻止，如鬼线起始下位所示那样。

运转的晶粒粘附在柱状晶粒前沿的倾向，估计在底角，边与底的前沿之间特别强烈，因为那里下降的液流突然向内转。由于液流的动量和进给的吸力，晶粒被推向角区的有限下分。因此，粘附着的晶粒的累积在这个地方要比任何其它地方早，并且很快地沿着侧边前沿向上和在底前沿上的一定距离内向内散布开来。当这两个前沿因增加晶粒而向前发展时（前者向内，后者向上）角架，即架子就向上和向内移动。对这样一个过程，Andrews和Gomer已作了图介说明，并已复绘在本文图4和5。Kohn用凝固前沿的角区域的不规则形状的方式提出同样的证据。这种不规则性早就开始，在相当长的时间内向上和向内移动，然后消失在也许是钢锭高度的 $\frac{1}{2}$ 或 $\frac{1}{3}$ 处。如图5中所见，这种架子区含有象它形成时出现的那样的鬼线。图5中所示的这种架子说明沟，即坑和脊的存在。后者可能表明，晶粒向运动着角端附近的侧前沿冲击中的不规则性。坑也许来源于进给流沟。这个期间架子区内下发生些什么，以后再讨论。

在设法用这里所说的钢锭中鬼线形成的理论来说明如图10所示的硬脂特锭侧壁中的A形偏析形式时，得出以下的结论。

在硬脂特锭中，以下的现象可能仍然出现：由对流和进给引起的液体运动；浮动晶粒及其于前进侧前沿的粘附和外流液体的偏析干扰进流沟结果迟延了凝固。

产生的偏析组织与钢锭中鬼线的组织是有差异的，这种差异可能是上述硬脂特锭中特别缓慢的冷却速度造成的，因为实际上消灭了液

体的对流运动。人们相信，所谓的A组织是在类似鬼线出现的条件下发源的，除非粘附物出现比较均匀。这种粘附物出现比较均匀的情况，或者是因为浮动晶粒小，或者可能是由于象在凝固的后期，浮动晶粒经过前沿缓流。晶粒由于冷铸的结果可能是小的和球状的（图2），或者如后百所述，枝晶骨架破裂成小碎片。图6和图8表明A组织和鬼线都出现的区域。图13表明粘附在生长着的柱状晶粒前沿上的晶粒是何等的小。那里很难有任何阻碍进给流的大块区域出现，因此，不可能形成大的进流沟。而对流和进给流的结合，可能会使小的晶粒排列成这样一种形式，即在流的斜向的晶粒间有狭窄的进流沟在这方百，图2、6和8中的细的偏析斜纹可以说明。



较大晶粒的粘附所产生的大的进流沟，甚至当该进流通过小晶粒排列成形成A组织图13 粘附在柱状晶粒前沿的小的球状浮动晶粒。狭窄斜的进流沟均匀分布

当A组织和鬼线出现在上述同一区域时，A组织的细纹比鬼线的细纹的斜度更陡。当细纹的走向与前沿上的总的合成流向一致时，鬼线的扩巨方向或许受沟口的下坑上粘附晶粒的出现情况所支配。

鬼线出现在所有的大钢锭和用粘土或砂模浇铸的小钢锭中，但是，根据作者的了介，并不出现在通常生产的小钢锭之中，然而这种钢锭冷铸时可能出现A组织。在小的普通钢锭中，在较高的温度下浇铸，鬼线产生所需条件在任何的生长期都不会造成，因为浮动晶粒很少，而且柱状前沿前进太快，使晶粒不能形成粘附群。

#### 轴向区域

melford和Granger 研究了一只2吨重的1% C - 1% Cr钢锭。根据锭模的不同位置沉降的晶粒的电子探针显微分析，他们发现，晶粒在其随循环钢液流动在整个时间一直在继续生长，Cr含量几乎不变（低于平均值），钢水中的附属元素渐渐聚集。

对改造形成轴向区的凝固过程作了以下努力，这主要是根据两种情况：(1)前进着的凝固前沿中已证明不规则性的“架子”存在一个相当时期，(2)根据 Andrews 和 Gomer 的见解，大下分钢液的主循环系统激引出一个方向相反和速度较快的次一级循环系统，两个系统都逐渐向上和向内退缩。

如前所述，足够速度的液流，带着浮动的晶粒，连续不断地袭击表凸，迫使下降的液流向内转，这样就形成架子并使架子不断生长。结果是，在后期，或者因为液流的速度下降晶粒通过架子的突出处未被粘住，或者因为液流中剩余的晶粒很少，上升的骨架消失。当架子存在时，它决定向内的液流通道的状态，这是可能的。这个向内的液流的主要下分将继续参与原有循环系统的上升轴向流，看来也是可能的。但是，很少受上述向内液流的快速运动干扰的底下熔池，自然地以一种反方向的循环来适应这个运动。在这种平衡条件下，底下的柱状区有可能继续生长一段时间，但它因晶粒受重力沉降，即松散堆积，而立即停止生长。这样，沉降晶粒的小山就在增长的骨架下的熔池中生长起来。由于架子区内下的间隙向上变狭，这个小山呈锥形或金字塔形。在循环时，它的顶表面将对着架子形成一个自然的上升斜坡，然后成碗形，这是 Kohn 和 A 和 J. Pokorny 观察到的。这个时期顶下轮廓的不规则性是由于晶粒的松散堆积和液流流动的变化造成的。当顶下生长时，它的轮廓就变成宝塔形，这可从图 9 中看出，这个图取自一个 35 吨钢锭的中间高度处。相仿这个变化是由于从四周的冷却渐渐超过从底下冷却的结果，这时底下冷却对凝固过程的影响马上停止。骨架弄平滑以后，相对方向的循环就不再存在，小山就从原来循环系统所带的沉降晶粒中生长，这时生长得较快。

再回到晶粒沉降的早期的情况，晶粒周围的下分钢液在积聚过程中要经过叠决并加入液流。沉降过程中晶粒的下沉达到快于钢水的程度时，类似的析出可能已经出现。因此，此时小山的平均成分，由于晶体的纯度和钢液分身的减少，表现出负偏析，这时球状晶比树枝晶表现更为明显，枝晶内仍保留着枝晶间的钢液。当小山和向上位移的钢液偏析更剧时，负偏析逐渐变为正偏析，在冒口熔池处达到最大值。



带着晶粒的偏析液在小山上的凝固是受等温线的运动所支配的，并且是在恒定的进给流情况下出现的。在小山的下下，少量的钢液和缓慢的冷却速度只引起较低的收缩应力，不会出现明显的宏观偏析。在其上下，多半在钢锭的舌至舌处，除冒口熔池外，等温线变得平缓，沉降的晶粒被送到比较热的中心区就停滞不前，最终的凝固将出现在中心区内极大高度的向上移动的V形轴线区通过长而狭的沟槽进给的液流与高的应力有关，晶粒的聚合偶而被撕裂，这就产生V孔穴和V偏析。总而言之，没有明显偏析的V组织可能是由小山晶粒受各边冷却的影响而下沉引起的，但是，V偏析的形成则必须有从不循环的中心区内极大高度的V形轴线区的冷却。在小钢锭中，小锥度的钢锭有许多V偏析，但在锥度大的钢锭中未发现有V偏析，而只有V组织，这种事实更证明了这个结论。

Blank和Pickering发现，大型钢锭的底下沉积锥中的晶粒一般是等轴的，但是表现得明显地沿着向底下的温度梯度对齐的倾向。这也许是，在这种区域中沉降速度已经很慢，从而给上升着的小山上的定向晶粒有优先生长的机会。

图8和9示出了一个35吨钢锭中间高度上小山中沉积晶粒的两个连续下分之间宝塔形的鲜明的分界。极小尺寸的晶粒，特别是两下分之一中的小晶粒，很难能说是冷铸造成的。不如说是由于可能产生枝晶的浮动晶粒骨架，在随着循环液体运动中，已变成碎片，这种情况可能是循环流在通过骨架区域时出现的紊流所造成的，循环流的重复通过可能产生极度的破碎。破碎了的晶粒在粘附晶粒所形成的区域和在沉积晶粒的小山中均可能出现。如图8和9中所示，小山的连续下分之间的鲜明的分界可能是由骨架消失之前的形状突变所引起的，Kohn也曾提到过这种鲜明的分界的特征。

图8和9示明了刚才曾说过的在小山中明鲜分界上终止的鬼线。人们认为，在底下角区域发端的进给流沟已在骨架区生长。当骨架消失时，在这下分中仍然出现的液体补充给进流沟，使进流沟在生长着的侧壁或在小山中生长，最后贯穿这个小山，到达它的顶下，在那里，沟中仍然需要的进液量在沉降完成之前局部得到满足。