5）若干个奥氏体晶粒将石墨球包覆，然后扩散匀化，形成年轮状等成分晕圈。石墨球外围奥氏体晕圈的形成过程各阶段的组织如图 3-37 所示。

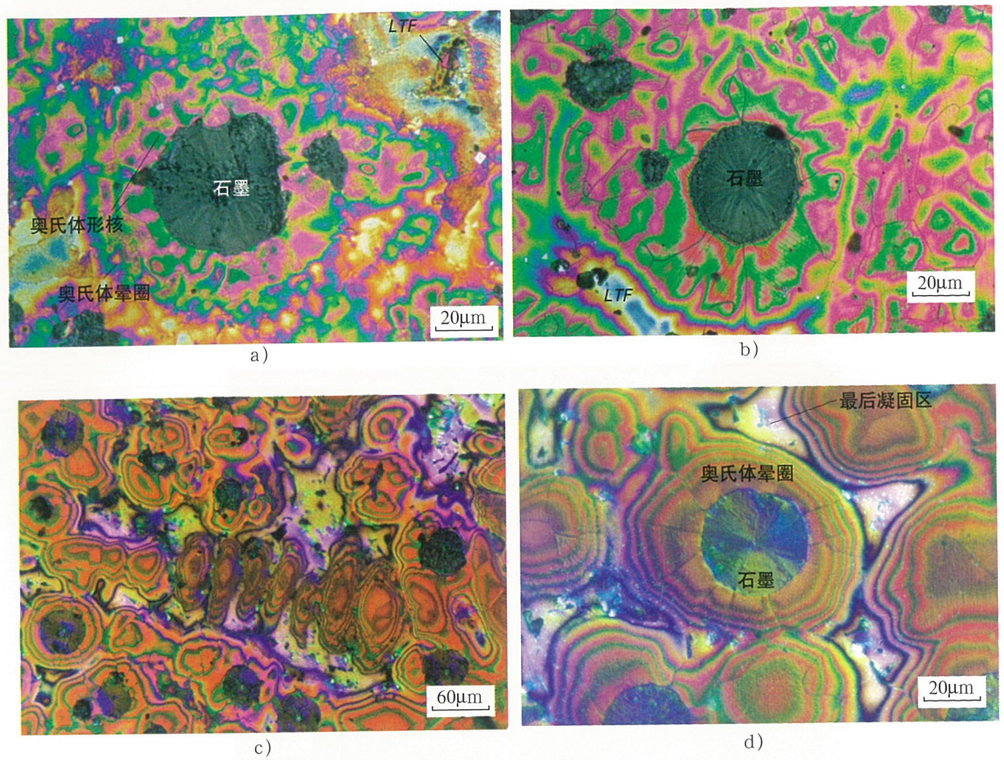


图 3-37　石墨球外围奥氏体晕圈的形成过程的组织显示

a）奥氏体形核　b）晕圈枝晶生长　c）枝晶圆整化　d）晕圈形成

3.4.3　石墨球在奥氏体晕圈内的生长

石墨被晕圈包围后的进一步长大，是通过溶体中的碳原子经奥氏体晕圈向内扩散进行。由于碳通过奥氏体壳的扩散速度比铁液约小 20 倍，所以被奥氏体壳包围下的石墨生长速度慢，共晶结晶时间长。据实际测定石墨球与液体直接接触的生长时间十分有限，所以，球墨的长大主要在奥氏体包围下完成。碳当量为4.5%的球墨铸铁，共晶转变前析出的碳的质量分数只有 4.5% ~ 4.3%=0.2% ，而在共晶转变时却要析出质量分数为 2.0% ~ 2.5% 的 C。对于一般壁厚的铸件在共晶转变刚开始时，没被奥氏体壳包围的石墨球最大直径不大于 10 ~ 15μm [35、70]，共晶转变终了最大球径可达 50 ~ 100μm，可以看出石墨球在共晶阶段的生长占主导地位。

石墨被奥氏体壳包围后的生长包括两个关键环节：①碳原子通过壳体由熔液向石墨晶体扩散。②铁原子自石墨 - 奥氏体界面向外迁出。

石墨被奥氏体包围后，在熔液 - 奥氏体 - 石墨之间形成两个界面，即：L-A 和 A-G。图 3-38a 示出各界面的含 C 量关系，在 L-A 界面奥氏体的含 C 量大于 A-G 界面的 C 量，

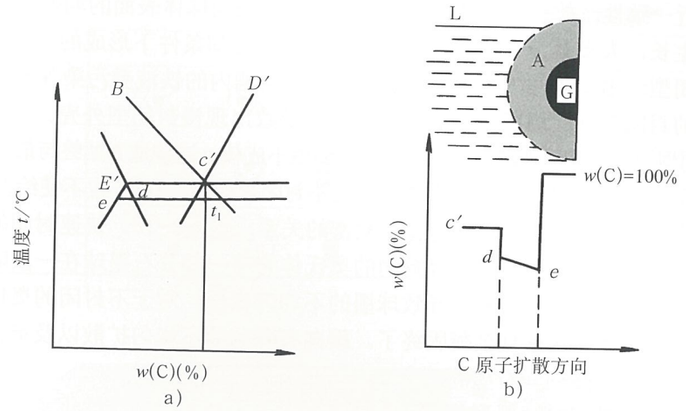


图 3-38　碳原子在相界面的扩散[70]

a）相图　b）界面处含 C 量的关系

L- 熔液　A- 奥氏体　G- 石墨

导致 C 原子从 L-A 界面扩散（见图 3-38b），由于 C 原子在奥氏体壳中的有向扩散，使 L-A 面上奥氏体的 C 低于熔液平均成分，从而促使液相中的 C 向奥氏体溶解。由于碳原子的有向扩散，使得在 A-G 界面的奥氏体含 C 量增加，逐渐在奥氏体的（111）晶面之间形成一个与奥氏体（111）平行的碳原子面。这一晶面处于平衡位置不停的做热振动，当获得足够能量之后就跃迁到另一位置。接近结晶温度时，跃迁变得极其频繁。结果，铁原子不断从A-G界面自扩散移出，空出位置使碳原子逐步结晶成石墨晶体新的（0001）结晶面。如果在（0001）晶面上存在螺旋生长台阶，这一共格生长将会得到加速。

为使石墨不断长大，必须保证在原来已被奥氏体占据的地方能空出位置，让石墨有充填的空隙，为此，铁的扩散移出是不可少的。由于碳原子比铁原子直径小得多，扩散速度比铁快，故铁的扩散是影响石墨长大的决定性环节。

3.4.4　石墨形状与奥氏体外壳的关系

当球墨在液态下自由生长时，因为奥氏体壳尚未生成，石墨形状与奥氏体无关。一旦石墨球被奥氏体壳包围，石墨的最终形状不可避免受到奥氏体外壳制约。

碳原子以石墨方式在奥氏体晕圈内析出时，由于石墨与奥氏体比容不同，必然对奥氏体产生较大的膨胀压力。当共晶将结束，各共晶晶粒互相接触，型壁又具有反压力的时候，这种膨胀力进一步增大。奥氏体壳在应力作用下发生塑性变形，变形结果引起高密度位错缠结，导致基体形变，使基体因位错密度增高而强化，铸型刚度越高，强化效果越好[93]。

从图3-33看出，球墨外围的奥氏体壳是由若干个独立生长的奥氏体晶粒组成的。它们的形核时间及生长速度不尽一致从而影响奥氏体外壳的封闭。奥氏体晶粒形成的开始阶段构不成完整外壳，生长一定时间以后，彼此相互接触，外壳最终封闭。封闭前，在奥氏体晶粒间存在着金属液体，即形成液体通道（也称沟槽）。

根据奥氏体外壳的封闭过程，可将其分为三种类型[94、95]：

（1）快封闭型：石墨球长大到一定尺寸后，奥氏体在球墨界面贫碳区以快速形核，短时间内很快地形成封闭的奥氏体壳。随后，球墨的长大依靠碳的不断向里扩散迁移，由于A/G