a. 共晶前：析出初生石墨球或奥氏体枝晶。

b. 共晶开始：碎块状共晶石墨核心在奥氏体枝晶旁优先形成，随后在枝晶周围长成碎块状石墨——共晶团（见图 3-75a），共晶团的形核与初生石墨球没有关系。

c. 大量共晶反应：共晶团以松散偶合方式快速生长(见图3-75b)，碎块状石墨大量析出，释放的结晶潜热使共晶温度平台明显升高。

d. 共晶末期：正偏析元素 Mn、V、Cr 以及 Mg 富集于最后凝固区。在 *LTF* 区有时可观察到细小、圆整石墨球（图 3-75c），这是由于含 Mg 高所造成。

图3-76示出碎块状石墨的形成位置，清楚看出它并不出现在最后凝固区。从表3-17给出的元素分布数据同样证实此结论的正确性。正偏析元素 Mg、Cr、V、Mn、P 在残余液体区最高，在 Chunky 石墨区次之；反偏析元素 Si、Cu、Ni 则相反。

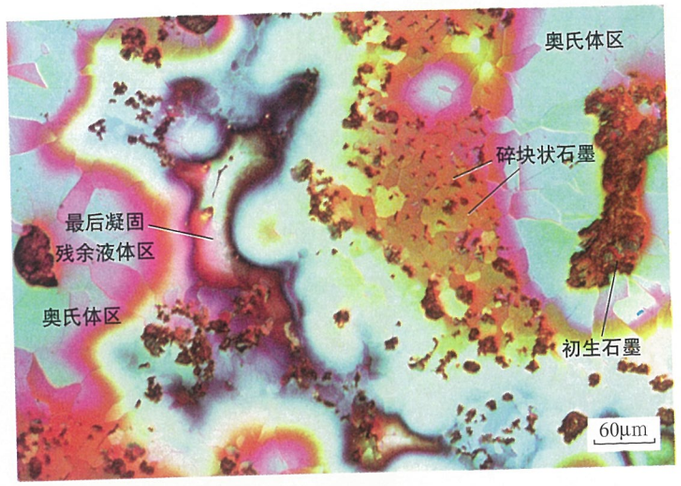


图 3-76　碎块状石墨的形成位置

表 3-17　灰斑区（图 3-76）**内各显微组织的化学成分**（质量分数，%）

位置	Si	Cu	Ni	Mg	P	V	Cr	Mn
试样平均成分	2.86	0.03	0.07	0.057	0.034	0.033	0.030	0.010
围绕初生石墨的奥氏体	2.80	0.047	0.084	0.0031	0.0044	0.0027	0.020	0.0023
碎块状石墨区	2.75	0.045	0.071	0.025	0.0030	0.080	0.022	0.04
残余液体区	2.50	0.027	0.056	0.0790	0.0430	0.240	0.380	0.090

碎块状石墨的形成机理，作者认为，缓慢冷却造成小的热学过冷度是生成碎块状石墨的根本原因。过冷度小时，离异共晶条件遭到破坏，共晶方式向非离异（即共生）转变。石墨与奥氏体的相关性由非偶合过渡到松散偶合状态[115]。松散偶合是指石墨与奥氏体的生长关系不像片状石墨那种紧密相依的共生关系（奥氏体紧贴着石墨片侧面生长），而是在石墨周围可出现部分液态区或液体沟槽，为石墨分枝提供了生长空间，石墨有可能在这些地方进行再分枝。但是，又不像球状石墨那样分枝频繁，而是在石墨分枝旁形成奥氏体，将石墨分枝间隔开，使小角分叉变为大角度分枝。过冷度对共晶偶合度、石墨形状的影响关系见图 3-77[87、114]。Itofuji的近期工作[116]对Chunky石墨的形成提出如下认识：初生石墨在液态下最早生成，生

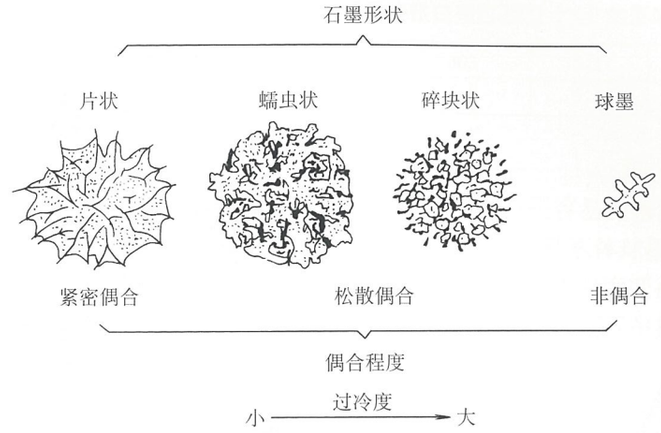


图 3-77　过冷度对共晶偶合度的影响[87、114]

长到 10μm 左右被奥氏体壳包围，它们与碎块状石墨的形成无关；Chunky 石墨是在奥氏体枝晶界面上成核的，并沿液体通道生长，生长前沿能通过沟槽与液体接触；球化处理到开始凝固的时间以及凝固总时间越长，则越易促使 Chunk 石墨形成。

在缓冷条件下，某些化学元素对碎块状石墨的形成有重要的促进或抑制作用。实验发现不溶于铁的 Ce[112]、Ca[33、117、118]、Sr[118、119]以及富集于奥氏体的反偏析元素 Si、Ni、Cu 的不均匀分布会增加Chunky石墨出现机率，因为这些元素或降低奥氏体熔点[114]或扩大共晶反应区域，延长凝固时间[47]。

防止 Chunky 石墨的措施：采用激冷铸型、冷铁、吹风、水冷型壁等最大限度提高冷却速度、将凝固时间限制在 2h 内；尽可能降低成分中含 Si 量，Si 含量与出现碎块状石墨之间的关系见图 3-78;精选炉料，减少微量元素的不良影响；添加微量元素 Sb、Sn、Bi、Pb、As、Te、B，借助这些元素与Ce反应，生成金属间化合物，减少Ce的有害作用抑制Chunky石墨形成，文献[120]发现Sb还有清除石墨／熔液界面上氧元素的功能，减少或阻止氧在石墨界面上吸附，阻止碎块状石墨产生。

5. *LTF* 区的组织　厚壁球墨铸铁的石墨球数少，球间距大，*LTF* 区所占面积明显变宽，见图3-79所示。由于凝固时间长，偏析元素有更多时间向 *FTF* 或 *LTF* 区扩散，导致厚壁球墨铸铁中元素的偏析系数比薄壁大。在*LTF*区富集的正偏析元素多属提高奥氏体稳定性元素，也是促进碳化物形成的元素，所以，在厚壁球墨铸铁*LTF*区容易生成珠光体及碳化物。等温处理的（ADI）球墨铸铁，*LTF* 区的成分分布对转化组织产生重要影响（见图 3-80）。元素分布均匀的薄壁铸件，铁素体针在奥氏体基体上从球状石墨四周开始成核，向*LTF*区内生长，得到较均匀的奥氏体组织。但是，对于厚壁球墨铸铁则不同，锰在*LTF*区含量明显增多，大大提高奥氏体稳定性并降低马氏体（M）温度。Mn 阻碍等温转化第一阶段反应的进行，有可能在 *LTF* 区发生第一阶段反应完成之前，在先凝固 *FTF* 区的奥氏体晶内已经进行第二阶段反应；与锰分布相反，硅聚集在早凝固的奥氏体内和石墨球周围，使等温转化的第一阶段反应首先在这区域进行。另外 Si 在 *LTF* 区的贫化又推迟在晶间区域的等温反应。综合上述因素，由于Mn、Si偏析，在不同区域奥氏体的等温反应动力学会出现差异，导致加工窗口缩小，严重时，会使加工窗口关闭。于是增大等温淬火发生第二阶段反应的可能，导致珠光