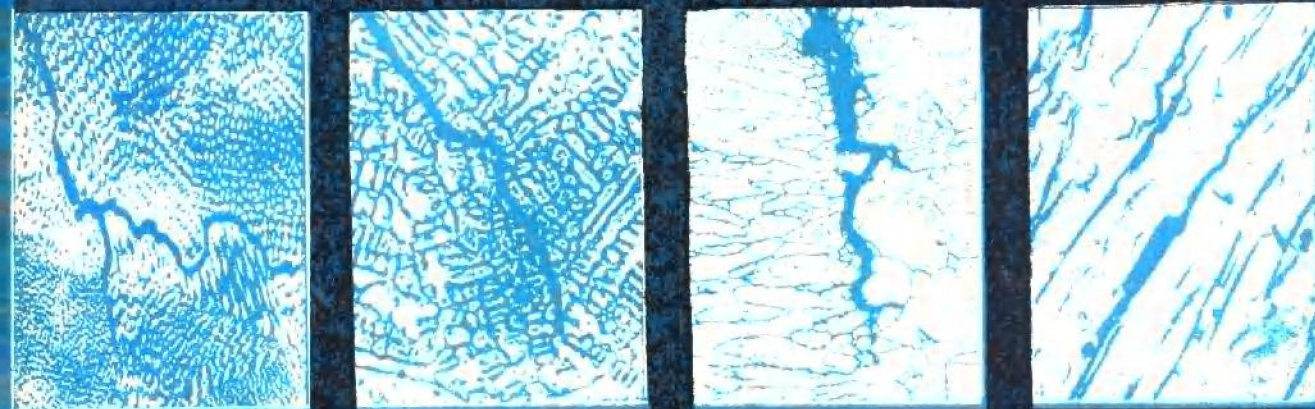


焊接裂缝金相分析图谱

HANJIELIEFENGJINXIANGFENXITUPU

第一机械工业部哈尔滨焊接研究所 编著



黑龙江科学技术出版社

-64

焊接裂缝金相分析图谱

第一机械工业部哈尔滨焊接研究所 编著

黑龙江科学技术出版社

一九八一年·哈尔滨

内 容 提 要

本书根据金属学的基本原理,对焊接裂缝的形态、机理、分类进行比较详尽的论述。通过对常用焊接钢种与金属的焊接裂缝分析,划分了属于热裂和冷裂两大系列的八种裂缝,并指出了各类裂缝的典型形态,以及它同工艺条件之间的相互关系;同时也论述了避免产生裂缝的工艺途径。本书中列举的各种典型裂缝,均有从低到高倍数断口金相分析图片,还有部分电子扫描图片,共150余幅。本书适用于国防、造船、石油化工、各类机械制造部门从事焊接技术工作和焊接金相研究的科技人员、工人以及有关工科大专院校师生参考。

焊接裂缝金相分析图谱

第一机械工业部哈尔滨焊接研究所 编著

黑龙江科学技术出版社出版

(哈尔滨市南岗区分部街28号)

黑龙江省教育局印刷厂印刷

黑龙江省新华书店发行

开本:787×1092 1/16·印张:4·插页38·字数47,000

1981年1月第一版 1981年1月第一次印刷

印数1—15,600

书号 15217·001

定价(简精):3.50元

序 言

随着焊接技术的进展，焊接裂缝的分析，在解决焊接质量问题上日益起着重要的作用。

焊接裂缝分析的主要任务，在于确定裂缝的性质，并尽可能地从形态学上完整地说明裂缝萌生与扩展的特征。

金属中裂缝萌生与发展的过程遵循裂缝产生的机理。在焊接过程中，裂缝的产生，与焊接时的冶金和工艺等因素有着内在的联系，因而可以根据裂缝的形态特征来判明裂缝的性质，推断裂缝产生的某些条件，从而更有效地采取措施，防止它的产生。

编写《焊接裂缝金相分析图谱》一书的目的，一方面在于从我国焊接技术进展的实际情况出发，提供一个从低倍到高倍对焊接裂缝进行形态分析的原则；另一方面，也在于从焊接裂缝金相分析的实践中，试图整理出一些典型的素材以丰富焊接金属学的内容。

对于焊接接头金属中所产生的裂缝，本书只将熔化焊时直接与焊接冶金因素、工艺因素有关而产生的裂缝定名为“焊接裂缝”。

书中对常用焊接钢材中的焊接裂缝进行了分类，列出了典型形态图片；从理论上阐述了各类裂缝形成的机理，并对裂缝的形态特征作了理论上的解释。

本书是在综合与整理有关焊接裂缝机理的基础知识上，结合我们对焊接裂缝分析的一点体会进行编写的。由于素材有限，加之我们的理论水平与分析能力不高，书中难免有不足之处，敬希读者指正。

本书在编写过程中得到了东方锅炉厂、哈尔滨锅炉厂、兰州石油化工机器厂、武汉锅炉厂、上海锅炉厂、一机部通用机械所与六机部 725 所等单位的大力支持，在此一并致谢。

本书初稿征求意见时，承蒙潘际銮教授、斯重遥研究员，周振丰、张文钺副教授等同志提出许多宝贵意见，在此深表谢意。

本书由田万钰同志执笔撰写；试样搜集与金相图片加工，主要由李砚珠同志负责，参加此项工作的还有张让二与孙秀芳同志；王长林与阎家树二同志摄制了裂缝断口的扫描电镜图片；《焊接》杂志编辑部对全书进行了校审加工。

目 录

第一章 焊接裂纹的分类	(1)
第一节 概述.....	(1)
第二节 焊接裂纹的分类.....	(2)
第二章 裂纹的形成机理与形态	(10)
第一节 结晶裂纹.....	(10)
第二节 液化裂纹.....	(19)
第三节 高温低塑性裂纹.....	(27)
第四节 高温孔穴型开裂.....	(32)
第五节 再热裂纹.....	(34)
第六节 延迟裂纹.....	(39)
第七节 热应力裂纹.....	(52)
第八节 层状撕裂.....	(54)
结语	(56)
参考文献	(57)

第一章 焊接裂缝的分类

第一节 概 述

焊接，是机械制造中的一项重要工艺。随着科学技术的进步与工业生产的发展，它在国民经济中得到了日益广泛的应用。

众所周知，金属的焊接过程是在热力学不平衡的条件下进行的。由于金属材料本身的冶金因素和产品制造所特定的工艺因素，以及焊件设计所构成的结构因素等的综合作用，特别是当焊接接头具有复杂的几何形状，应力集中程度高，应力状态恶劣时，焊接与其他的热加工工艺相比，是最容易出现缺陷的一种工艺。

焊接过程中，裂缝是最严重的一种工艺缺陷。为提高焊接的工艺质量和焊件的使用寿命，克服焊接裂缝成为焊接技术中急需解决的首要问题。

导致焊接接头金属开裂的诸因素，大体可归结为两大类：即冶金因素和力学因素。

金属的熔化焊，一般地说，是通过局部冶金、熔融的金属结晶凝固的办法，将两块金属连接成一个整体。在焊接过程中，由于不平衡的快速加热与快速冷却，焊接接头金属承受了热循环的作用；在接头的不同区域，加热的峰值温度不同，冷却速度也不同，这样就产生了不均匀的组织区域。此外，由于热应变不均匀，不同区域间会产生不同的应力联系。所有这些都使整个焊接接头金属处于复杂的应力—应变状态。内在的热应力、组织应力与外加的拘束应力，以及应力集中相叠加，构成了导致焊接接头金属开裂必不可少的力学条件。

另一方面，由于焊接是一系列不平衡的工艺过程的综合，在快速冶金与凝固的条件下，必然产生不同程度的物理与化学状态的不均匀性。比如，在焊缝金属中，由于结晶偏析，使化学成分分布得不均匀，其中，当低熔共晶的组成元素如 S、P、Si 等发生偏聚富集，将对焊接裂缝的形成起重要的作用；焊接冶金过程带来的夹渣与夹杂，以及氮、氢、氧等气体元素处于饱和状态；此外，在热影响区金属中，快速加热与冷却使金属中的空位浓度增加；由于材料的淬硬倾向，使金属发生了不利于提高抗裂缝发生与发展能力的组织转变。在一定的力学因素下，这些都将成为促进焊接裂缝萌生与发展的冶金因素。因此，对于焊接接头金属来说，一定的冶金因素与力学因素的配合，是焊接裂缝产生的充分而必要的条件。

如上所述，既然焊接裂缝的产生与焊接过程的冶金因素与力学因素有关，那么，裂缝的形态与裂缝的产生条件，必然有某种本质上的联系。也就是说，裂缝的形态，在某种程度上是导致裂缝产生的本质因素的具体表现。因此，分析裂缝形态，对解决焊接裂缝问题，是一项十分重要的技术环节。

本图是在阐述焊接裂缝机理的基础上，分析裂缝的形态与其产生条件之间的联

系，从而对焊接裂纹进行分类。为了使理论与实践联系的内容更为丰富完整，从大量的焊接金相分析中，按类别归纳了典型的裂纹形态图片。这样，一方面从理论上为焊接金属学的完整化提供一些内容；另一方面，从实践上为正确地鉴别焊接裂纹，进而有效地解决裂纹问题提供依据。

第二节 焊接裂纹的分类

焊接时，在焊接热源的作用下，焊缝坡口内的填充金属（焊条或焊丝）被熔化，母材金属的边缘部分也被熔化，两者混合，共同组成焊接熔池中的液态金属。熔融的金属随后冷却凝固，建立起牢固的强度联系，将两块金属连接成一个整体——焊接接头。不同形式的焊接裂纹，产生在焊接接头形成过程的不同阶段。要科学地认识焊接裂纹、掌握它与产生条件之间的关系，首先要正确了解焊接接头的区域结构、宏观组织特征，以及与此有关的焊接热过程。

1. 焊接接头的宏观组织

熔化焊时，在焊缝坡口内，母材的部分金属熔化混入焊缝金属中。由于填充金属与母材化学成分的差异，母材金属的熔入，对填充金属中的某些合金元素起了稀释作用；对某些非合金化元素，特别是碳、硫、磷等，则起到提高浓度的作用。图1为焊接接头宏观区域示意图，图中由熔合线与焊缝表面线所包围的区域是焊缝金属，它所勾画出的轮廓线也就是焊接时焊接熔池的边缘线。与焊缝金属毗邻的母材部分称热影响区，紧靠熔合线的热影响区部分常称近缝区。焊缝金属与母材金属的交界面是焊接熔池的边缘表面，在横截面的宏观组织中常称它为熔合线。实际上，在横截面上焊缝与母材交接处并不是一条实在的线；在焊接过程中，它是液相与固相同时并存的一个区域，亦即从焊缝向母材过渡的区域，称为熔合区。由于这个区域中液相与固相同时并存，所以又称半熔化区。

图2为焊缝金属结晶凝固时熔合区的示意图，图中箭头4所指的虚线，即理想中的熔合线。两条平行虚线间的部分是母材近缝区中晶粒过热长大、晶界熔化或部分熔化的部分，统称为晶间液化区。显然，所谓熔合区或半熔

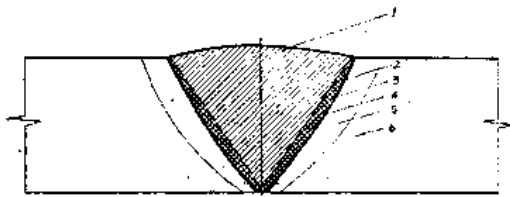


图1 焊接接头宏观区分示意图
1—焊缝金属 2—焊前坡口面 3—母材金属熔
化区 4—熔合线 5—热影响区 6—母材

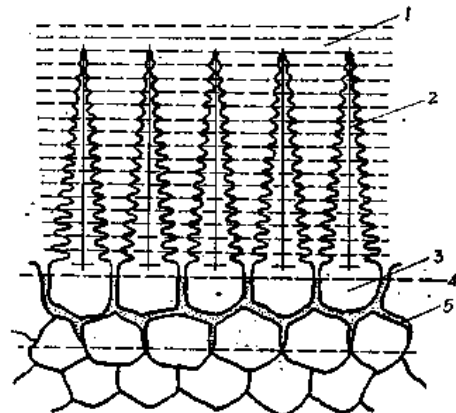


图2 焊缝金属结晶凝固时熔合区状态示意图
1—熔融的焊缝金属 2—成长中的晶体 3—母材
近缝区晶粒 4—熔合线 5—熔化的晶界

化区，就是虚线4附近的固相晶粒与液相晶网所构成的区域。这个区域的上部边界是焊接熔池底部树枝状晶体生长时的根部，下部边界应当是母材近缝区中发生晶间液化的尽头处。因此，从热力学平衡状态来分析，焊缝金属与母材金属的接合，就是液相与固相相互渗透交错、随后结晶凝固而实现的区域接合。根据这一分析，再考虑到焊接熔池边界出现层流，也就是说在熔池底部实际没有搅拌、不发生紊流的情况下，焊缝底部的一薄层金属可看作是全由母材重熔后结晶形成的。因此，焊接接头特别是焊缝与母材金属成分上有差异的接头的结构，又可按图3划分成不同的区域^[1]。

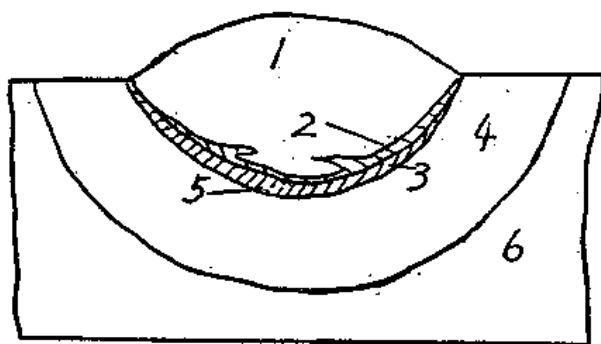


图3 焊接接头金属的区域组成示意图

1—焊缝中的混合熔化区 2—焊缝中的未混合熔化区 3—母材中的部分熔化区 4—受热影响的母材区(热影响区) 5—实际的熔化与未熔化部分的分界线 6—未受热影响的母材区

焊接过程中，在母材一侧，离开焊接熔池，温度急剧下降。因此，在母材热影响区中形成了一个陡降的温度梯度。对于既定的母材金属，焊接接头中的温度梯度（温度场）决定于焊接时的工艺条件。接头的不同部位，受热的峰值温度不同，冷却速度也不同，这就构成了不同的组织区域。在热影响区中（图4），受热循环的加热温度不同，可以分为过热的粗晶区、正火的细晶区、不完全正火区与回火区。此外，在接近熔合线处，由于晶界局部区域熔化，称为不完全熔化区，也就是图3所示的部分熔化区。从图中可见，不同的组织区域受热的状态不同，以及奥氏体化条件不同，因而冷却转变就有差异。考虑到焊接结构实际上是具有有一定刚性的拘束系统，焊接接头金属的冷却收缩将受到拘束作用，冷却中最后转变的区域受到拘束作用将最大。因此，焊接接头金属，作为焊接结构整体的一部分，所处的应力状态是十分复杂的。

2. 焊接裂纹

如上所述，焊接过程是一系列不平衡的工艺过程的综合。该特性将从本质上与导致焊接接头金属断裂的冶金因素和力学因素发生重要的联系，譬如，焊接工艺过程与冶金过程

以上是从热力学平衡状态来着重分析焊接接头中焊缝金属一侧的组成结构。在母材一侧，也就是受焊接热循环作用的母材区域，由于受热条件不同，热力学状态不同，所以也就具有不同的区域组成。

焊接过程中，在母材一侧，离开焊接熔池，温度急剧下降。因此，在母材热影响区中形成了一个陡降的温度梯度。对于既定的母材金属，焊接接头中的温度梯度（温度场）决定于焊接时的工艺条件。接头的不同部位，受

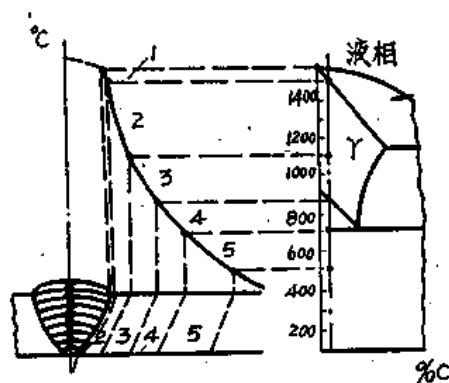


图4 焊接接头热影响区的组织区域与温度场

1—不完全熔化区 2—过热区 3—正火区 4—不完全正火区 5—回火区

的产物即物理的、化学的与组织上的不均匀性、熔渣与夹杂物、气体元素与处于过饱和浓度的空位等。所有这些，都是与裂缝的萌生与发展有密切联系的冶金因素。从力学因素方面看，焊接热循环特定的温度梯度与冷却速度，在一定拘束条件下，将使焊接接头金属处于复杂的应力—应变状态，从而为裂缝的萌生与发展提供必要的条件。在焊接过程中，冶金因素与力学因素的综合作用将归结为两个方面，是强化金属联系，还是弱化金属联系。如果在冷却时，焊接接头金属中正在建立的强度联系（塑性与强度）在一定刚性拘束条件下能够顺利地收缩应变，也就是说，当焊缝与近缝区金属能承受住外加拘束应力与内在残余应力的作用时，裂缝就不易产生，接头金属的裂缝敏感性低。反之，当承受不住应力的作用时，金属中的强度联系容易中断，就会产生裂缝，在这种情况下，接头金属的裂缝敏感性高。

焊接接头金属从结晶凝固的温度开始，以一定的速度冷却到室温，其裂缝敏感性决定于变形能力（塑性）与外加应变的对比以及变形抗力（强度）与外加应力的对比。然而在冷却过程中，在不同的温度阶段，由于晶间强度与晶粒强度增长的情况不同、形变在晶粒间与晶粒内分布的情况不同、由应变所诱导的扩散行为不同、应力集中的条件以及导致金属脆化的因素不同，焊接接头中具体的薄弱环节以及使它弱化的因素与弱化的程度也是不同的。因此，金属中的断裂特征与裂缝形态，也就不能是单一的。裂缝的萌生与发展，可以是沿一次结晶晶界，沿再结晶晶界或冷却转变后的二次结晶晶界；也可以是穿晶的，或者是连续直通单道扩展，或者是断续串接成长；可以是脆性或低塑性断裂，也可以是韧性断裂；裂缝可以发生在焊缝金属中，也可以发生在热影响区金属中；视最大应力的方向不同，裂缝的分布可以平行于焊缝，也可垂直于焊缝。总之，焊接裂缝的萌生与发展，其具体特征与形态是多种多样的，但本质上是受冶金因素与力学因素所控制的，当然与所处的温度条件也有密切联系。

必须指出，导致焊接接头金属开裂的冶金因素与力学因素，二者之间并非绝然无关，它们之间也存在着某些内在的联系。比如力学因素中的应力梯度就与热循环特性所确定的温度梯度有关，而后者与金属的导热性又密切相关。又如金属的热塑性变化特性、热膨胀性以及组织转变特性等构成的冶金因素，在很大程度上对焊接接头金属所处的应力—应变状态起着重要作用。此外，随着温度的降低与冷却速度的变化，冶金因素与力学因素也都是在变化着的；在不同的温度区间，它们对焊接接头金属的强度联系所起的作用，是各不相同的。比如，在液相与固相同时并存的高温下，当冷却收缩产生的应变速率不大，由此导致的应力—应变状态并不恶劣；但如果结晶温度区间大，固相线温度低，晶粒间残存的低熔液态金属处，便容易引起应变集中，导致固相金属撕裂，而使裂缝产生。又如，随着温度降低，如果收缩量大，特别是在快速冷却条件下，当收缩应变速率高，应力—应变状态比较恶劣时就容易产生裂缝，但如果金属纯净，结晶温度区小，金属组织的塑性储备高，已经建立起的强度联系能承受住应力、应变的作用，则裂缝就难以产生，因而金属的裂缝敏感性也降低。可是，当金属为某些有害元素所污染的程度高，氮、氢、氧等气体元素的过饱和度大，且组织状态所具有的塑性储备又低时，这些消极的冶金因素与恶劣的力学因素综合作用，就会使焊接接头金属中出现裂缝的可能性大大增加，焊接接头金属对裂缝就十分敏感了。从以上分析可知，焊接裂缝是焊接过程中许多因素相对作

用的结果，它的产生不是绝对的。但是一旦有裂缝产生，从其特征、形态是可以推断出促使裂缝产生的某些主导因素的。这是因为，在焊接过程中，任何裂缝的萌生与发展，总是遵循着金属学的基本规律的；不管工艺因素与结构因素起什么样的作用，裂缝总是具有某些宏观与微观特点，而这些特点又总是与一定温度条件下发生裂缝时金属的热力学状态有关的。因此，可以根据裂缝的形态及其萌生与发展的条件，对它进行分类。

3. 焊接裂缝的区分温度

焊接裂缝常以“热裂缝”或“冷裂缝”来区分，然而对于“热”或“冷”的科学定义还没有建立起统一的认识之前，概念上的含混，往往给在技术上解决焊接裂缝问题带来消极影响。

在早期的文献^[2,3,4]中，热裂缝被认为是在固相线或高于固相线的温度下产生的，是由于在晶间存在液态金属，并承受了拉应力的结果。因此，把热裂缝定义为在高于固相线的温度下，在焊缝金属结晶过程中所产生的裂缝^[5,6]。对于在这一温度区间内产生的裂缝，在文献中命名繁多，如结晶裂缝（кристаллизационная трещина）、凝固裂缝（solidification cracking）、热脆（hot short）、热裂缝（hot cracking）、微裂（fissure）等，有的文献中，也有称之为超固相线裂缝（supersolidus cracking）。

五十年代，对热裂缝的产生开始提出了一些新的内容，如：热裂缝的形成，在某些条件下可能与晶间存在脆性膜有关，开裂可能发生在等强温度以上^[6]的温度。在文献[7,8]中提出，对于镍铬不锈钢及奥氏体合金，热裂缝可发生在低于固相线的温度。这种裂缝产生在大约稍低于再结晶的温度，称为高温低塑性裂缝（ductility dip cracking）^[10]或多边化裂缝（полигонизационная трещина）^[9]。

由于奥氏体钢焊接研究的进展，在六十年代末期，对热裂缝的本质有了较为科学的认识，即焊接接头中的热裂缝，一部分与晶间液膜的出现有关，发生在固相线或固相线以上的温度；另一部分则与高温下某些因素综合作用所引起的晶间塑性降低而导致的晶间脆化有关，发生在固相线以下的温度，前者称为超固相线裂缝^[11]，后者称为亚固相线裂缝^[10]，以上观点基本得到了公认。

在焊接生产中，一些焊接结构由于性能上的要求，如为了降低残余应力、提高热影响区金属的韧性、消除焊接时的残余氢、改善抗腐蚀能力等，需要进行焊后热处理；有的焊件需要在一定高温下工作。这些焊件尽管焊后没有发现任何裂缝，但是在热处理后或在高温下工作了一段时间后（焊后未经任何热处理）产生了裂缝。这些裂缝多在焊接接头的近缝区，以沿晶的形态分布^[6,8,10]。七十年代对这类裂缝进行的研究指出，对于碳钢及低合金钢，裂缝的敏感温度是550~700℃；对于奥氏体钢，大约为900℃^[12~16]。这种裂缝虽然说印象上似乎不是产生在焊接过程中，或者说不是由于工艺因素的直接作用在焊后产生的。但是，裂缝的本质与起因都与焊接过程有密切关系，所以仍属焊接裂缝。文献中将这种裂缝称再热裂缝（reheating cracking）或应力松弛裂缝（stress relief cracking），其裂缝的断裂形态，与低温下的断裂形态迥然不同，具有高温下断裂的全部特征。

由此可见，焊接裂缝的内容是复杂的，各种裂缝显然因机理不同而异，很难用某一

具体的断裂特征来概括所有在不同条件下产生的焊接裂纹的特征。事实上，在焊接过程中，从高温到低温，尽管裂纹机理不同，产生的条件不同，断裂特征也不同。但是，由“热”到“冷”，在热力学条件变化的过程中，金属的断裂特征有某种质的突变，这种突变就是由沿晶断裂过渡到穿晶断裂。因此，根据这一概念来分析促使断裂特征发生突变的热力学条件，有助于科学地划分产生焊接裂纹的系列范围。

焊接裂纹传统地分为热裂纹与冷裂纹两类。关于区分温度，根据热加工工艺的传统概念，将高温与低温点定为 $T = 0.5T_m$ (T_m 为以绝对温度表示的熔点温度)，在文献〔10〕中提出以它定为“热裂”或“冷裂”的区分温度。高于此温度发生的裂纹，称热裂纹；低于此温度发生的裂纹，称冷裂纹。在另一文献〔19〕中，提出将钢的冷却转变温度 A_{r3} 点定为热裂纹与冷裂纹的区分温度。

对前一种，以再结晶温度作为区分温度，这一概念在热加工中是有实际意义的。然而在焊接中，由于各种因素的交互作用，由于晶界弱化与应变在晶界集中导致高温下的金属开裂，可以滞后于再结晶，使裂纹产生在略低于再结晶的温度〔9、10、40〕。按这一温度区分，就可能把典型的高温下的沿晶开裂定为冷裂纹。所以，这一区分温度难以概括高温下的裂纹形成温度。对于后一提法，即将 A_{r3} 温度定为区分温度，其实质上是 将焊接热裂纹定义为在奥氏体状态下的开裂行为，冷裂纹定义为在完成 $\gamma \rightarrow \alpha$ 冷却转变后的开裂行为。对于铁素体型与珠光体型钢，这样确定似乎是合理的，因为只有奥氏体的面心点阵结构才能在高温下存在。组织中的强化相，特别是晶间强化相消失，这种状态正好能与高温下的晶界断裂行为相对应。然而在焊接钢材中，并非所有的钢材与合金都有 A_{r3} 转变点。比如，镍铬奥氏体钢与镍基合金等，它们的焊接接头在某些情况下也可发生冷裂纹，只不过这种冷裂纹与氢的行为无关，不同于延迟裂纹而已，它是由高应变导致的热应力裂纹。从另一方面讲，某些有 A_{r3} 转变的钢，如珠光体型热强钢，或含 Mo、V 的低合金钢，经焊后热处理，尽管处理温度低于 A_{c3} ，不处于奥氏体状态，但在一定条件下，却可发生高温沿晶开裂型的裂纹。这种裂纹只能归类于热裂纹系列，而不能归类于冷裂纹系列。

根据以上分析可见，以再结晶温度和 A_{r3} 转变温度来区分热裂纹与冷裂纹，都不能认为是最严密的。下面将从金属的断裂特征来分析，确定焊接裂纹区分温度的原则问题。

鉴于金属的断裂特性与温度有重要的联系，所以确定焊接裂纹的区分温度要参照金属断裂特性的变化。

很早就已确定，金属的晶界在高温下具有粘滞性，晶界区域的金属具有最大的点阵不完整性，所以晶界金属的强度对温度的敏感性大；与此相对应，晶内金属由于点阵较为完整，所以其强度对温度敏感性小。这一特性使金属的断裂随温度变化具有两种特征形态，即穿晶破断与沿晶破断。这种形态上的特征表示了温度因素对断裂行为所起的作用〔11〕，这一关系示于图 5。从图中可见，低温下，晶界强度高，断裂将以穿晶方式进行；高温下，晶界强度低，断裂将以沿晶方式进行。这样，就出现一个“等强温度”，高于此温度时，对于裂口的萌生与发展起主要作用的是晶界的粘滞性、晶界的滑动以及空位沿晶界的扩散凝聚等晶界行为，因而沿晶破断是裂口形成的特征形态；低于等强温度，对断裂起主要作用的是晶粒内沿某一晶面的滑移，所以穿晶破断是主要的特征形态。这

样，可以用“等强温度”这一概念来作高温裂缝系列与低温裂缝系列的区分温度。高于

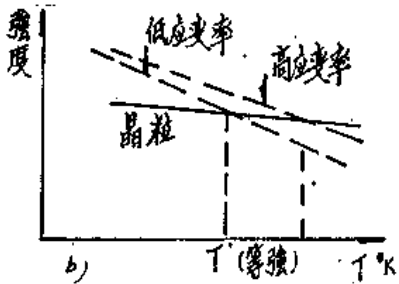
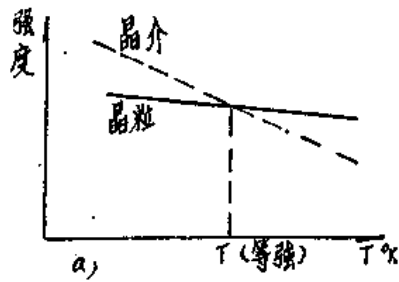


图 5 晶粒与晶界强度随温度变化的示意图

此温度发生的焊接裂缝，归属于高温下产生的热裂缝系列；低于此温度发生的裂缝，归属于低温下产生的冷裂缝系列。因此，根据上述分析，可以为裂缝系列下一个较为科学的定义，即：在焊接条件下，凡是发生在“等强温度”以上的，由高温的晶界状态（晶界液化、晶界滑动、晶界迁移与晶界孔穴凝聚长大）所决定的晶界弱化引起的沿晶开裂（沿一次结晶晶界、再结晶晶界、原始奥氏体晶界），都归属于高温下产生的热裂缝系列。与此相对应的，凡是低于此温度，与高温下的晶界行为无关的一切断裂（穿晶型的、穿晶与沿晶混合型的，或者沿晶的），都归属于冷裂缝系列。

4. 焊接裂缝的划分

在实际焊接生产中，人们对焊接裂缝的印象，首先是根据它们的直观形态与分布特征。焊接裂缝的宏观分布特征，常常被作为肉眼识别裂缝的依据。在具体情况下，焊接裂缝的分布总是与焊接接头中应力的分布有关的。所以裂缝的走向，相对于焊道，可以是平行的，也可以是垂直的，在某些情况下，还可以呈星形分布或者垂直于焊波呈弧形分布。就裂缝产生的区域而论，裂缝既可发生在焊缝金属中，也可发生在母材热影响区中。图 6 为通常见到的焊接裂缝分布形态示意图，右图为火口裂缝。根据分布特点，可将裂缝划分为：

在实际焊接生产中，人们对焊接裂缝的印象，首先是根据它们的直观形态与分布特征。焊接裂缝的宏观分布特征，常常被作为肉眼识别裂缝的依据。在具体情况下，焊接裂缝的分布总是与焊接接头中应力的分布有关的。所以裂缝的走向，相对于焊道，可以是平行的，也可以是垂直的，在某些情况下，还可以呈星形分布或者垂直于焊波呈弧形分布。就裂缝产生的区域而论，裂缝既可发生在焊缝金属中，也可发生在母材热影响区中。图 6 为通常见到的焊接裂缝分布形态示意图，右图为火口裂缝。根据分布特点，可将裂缝划分为：

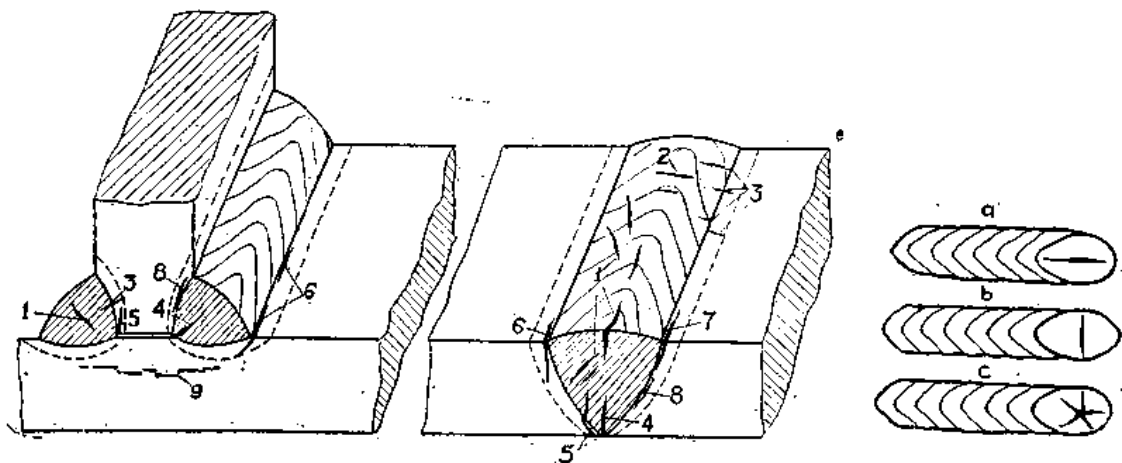


图 6 焊接接头裂缝分布形态示意图

- 1—焊缝中的纵向裂缝与弧形裂缝（多为结晶裂缝）
- 2—焊缝中的横向裂缝（多为延迟裂缝）
- 3—熔合区附近的横向裂缝（多为延迟裂缝）
- 4—焊缝根部裂缝（延迟裂缝、热应力裂缝）
- 5—近缝区根部裂缝（延迟裂缝）
- 6—焊趾处纵向裂缝（延迟裂缝）
- 7—焊趾处纵向裂缝（液化裂缝、再热裂缝）
- 8—焊道下裂缝（延迟裂缝、液化裂缝、高温低塑性裂缝、再热裂缝）
- 9—层状撕裂

火口裂缝

- a —纵向裂缝
- b —横向裂缝
- c —星形裂缝

(1) 按裂缝走向划分

- ①纵向裂缝：裂缝平行于焊道方向发展、分布；
- ②横向裂缝：裂缝垂直于焊道方向发展、分布；
- ③星形裂缝与弧形裂缝：裂缝在焊道上呈星形（或鸡爪形）分布或大体垂直于焊波呈弧形分布，前者多出现在火口弧坑处。

(2) 按区域划分

①焊缝金属中的裂缝：裂缝可以各种分布形式出现（纵向、横向、星形或弧形），横向或弧形裂缝可以发展穿过熔合线，进入母材热影响区中。

②热影响区裂缝：裂缝萌生与发展在母材热影响区中，既有平行于熔合线发展的，也有垂直于熔合线发展的。横向发展的裂缝，一般长度较短，大都止于热影响区的边缘；某些往母材厚度纵深发展的纵向裂缝，一般也都止于热影响区的边缘。

裂缝的宏观走向与区域分布，尽管能部分地说明裂缝产生的原因或条件，但是由于诱导裂缝产生的因素错综复杂，因此很难概括出裂缝的本质特征。所以，根据裂缝的宏观形态分类，只能是一种粗略的划分，它只能说明裂缝的分布与应力状态的关系。这里需要说明的是，绝对不能把裂缝纵向的或横向的断裂特征，作为对裂缝分类的唯一依据，并用以说明裂缝产生的原因与条件。科学的分类，应该是根据裂缝的断裂特性，参照裂缝产生的机理来进行。

(3) 按断裂特性划分

五十年代初期，文献〔5〕试图摆脱绝对按温度或表面形态来划分“热裂缝”或“冷裂缝”的观点，根据裂缝产生的条件，将裂缝大体分为四类：

- ①在结晶过程中产生的裂缝（即结晶裂缝）；
- ②在重结晶过程中产生的裂缝；
- ③由于合金元素分布不均而产生的裂缝；
- ④由于冷却中温度分布不均而产生的裂缝。

上述裂缝分类虽然是按裂缝产生的条件与原因来划分焊接裂缝的最初尝试，是对将裂缝粗略地划分为“热裂缝”或“冷裂缝”这一传统观点的背弃，然而由于当时技术进展的局限性，这种划分还没能真正根据产生裂缝诸因素的综合作用来进行分析、归类，因而还缺乏科学的严密性。譬如说，几乎所有的焊接裂缝都直接或间接地与合金元素分布不均匀有关；某些裂缝如延迟裂缝，不是产生在重结晶过程之中，而是产生在重结晶过程之后等等。因此，上述划分，在概念上尚有一定程度的紊乱，不能对焊接裂缝分类给予明确的科学定义。

六十年代末期，由于焊接技术研究的进展，针对焊接接头的高温裂缝，文献〔10〕中提出了较为科学的分类（目前该分类已在世界上通用）。该裂缝分类的基本思想是：钢材或奥氏体合金焊接接头中高温裂缝的产生过程，就是当金属具有面心立方点阵时的开裂过程。这类裂缝可以由结晶偏析控制的晶间液态膜所引起，即第一类高温裂缝；也可以是由力学因素与冶金因素综合对再结晶过程发生作用，使无液态金属膜的新生晶界在高温下发生塑性降落而引起，即第二类高温裂缝。具体分类如下：

- (1) 第一类高温裂缝（偏析裂缝）：由晶间偏析液膜引起的，有以下三种：

- ①焊缝金属的结晶裂纹；
- ②热影响区金属的液化裂纹；
- ③多层焊缝金属中的液化裂纹。

(2) 第二类高温裂纹(低塑性裂纹)：由无晶间液膜的新生晶界金属的塑性下降引起的，可分下列三种：

- ①焊缝金属的高温低塑性裂纹；
- ②热影响区金属的高温低塑性裂纹；
- ③多层焊缝金属重热区的高温低塑性裂纹。

这一分类法反映了不同裂纹产生于不同条件，受不同机理的作用，这样地划分是适宜的。不足之处是，作者提出的 $T=0.5T_m$ 作为高低温裂纹的区分温度。如果以此定为高温下的热裂纹与低温下的冷裂纹系列的区分温度，那么势必将符合高温断裂机理的高温低塑性裂纹，由于裂纹产生的温度略低于再结晶温度，摒弃于高温热裂纹系列之外。

至于焊接中的冷裂纹，在某些文献^[18,19]中还只是把它概括为与氢的活动有关的开裂行为。根据这一观点，只按裂纹分布的区域特征来划分：

(1) 焊缝区中发生的裂纹。多为横向裂纹。

(2) 热影响区中发生的裂纹。按其部位又分：①焊趾裂纹；②焊根裂纹；③焊道下裂纹。

应该确认，在合金结构钢中，与氢的活动有关的延迟裂纹是低温下产生的一种最常见的冷裂纹。然而，发生在“等强温度”以下的，或者说发生在 A_r3 温度以下的焊接裂纹，并不都与氢的活动有关。众所周知，某些脆性材料，如铸铁，可以边焊边裂。所以把焊接接头中的冷裂纹，笼统地概括为与氢有关的裂纹是不科学的，这一点在后面的章节中将详细讨论。

综上所述，有必要统一焊接裂纹的划分，完整地科学地进行分类。这样，可以将与焊接条件有关的裂纹行为与焊接热循环过程有机地联系起来，有助于深入理解裂纹类别、形态与裂纹发生的内因和外因之间的关系；也有助于建立较完整的焊接裂纹的金属学理论。

考虑了温度与其他诸因素对形成焊接裂纹的作用，现将焊接裂纹按其产生条件分类如下：

(1) 产生于高温下的热裂纹系列。裂纹的产生与高温下的晶界行为所导致的晶界弱化有关，即有：①结晶裂纹；②液化裂纹；③高温低塑性裂纹；④高温孔穴型开裂；⑤再热裂纹。

(2) 产生于低温下的冷裂纹系列。裂纹的产生与应力状态、材料、塑性以及氢的活动等因素有关；即有：①延迟裂纹：如焊根裂纹、焊趾裂纹、焊道下裂纹等；②热应力裂纹；③层状撕裂。

第二章 裂缝的形成机理与形态

在不同条件下，焊接接头金属的开裂行为具有不同的特性。为了正确地认识裂缝的形成规律、科学地将裂缝进行分类，必须了解裂缝的形成机理。

首先从高温热裂缝系列谈起。一般情况下，金属从熔融状态开始，在凝固冷却的初始阶段，在数量上液相占主要地位；由于液体具有流动性，它可以任意变形，表现出优异的可塑性。随着结晶凝固过程的进行，当固相在数量上开始占有一定地位时，出现了脆性温度区；在这一温度范围内，与凝固完成后的温度相比，金属的塑性极低，不大的应变就可导致裂缝出现。在这一温度区内出现的裂缝，与结晶偏析有关，具体定名的裂缝有“结晶裂缝”与“液化裂缝”。随着温度的继续下降，在完成结晶凝固之后，在低于固相线的温度下，结晶时呈树枝状的晶界，发生平直化或者发生再结晶晶粒细化，在一定的条件下将使塑性再度下降，形成另一脆性温度区；在这一温度区内容易产生的裂缝有高温低塑性裂缝。在一个比较宽的高温区内，无论晶界是否发生迁移（无论是晶界发生平直化还是晶粒细化，或在原始的晶界上），由于晶界上空位凝聚，在低应力下容易产生沿晶断裂，即高温孔穴型开裂。在更低的温度下，在焊后重新加热时，由于应力松弛时塑性不足，则产生应力松弛裂缝或称再热裂缝。

温度再往下降，一般在低于 250°C 左右，受焊接结构的刚性拘束作用，在塑性不足时，容易在一定收缩应变引起的应变—应力状态下产生冷裂缝。在这一过程中，当有氢的活动起作用时，便产生延迟裂缝；当与氢的活动无关，在稍高一点的温度下，可产生热应力裂缝；在不高于 400°C 的温度下，由于母材中的夹杂物以片状存在，母材可引起层状撕裂。

以上分析，说明了从结晶温度开始冷却，焊接接头金属由高温向低温过渡时的各类裂缝的敏感温度区。当然这只能是大致地划分，很难准确地以数字截然示出。这不仅是因为钢材成分不同、冶金因素不同而造成的，而且也因为同系列的裂缝间可以有敏感温度区交叉重合的情况。比如液化裂缝发生的温度区，一般地比结晶裂缝低，但是焊接接头金属受重热发生液化裂缝的温度，也可以是发生结晶裂缝的温度区的偏下部分。目前这方面的研究还不够完善，只能在一定程度上进行定性讨论。下面将对各类裂缝分别予以分析。

第一节 结 晶 裂 缝

在液相与固相并存的温度区，由于收缩应变速率的作用，焊缝金属沿一次结晶晶界开裂的裂缝，是结晶裂缝。它的产生与以下因素有关：

1. 产生结晶裂纹的脆性温度区间

当焊缝金属处于熔融状态时，就整个焊接熔池而言，由于热膨胀，焊缝金属及其毗邻的高温下的母材近缝区金属，受到周围处于“冷”状态的金属所给予的压应力的作用。随着结晶冷却，由于收缩，焊缝金属逐渐从受压应力转为受拉应力作用的状态。在图 7

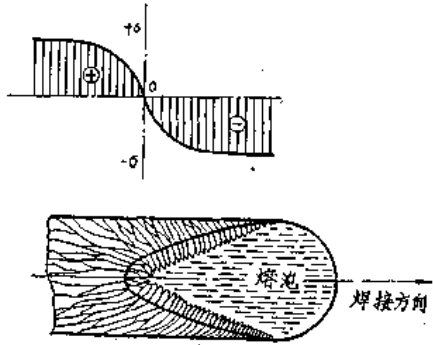


图 7 焊接时焊接接头金属的结晶与应力状态

中明显可见，只有在拉应力作用下，焊接接头金属才能有效地受到力学因素对裂纹的激发作用。但是，在承受拉应力的情况下，只有当金属的形变能力（塑性）很低，而形变抗力（强度）也很低，换句话说，只有当破断功很低时，才最容易产生裂纹。在这种情况下，金属对裂纹最敏感。对于这一点，可以借用金属的强度与塑性随温度变化的特性来分析，以便认识高温下热裂纹系列的产生条件。

在一般情况下，处于高温状态的金属具有较好的塑性，随温度升高，金属的塑性变形抗力降低，塑性增高。在接近材料的名义熔点温度时，金属中晶间低熔点的第二相先开始熔化，因此塑性急剧下降。此时在晶粒间，除低熔相熔化外，晶间金属的大部分尚保持固相联系。随温度继续升高，不仅低熔相继续熔化，直至完全消失，而且晶间金属也开始熔化。所以除金属的塑性急剧下降外，金属的强度也明显降低。由于晶间第二相已完全熔化，晶间金属也有相当一部分熔化，晶粒间除少数部位尚保持固相联系外，大部分为晶间液膜所包围。所以，在这种情况下，破断时的塑性近似地趋于零值，然而此时还具有一定的强度联系。只有当温度升得更高，晶间金属全部熔化，固相晶粒表面全为晶间液膜复盖时，破断强度才能降低，并近似地趋于零值。上述的特性变化示于图 8 中^[20]。

如果不考虑晶间液膜的表面张力与层流阻力，可以有条件的将高温塑性近似地趋于零值的温度，称为无塑性温度 (T_{ND})；强度趋于零值的温度，称为无强度温度 (T_{NS})，显然， $T_{NS} > T_{ND}$ 。在 $T_{NS} - T_{ND}$ 温度区内，晶粒间为断续的液态金属膜所隔。虽然晶间液膜具有表面张力，使晶粒间尚保持一定的强度联系，然而总的说来，强度与塑性都极微小，金属的破断功极低。因此金属极易开裂成裂纹，使这一温度区成为裂纹最敏感的温度区。由于破断时形变量极小，所以此区又称脆性温度区或无塑性温度区。

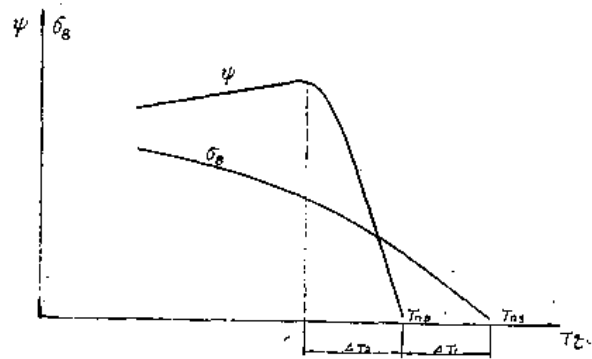


图 8 金属的强度 (σ_B) 与塑性 (ψ) 随温度变化的曲线

T_{NS} —无强度温度 T_{ND} —无塑性温度
 ΔT_1 —晶间液化温度区 ΔT_2 —晶间第二相熔化温度区

在 $T_{NS} - T_{ND}$ 温度区内，晶粒间为断续的液态金属膜所隔。虽然晶间液膜具有表面张力，使晶粒间尚保持一定的强度联系，然而总的说来，强度与塑性都极微小，金属的破断功极低。因此金属极易开裂成裂纹，使这一温度区成为裂纹最敏感的温度区。由于破断时形变量极小，所以此区又称脆性温度区或无塑性温度区。

图 8 所示的金属强度与塑性随温度而变化的特性曲线，是一种简化的、用于定性分析的示意曲线。从热力学状态上讲，无强度温度 T_{ns} 低于金属的液相线温度 ($T_{液}$)。在不平衡冷却下，无塑性温度 T_{np} 也低于加热条件下的无塑性温度。由于从金属的物理意义上说，无塑性温度是晶间液化开始后的温度，所以在冷却情况下，这一温度 (T_{np}) 低于平衡冷却条件下金属的名义固相线温度 ($T_{固}$)。这样一来，实际上的脆性温度区间 ΔT 大于图 8 所示的脆性温度区 ΔT_1 。

前面曾提出，为了简化讨论，在脆性温度区内有条件地将金属的塑性与强度近似地认为等于零值。但是无论从理论上或实践上讲，金属的塑性与强度都不可能降低到零值，即使金属的晶粒被液膜全部隔开分离时也是如此。在液相与固相同时并存的温度区，要使金属断裂，无论如何也要满足一定的力学条件。试验与理论表明，焊缝金属产生结晶裂缝，与材料所容许的最小形变量、温度变化的应变速率、脆性温度区的大小有关^[21]。上述因素对发生结晶裂缝所起的影响作用示于图 9。从图中可见，当材料容许的形变量小，应变速率高，或者脆性温度区宽，出现裂缝的危险性就大；然而脆性温度区的大小却起主要作用，脆性温度区的下限温度愈低，裂缝敏感性愈大。

如前所述，脆性温度区的上限与下限温度，分别与无塑性温度、无强度温度有关。

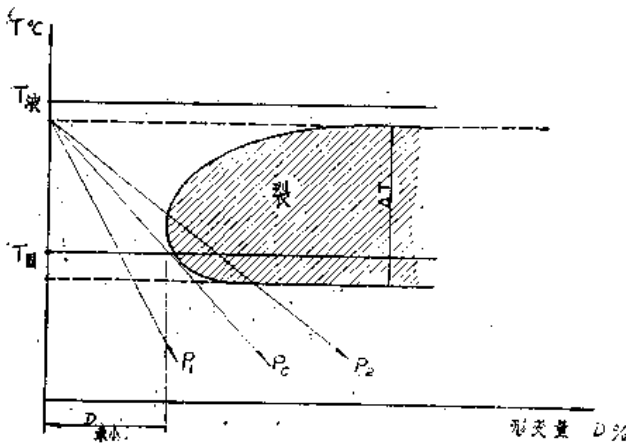


图 9 脆性温度区范围内结晶裂缝倾向与应变速率的关系

$$P = \frac{\Delta D}{\Delta T}, \quad P_c \text{—临界应变速率}$$

$$P_1 < P_c < P_2$$

也就是说，与晶间物质所处的熔化状态有关。所以脆性温度区的大小，实际上取决于液相线与固相线温度所表征的结晶温度区的大小。由此可以得出：结晶温度区宽，脆性温度区也宽，结晶裂缝的倾向也就大。

2. 凝固结晶时的冷却速度与结晶偏析

焊缝金属从液相到固相，金属结晶时，在平衡的热力学条件下，化学成分的均匀化是靠组元的原子相对扩散来实现的。在不平衡的冷却条件下，一般来说，在液态金属中，由于扩散容易，化学均匀性的问题可以解决。可是在固相晶体中，由于扩散困难，不易达到平衡条件所要求的均匀化的浓度成分。这样，由于存在化学成分的不均匀性，导致了元素偏聚，形成晶内偏析。由此而产生的结果是，在实际的结晶冷却中，固相线将往下偏移，离开平衡图上的固相线。冷却速度愈大，往下偏移得愈多。这一情况示于图 10。从图中可见，不平衡条件下的冷却效应，就是实际使结晶温度区加宽，因而偏析程度加大，脆性温度区加大，裂缝倾向增加。

如果继续提高结晶时的冷却速度，就可能发生这样的情况，即：不仅在已结晶的固相晶体中扩散难以进行，就是在液相中扩散也不容易进行了。这样，当结晶冷却速度增