

金属中的 晶粒间界

D. 麦克林

科学出版社

75.12
252
C.2

金属中的晶粒间界

D. 麦克林 著

楊順华 譯

34590/03

科学出版社

1954.8.5

D. McLean
GRAIN BOUNDARIES IN METALS
Oxford University Press, 1957

內 容 簡 介

本书比較全面地論述了晶粒間界的結構及其理論,詳細地討論了晶界的能量,晶界的平衡性质,杂质原子沿晶界的聚集及扩散,亚晶界,晶界的迁移和滑移,以及晶界在形变和断裂过程中所起的作用等方面的实验和理論研究。

本书适于金属物理及冶金方面的科学工作人員,及高等院校有关专业的大学生和研究生参考。

金 属 中 的 晶 粒 間 界

(英) D. 麦克林 著

楊 順 华 譯

*

科学出版社出版

北京朝陽門內大街 117 号

北京市书刊出版业营业許可証出字第 061 号

上海新华印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店經售

*

1965 年 7 月 第一版

开本: 850×1168 1/32

1965 年 7 月第一次印刷

印張: 9 5/8 插頁: 5

印數: 0001—4,100

字數: 260,000

統一書号: 13031·2086

本社書号: 3184·13—3

定价: [科七] 1.80 元

序

金属中晶粒間界的出現是由于晶界兩側的晶粒有所不同或是取向不同。晶粒間界的某些效应即是来自这种差异，而并非由象这样的界面本身所引起；例如，純单晶体与純多晶体范性性质的差别有一部分就是由于多晶体中晶粒改变取向所导致。不过，晶粒間界本身又是在物理上不同于它兩側晶粒的一个地带，晶粒間界的許多效应便是因此而起的，例如，在晶粒間界上发生的优先脱溶，沿晶粒間界发生的迅速扩散，以及多晶軟鋼和类似的金属中发生的屈服点現象等。晶粒間界具有双重的特性，而其中每一个方面都会有重要的效应。

晶粒間界的影响可能相当大，而且并不总是简单的。这样，引入适当的晶界能够使那些象单晶体一样容易滑移的金属变得象多晶体一样迅速地发生加工硬化，或者使具有延性的单晶体轉变为脆性的多晶体。沿晶粒間界进行的扩散可以比通过晶粒内部的扩散迅速很多，以致在某些情况下，虽然晶界区域的厚度极小，它却能够比晶粒本身輸运更多的物质。这类效应使得多晶体的許多性质并非简单地就是所有可能取向的单晶体性质的平均結果。特别是在范性性质領域中，起主要作用的是晶粒本身与晶粒間界之間的相互作用。

金属的許多性质都受到晶粒間界的影响。有一些是多少直接地受到影响；而另一些性质是間接地受到影响，例如，当沿晶界上发生的脱溶成为一个严重問題的时候。这本书首先是为冶金学家写的，同时也是为了供金属方面工作的物理学家感兴趣，作者试图在这个限度內使本书尽可能地完整。被略去的材料中最主要的大約就是关于晶粒間界的化学效应，或者是关于液态表面活性介质

作用的討論。还有不少悬而未決的問題，最主要的是：雖然存在着許多理論學說，它們在不同程度上令人滿意地解釋了晶粒間界的若干特定的性質，不過，至今還沒有一個完整的理論，能夠以相當好的數值精確性來解釋晶界的一切性質。

(下略)

作者

目 录

序.....	iii
第一章 历史簡引	1
1.1 定义	1
1.2 金属究竟是非晶态物质还是晶体?	1
1.3 非晶态粘合物学說	5
1.4 过渡点陣学說.....	10
第二章 晶粒間界的現代理論.....	13
2.1 概述.....	13
2.2 晶粒間界的寬度.....	14
2.3 “島屿”模型.....	15
2.4 葛庭燧模型.....	18
2.5 位錯模型: 簡單傾折間界.....	19
2.6 定义: 傾折間界和扭折間界.....	21
2.7 位錯模型: 推广至任意晶界.....	22
2.8 位錯晶界的能量.....	25
2.9 Smoluchowski 模型	31
2.10 Friedel 等的模型	32
2.11 共格晶界.....	33
2.12 泡沫模型.....	34
2.13 关于晶粒間界結構的若干結論.....	37
第三章 內界面能量.....	38
3.1 引論.....	38
3.2 內界面張力与內界面自由能数值上的相等.....	38
3.3 晶粒間界力的三角形: 两面角.....	40
3.4 晶界接合綫的綫張力.....	43
3.5 測定內界面自由能的方法.....	44
(a) 应用于晶粒間界的方法.....	44
(b) 应用于其它內界面的方法.....	50

3.6	取向对内界面自由能的影响	54
3.7	杂质对内界面自由能的影响	59
3.8	内界面自由能的测量值	60
3.9	内界面自由能对温度的依赖关系	62
3.10	小粒子的热力学公式	64
第四章	晶粒间界能量与显微组织	71
4.1	三维空间中晶粒的形状	71
4.2	二维空间中晶粒的形状	77
4.3	晶粒长大	77
4.4	晶粒大小的取值范围	81
4.5	少量第二相的分布	83
4.6	黄铜由于汞引致的脆化	86
4.7	晶粒间界上的熔化	87
4.8	连续的和间断的脱溶	94
4.9	数值关系	95
	(a) 面积与线段的分析	95
	(b) 长度、面积和体积之间的关系	96
	(c) 三维物体的平均截面积	98
4.10	立体显微射线照相术	99
第五章	晶粒间界上溶质原子的聚集——平衡析聚	101
5.1	引言	101
5.2	发生平衡析聚的原因	101
5.3	Zener 小片	107
5.4	发生析聚的策动力	108
5.5	总体溶解度和点阵溶解度	110
5.6	晶粒间界的溶解度	114
5.7	趋于平衡态的过程	114
	(a) 镁在铝中	116
	(b) 碳在 α 铁中	116
5.8	晶粒间界平衡析聚的实验证据	121
	(a) 采用放射性示踪原子的实验	121
	(b) 晶粒间界上的金相效应	121
	(c) 其它效应	125

5.9	其它溶质元素的影响	126
5.10	晶粒間界的热力学	126
5.11	晶界聚集濃度的实验测定法	130
第六章	晶粒間界在形变中所起的作用	132
6.1	晶粒間界对滑移的阻滞作用	133
6.2	复杂化效应	139
6.3	关于双晶体以及晶界附近滑移的若干实验	142
6.4	局部伸长和局部硬度	146
6.5	各种多晶金属試样的形变硬化	152
	(a) 具有多組滑移系統的金属	153
	(b) 发生强烈內析聚的金属	155
	(c) 以黃銅为代表的金属	155
	(d) 含有硬的第二相的金属	156
6.6	多晶体的屈服应力	158
6.7	晶粒大小对于蠕变强度的影响	171
第七章	亚晶粒間界	176
7.1	亚晶粒間界的位錯結構	176
7.2	純度对于亚晶界被蝕刻的影响	177
7.3	在凝固、冷加工、退火、蠕变和相变过程中亚晶粒間界的形成	178
7.4	亚晶粒間界在应力作用下的运动	187
7.5	亚晶粒間界对力学性质的影响	190
7.6	Smialowski 結構	191
7.7	深蝕刻图案	193
第八章	沿晶粒間界的扩散	194
8.1	沿晶粒間界向試样內部透入的深度	194
8.2	晶粒間界扩散的測定	199
第九章	晶粒間界的迁移	205
9.1	晶界迁移的方向和策动力	205
	(a) 經過退火的金属	206
	(b) 經過冷加工的金属	206
9.2	晶界类型对迁移率的影响	208
9.3	迁移的机制	209
9.4	杂质的影响	211

9.5	迁移速度理論值与实验值的比較	215
9.6	再結晶	221
(a)	初級再結晶	221
(b)	二次再結晶	222
(c)	再結晶組織	224
9.7	蠕变中的晶界迁移	225
9.8	相間界面的迁移	226
9.9	晶粒間界的振动	226
第十章	晶界滑移	228
10.1	葛庭燧实验的理論	228
10.2	葛庭燧实验所得的結果	234
(a)	实验結果与理論符合的情况	235
(b)	純金属所得的結果	239
(c)	杂质的作用	240
(d)	背景弛豫	243
(e)	晶粒間界的粘滯性	244
10.3	双晶体与多晶体的晶界滑移	246
10.4	晶界滑移的机制	252
10.5	晶界滑移在蠕变中的作用	254
10.6	晶粒間界的屈服强度	257
附录	由图 10.1(d)推出的关系	257
第十一章	晶間脆性	261
	第一部分 低温脆性	
11.1	低温脆性断裂的类型	261
11.2	鉄中范性-脆性轉变	264
11.3	低温脆性現象的出現及其存在范围	265
11.4	低温脆性的理論	270
11.5	过热和燒毀	281
	第二部分 高温下的晶間断裂	
11.6	实验事实	282
11.7	理論	287
参考文献		296

第一章

历史簡引

1.1 定 义

金属中的晶粒間界是分隔着这样两个晶体(或晶粒)的内界面:这两个晶粒在晶体取向上、或是在成份上、或是在晶体点陣参数上有所不同,或者是在两种或甚至所有这些性质上都有所不同。

晶粒間界的这个定义把单晶体未被沾污的表面划分在晶粒間界定义范疇之外。不把未被沾污的自由表面包括在内,其正确性是有待商榷的。由空間意义來說,自由表面显然是一个界面,而且比起晶粒間界来,它具有較高的自由能;但它并不象晶粒間界那样对力学性质有影响。反之,被沾污的表面却可能象晶粒間界一样地影响力学性质,如果沾污物是形成一个明晰可辨的表面层(如氧化层),按照上面的定义,这个表面层与晶体之間的界面就是一个晶粒間界。

1.2 金属究竟是非晶态物质还是晶体?

純金属中相邻晶粒之間的差异通常是晶体取向上的差异。因此,一直要到認識到金属是晶态物质之后,人們才能得到关于晶粒間界本性的清楚观念。这种認識是約在轉入本世紀之初时方才有的。

在更早一些的时期中,許多观念曾被弄得混淆不清。金属的范性,与粘滯性固体的可流变性以及已知其为晶体的那些物质的

脆性相比較起来,使人看来似乎金属也是一种粘滯性固体,也就是說,是一种非晶态物质。卓越的冶金学家 Roberts-Austen 曾經表述了这一观点。1886年,比較了鉛的挤压和糖浆的挤压之后,他断定:“鉛就它的性质看来确是一种粘滯性固体,因为它很容易流过注孔”^[417]。但是金属并非总是可以形变的,有时它反而表現具有脆性。脆性金属沿晶粒間界破裂的情况并非罕見,而且断裂处显出具有“晶态”的性质。这就引出还偶尔遇到的如下的观念:虽然正常情况下金属是非晶态的,可是在某些情况下它也可以結晶,因而表現脆性,而并不表現出可以形变的本領。如 Roberts-Austen 所表明的:“金属結晶过程之发生其关系甚为重大,因为,由于連續的振动,急剧地冷却,猝然地改变温度或是由于杂质的存在而形成晶体,可能使金属变得毫无用处”^[418]。他所提到的这些条件就是有时会引起脆性的条件。Mellor 提出了另一看法。他承认純金属是晶态的,“但是,当我们研究合金的結構时,发现这些晶体往往是这样的不确定和不完整,以致于无法由其外形来判定它們是真的晶体,还是仅仅就是非晶态的顆粒”^[350]。

大約就在 Roberts-Austen 表述上述的第一段引文的同时,显微結構的研究已使 Sorby 支持金属是晶态的这个观念。1887年, Sorby 写道:“看来……几乎可以肯定,各单个的顆粒……就是一个一个的晶体,虽然发育得不很完好”^[477]。在同一文章中他还写道:“在一个时候曾經假定:借助于不断的振动,可以把一条所謂纖維狀的鉄棒轉变为晶态的。为了驗證这个問題,使一条試棒……(連續振动了)……15小时,直到它破裂而呈現晶态。断头的纵向截面表明其結構并不比自然状态下的鉄具有更多的晶态特性。……在研究这种問題时,任何情况下都必须不把鉄看作是一种均匀的物质,而仅认为它們是由許多小晶体所組成的块,这些小晶体之間的相互聚合比之各个晶体的不同部分間的聚合要弱一些”。两年以后, Ewing 和 Rosenhain 写道^[162]:金属“粒子事实上都是晶体;但是它們的每一个界面都是由一个晶粒与另一晶粒相接触所偶然地确定。我們相信,这是冶金学家們通常所接受的观

点”。Stead^[482]也持有类似的看法。

1900年，Ewing 和 Rosenhain 提出了关于金属晶体性的强有力论据^[163]。他们研究了好几种金属滑移线和侵蚀斑的形式。他们认为：“在从未经过磨光或侵蚀的金属表面上，出现了具有这样规则几何形状的侵蚀斑，可以作为支持下面所说观点的强有力的论据，即金属晶粒是为晶态的元体所组成，在每一晶粒之内它们都具有相同的取向”。这是关于现代晶粒观念的一个极好的申述。他们发现滑移线是直的，而且在形变之后侵蚀斑还是和形变以前一样具有平直的边缘。下面所说的概念看来是提供了关于这些观察结果的唯一解释，即金属原子是处在确定的诸层列之中，这些层在范性形变中发生相对滑移，但基本上并不破坏它们的晶态完整性；由此，他们认为这一概念可以支持金属在正常情况下是晶态的这一观念：“笔者认为他们已经确定了这样一事实：金属的结构是晶态的，甚至在被设想为晶体结构遭到破坏的那些情况下，也仍然保持晶态。……人们往往在金属的结晶状态与非晶状态之间所划的分界线看来是没有根据的”^[163]。当有可能用X射线去测定晶体的点阵参数时，就终于获得了关于以上论断的无可争辩的证明。

虽然如此，金属可以是非晶态物质的观念还逗留未去。1912年 Guertler 认为这样的提法是适当的：“Schweder 远在 1877 年当然就已经正确地认识到合金由熔融状态结晶的过程与盐类从溶液中结晶的过程是相似的，不过他的工作一直未被注意。……甚至在 1898 年，Andrews 还居然把下述说法当作一个新颖的论断提出：‘在水的结冰与熔融金属的结晶这两个过程之间似乎存在着相似性’”^[210]。并且说：“首先，下面这点必须强调：所有的金属和合金在凝固时都进行结晶”^[210]。在次一页上，Guertler 继续写道：“我们在文献中常常会发现下面这样的一些说法：这种或那种合金在退火时结晶，或是经过某种处理之后结晶，而经过另一些处理之后并不结晶。这些说法全都是不正确的，所有的金属本来就是晶体”^[210]。

如这些引文之所表明，关于金属在低于它的熔点的温度之下还能够以非晶态形式存在的观念为某些人所顽强地坚持着，使得人们似乎有理由去相信金属的若干特殊行为可以用金属晶体的某些小部分从晶态转化为非晶态的过程来加以解释。这个想法与 Roberts-Austen 引用整个金属试样由非晶态转变为晶体的逆过程来解释某些致脆现象甚为相似。Beilby 就是这样来解释经过磨光之后产生的“Beilby 层”的。现代的研究固然支持了 Beilby 层是非晶态的，或者至少是由小到不易察觉的小晶体所组成的观点，但这些多少具非晶态特性的物质其所以能够稳定，应归因于氧化物等的直接阻碍作用^[60]。由此，Beilby 根据他的发现作出结论，认为使一种金属充分快速地冷却可以把它保持在非晶状态，但这个论断是不正确的。不过，下面的观念却有助于他的学说，即加工硬化乃是由于沿着每个滑移面的一薄层金属转化为非晶态物质所致^[43]。他认为形变时滑移面上发生的摩擦作用与抛光时外表面上发生的摩擦作用相类似，在后一情况下既然产生非晶态的薄层，因此他认为在前一种情况下也会产生非晶态薄层。下面这个观念也有助于他的学说：固溶体比纯金属具有较高的硬度，是由于前者是非晶态的。固溶体之所以被看作是非晶态物质，是因为看来难于解释两种或更多种类的原子在很大的区域中如何能够处在同样结构的晶体点阵之上^[43]。上面这两个学说都隐含着晶粒间界观念发展中的两个重要的概念。其中一个：一种物质可以是晶态物质或者是非晶态物质，而不能处在这两种情态之间；换句话说，这里缺乏现代关于晶体点阵可以具有不同程度完整性的概念。另一概念是：当温度太低，原子振动微弱时，非晶态物质由于它们并不具有易于发生滑移的点阵平面，因此不如晶体那样容易进行形变。

由此可以看出，在转入本世纪之初时情况就是这样：金属被认为在正常情况下是结晶体，显微镜下所观察到的晶粒分别是具有不同取向的晶体；但在低于金属熔点的温度之下，一块金属的某些部分也可能以非晶态的形式存在。

1.3 非晶态粘合物学說

用这个学說的主将——Rosenhain 的話來說：“非晶态粘合物学說的理論概念主要是认为：純金属的晶粒是由同样金属的非晶态物质的极薄薄层所圍繞并粘合起来。就其性质而言，这些物质与在极度过冷情态下的液体金属相似。在这个意义下的非晶态金属与 Beilby 所定义的非晶相相当……”^[420]与此同时，Sears^[446]，Osmond^[379]，Bengough^[44]也提出类似的观点。

上节中所描述的当时的时代背景虽然是晶粒間界的这个学說之所以被提出的真实原因，但由研究金属高温力学性质所得出的若干結果乃是支持这个学說的特殊实验証据，而且許多年来成为这个学說的主要支柱。Rosenhain 和 Humphery^[420]曾获得一些显微照片，很清楚地說明当鋼在高温下經受很緩慢的拉伸时各个晶粒是整个地发生相对滑移，但在低温下却并不表現如此。他們认为应把这个現象理解为由于晶态的金属与非晶态金属的性质随着温度提高所发生的变化有所不同所导致的结果。在低温下，晶界上的非晶态粘合层應該較硬，而晶粒本身應該較軟，比較容易发生形变。当温度提高时，非晶态粘合层会比晶粒本身更加迅速地发生軟化，这是非晶态粘合层的特征性质；因而最后非晶态粘合层就会变成較軟的組元。所以，在高温下进行力学試驗时，形变将主要是沿晶粒間界发生。在同一篇文章中也报告了极限拉伸应力随形变速度增加而提高的現象。这个現象可以用非晶态粘合物学說解釋如下：“粘滯性很大的液体在較低的应力下能够很緩慢地伸展，而在迅速作用的应力之下表現得象一个脆性固体。瀝青的例子是大家所熟悉的：它可以很容易地但是緩慢地流动，然而在一击之下它又很容易破碎。这个例子把上述的特性很清楚地显示出来。作者們的观察表明了实验中形变(或拉伸)速度对于拉伸試驗結果的巨大影响。而这些現象很容易用非晶态粘合物学說来加以解釋”。

Rosenhain 和 Ewen^[421]把这个研究扩展到有色金属方面；他

們把鉛、錫、鋁和鉍的試樣加熱到低於熔點溫度 50°C 的溫度，並加上一個不大的負載 ($72 \text{ 磅/吋}^2 \sim 0.5 \text{ 公斤/毫米}^2$)，然後再緩慢地加熱(升溫)，直到斷裂發生為止。斷裂在較熔點溫度低 $3-20^{\circ}\text{C}$ 的溫度下發生，屬於晶界斷裂的類型。由此可以斷定：在高溫下，晶粒間界比晶粒本身脆弱。(應該注意，這些文章中沒有一篇曾把切變強度和斷裂強度這兩個概念清楚地加以區分。)這個情況可以用圖 1.1 表明。由圖可見，在溫度等於 T_1 時，晶粒本身的強度和晶粒間界的強度相等。自此以後，這個溫度就被稱作“等內聚溫度”^[260]。Rosenhain 和 Ewen 還論證了這類實驗中所觀察到的晶間斷裂並非由於晶界上出現的共晶體薄層所導致；這是由於所用材料非常之純，不可能出現這樣的薄層。說服力也許更強的另一例證是鉛錫合金的一個例子。這種合金含有多量的共晶體，試樣在比鉛的熔點約低 100°C 的溫度下就發生斷裂(而不是低 $3-20^{\circ}\text{C}$)，真實的斷裂溫度是共晶溫度以下 0.5°C 。

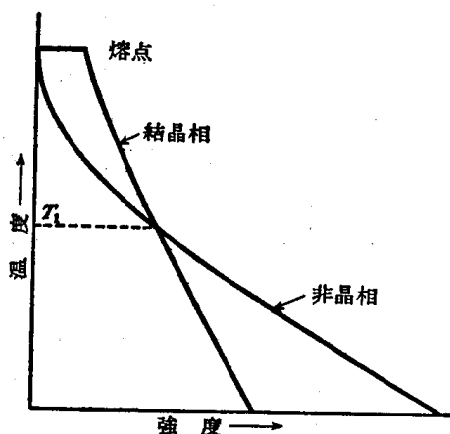


圖 1.1 溫度對晶態相和非晶態相的強度的影響 (Rosenhain)

在這篇文章中還敘述了一種晶界滑移機制。它假設：對於晶界滑移的發生而言，暫時需要(而並非長久地需要)一個厚層的晶粒間界。“……並不需要假定晶間粘合層厚到這樣的程度，使得形狀多少是不規則的晶粒都可以自由地進行相對滑移。粘合層的柔弱性所起的作用僅在於除去了各個晶粒在晶界上的相互牽制，因

此形变量就几乎全部集中在晶粒間界上或晶粒間界附近。作为形变的結果,由于分子的扰动会产生新的非晶态物质;而当金属的形变一經停止,过剩的非晶态物质又会由这些在形变中所形成暂时加厚了的晶間粘合层中重新結晶出来。因此在形变过程終了时,可以期望在晶粒間界上或晶界的附近发现巨大扰动的迹象,而晶粒本身将不表現什么曾經受拉伸伸长的征象。晶粒間界在形变之后将不会(实际上也不可能)再和形变以前一样^[421]。当晶界滑移进行时必定要存在着一个厚的晶粒間界区域,这个观念一直保持了許多年,下面我們还要再回到这个問題上来。

还援引过另外几种类型的实验証据以支持非晶态粘合物学說。在六次試驗中曾有三发现金属試样在真空中加热时,細晶粒試样的重量损失比起粗大晶粒試样更为迅速^[422]。这个現象被认为是由于非晶态的晶間粘合物质的蒸气压較高所致,在細晶粒試样中应含有較多的非晶态相。同时,沿着晶粒間界还形成了沟槽(“热蝕刻”現象)。差不多与此同时,Баиков 和 Гудцов 观察到同样的現象,他們也把它归因于晶粒間界层的蒸发較为迅速所致(見[375])。Desch¹⁾ 反对这个意見,他根据粗晶粒試样和細晶粒試样重量損耗之差进行了計算,得出晶粒間界层的厚度是几千个原子的厚度,事实上这是不可能的。近来,Chalmers 等^[101]的工作也支持了后一观点。Rosenhain 提出如下論証,进行論战:他指出,沿着晶粒間界形成的沟槽增加了表面面积,因此細晶粒試样的表面面积比起粗晶粒試样来增加得較为迅速。但由于这个因素的效果还不很清楚,因此还没有进行具体的計算²⁾。Rosenhain 等^[423]

1) Desch C. H., 关于文献[422]的討論。

2) 今日所持的观点认为这些沟槽的形成乃是由于晶間界面張力所导致。支持这个观点的主要实验証据是:当晶界作迁移运动时,这些沟槽和晶界一起移动,并且,在惰性气体中加热时也和真空中一样会形成沟槽;但是,在惰性气体中,由于气体分子碰撞的緣故,蒸发过程的进行应比真空中缓慢。作为推論,似乎應該认为 Rosenhain 和 Ewen 所发现細晶粒試样重量損失較多的事实(这事实只在試驗过的半数的情况下是肯定的)可能是个偶然的現象。不过,在 Fonda 所报告的另一个仅有的这一类型的实验中^[172]发现:細晶粒鎢絲試样的重量損失比粗晶粒試样約高出百分之五十。

发现有一种 Zn-Cu-Al 合金,其力学性质与瀝青和玻璃相似,因为“如果……迅速弯曲,或是在一击之下……(它)会破碎,而不会发生什么范性流变。不过,如果緩慢地进行弯曲形变,把板状样品弯曲 180° 是十分可能的”。弯曲之后,合金能够逐渐发生回复。弯曲的回复与时间的关系曲线和瀝青或玻璃的曲线形状一致,回复的形变量和瀝青相近而仅约为玻璃的十分之一。Rosenhain 也用非晶粘合物学说来解释馬氏体及其它脱溶硬化合金所具有的高硬度。他认为每一粒子周围都圍繞着一层非晶态金属,由于粒子很多,因此在总的体积中有很大的部分是晶态物质,在低温下具有抵抗形变的能力,因此使金属硬化^[424]。对于其它若干性质他也进行了解释。

Rosenhain 明确地认为有好几組现象表明非晶态間界层必須具有相当的厚度。虽然 Osmond 和 Roberts-Austen^[380] 在很早就曾提出这一点,不过它还不是一个尽人皆知的观念。为了使它显得比較合理, Rosenhain 引入“晶体单元”的观念。所謂一个晶体单元,就是可以結成晶体的最小原子群,不过还要設想每一单元是含有相当多数的原子。在結晶过程中,当两个晶粒彼此这样接近,使得其間的液态金属层比一个晶体单元为薄,那么晶間物质便不能繼續进行結晶,而存留下来成为非晶态的、无定形的、玻璃状的薄层。关于这个晶体单元的概念曾經成为經常爭辯的主题,这可能是由于冶金学家們逐漸注意到原子間力所具有的短程性的緣故。Desch 提出疑問:“金属中的晶体单元究竟有多大?所有的实验証据都可以說明固态金属的分子状态极其简单:一个分子是由一个或极少数的原子所組成。……因此,應該想見,如果是由于这个原因,晶間薄层的厚度会是非常之小的”^[1]。不过,如果晶粒間界层极薄,問題的困难之点就在于如何解释晶粒間界滑移的发生。Guertler “在下面这一点上十分同意 Rosenhain 的意见,即认为晶粒間界厚度很小的这一假設不能說明所有观察到的现象。不过,他不能确信非晶状态的存在,除非非晶态相仅局限于一个分子

¹⁾ C. H. Desch, 关于文献[421], [422]的討論, *J. Inst. Metals*, 1912, 8, 149.