

陶正耀论文选集

目 次

怀念陶正耀先生(代序)	(1)
-------------------	-----

一、基础理论

强度与相子	(4)
球墨铸铁的强度与显微组织关系	(18)
铁素体、渗碳体及材料强度	(26)
材料强度及其影响因素	(33)
纵论机械工程材料与显微组织	(42)
高温材料试验外推法中一个新的误差	(50)
A New Statistical Relation Between the Strength and the Microstructural Parameters	(56)
对 Prigogine 耗散结构学说的一些异议	(74)
评 Prigogine 耗散结构学说并论 Boltzmann 有序性原理	(79)
机械构件的失效与热力学	(85)

二、新材料开发与试验

排气阀钢的代用及工作温度的测定	(93)
12000 千瓦沉淀强化护环试制总结(综述部分)	(99)
12000 千瓦沉淀强化护环试制总结(工艺部分)	(111)
60Si2Mn 钢高温瞬时回火机理的初步探讨	(134)
电镀铁及镀铁渗碳的特性和试验	(147)

三、电站大锻件的试制与试验

55 吨钢锭的解剖试验	(157)
125000 千瓦发电机转子的质量及中心棒的解剖分析	(178)
再接再厉狠抓发电设备的生产	(192)
深化科学技术, 振兴重机行业	(197)
充分发挥重机厂多余钢水的作用	(203)
电站大锻件的高质与高产	(205)

四、失效分析

更广泛深入地开展失效分析	(211)
八年来失效分析工作的回顾	(218)
模具失效分析实例	(226)
提高冶炼水平, 降低失效发生	(238)

五、其他

X 光作化学分析并介绍 Broosky 法	(244)
从模具调研看模具材料问题	(249)
扭转机械工业用钢的比例失调	(254)
对于人才及科研问题的建议	(259)
论人体特异功能——兼论人体失效与气疗	(261)
回顾上海材料研究所的五十年	(266)
向天要能源	(270)

知行臻楷模 仁德海族裔

——缅怀慈父陶正耀(代跋)	(275)
---------------------	-------

怀念陶正耀先生

(代序)

我国著名的材料科学专家陶正耀先生离开我们已经三年多了。先生是原机械工业部上海材料研究所的主要创始人之一，他热爱祖国，拥护中国共产党，深爱着我们的研究所，他满怀激情和坚强毅力，孜孜不倦地为发展我国的材料研究事业呕心沥血，直至病笃时仍不忘工作。追思先生一生艰辛创业、陶冶科坛；厚德有容、正直刚磊；关爱下属、和蔼可亲的高风亮节，令我等后辈肃然起敬，留下了深深的怀念！

先生于1912年10月27日出生在浙江省温州市，1935年毕业于上海交通大学物理系，毕业后曾在京沪、沪杭甬铁路局工作。1945年6月赴美深造，回国时带回国外先进的材料理化性能测试设备，建立了原上海资源委员会材料供应事务所的技术室（上海材料研究所的前身）。新中国成立后，先生以满腔热情，亲赴工厂，投入到创建我国机械工业首批企业的中心试验室的工作中去。为了加快机械工业的发展，先生等科技工作人员负责主办了新中国成立以来最早的理化检验培训班，培养了大批理化分析技术人才，大大加速了我国工业企业中心试验室的建立，为我国工业稳步发展，奠定了可靠的基础，作出了卓越的贡献。

1956年，先生考察了原捷克斯洛伐克和苏联后，向机械工业部领导提出了建立上海材料研究所的建议，得到了部的采纳，1957年正式建立了以材料及其应用技术为主、专业体系完整的十个研究室，先生（三级工程师，正教授级）任上海材料研究所主任工程师兼耐热材料研究室主任。与全所尊敬的孟治良所长亲密合作，在组织上、人才上、科研方向和实验室的建设上，使十个研究室奠定了坚实的基础，为我国机械工业的发展起到了积极作用。当前，所科研成果陈列室的展品，均为十个研究室基础上发展起来的科研结晶。所内同仁想到这些成就的时候，无不怀念这两位兴业发迹的老人。

先生在五十多年的创业生涯中，不辞艰辛、爱所敬业、精益求精，取得了丰硕的研究成果。他所负责的科研项目和试验方法，广泛被工业企业采用。他负责的高温材料和高温蠕变研究，开发了具有中国资源特色的耐热钢；建立了国内当时规模最大、在学术界颇具影响的高温试验室。1971年春，当时，

正值“四人帮”横行之际，59 足岁的陶先生在上海重型机器厂与工人实行“同吃、同住、同劳动”。他带着解决大锻件的质量问题，参与溶炼、浇注大锻件全过程劳动，详细记录每道工序情况，收集了大量资料和国外有关技术信息，对报废的大型转子进行解剖分析，找到了问题的关键所在，在无先例的情况下，对数十吨钢水加铝脱氧，取得了国产转子钢的合格品，受到了机械工业部的重视并予致电祝贺。接着，又在无先例的情况下，解剖分析了 55 吨级钢锭，取得了数以千计的数据，亲自总结影响大锻件质量的各种制约因素。为解决大锻件质量问题，他在上重厂连续战斗了三年多。取得的研究成果，受到了重型行业学术界和机械工业部的极大重视，得到了当时方毅副总理的赏识。

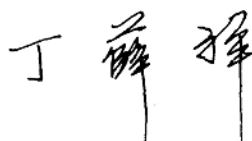
70 年代末，年已古稀的陶先生与西安交大周惠久院士、机械科学研究院张协和院长等一起积极建议，并得到中国机械工程学会的支持，同意成立“中国机械工程学会材料分会”，并挂靠上海材料研究所。他在 1980~1990 年的 10 年副理事长任职期间，与周惠久院士亲密合作，推动学术交流，为机械行业材料技术进步起到了积极作用。他积极倡议开展机械产品失效分析，亲自参与研究，撰写论文，亲自组织与主持召开过三次全国机械产品失效分析会议，为我国开展机械产品失效分析作出了重要贡献。先生还担任原机械工业部的材料专家顾问。先生为人正直、光明磊落、敢于发表自己的见解，在国际敌对势力对我国封锁缓解的情况下，在用材元素的代用政策上，他及时提出了各种性能的材料，其组元应遵循“该用什么元素就用什么元素”的观点；并积极向原机械工业部提出“扭转钢材品种的倒挂，提高机械产品水平及质量”的书面意见，他的许多意见得到了部的采纳并组织落实，受到了部的表扬。

年过八旬的陶先生，依然豪情激荡、不辞辛劳，经常到研究室基层了解科研发展情况，鼓励课题立项前的预研；积极倡议材料表面技术的研究，亲自参与机械产品表面渗金属的研究，其成果得到了生产应用；鼓励科研人员退休后继续为研究所做贡献，提倡 70 岁是科研的大好辰光；倡议开展太阳能利用中的材料研究。1999 年 6 月 28 日，上海市老科技工作者协会等社会团体在沪杏图书馆联合召开“上海太阳能发展战略研讨会”，会前，上海市老科协请陶先生写一篇有关论文，那时他正在华东医院住院治疗，却欣然答应，并在不到 10 天的时间里，写好论文，委请胡世孚同志会上宣读，这是陶先生生前最后一篇论文。1999 年 10 月 11 日，病重在华东医院的陶先生，行动已不能自如了，但床边还放着许多技术资料，他笑着对去看望他的同事们说：“这次病重，但脑子仍很好，还可思考研究”。可是，不到半个月，于 1999 年 10 月

25日20时15分，尊敬的师长——陶正耀先生在上海华东医院与世长逝了。陶先生的一生真正达到了“春蚕至死丝方尽”的崇高境界。

我们亲眼目睹了陶先生五十多年的创业和追求，总觉得情怀未了，为了学习和发扬陶先生一生的高品洁行，我们收集了陶先生一生所撰写的50多篇论文，并精选了部分编辑出版了《陶正耀论文选集》，以寄托我们对先生的怀念，并告慰先生，含笑九泉！

我们深信，本选集的出版，后人定将从中得到启迪，得到激励。

A handwritten signature in black ink, consisting of three characters: '丁', '薛', and '辉'.

(原机械工业部上海材料研究所所长)

强度与相子

陶正耀

(一机部上海材料研究所)

【摘 要】 强度与显微组织关系很密切。作者将显微组织中的相划分成许多小方块,并将每一个小方块称为相子,据此可认为任何显微组织,都是相子在一定条件下的组合排列结果。将显微组织粒子化后,可采用统计方法,寻求相的形态与宏观强度之间的关系。探讨结果,得知相子的分布规律属一般高斯型,并由此导出材料强度与显微组织参数之间的一个关系式,经用实验数据来考核,得到验证。最后又讨论了与某些理论公式的关系。

1 引 言

我们使用材料,主要是使用它的力学性能,其中强度往往是考虑的一个重要因素。目前所获得强度虽已相当高,但仍远远落后于理论数值。落后原因是由于材料内部存在位错等缺陷。位错理论从提出到现在已有 40 余年,40 余年来材料强度的提高大多不是以位错理论为指导思想,而几乎大多是以改变显微组织来达到。

显微组织与强度之间关系既如此密切,因而引起了大量研究,通过测定显微组织中某些参数如沉淀颗粒大小、颗粒间距离、晶粒大小、珠光体层间距、第二相体积百分数等,在某些特定组织下,曾获得强度与以上某些参数间的经验公式。较早的研究有 Gensamer^[1],他于 1942 年即发表珠光体钢以及球化组织与铁素体晶体粒度的关系。其他有 Roberts^[2],Turkio 与 Low^[3],Ansell 与 Lenel^[4],Liu 与 Gurland^[5],以及 Kouwenhoven^[6]等都进行过此项研究,企图建立某些经验公式。要从理论上建立关系式的有 Orowan^[7],Fisher^[8],Hall^[9],Petch^[10]等,其中以 Hall 及 Petch 的关系式最有名。这两人从位错理论导出铁素体晶体粒度 d 与屈服强度 σ_s 的关系为:

$$\sigma_s = \sigma_0 + Kd^{-1/2} \quad (1)$$

上式中 σ_0, K 为常数。此即一般所通称的 Hall-Petch 关系。许多人认为式(1)不仅适用于铁素体晶粒,可引伸至其它参数如碳化物颗粒大小等,认为具有较普遍意义。然而式(1)引伸后只适用于一定量的第二相体积分数,因此它不是一个完整的表达式。显然,单纯从位错关系得到一个包括第二相体积分数的表达式,尚相当困难。

本文是以显微组织为基础,采用统计方法进行推算。统计方法需有为数众多的统计“对象”,因而在方法上并不如一般人那样把组织原封不动,而是把它划分为许许多多大小相等小颗粒——相子,亦即是把它粒子化。如此一切显微组织的各种形态,都只是相子在一定条件下的组合排列结果。由于相子的强度是已知的,使我们有可能采用统计方法去推

• 本文曾在《机械工程学报》第 16 卷第 3 期(1980 年 6 月)上发表。

导强度与显微组织参数之间的关系。

2 相子及其性质

相子是什么,它的性质如何,这是首先要阐明的。

相子的来历是这样的,当观察材料的显微组织时,用两组互相垂直而等距离的平行线,将试样如图 1 中的(a)进行划分,可得到许许多多小方块如图(b)、图(c)所示。划分时应使小方块的体积比最小的相(或结构)还要小,使小方块只含一种相。在两相交界处,要用“四舍五入”法,使交界处小方块,亦只含一种相。这样做虽使相的边界呈锯齿状如图(c)有所失真,但若小方块体积相当小,失真将逐渐微弱而不易察觉。由于相的力学性能大多是已知的,因此小方块的力学性能亦可认为是已知的。这样得到的小方块,给它一个名称叫相子。

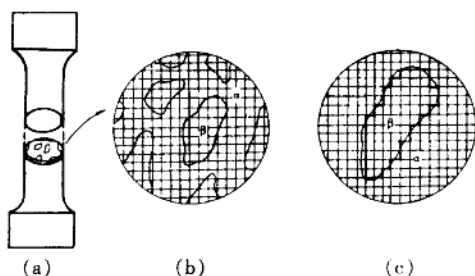


图 1 显微组织划分为相子的示意图

按照以上划分,相子将具有两重性质,它具有相的许多性质,又具有相子所在部位的力学性能。根据后一性质,我们可以把裂缝、气孔、晶界等亦划分成相子。裂缝是有形而无实,但它却代表该一部位的力学性能。我们区分各种相是根据它的化学成分及晶体结构,但要区分各种相子的还要依据它的力学性能。相的种类很多,而相子的种类可不多。这里把相子粗分为四大类:

- (1)甲类相子——强度高、塑性低,如许多碳化物等;
- (2)乙类相子——强度较高且有一定塑性,如低碳马氏体,冷变形后的奥氏体等;
- (3)丙类相子——强度低,塑性高,如铜、铝等;
- (4)丁类相子——强度很低或为零,如裂缝、空洞等。

缝,空洞等。

上列分类只便于互相区别,不必有等级数字。

材料强度不仅随相子性质(哪一类)而异,又随其数量形态而不同。试在任何试样中挖取几个小子样,令小子样的大小适等于四个相子,如图 2 所示。若原试样是两相组织,则所挖小子样将不外乎为图 2 中任何一种,

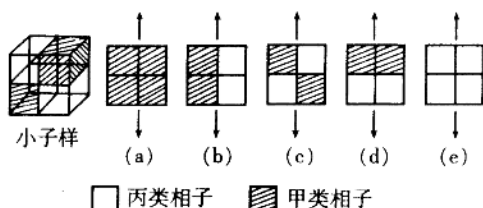


图 2 五种小子样

因为整个试样不外乎为用这五种小子样叠合而成。从这五种小子样中,可看出相子的不同排列,而产生强度及塑性的变化。图 2 中(a)的强度最高,塑性最低,因为都是甲类相子;(e)的强度最低,塑性最高,因为都是丙类相子;其它三种排列,其强度及塑性都介于前两者之间。又图 2 中(b)、(c)、(d)三种排列,是代表两种不同性质的四个相子的排列方法,它们亦产生了三种不同强度和塑性。(b)的强度最高;(d)最低,(c)介于两者之间,而塑性则相

反。由上可知,相子的不同排列,将产生不同的强度。

材料的强度,又随内中所含各类相子的数量而异。试在图 1(a)的横截面上截取一薄片,令其厚度适等于一个相子的厚度。设材料是两相组织,薄片上两类相子的数量为 m 及 n ,其强度分别为 σ_1 及 σ_2 ; A 为相子的面积; V_1 及 V_2 为两类相子的体积百分数。则该薄片的强度为:

$$\sigma(m+n)A = \sigma_1 mA + \sigma_2 nA$$

或

$$\sigma = V_1 \sigma_1 + V_2 \sigma_2$$

上式即为一般所称之为体积比例准则(Role of Volume Fraction)。

材料的强度,又随内中所含各种相子的分布形态而异。上式只包含相子体积百分数,没有分布形态因素,是不全面的,因为在相同数量的情况下,若一类相子(例如甲类)作大块密集,受力时裂缝甚易扩展而穿越整片密集的甲类相子,根据 Griffith 关系^[11],整体材料将较预期为低的应力作用下发生断裂。

综上所述,说明材料强度,主要决定于内中相子性质、数量比例及其分布排列。

3 相子的分布规律

材料强度既主要决定于相子性质、数量比例及分布排列,有必要先探求相子的分布规律。两相组织是最常见的组织,亦是最基本的组织,因此下面即先在两相组织中推导相子的分布规律。

在任何显微组织上试画一直线,该直线所截两类相子,必互相分离为若干“组”,各组的相子互相穿插,即成为各种形态的相。图 3 是两相组织,任画两平行线 AA' 及 BB' ,即见这两直线内相子,各分为若干组(见 aa' 及 bb'),图中 aa' 上有 4 组, bb' 上有 5 组,这是一般金相准则^[12,13]。由这些不同长度的相互相穿插,即成各种不同形态的相。

设 m 及 n 为任何单位长度上两类相子的数量, M 为相子总数, α 为比值。把 n 个相子分为 r 组,分法有:

$$Q_n = C_{n-1}^{r-1} \quad r \leq n \quad (2)$$

把 m 个相子分为 r 组,分法同上。把 m 个 r 组与 n 个 r 组相子排列在一条线上,进行组合排列,总的排列法有:

$$Q = C_{n-1}^{r-1} \cdot C_{m-1}^{r-1} \quad (3)$$

经过一系列推算(推算方法见附录),得:

$$Q = \frac{2^M(1+\alpha)}{2\pi M\sqrt{\alpha}} e^{-\frac{M}{2}\left(\frac{\alpha-1}{\alpha+1}\right)^2} e^{-\frac{2(1+\alpha)^2}{\alpha M} \left[r - \frac{\alpha M}{(1+\alpha)^2}\right]^2} \quad (4)$$

上式即两类相子存在 r 组时的所有排列数,这种种分布,构成可能出现的某种相组织形态。

若 P 为出现 r 组的概率,则

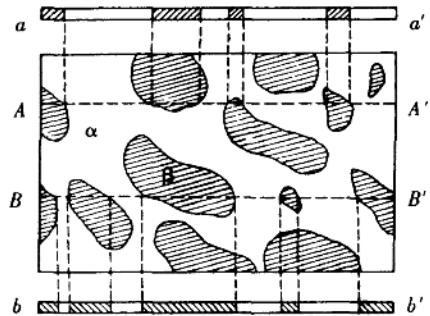


图 3 相子的“分组”

$$P = \frac{Q}{\int_{-\infty}^{\infty} Q dr} \quad (5)$$

但

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{\infty} Q dr &= \frac{2^M(1+\alpha)}{2\pi M\sqrt{\alpha}} e^{-\frac{M}{2}\left(\frac{\alpha-1}{\alpha+1}\right)^2} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{2(1+\alpha)^2}{\alpha M} \left[r - \frac{\alpha M}{(1+\alpha)^2}\right]^2} dr \\ &= \frac{2^M(1+\alpha)}{2\pi M\sqrt{\alpha}} e^{-\frac{M}{2}\left(\frac{\alpha-1}{\alpha+1}\right)^2} \frac{\sqrt{2\alpha M}}{2(1+\alpha)} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-y^2} dy \\ &= \frac{2^M}{2\pi M\sqrt{\alpha}} e^{-\frac{M}{2}\left(\frac{\alpha-1}{\alpha+1}\right)^2} \cdot \frac{\sqrt{2\alpha M}}{2} \cdot \sqrt{\pi} \end{aligned}$$

上式中

$$y = \frac{1+\alpha}{\sqrt{2\alpha M}} \left[r - \frac{\alpha M}{(1+\alpha)^2} \right]$$

代入式(5),得:

$$P = \frac{2(1+\alpha)}{\sqrt{2\pi\alpha M}} e^{-\frac{2(1+\alpha)^2}{\alpha M} \left[r - \frac{\alpha M}{(1+\alpha)^2} \right]^2} \quad (6)$$

上式即两类相子以 r 为变数的分布概率,它与高斯分布函数一致。在工业科学等许多方面,存在大量高斯型分布事例,如今两类相子的分布,亦属这一类型,说明它相同于一般客观规律。

如果材料是单一相,亦可用同样方法推导,只是把晶界作为另一类相子,这材料即成为由两类相子构成,总的排列数及出现概率,仍同式(4)及式(6)。

相子的种种分布,往往是通过不同热处理而获得,它当与热力学有密切关系。根据统计热力学,熵代表组织的“混乱”程度,相子作种种不同排列,表现出不同程度的混乱,产生了混合熵(Entropy of Mixing),按 Boltzmann 关系,熵的值可以下式表示:

$$S = k \ln w \quad (7)$$

式中 k 为 Boltzmann 常数, w 为热力学概率。以 Q 代 w 得:

$$\begin{aligned} S &= k \ln Q = \left\{ M \ln 2 + \ln(1+\alpha) - \ln 2\pi M\sqrt{\alpha} - \frac{M}{2} \left(\frac{\alpha-1}{\alpha+1} \right)^2 \right. \\ &\quad \left. - \frac{2(1+\alpha)^2}{\alpha M} \left[r - \frac{\alpha M}{(1+\alpha)^2} \right]^2 \right\} k \\ &\approx \left\{ M \ln 2 - \frac{M}{2} \left(\frac{\alpha-1}{\alpha+1} \right)^2 - \frac{2(1+\alpha)^2}{\alpha M} \left[r - \frac{\alpha M}{(1+\alpha)^2} \right]^2 \right\} k \end{aligned} \quad (8)$$

上式因 M 是相当大的数,故可简化。当

$$r = \frac{\alpha M}{(1+\alpha)^2} \quad (9)$$

熵的值为最大,式(8)成为:

$$S_{\max} = kM \left[\ln 2 - \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha-1}{\alpha+1} \right)^2 \right] \quad (10)$$

但在式(6)中,当 r 同式(9)时, P 为最大,可见熵的最大值条件,恰与相子分布概率的最大值条件相一致。

在热力学方面,熵最大时,表明这时组织最稳定。在分布概率方面,当出现概率为最

大,表明这组织最易出现,最易出现的组织,必为较稳定的相。如今由热力学关系所获得熵最大条件,恰与组织出现概率最大的条件相一致,说明本文所推导的相子分布概率,符合 Boltzmann 关系。

4 显微组织与宏观强度的关系

得到相子的分布规律后,可进而推求显微组织与宏观强度的关系。

对于两相组织的材料,当出现某一显微组织时,这是由于内中两类相子以 r 为参数所作的组合排列结果,若出现这组织的概率为 P ,宏观强度为 σ_1 ,组织参数 r_1 ,已知 P_1 与 r_1 符合高斯型关系,则 P_1 与 σ_1 亦可认为存在高斯型关系,因此可假定:

$$P = K e^{-\left(\frac{\sigma - \sigma_0}{\sigma_1}\right)^2} \quad (11)$$

上式中 K, σ_0, σ_1 为常数,将式(6)及式(11)各取对数,得:

$$\ln K - \left(\frac{\sigma - \sigma_0}{\sigma_1}\right)^2 = \ln 2(1 + \alpha) - \frac{1}{2} \ln 2\pi\alpha M - \frac{2(1 + \alpha)^2}{\alpha M} \left[r - \frac{\alpha M}{(1 + \alpha)^2} \right]^2$$

由于 M 是相当大的数,上式可简化为:

$$\left(\frac{\sigma - \sigma_0}{\sigma_1}\right)^2 = \frac{2(1 + \alpha)^2}{\alpha} \left[\frac{r}{M} - \frac{\alpha}{2(1 + \alpha)^2} \right]^2 M$$

或

$$\sigma = \sigma_1(1 + \alpha) \sqrt{\frac{2}{\alpha M}} \cdot r - \left(\frac{\sigma_1}{1 + \alpha} \sqrt{2\alpha M} - \sigma_0 \right) \quad (12)$$

上式有一 α 因子,为便于计量,作如下转化:

$$\alpha = \frac{m}{n} = \frac{f_m}{f_n} \quad f_m + f_n = 1$$

f_m 及 f_n 为 m 及 n 个相子的体积百分数,这个数值易于计量。代入式(12),得

$$\sigma = \sigma_1 \sqrt{\frac{2}{M}} \frac{1}{\sqrt{f_m(1 - f_m)}} \cdot r - (\sigma_1 \sqrt{2M f_m(1 - f_m)} - \sigma_0) \quad (13)$$

上式即显微组织参数 r 与宏观强度 σ 间的一个关系式,它还包括一个重要因素即第二相的体积百分数。式中 σ_1, σ_0 是常数, M 是一定长度内两类相子的总数,它属人为划分,因此亦可视为一个常数。

在不少场合中,需以第二相颗粒大小 d 为参数,这可作如下转化:

在图4上任画一直线 AA' ,两类相子在 AA' 上的分布如 aa' ,可区分为若干组,本图有5组,即 $r=5$ 。设 α 相有 m 个相子, β 相有 n 个相, r 为组数, t 为每个相子的长度,则 β 相被直线 A' 所截的平均大小为:

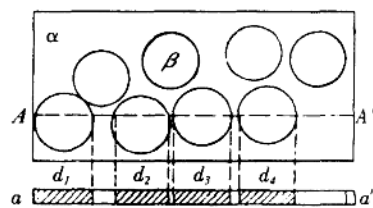


图4 颗粒大小的平均计量

$$d = \frac{d_1 + d_2 + \cdots}{r} = \frac{tm_1 + tm_2 + \cdots}{r} = \frac{tm}{r}$$

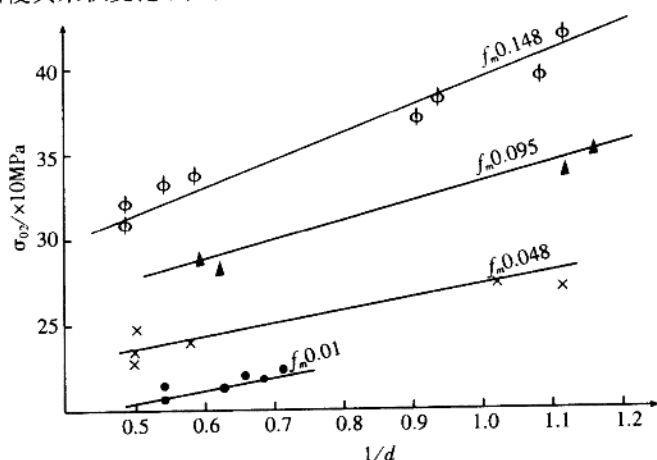
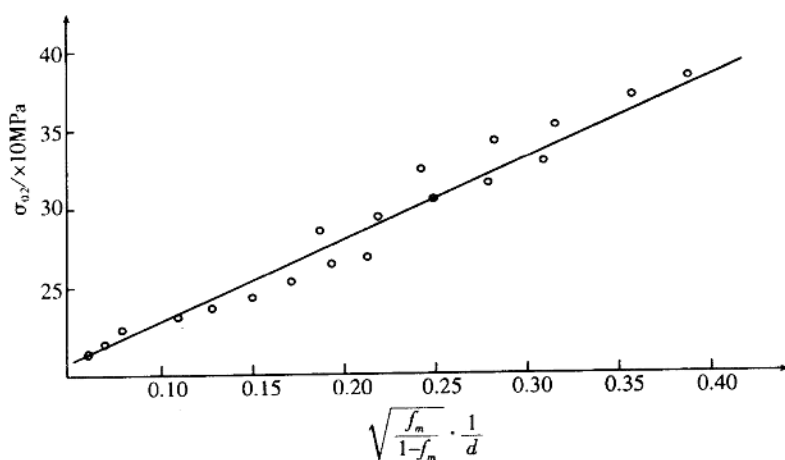
或

$$r = \frac{tMf_m}{d}$$

代入式(13),得

$$\sigma = \sigma_1 t \sqrt{2M} \sqrt{\frac{f_m}{1-f_m}} \cdot \frac{1}{d} - (\sigma_1 \sqrt{2Mf_m(1-f_m)} - \sigma_0) \quad (14)$$

上式即为第二相平均颗粒大小 d 与宏观强度 σ 的关系。当 f_m 不变时, σ 与 $1/d$ 成线性关系; 当 f_m 为变值时, σ 与 $\sqrt{\frac{f_m}{1-f_m}} \cdot \frac{1}{d}$ 成线性关系。式(14)末项含有 $f_m(1-f_m)$, 由于 f_m 增加时, $1-f_m$ 减小, 使其乘积变化不大, 因此可视末项为常数。

图5 $\sigma_{0.2}$ 与 $1/d$ 的关系图6 $\sigma_{0.2}$ 与 $\sqrt{\frac{f_m}{1-f_m}} \cdot \frac{1}{d}$ 的关系

式(13)或式(14)是循用相子观点和统计方法所获得的一个理论公式,这公式是否与客观实际相符合,需有验证。

下面引用两个不同来源的实验数据,进行验证。一个是 Liu 及 Gurland 的数据^[5],他们的数据较全面,测量较严格,如 Liu 的数据是将每一试样取两个不同部位,共测量了 2000 个点的结果,他们的数据分别抄录于附表 1 和附表 2。

根据附表 1,按 $\sigma_{0.2}$ 及 $1/d$ 绘画,得结果如图 5,可见当 f_m 为定值时,各点皆位于一条直线。若在图 5 的 4 根直线上各取 4~6 个点,并将每点的横座标都乘以相应的 $\sqrt{f_m/(1-f_m)}$ 值,然后按 $\sigma_{0.2}$ 及 $\sqrt{f_m/(1-f_m)}/d$ (见附表 3)绘图,即得非常有趣结果,原来是 4 根相互分离的直线,基本上叠合成一根直线(图 6),恰如式(14)所预测。

再用附表 2 的数据来验证。表中 d 代表铁素体晶粒平均直径, f_a 为它的体积百分数。数据号 1~13 都属同一 f_a 值,以这些数据绘图,得结果如图 7,各点亦都在一根直线上。对于附表 2 中其它数据,将硅、锰含量相接近的点,各为一组绘图,其横座标都乘以相应的 $\sqrt{f_a/(1-f_a)}$ 值,得结果亦基本上位于一条直线上(图 8),完全如式(14)所预测。硅锰能强化铁素体,改变了铁素体相子本身的强度,因此应取硅锰含量基本上相同的点,方可应用式(14)。以上就验证了式(14)的线性关系。

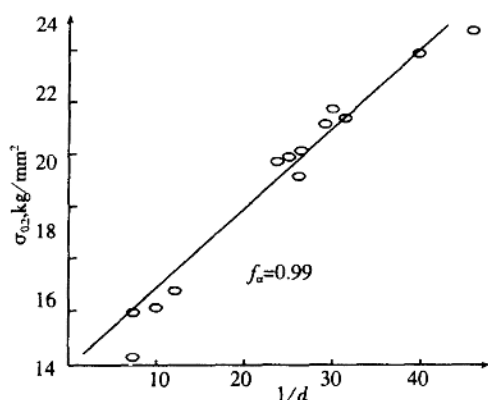


图 7 在相同 f_a 下, $\sigma_{0.2}$ 与 $1/d$ 的关系

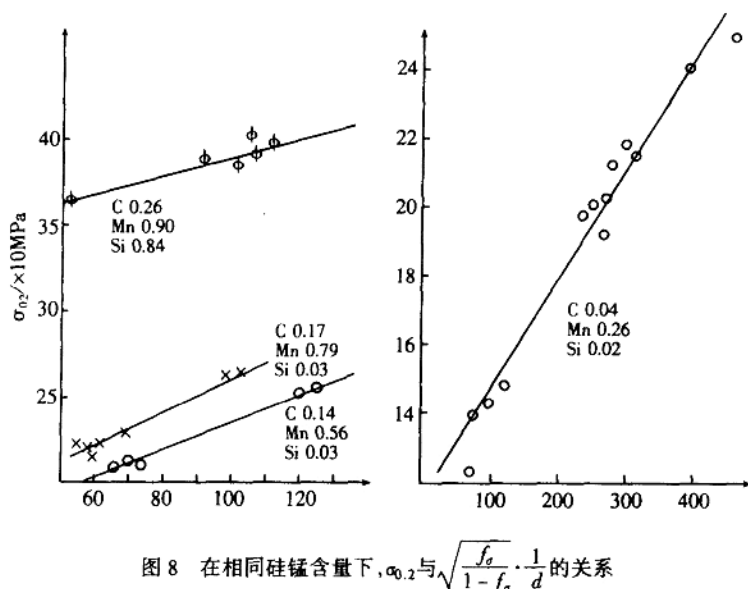


图 8 在相同硅锰含量下, $\sigma_{0.2}$ 与 $\sqrt{\frac{f_a}{1-f_a}} \cdot \frac{1}{d}$ 的关系

5 讨 论

本文是循用相子观点及统计方法,获得了宏观强度的表达式。虽有文献报道,可从理论上获得,但都缺乏包含体积百分数这么一个重要因素。如将体积百分数视为定值,则 Orowan 式及 Fisher 式与本文式(14)即基本一致。前者的关系为^[7]:

$$\sigma = C/D$$

D 表示第二相颗粒的平均自由程(图 4)。但 $r = tn/D$,代入式(13),即见两者基本一致。Fisher 的关系式为^[8]:

$$\sigma = CA/d$$

与式(14)比较,亦是基本上一致。

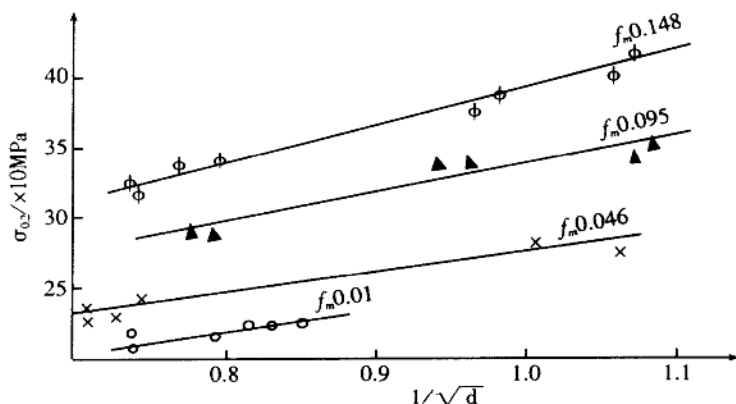


图 9 $\sigma_{0.2}$ 与 $\sqrt{d}$ 的关系

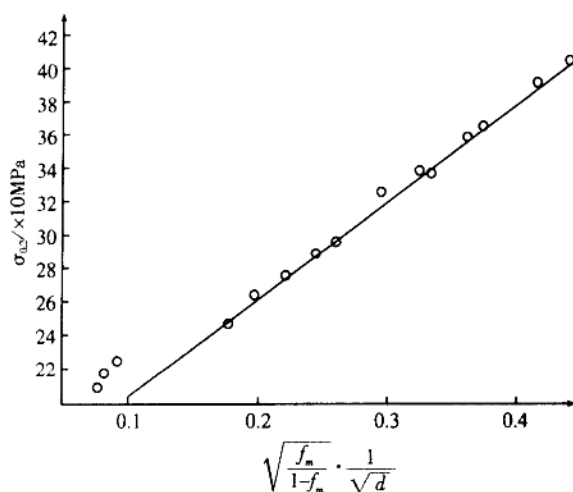


图 10 $\sigma_{0.2}$ 与 $\sqrt{\frac{f_m}{1-f_m}} \cdot \frac{1}{\sqrt{d}}$ 的关系

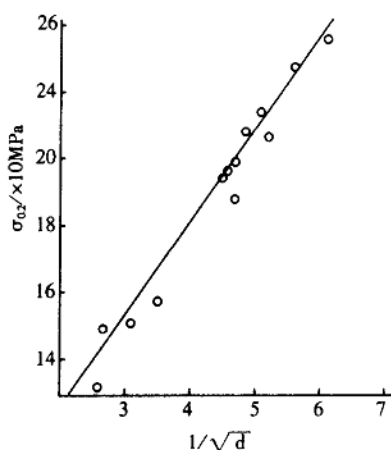


图 11 在相同 f_m 下, $\sigma_{0.2}$ 与 $\frac{1}{\sqrt{d}}$ 的关系

另一方面, Hall 及 Petch 所获得的关系式, 式(1), 与式(14)很不一致, 为什么不一致, 这两式虽在形式上不一致, 但若用相同数据绘图, 都可以得到直线。例如图 6~8 系按 $\sigma_{0.2}$ 及 $1/d$ 绘图, 若按 $\sigma_{0.2}$ 及 $1/\sqrt{d}$ 绘图, 都亦成直线(图 9~11), 这个原因, 需要阐明。

令

$$\Delta = \frac{1}{d} - \frac{1}{\sqrt{d}} \quad (15)$$

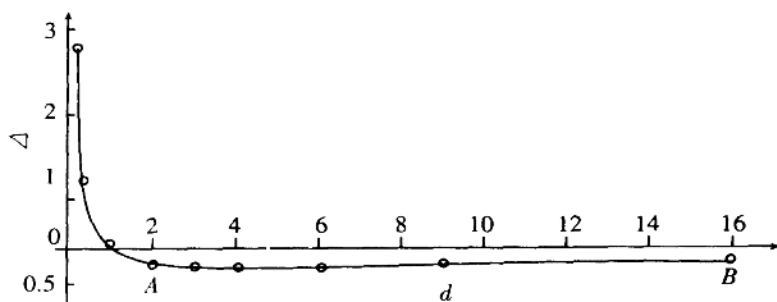


图 12 Δ 与 d 的关系

将上式按 Δ 及 d 绘图得结果如图 12。由图得知, 当 d 大于 0.5, Δ 的值只变动于 ± 0.3 , d 愈大, Δ 渐趋于零, 在 AB 之间, 是一相当平坦线段, 这时 Δ 的值变化很小, 可视为常数, 即:

$$\frac{1}{d} - \frac{1}{\sqrt{d}} \approx \text{常数} \quad (16)$$

由式(16), 以 $1/d$ 或 $1/\sqrt{d}$ 绘图, 可各得直线。附表 1 的 d 值, 都大于 0.5, 因此绘起图来, 都成直线。

当 d 小于 0.5, 在一定条件下, 亦能得到直线。试用不同 d 值, 以 $1/d$ 及 $1/\sqrt{d}$ 为座标绘图, 得抛物线。在某些范围内的 d 值, 抛物线的斜率变化不大, 即接近直线, 这时以 $1/d$ 或 $1/\sqrt{d}$ 绘图, 将各得直线。表 2 的 d 值变化于 0.15~0.013, 用该表的 $1/d$ 及 $1/\sqrt{d}$ 为座标绘图, 得一近似直线图形(图 13), 这就说明为什么用该表的 $1/d$ 及 $1/\sqrt{d}$ 与 $\sigma_{0.2}$ 绘图, 都得直线。

Hall - Petch 关系中的 d , 原指铁素晶体颗粒直径, 后人曾用一些两相组织的实验数据, 亦确得直线, 因此认为该关系有普遍意义。其实, 根据以上论述, $1/d$ 与 $1/\sqrt{d}$ 在大多数情况下, 是可以互换的。式(1)之所以能引伸至两相组织, 可能是偶合。

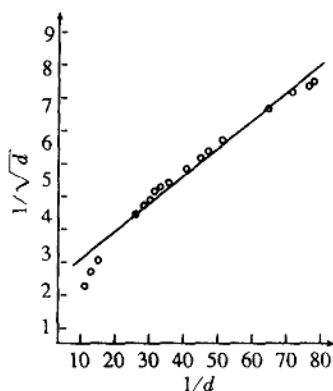


图 13 $1/d$ 与 $1/\sqrt{d}$ 的关系

6 结 语

综上,可归纳如下几点看法:

(1)本文是以显微组织为基点,但并不是一般所用方法。原组织不变,而是将其划分为大小相等的小方块——相子。显微组织转化为相子后,由于相子的数量总是很多,因此就有可能循用数理统计方法进行统计推导。

(2)任何显微组织,都是内中各类相子的组合排列结果。排列方法很多,只有那些出现概率较大的,才成为常见相。经用统计方法,得知相子的分布属一般高斯型。

(3)从分布规律得宏观强度与组织参数间的关系式,经用一些具体实验数据进行验证,都如该关系式所预测。

(4)有人认为 Hall - Petch 关系式具有普遍意义,其实是偶合,特别是当第二相体积有变化时,它即丧失线性关系,但若用本文给出的关系式,仍能保持线性。本文关系式,与 Orowan 及 Fisher 等用位错方法所得关系式基本一致。

(5)采用相子观点及统计方法,本文仅为开始。目前是先针对简单的两相组织,说明用位错方法可以达到的,用相子和统计方法亦可以达到。对于其它强化组织,以及相子与塑性及断裂韧性的关系等,将有待于进一步研究。

参考文献

- [1] Gensamer M, Pearsall E B, Pellini W S and Low J R. Trans. A.S.M., 1942, 30: 983
- [2] Robert C S, Carruthers R C and Averbach B L. Trans. A. S. M., 1952, 44: 1150
- [3] Turkalo A M and Low J R. AIME, 1958, 212: 750
- [4] Ansell G S and Lenel F V. Acta Met, 1960, 8: 621
- [5] Liu C T. and Gurland J. AIME, 1968, 242: 1535
- [6] Kouwenhon H. J. Trans. A. S. M., Quarterly, 1969, 62: 437
- [7] Orowan E. Symposium on Internal Stresses. 1948, 451
- [8] Fisher J C, Hart E W and Pry R H. Acta Met, 1953, 1: 366
- [9] Hall E. O. Proc. of Physical Society, 1951, B64: 747
- [10] Petch N. J. Iron and Steel Inst., 1953, 174: 25
- [11] Griffith A A. Phil. Trans. Roy. Soc. 1920, A221: 163
- [12] Stereology and Quantitative Metallography, ASTM. SIP504, 1971
- [13] Cahn E W. Physical Metallurgy, 1970

附 录

在式(2)中令:

$$n - 1 = N, r - 1 = R, R - \frac{N}{2} = x$$

$$\text{则} \quad Q_n = \frac{N!}{\left(\frac{N}{2} + x\right)! \left(\frac{N}{2} - x\right)!} \quad (A)$$

当 $x=0$, Q_n 之值为最大, 即:

$$(Q_n)_{\max} = \left[\left(\frac{N}{2} \right)! \right]^2 \quad (B)$$

由于 N 是相当大的数, 可应用 Stirling 公式:

$$N! = \sqrt{2\pi N} \left(\frac{N}{e} \right)^N$$

代入式(B)得:

$$(Q_n)_{\max} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot N^{-\frac{1}{2}} \cdot 2^N = \frac{2^n}{\sqrt{\pi 2(n-1)}} \quad (C)$$

由式(A),(B)得:

$$\begin{aligned} \frac{Q_n}{(Q_n)_{\max}} &= \frac{\left(\frac{N}{2}\right)!}{\left(\frac{N}{2} + x\right)!} \frac{\left(\frac{N}{2}\right)!}{\left(\frac{N}{2} - x\right)!} \\ &= \frac{\frac{N}{2} \left(\frac{N}{2} - 1\right) \left(\frac{N}{2} - 2\right) \cdots \left[\frac{N}{2} - (x-1)\right]}{\left(\frac{N}{2} + x\right) \left(\frac{N}{2} + x - 1\right) \cdots \left(\frac{N}{2} + 1\right)} \\ &= \frac{N(N-2)(N-4) \cdots [N - (2x-1)]}{(N+2x)(N+2x-2) \cdots (N+2)} \\ &= \frac{1}{1 + \frac{2x}{N}} \frac{1 - \frac{2}{N}}{1 + \frac{2x}{N} - \frac{2}{N}} \cdots \frac{1 - \frac{2x}{N} + \frac{2}{N}}{1 + \frac{2}{N}} \end{aligned}$$

$$\text{但} \quad \frac{1}{1 + \frac{2x}{N}} > \frac{1 - \frac{2}{N}}{1 + \frac{2x}{N} - \frac{2}{N}}$$

$$\text{及} \quad \left(1 - \frac{2x}{N}\right) < \frac{1 - \frac{2x}{N} + \frac{2}{N}}{1 + \frac{2}{N}}$$

$$\therefore \quad \left(\frac{1}{1 + \frac{2x}{N}}\right) > \frac{Q_n}{(Q_n)_{\max}} > \left(1 - \frac{2x}{N}\right)^x$$

由于

$$2x/N \leq 1$$

则

$$\ln(1 + 2x/N) \approx 2x/N$$

得

$$\left(1 + \frac{2x}{N}\right)^x = e^{x \ln(1 + \frac{2x}{N})} \approx e^{\frac{2x^2}{N}}$$

及

$$\left(1 - \frac{2x}{N}\right)^x \approx e^{-\frac{2x^2}{N}}$$

由上可知 $Q_n/(Q_n)_{\max}$ 的上下限, 都趋相等, 即: