

# 金屬陶瓷

[美] J. R. 丁格尔波夫 W. B. 克兰道尔主編

施 今 譯

上海科学技术出版社

# 金 属 陶 瓷

〔美〕 J. R. 丁格尔波夫 主編  
W. B. 克兰道尔

施 今 譯



上海科学技术出版社

## 內 容 提 要

本书是由美国目前从事金属陶瓷研究、試用与制造的一些专门人員分头执笔撰写,汇编而成。内容包括:金属陶瓷的物理化学問題、各种类型的金属陶瓷制造工艺、金属陶瓷的性能及其測試方法以及金属陶瓷在各方面的用途和試用經驗,比較全面。因此是一本了解金属陶瓷的入門书籍。本书可供从事这方面研究、制造与教学的工作者作为参考书用。

CERMETS

J. R. Tinklepaugh, W. B. Crandall

Reinhold Publishing Corporation • 1960

金 属 陶 瓷

施 今 譯

---

上海科学技术出版社出版 (上海瑞金二路 450 号)

上海市书刊出版业营业許可證出 093 号

---

上海新华印刷厂印刷 新华书店上海发行所发行

---

开本 850×1156 1/32 印張 8 4/32 排版字数 214,000

1964 年 11 月第 1 版 1964 年 11 月第 1 次印刷

印数 1—4,500

統一书号 15119·1581 定价(科六) 1.20 元

## 譯者前言

本书是一册专门介绍金属陶瓷这种新型材料的书籍。系由美国目前各工厂试验室、科学研究机关与一些高等学校中从事金属陶瓷试制或研究的工作者分题执笔写作,汇编而成。

本书内容就其涉及的方面来说,是比较全面的;举凡金属陶瓷的物理化学问题、制造工艺方法、性能测试及其用途与试用经验,差不多都占有一定的篇幅,因此不失为一册比较全面地了解金属陶瓷及其制造方法与用途的入门书。

但由于本书是由许多人分头执笔撰写,事先似乎只规定了各人所写的大致内容范围,并无统一的编写提纲,因此本书有一个很显著的缺点:每一章节的撰写人可能是因为各人的工作部门与性质不尽相同,其所写的内容在着眼点与叙述方式上固各有不同,在详简与深浅程度上也颇不一致;甚至还或多或少有重复之处。所以要把它作为一本深入研究金属陶瓷的专业性质的参考书籍,在内容上似乎还不足够。不过本书大部分章节后面都附有相当数量的参考文献,并在全书末尾列有一份比较完全的参考书目。故能直接阅读英文的读者仍可查阅所需的文献,作进一步深入的了解。

因本书所涉及的内容比较专门,故全书中专业术语既多,“行话”亦不少;译者虽尽最大努力参考各类专业词典,将这些专业术语按国内现定译名译出,但仍不免有若干专门名词与“行话”不得不根据字义来翻译,因限于外文与专业水平,谬误之处恐怕不少,祈读者给予指正。

譯者

# 原 序

这些年来,已有大量关于金属陶瓷的公开报导在陶瓷、冶金与化学方面的各种杂志和期刊上发表。但是还没有一本将这类报导中有代表性的内容汇总起来的著作。本书不拟对欧洲方面的研究工作广泛而重要的工作进行介绍,故所选用的文章都限于在美国所发表的。

本书内容包括氧化物基与碳化物基两种高温金属陶瓷。金属陶瓷的物理化学问题在本书中占了相当大的篇幅,以便读者可熟悉陶瓷与金属间的关系,因为这种关系对材料的选择与所获得的性能起着决定性的作用。介绍原料制备与制造方法的那些章节多少都受到报导本身性质的限制。

在美国,主要的努力一直放在用于喷气发动机的碳化钛基金属陶瓷的发展方面。关于这类金属陶瓷制造与性能的报导要比任何其他类型的金属陶瓷更多一些。因此,本书将重点放在碳化钛基金属陶瓷方面,作详细的介绍,而这种详细的叙述对于其他类型的金属陶瓷也是适用的。对于氧化铝基金属陶瓷的讨论也很广泛。金属陶瓷的用途在目前还受限制,因此关于应用方面的一些章节,是企图使读者了解目前与将来应用金属陶瓷的限度与可能。

兹谨向 Penn-Texas Corporation 的 Helen Friedemann 女士志谢。因在她的同意下始把她关于金属陶瓷的书目(1950~1956)编入了本书的书目中。

J. R. Tinklepaugh

W. B. Crandall

*Alfred, New York*

1960 年 7 月

# 目 录

譯者前言

原序

|                                                             |     |
|-------------------------------------------------------------|-----|
| 1. 引言 (J. R. Tinklepaugh 与 W. B. Crandall).....             | 1   |
| 2. 金属陶瓷的物理化学性状 (M. Humenik, Jr.<br>与 T. J. Whalen) .....    | 7   |
| 3. 氧化物与碳化物的制备 .....                                         | 53  |
| 氧化物的制备 (Thomas S. Shevlin) .....                            | 53  |
| 用电弧炉生产碳化鈦 (W. W. Trainor) .....                             | 59  |
| 碳化鈦的制备 (John Wambold) .....                                 | 61  |
| 4. 成型工艺 .....                                               | 63  |
| 金属陶瓷的注浆成型 (Berthold C. Weber) .....                         | 63  |
| 浸漬法 (Claus Goetzel) .....                                   | 79  |
| 金属陶瓷在压力下电阻燒結 (Fritz V. Lenel) .....                         | 87  |
| 爆炸等靜力成型 (John Wambold) .....                                | 92  |
| 粘結碳化物干压成型中优良实践的总结 (John V. West) .....                      | 92  |
| 5. 氧化物基金属陶瓷 .....                                           | 104 |
| 氧化铝-金属的金属陶瓷 (Thomas S. Shevlin) .....                       | 104 |
| 鉻-氧化铝基金属陶瓷 (Claude L. Marshall) .....                       | 117 |
| 金属-改形的氧化物 (Berthold C. Weber<br>与 Murray A. Schwartz) ..... | 128 |
| 6. 碳化物基金属陶瓷 .....                                           | 131 |
| 碳化鈦-金属組成的性能 (John Wambold) .....                            | 131 |
| 碳化鈦-金属浸漬的金属陶瓷 (Claus Goetzel) .....                         | 140 |
| 碳化鈦-鋼金属陶瓷 (Martin Epner 与 Eric Gregory) .....               | 158 |
| 7. 金属陶瓷的测试与应用 .....                                         | 162 |
| 碳化鉻的应用 (R. F. Pozzo 与 John V. West) .....                   | 162 |
| 熔炼活性金属的盛器材料 (Berthold C. Weber                              |     |

|                                                                          |     |
|--------------------------------------------------------------------------|-----|
| 与 Murray A. Schwartz) .....                                              | 166 |
| 电子管用的耐高温金属陶瓷(Leo J. Cronin) .....                                        | 170 |
| 在摩擦材料中的金属陶瓷(Howard B. Huntress) .....                                    | 178 |
| 金属陶瓷与陶瓷的金属加固和套盖(J. R. Tinklepaugh) .....                                 | 182 |
| 一种用来测试金属陶瓷的冲击试验(E. J. Soxman, J. R.<br>Tinklepaugh 与 M. T. Curran) ..... | 193 |
| 金属陶瓷在原子核设备上的应用(J. R. Johnson) .....                                      | 204 |
| 金属陶瓷在航空发动机上的应用(Andre J. Meyer, Jr.<br>与 George C. Deutsch) .....         | 209 |
| 图书目录 .....                                                               | 222 |
| 索    引 .....                                                             | 246 |

# 1. 引言

J. R. Tinklepaugh 与 W. B. Crandall

历史上有不少明显的事例,即人們为了某种需要力图去发现、发展或制造出一种近乎完善的材料。其中值得注意的是,要能满足对这种材料的要求,即能綜合陶瓷与金属两种材料大部分有用的特性于一体。虽欧洲方面的研究工作者在这一寬广的题目上已經有了大量的文献,但介紹这些工作并非本书任务之一。

在第二次世界大战期間及在它剛結束的时候,对一种高温、高强度材料的需求,在美国已經变得十分明显。若干氧化物基的金属陶瓷可作为急需合金的代用品。这种新型材料在当时看来非常有希望可用在新噴气发动机的高温部位上,于是发展的計劃就着手拟訂了。

有关部門承担了这个任务去定出当时认为这样一种新材料应如何把它們結合起来的詳細办法。在这一工作开始时,觉得不仅不特別困难,而且认为只是需要一些時間去找出“那种結合”的途徑。如所周知,許多合金几乎具有所有理想的性能,例如:延性好、强度高与热傳导优良等等,而且差不多是足够好了。所要求的高温应用,只不过是比当前所知最优良的金属或合金略高一些。因此,为什么不把較高熔点与較好化学稳定性(抗氧化)的陶瓷和性能差不多够好的金属結合在一起,来創造一种新型材料——金属陶瓷——呢?有些名称,如:“ceremetallic”、“ceramul”及“cermet”都曾用来称呼过这种新型材料;但是“cermet”这一名称,后来几乎在全美国都被接受了。

在所有的国家中对于“metal”(金属)这个字和从它所意味着的材料,看来都不会有多大的困难。而“ceramic”(陶瓷)这个字却似乎在全世界有很不同的含义。陶瓷材料大多数較旧的定义指

出：它們来自矿物，同时在制造它們的时候要用热。可是許多現代的陶瓷材料却是电炉里的合成产物。国立陶瓷工程师学院的政府定名委员会一度对陶瓷作如下的定义：“陶瓷是一类属的名称，包括那些由无机、非金属、矿物原料所組成，采用各种方法之任何一种来制备，并在制造过程中往往要使用高温的制品”。在一般實踐中，这名称常被用来称呼除碳以外的、几乎所有的无机非金属材料。有許多材料在性能上似乎介于陶瓷与金属之間。碳化硅基的耐火材料曾一直被列为陶瓷材料，但碳化鈦及許多其他碳化物則被冶金工作者看作“硬质合金”。“硬质合金”这个名称的采用看来也是有問題的；可能是由于找不到一个更好的字，才在欧洲方面普遍采用。

純的碳化物象陶瓷材料那样，通常是脆而对热震敏感的，但它們同时也象金属那样具有高的热导与电导。硼化物、氮化物与硅化物具有某些陶瓷的特性，但也具有金属的性质。而至今我們仍可听到冶金工作者把这些材料称为“非金属”、“陶瓷”，甚至称做“硬质相”，即使当它們存在于合金中时，也是如此。除了那些对定名学有兴趣的人之外，把这些很有兴趣的材料称为陶瓷、硬质合金或其他別的什么，并不重要。不过，由于沒有定义來說明什么是陶瓷与什么是金属，在“金属陶瓷”这名称的含义上已引起了很大的混乱。

曾作过一些尝试給金属陶瓷下一个定义。ASTM<sup>①</sup>的 C-21 委员会的金属陶瓷任务組 B (Task Group B on Cermets of ASTM Committee C-21) 曾建議用下面的定义：“一种由金属或合金同一种或几种陶瓷相所組成的非均质的复合材料。”采用这一定义是由于想把关于陶瓷的定义保留下来。

ASTM 金属陶瓷研究委员会——一个由陶瓷工作者与冶金工作者共同組成的机构，并不想对这名称下定义。通过协商，他們

---

① ASTM 是 American Standard Testing Methods (美国标准試驗方法) 的縮写——譯注。

可以同意对这一与委员会有关的材料采用这样一个定义：“一种由金属或合金同一种或几种陶瓷相所组成的非均质的复合材料，其中后者约占 15 到 85 体积百分率，同时在制备温度下，金属相与陶瓷相间的溶解度是较微末的。”这一定义很明显地把那些通过在颗粒界面上沉淀一种“硬质相”、“陶瓷相”或“非金属相”来强化的合金从金属陶瓷中给取消掉了。大多数或全部烧结铝型材料也给取消掉了。所谓烧结铝就是一种用非常细的氧化铝(陶瓷材料)均匀地分散在金属铝颗粒界面上来强化的铝材。曾审慎地在这一定义中，提出了某种在其他任何金属陶瓷定义中所没有的区别。金属陶瓷也曾被认作一种高温材料。按本书的目的，采用了 ASTM 的 C-21 委员会任务组的定义，同时却有一定的灵活性，至少把碳化物作为陶瓷材料包括在内。

在美国金属陶瓷短短的发展史中，许多研究实验室在工艺上作出了贡献。俄亥俄州立大学(Ohio State University)、伊利诺亥思大学(University of Illinois)等在  $MgO$ 、 $BeO$  与  $Al_2O_3$  基金属陶瓷的发展上有所贡献。肯尼麦德耳公司(Kennametal, Inc.)、美国电金属公司(American Electrometals, Inc.)以及费思司德林公司(Firth Sterling Company)等在研究用镍粘结的碳化钛金属陶瓷方面进行了工作。路易思飞行推进实验室(Lewis Flight Propulsion Laboratory)对肯定金属陶瓷在喷气发动机中的应用价值及在考察与设计金属陶瓷部件中，作了许多工作。

麻省工艺研究所以及后来福特汽车公司都完成了金属与陶瓷之间关系的基本研究工作，这种研究工作使我们能更好地了解制造优良金属陶瓷的工艺。到 1949 年，金属粘结碳化物，特别是镍粘结的碳化钛出现了，同时看来有可能作高温的应用。这就使大多数碳化物工具材料的制造厂商转向高温领域，同时产生了丰富的工艺并开辟了另一个发展阶段。Schwartzkopf 与 Kieffer 在他们的“高温硬质金属”(“Refractory Hard Metals”)一书中，曾叙述过硬质金属工艺的历史，这里没有必要再深入地去探讨了。

在金属陶瓷发展的初期，重点是放在  $1800^{\circ}F$  左右温度下的高

应力-破裂强度上。一种喷气发动机用的合金——X-40——往往用来作为比较的标准。在一个比较短的时期内，金属陶瓷在这一性能上的优点就表现了出来。氧化铝基金属陶瓷在俄亥俄州立大学被发展起来，它直到  $2200^{\circ}\text{F}$  都有合乎要求的应力-破裂强度。最后，由肯尼麦德耳公司发展了一种碳化钛基金属陶瓷(K183A)，在  $1800^{\circ}\text{F}$  下具有 28,000 磅/时<sup>2</sup> 100 小时的应力-破裂强度。采用浸渍法制造的碳化钛金属陶瓷具有在  $1800^{\circ}\text{F}$ ，100 小时 20,000 磅/时<sup>2</sup> 的应力-破裂强度(SOA 300)。曾经报导过，一种商品氧化铝基金属陶瓷[LT-2，海司思德拉脱公司(Haynes Stellite Co.)]，在  $2400^{\circ}\text{F}$  时，具有 25,000 磅/时<sup>2</sup> 的破裂强度模量。所以，要获得在喷气发动机操作温度下优越的强度，没有很大的困难。

在  $1500\sim 2000^{\circ}\text{F}$  温度范围内，碳化钛基金属陶瓷的氧化稳定性是一个问题，因为碳化钛在这种温度下氧化得十分迅速。不过很快就发现，无论以金属或碳化物的形式把少量的铬加入到碳化钛基金属陶瓷中去，都能大大地增加它的抗氧化能力。同时也发现，添加 4~6% 的碳化钼、铌与钛的固溶体也可收到类似的效果。氧化铝-铬金属陶瓷不加添加物，直到  $2200^{\circ}\text{F}$  都有非常好的稳定性。

在路易思飞行推进实验室等金属陶瓷发展的实验室中所进行的，相当详尽的热震试验证明：最好的碳化钛与氧化铝基金属陶瓷具有足够的能力来承受类似于在喷气发动机中所遇到的那种热震。

不过，金属陶瓷很脆，用来做试验的部件往往要很小心地包装与运输以防止破裂。在这阶段，有一家飞机发动机制造厂商宣称：只要金属陶瓷还是必须装在用棉花衬里的盒子里来运输的话，它们将决不能用到飞机发动机中去，他很强调抗冲击强度的重要性。冲击强度试验过去是，现在还是采用各种不同的特殊设备来进行的。

阿尔弗雷德大学发展了一种冲击强度的测试方法，这方法也为其他一些金属陶瓷实验室所采用了。采用这种设备来进行时，

发现那些用几种不同方法所制造出来的金属陶瓷的冲击强度在室温时变动在 2~15 吋·磅之間。采用同一設備来测定热处理过的 X-40 合金的抗冲击强度,是 32 吋·磅。发动机制造者还发觉,鉄鱗、石子及其他外来物质的小顆粒穿过发动机时,会以高速度打击渦輪叶片。虽然不能肯定地表明,金属陶瓷叶片最初的损坏是由于冲击所造成,但有一点是很明显的,当有一片叶片损坏之后,不管是由于什么原因所造成,它将冲击所有其余的金属陶瓷叶片,把它們全部撞坏。

兴透卡司德联合企业发展了一种方法,就是用一种熔融的金属或合金浸漬一个多孔性的碳化物結構,来制造金属陶瓷。采用这种工艺就有可能来做出一种分层次的金属陶瓷,这种金属陶瓷的表面基本上是金属,而越向内部則碳化物愈来愈多。这一发展,提供了一种具有相当高的抵抗低质量顆粒高速度冲击能力的金属陶瓷。

产品质量的恒定与檢驗方法的肯定始終是金属陶瓷領域內的主要問題。金属陶瓷通常一直是小量生产的,而同一种金属陶瓷的性能往往这一批和另一批不同。材料的损坏无疑地往往是由于那些察看不出来的微裂紋存在的緣故。

噴气发动机用的金属陶瓷最后达到了这样一个地步,就是要从主要方面来改进它們看来似是沒有工作可做了。金属陶瓷由于价格高、性质脆、用實驗室方法制出产品的不稳定性,以及缺乏合适的檢驗方法,結果使得一部分发动机制造厂商不愿把它們应用在发动机中。

在最近这五年中,对于金属陶瓷在应用方面的兴趣变得广泛起来。本书后面将介紹一些这类新的应用。現今在有些實驗室中,金属陶瓷正在大力发展。成分的范围比过去要寬广得多,并直接与特定的应用有着联系。使核陶瓷材料与金属粘結起来能成功地提高核陶瓷材料的热傳導确是一件很有意义的事情。某些金属陶瓷由于它們的抗腐蝕性,也使它們至少在实验性质的应用中得到了采用。难以确切地預計,这类独特材料最終的工业用途在哪

里。基本的工艺已经被发展了, 本书的目的是来综述至少其中的一部分。

## 2. 金属陶瓷的物理化学性状

M. Humenik, Jr. 与 T. J. Whalen

对于金属陶瓷来说,需要考虑的主要问题之一是,如何把两个以上不同的相结合起来。因此,对于影响非均质系统结合的一些因素作本质上的了解,就极其重要了。在多相离子晶体组合的情况下,例如氧化物的混合物,或是在我们所熟知的,采用粉末冶金工艺所制成的金属组合,例如在铁-铜合金这一情况中,结合似乎不是一个特殊问题。可是,若干金属陶瓷系统,特别是金属-氧化物系统,它们的结合性能很差,这是人所共知的,同时它们常具有这样一种特征,就是在液相烧结过程中,金属会从坯体中“渗漏”。曾采用热压和固态烧结的工艺来克服这种困难,但即使如此,由于非均质的一些相的结合性能本来就很差,因此在这些系统中仍无法得到理想的机械强度。

在金属陶瓷的设计中,另外一个也许是同等重要和需要考虑的问题是对那些决定显微组织的因素的了解和控制。这是可以理解的,因为显微组织对于一种组合的许多性能会有很大的影响。对于金属陶瓷的这一性状一直注意得很不够,虽在合金系统中,过去三十年内机械性能方面的许多改进,都应归功于显微组织的研究与控制。在金属陶瓷的情况下,显微组织对性能的影响将会显示出可能比在合金中更大的意义。这是因为组成金属陶瓷的那些各别组分可以具有差得很远的性能,例如:热传导、热膨胀、电阻、弹性模量、强度、摩擦系数等等。因此,虽然组分的选择将由最后的应用来决定,例如用作高温结构材料、电接头、电极、切削工具、轴承、摩擦材料等等,但是在所有的这些情况中,相的分布将显著地影响这一组合的整体性能。

在本章中企图来讨论一下材料的一些基本性能,这些性能是

金属陶瓷形成的基础。对于那些有液相存在的情况下燒結的系統將給予特別的注意。由于表面能的一些关系被认为对于这些系統极其重要,因此这些关系將和結合性能与显微組織联系起来討論。典型的金属陶瓷系統將在这里所提出的理論指导下进行分析。

## 金属陶瓷中的結合

在几个不同的相之間形成一种牢固的結合是一个在許多領域中首先要考慮的問題,这些領域包括:附着結合、搪瓷、銅焊、焊接以及金属陶瓷制造。同时在另一方面,在軸承材料的制造中,在摩擦的表面間为了减小摩擦系数和减低磨損,則需要最小的結合。在这两种情况中,当两个不同的相互相接触时,促使它們之間粘着的,却是同一类的那些力。尽管在許多实际应用的場合中,結合問題十分重要,然而其中的一些根本性的基础机理,却还知道得很少。

在金属陶瓷发展过程中所获得的成就,主要是建立在經驗基础上的,同时这些研究曾对那些系統中的結合情况作出了一种定性的解說。一般认为,要在金属粘結剂与非金属相之間形成一种牢固的結合,它們之間必須相互或部分地溶解。这一点被认为是在鈷-碳化鎢合金中促进高强度的机理<sup>[1,2]</sup>,这种鈷-碳化鎢合金是許多成功的金属陶瓷中一个突出的例子。基于对金属-碳化物系統的研究,也提出了这样的看法,就是:要获得一种滿意的粘結,所必須的条件之一是在燒結温度下,固相在粘結剂中的溶解度<sup>[3]</sup>。

同金属-碳化物系統比較,金属-氧化物系統的結合和燒結性能一般地要来得差些。关于在金属-氧化物系統中获得一种滿意結合的問題,有一个成功的研究,即在鎳-氧化鎂系統中加添氮化鈦<sup>[4]</sup>。当在一种惰性气氛中加热时,氮化鈦部分地与氧化鎂起反应,給出一种显然很牢固的結合,因为我們知道,金属和类金属物要比氧化物更容易結合,因此可以設想應該得到一种金属-类金属物-氧化物的过渡类型的結合。

另一改进金属-氧化物系統結合方面的成就,是利用相互溶解的办法来加强化学性质的結合。将一般金属粘結剂,例如鉄、鎳与鈷同耐火氧化物配合,如果燒結是在一种惰性气氛中进行的話,則在它們之間看不到有什么反应<sup>[6]</sup>。为了促进其中一种組分,或两种組分都产生某种程度的溶解,可以通过控制燒結条件来生成一种第三种中間相,或在金属粘結剂中添加和金属形成合金的添加剂。在 Cr-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 系統<sup>[7]</sup>中就有这种工艺的例子。这认为是由于在燒結时,保持严密控制的,适当的氧化气氛,会在金属铬表面生成一层 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 这层 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 是异晶同构的,因而极易形成固溶体而产生一种牢固的結合。鉄、鎳或鈷和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 配合,也可以得到类似的反应,生成尖晶石相,即 (Fe, Ni, Co)O: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 作为反应的产物。曾經这样假設,促使在金属与氧化物之間产生一种比較牢固的化学性結合的就是上述的这些反应;可是,有一点却不清楚,就是为什么金属和一种固溶体或尖晶石的結合要比純 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 更牢固。

在采用加添能与金属形成合金的添加物以作为改进金属-氧化物系統結合的手段时,鈦曾被用来作为一种添加物加到 Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 系統中去。采用鈦,可能是由于它曾成功地 在焊料与銅焊金属中用来进行陶瓷与金属封接的緣故<sup>[8,9]</sup>。虽然确切的結合机理还不知道,但是这种明显的、比較牢固的粘着現象可能是因为鈦和大多数氧化物<sup>[6]</sup>反应活潑,以及氧在鈦中溶解度大的緣故;这一現象和上述相互溶解的設想是符合的。

銻(同时可能鈷也这样)对氧來說,都是反应活性很强的金属,估計都会起类似的作用。

一些定性的結論认为,当两个相中間的一个,或是两个相全都具有某种程度的可溶性的时候,就会形成一种比較牢固的金属-非金属的結合,在一个試驗各种不同的金属作为抵抗 SAE 1045 号鋼盘摩擦的、滑动材料的研究工作中获得了間接的支持<sup>[10]</sup>。在这工作中观察到这样一个現象,就是在那些和鉄生成固溶体时溶解度大的金属中,具有一种比較明显的焊痕。因为焊痕是由于在那些

金属-金属接触点上形成了焊接点的結果，这就說明，具有能够形成固溶体的那些相之間确是可以比較牢固地粘着的。

在一些相同的或不同的相之間，在相互接触时所发生的粘着現象，是由于每个相的表面，也可能是它們表面附近的原子、离子或分子相互作用的結果。这种相互作用是由于在表面原子的周圍环境与内部原子的周圍环境不同的緣故，結果在接触面之間产生

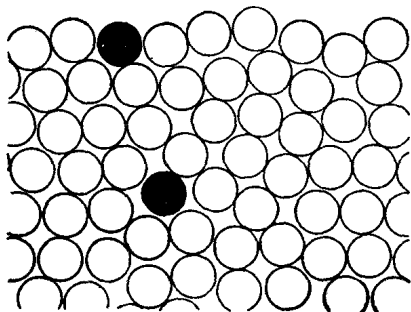


图 2-1 表示在一种液体内部和表面上的原子配位情况示意图

了一种吸引力。如图 2-1 所示：在一种固体或液体内部的原子是对称地配位的，而那些在表面的原子则并非对称地配位。从这两种几何形状中可以看出：表面比内部具有较高的自由能，同时表面的自由能可以通过两个表面的相互作用来降低。按原

子的显微尺度来看，那类可以称之为化学性质的或电性质的相互反应，如偶极-偶极的、电子迁移的、形成共价鍵等的反应，是可以发生的，反应的結果产生結合。

虽然对于按原子的显微尺度来衡量那种粘着現象的确切机理还知道得很少，可是曾經有一种看法，认为它和金属相与陶瓷相之間微弱的机械性质的結合，或牢固的化学性质的結合有关<sup>[4, 5, 11]</sup>。这类定性的描述对于按宏观来衡量的那种显粘着現象的討論却是 useful 的；那种按宏观的显粘着現象，不只是由两个相之間界面上的吸引力来决定的，可能还取决于由于两个相的膨脹系数的不同而引起的应力集中現象，以及存在于界面上的那些缺陷。不过“机械性质的結合”及“化学性质的結合”这类名詞也意味着一种在結合机理上的本质的差別，并且常易被誤解；因为在任何情况中，吸引力都是由化学上的相互作用所产生。可惜，目前無論是精确地測定金属-陶瓷界面間所发生的原子相互作用也好，或是直接来定量地測量它們的結合强度也好，在实验技术上都还不容易办到。