

B.C. 拉科夫斯基著

粉末金属学基础



国防工业出版社

出版者的話

本书系根据苏联 В. С. 拉科夫斯基 (В. С. Раковский) 所著“粉末金属学基础” (Основы Порошкового Металловедения) 国立国防工业出版社 1962 年版譯出。书中簡要論述了属于粉末金属学范畴的金属粉末性能、压制原理、燒結原理、金属陶瓷材料的强度等問題；并結合金属陶瓷耐热合金、摩擦材料、减摩材料及致密材料討論了上述問題；同时，还以較大的篇幅闡述了粉末材料的檢驗方法。

本书可供各技術部門內从事金属陶瓷材料应用的科学工作者和工程技術人員参考。

在譯书过程中，发现原书有个別錯誤之处，已进行了勘誤，个别重要的地方已在頁末注明，一般性的未逐一进行注解。

ОСНОВЫ ПОРОШКОВОГО МЕТАЛЛОВЕДЕНИЯ

В. С. РАКОВСКИЙ

ОБОРОНГИЗ 1962

*

粉末金属学基础

李祖德、王振常、周冠杰

龐世偶、陈蓉貞、周华明、張志超合譯

*

国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业許可証出字第 074 号

国防工业出版社印刷厂印刷 新华书店北京发行所发行

*

850×1168 1/32 印張 2 7/8 71 千字

1963 年 9 月第一版 1963 年 9 月第一次印刷 印数：0,001—2,000 册

統一书号：15034·679 定价：(11-6)0.68 元

序 言

粉末冶金是一門年輕、而又非常重要的技術。粉末冶金是將原粉压制并進行燒結以制成各種制品（如多孔軸承、過濾器、觸頭、磁體、耐熱合金等等）的方法。粉末金屬學研究粉末冶金的主要工藝過程的物理和化學實質、以及與金屬粉末和燒結制品的性能有關的問題。

燒結體是借压制過的粉末中的顆粒，在其密接（接觸）處相互作用而形成的。接觸表面以及燒結過程中在接觸表面上所發生的一切現象，在很大程度上，決定燒結制品的性能。燒結制品的質量還取決於金屬原粉的性能——容積特性、比表面、顆粒形狀、粒度組成、流動性等等。

压制是粉末冶金的主要工序之一，在此過程中，發生一系列物理和化學現象。其中，最主要的有：粉末顆粒的壓實、顆粒的塑性變形和脆性斷裂、顆粒間的摩擦、粉末顆粒與模壁之間的摩擦等等。表面活化物質對压制過程的影響很大，П. А. 列賓德爾（Ребиндер）院士及其同事詳盡地研究了這方面的理論〔1〕。採用這種物質可促進压制時的壓實過程和提高压制件的性能。

压制件的燒結是粉末冶金最後和最重要的一道工序。這道工序就其物理和化學實質來說，是極其複雜的，因為其中包括擴散、自擴散、再結晶、回復以及其它一系列過程。雖然在蘇聯和其他國家對燒結理論都作了大量的研究，但目前，還不能建立一個概括燒結過程中所發生的全部基本現象的統一的理論。蘇聯學者Б. Я. 皮涅斯（Пинес）及其同事已卓有成就地對燒結理論問題研究了十年以上，使這一理論接近建成。

上述這些問題將在本書第一部分加以討論。

應用金屬陶瓷制品的可能性及其使用性能，首先取決於其在

常溫和高溫下，在恒定負荷和變化負荷下，及其它情況下的強度及其物理機械性能。本書第二部分闡述了金屬陶瓷材料的強度問題。其中還研究了在機械製造業中廣泛應用的各種類型金屬陶瓷制品的某些最重要的金屬學問題。這些制品包括由鐵和難熔金屬制成的耐熱、摩擦、減摩和致密制品以及各種多孔制品。

在粉末金屬學中，除了採用普通金屬學中廣泛採用的一般方法（如：拉伸強度的測定、硬度的測定、金相分析、X-射線結構分析等等）以外，還有某些特殊的檢驗方法，其中包括：粉末粒度組成的測定、粉末容積特性和比表面的測定、原粉顆粒形狀的測定和孔隙度的測定（孔隙的形狀、大小和數量）。本書第三部分討論了這些檢驗方法。

最後必須指出，蘇聯學者所作的研究工作，在很大程度上促進了粉末金屬學的發展。Я. И. 弗林克爾（Френкель）對燒結粘滯流動理論作了詳盡的研究；Б. Я. 皮涅斯在燒結擴散理論方面進行了大量的研究；В. А. 伊凡申（Ивенсен）對燒結動力學作了詳盡的研究；И. М. 費道爾欽柯（Федорченко）研究了燒結再結晶理論；В. И. 特列奇雅柯夫（Третьяков）在金屬陶瓷合金的強度與組織關係方面作了重要的研究工作。此外，Г. А. 麥爾松（Меерсон）、В. И. 里赫曼（Лихтман）等人也進行了大量的研究工作。М. Ю. 巴爾申（Бальшин）在粉末金屬學的發展中起了重大的作用，有充分理由認為他是粉末金屬學的奠基人。

因篇幅所限，不能更廣泛與深入地論及上述這些問題，故作者不得不只作一般的分析。完整的“粉末金屬學”教程尚待建立。

目 录

序言	5
第一部分 金属陶瓷材料的金属学一般原理	7
第一章 接触表面	7
§ 1 固体表面的相互作用	7
§ 2 固体表面与液体的相互作用	9
§ 3 固体表面与气体的相互作用	11
第二章 金属粉末	12
§ 4 粉末的性能	12
§ 5 疏松体状的粉末	15
第三章 压制过程	16
§ 6 塑性变形	16
§ 7 压制过程的动力学	17
§ 8 压制过程的基本特征	19
§ 9 压块的性能	21
§ 10 某些附加因素的影响	22
§ 11 各种不同类型粉末压制过程的特征	23
第四章 烧结	24
§ 12 烧结理论的一般问题	24
§ 13 几种重要的烧结理论	31
第五章 金属陶瓷材料的强度	45
第二部分 金属陶瓷材料的金属学专门问题	49
第六章 金属陶瓷耐热合金	49
§ 15 难熔化合物之间及其与金属之间的相互作用	50
§ 16 难熔化合物的性质	51
§ 17 难熔化合物及以之为基的合金的使用性能	53
§ 18 难熔化合物基材料制造工艺的特点	58
第七章 摩擦材料和减摩材料	59
§ 19 摩擦材料的一般特性	59
§ 20 干摩擦过程的物理—化学原理	61
§ 21 减摩材料的一般特性	66
§ 22 铁—石墨材料的组织	67
§ 23 铜基减摩材料	69



第八章 致密材料	70
§ 24 鉄基致密材料	70
§ 25 合金鋼致密材料	71
§ 26 燒結難熔金屬及其合金的特性	72
§ 27 燒結鋁粉	73
第三部分 粉末金屬學中的檢驗方法	74
第九章 粉末的檢驗	74
§ 28 粒度	74
§ 29 比重與容積特性	76
§ 30 比表面	77
第十章 物理機械性能的測定	79
§ 31 導熱性	79
§ 32 膨脹測量	80
§ 33 彈性模量	82
§ 34 相對脆性	83
§ 35 斷裂特征	83
§ 36 熱試驗	85
§ 37 金相檢驗	89
參考文獻	91

76.13
327

粉末金属学基础

B. C. 拉科夫斯基著

李祖德、王振常、周冠杰、龐世側

陈蓉貞、周华明、張志超合譯

王 冠 校

3200105



国防工业出版社

1963

出版者的話

本书系根据苏联 В. С. 拉科夫斯基 (В. С. Раковский) 所著“粉末金属学基础” (Основы Порошкового Металловедения) 国立国防工业出版社 1962 年版譯出。书中簡要論述了属于粉末金属学范畴的金属粉末性能、压制原理、燒結原理、金属陶瓷材料的强度等問題；并結合金属陶瓷耐热合金、摩擦材料、减摩材料及致密材料討論了上述問題；同时，还以較大的篇幅闡述了粉末材料的檢驗方法。

本书可供各技術部門內从事金属陶瓷材料应用的科学工作者和工程技術人員参考。

在譯书过程中，发现原书有个別錯誤之处，已进行了勘誤，个别重要的地方已在頁末注明，一般性的未逐一进行注解。

ОСНОВЫ ПОРОШКОВОГО МЕТАЛЛОВЕДЕНИЯ

В. С. РАКОВСКИЙ

ОБОРОНГИЗ 1962

*

粉末金属学基础

李祖德、王振常、周冠杰

龐世偶、陈蓉貞、周华明、張志超合譯

*

国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业許可証出字第 074 号

国防工业出版社印刷厂印刷 新华书店北京发行所发行

*

850×1168 1/32 印張 2 7/8 71 千字

1963 年 9 月第一版 1963 年 9 月第一次印刷 印数：0,001—2,000 册

統一书号：15034·679 定价：(11-6)0.68 元

目 录

序言	5
第一部分 金属陶瓷材料的金属学一般原理	7
第一章 接触表面	7
§ 1 固体表面的相互作用	7
§ 2 固体表面与液体的相互作用	9
§ 3 固体表面与气体的相互作用	11
第二章 金属粉末	12
§ 4 粉末的性能	12
§ 5 疏松体状的粉末	15
第三章 压制过程	16
§ 6 塑性变形	16
§ 7 压制过程的动力学	17
§ 8 压制过程的基本特征	19
§ 9 压块的性能	21
§ 10 某些附加因素的影响	22
§ 11 各种不同类型粉末压制过程的特征	23
第四章 烧结	24
§ 12 烧结理论的一般问题	24
§ 13 几种重要的烧结理论	31
第五章 金属陶瓷材料的强度	45
第二部分 金属陶瓷材料的金属学专门问题	49
第六章 金属陶瓷耐热合金	49
§ 15 难熔化合物之间及其与金属之间的相互作用	50
§ 16 难熔化合物的性质	51
§ 17 难熔化合物及以其为基的合金的使用性能	53
§ 18 难熔化合物基材料制造工艺的特点	58
第七章 摩擦材料和减摩材料	59
§ 19 摩擦材料的一般特性	59
§ 20 干摩擦过程的物理—化学原理	61
§ 21 减摩材料的一般特性	66
§ 22 铁—石墨材料的组织	67
§ 23 铜基减摩材料	69



第八章 致密材料	70
§ 24 鉄基致密材料	70
§ 25 合金鋼致密材料	71
§ 26 燒結難熔金屬及其合金的特性	72
§ 27 燒結鋁粉	73
第三部分 粉末金屬學中的檢驗方法	74
第九章 粉末的檢驗	74
§ 28 粒度	74
§ 29 比重與容積特性	76
§ 30 比表面	77
第十章 物理機械性能的測定	79
§ 31 導熱性	79
§ 32 膨脹測量	80
§ 33 彈性模量	82
§ 34 相對脆性	83
§ 35 斷裂特征	83
§ 36 熱試驗	85
§ 37 金相檢驗	89
參考文獻	91

序 言

粉末冶金是一門年輕、而又非常重要的技術。粉末冶金是將原粉压制并進行燒結以制成各種制品（如多孔軸承、過濾器、觸頭、磁體、耐熱合金等等）的方法。粉末金屬學研究粉末冶金的主要工藝過程的物理和化學實質、以及與金屬粉末和燒結制品的性能有關的問題。

燒結體是借压制過的粉末中的顆粒，在其密接（接觸）處相互作用而形成的。接觸表面以及燒結過程中在接觸表面上所發生的一切現象，在很大程度上，決定燒結制品的性能。燒結制品的質量還取決於金屬原粉的性能——容積特性、比表面、顆粒形狀、粒度組成、流動性等等。

压制是粉末冶金的主要工序之一，在此過程中，發生一系列物理和化學現象。其中，最主要的有：粉末顆粒的壓實、顆粒的塑性變形和脆性斷裂、顆粒間的摩擦、粉末顆粒與模壁之間的摩擦等等。表面活化物質對压制過程的影響很大，П. А. 列賓德爾（Ребиндер）院士及其同事詳盡地研究了這方面的理論〔1〕。採用這種物質可促進压制時的壓實過程和提高压制件的性能。

压制件的燒結是粉末冶金最後和最重要的一道工序。這道工序就其物理和化學實質來說，是極其複雜的，因為其中包括擴散、自擴散、再結晶、回復以及其它一系列過程。雖然在蘇聯和其他國家對燒結理論都作了大量的研究，但目前，還不能建立一個概括燒結過程中所發生的全部基本現象的統一的理論。蘇聯學者Б. Я. 皮涅斯（Пинес）及其同事已卓有成就地對燒結理論問題研究了十年以上，使這一理論接近建成。

上述這些問題將在本書第一部分加以討論。

應用金屬陶瓷制品的可能性及其使用性能，首先取決於其在

常溫和高溫下，在恒定負荷和變化負荷下，及其它情況下的強度及其物理機械性能。本書第二部分闡述了金屬陶瓷材料的強度問題。其中還研究了在機械製造業中廣泛應用的各種類型金屬陶瓷制品的某些最重要的金屬學問題。這些制品包括由鐵和難熔金屬制成的耐熱、摩擦、減摩和致密制品以及各種多孔制品。

在粉末金屬學中，除了採用普通金屬學中廣泛採用的一般方法（如：拉伸強度的測定、硬度的測定、金相分析、X-射線結構分析等等）以外，還有某些特殊的檢驗方法，其中包括：粉末粒度組成的測定、粉末容積特性和比表面的測定、原粉顆粒形狀的測定和孔隙度的測定（孔隙的形狀、大小和數量）。本書第三部分討論了這些檢驗方法。

最後必須指出，蘇聯學者所作的研究工作，在很大程度上促進了粉末金屬學的發展。Я. И. 弗林克爾（Френкель）對燒結粘滯流動理論作了詳盡的研究；Б. Я. 皮涅斯在燒結擴散理論方面進行了大量的研究；В. А. 伊凡申（Ивенсен）對燒結動力學作了詳盡的研究；И. М. 費道爾欽柯（Федорченко）研究了燒結再結晶理論；В. И. 特列奇雅柯夫（Третьяков）在金屬陶瓷合金的強度與組織關係方面作了重要的研究工作。此外，Г. А. 麥爾松（Меерсон）、В. И. 里赫曼（Лихтман）等人也進行了大量的研究工作。М. Ю. 巴爾申（Бальшин）在粉末金屬學的發展中起了重大的作用，有充分理由認為他是粉末金屬學的奠基人。

因篇幅所限，不能更廣泛與深入地論及上述這些問題，故作者不得不只作一般的分析。完整的“粉末金屬學”教程尚待建立。

第一部分

金屬陶瓷材料的金屬学一般原理

第一章 接触表面

具有很大总表面的大量顆粒的相互作用过程，在燒結体形成中起着主要的作用。这些总表面中包括有大量的接触表面，因此，在粉末冶金中，接触表面的相互作用問題具有重要的意义。

所謂接触表面，系指顆粒表面直接与其它顆粒表面接触并在燒結体变形中最活跃的那一部分。

表面的相互作用，可能有下列几种基本情况：

- 1) 固体表面与固体表面的作用（鉄粉的燒結）；
- 2) 固体表面与液体的作用（ $WC + Co$ 合金的燒結、或 $Ni + Cr$ 合金对 TiC 燒結骨架的浸漬）；
- 3) 固体表面与气体介质的作用（压制过的粉末在氩气介质中的燒結）。

§ 1 固体表面的相互作用

固体的基本特点如下：

- 1) 原子被严格固結在一定类型的晶格中，或呈非結晶状态；
- 2) 固体表面的自发收縮或則很小或則完全不存在；
- 3) 固体表面非常粗糙，因此，固体实际表面面积比其几何

面积大很多倍(表1)。

表1 固体实际表面的面积^①

固 体 (表 面) 名 称	实际表面与几何表面面积之比
液体汞	1.0
抛光的镍	9.7
刚浸蚀过的银	51
电弧碳	356
海绵铂	1830

① Э. К. Райдрил, Химия поверхностных явлений Химтеоретиздат, 1936.

固体晶格中有两类原子——内部原子和表面原子。二者不同之处,在于内部原子被其它原子所平衡,而表面原子不能被平衡,所以,表面层的晶格总是有些畸变。烧结过程主要依靠表面原子进行。

粉末体中的固体表面的相互作用,在接触部分进行,并且一定与其变形相联系。目前,关于变形特征的看法还不一致。某些研究者(康托諾娃 [Конторова] [2])认为,接触部分的变形是弹性的;而另一些研究者(霍尔門 [Holm] [3], 保頓 [Bowden] 和泰伯尔 [Tabor] [4])认为其变形是塑性的。看来,变形特征取决于粉末材料性质的論点是较为正确的,这种見解认为:变形无论是弹性的还是塑性的,即或是脆性断裂的,全由粉末材料的性质决定。

下列现象说明了接触表面的特征:

1) 加载时,接触面积的增加,经常是与接触部分的不可逆变形(塑性变形或脆性断裂)相联系的;

2) 加载不引起单位面积上的压力升高,而使接触表面增大;

3) 接触表面总是处于应力状态下。

接触强度取决于许多因素,其中最主要的是接触表面的純度

和接触表面的大小。

在絕大多數情況下，表面氧化物的存在使接觸強度降低到較氧化物本身的強度為高。有時，氧化物的存在，能促進接觸強度的提高（例如兩塊鋼由於生銹而粘緊）。在潮濕情況下，接觸表面形成氧化物時，往往會出現上述的情況。接觸表面愈大，則接觸強度愈高。

接觸強度取決於破壞接觸所必須消耗的力；可由下式確定：

$$F = S_{\kappa} P_{c, \kappa}, \quad (1)$$

式中 F ——接觸強度；

S_{κ} ——接觸面積；

$P_{c, \kappa}$ ——作用在單位接觸面積上的附着力。

接觸表面的形成，與所作的一定的功有關。這個功與所消耗的負荷和所形成的接觸表面成比例。

形成接觸表面，可能有下列兩種情況：

- 1) 借助於已有的接觸部分的長大（再結晶、擴散），在這種情況下，接觸面積進行擴展；
- 2) 借助於顆粒的塑性變形、脆性斷裂以及粉末比表面長大而形成的新接觸部分。

§ 2 固体表面与液体的相互作用

近几年来，金屬陶瓷制品的組合製造法開始獲得了實際應用。這種方法就是將難熔材料和難熔化合物的粉末，用一般方法成型為所需形狀的制品，並將其燒結，然後將所燒結的制品以較易熔的液體金屬浸漬，使毛坯的孔隙為液體金屬所填充，從而獲得實際上在整個體積內都沒有孔隙的材料。

A. A. 阿賓捷爾（Абиндер）首先提出了這種方法〔5〕。浸漬動力學和浸漬的均勻性與完全性取決於許多因素，其中，主要有下列各點：

- 1) 浸漬液體和被浸漬固體之間接觸邊界的表面張力大小；

- 2) 被浸漬材料顆粒的表面状态;
- 3) 燒結体孔隙的大小和形状;
- 4) 浸漬金屬的过热程度;
- 5) 浸漬金屬粘度的大小。

表面張力愈大, 液体金屬粘度愈低, 被浸漬材料●顆粒表面愈純, 被浸漬材料●孔隙愈大和愈接近球形, 則浸漬过程愈容易进行, 浸漬的均匀程度也就愈高。

目前, 这种方法在制造触头、金屬陶瓷軸承、金屬陶瓷艺术品(浮雕等)和在許多其它部門內获得了实际应用。

固体表面和液体相互作用的程度取决于潤湿角的大小。

液体和固体表面的相互作用, 可用下列方程式表示:

$$\sigma_{T, \Gamma} = \sigma_{T, \kappa} + \sigma_{\kappa, \Gamma} \cos \theta. \quad (2)$$

液体和固体表面相互作用时的附着功, 可用下列方程式表示:

$$W_{T, \kappa} = \sigma_{T, \Gamma} + \sigma_{\kappa, \Gamma} - \sigma_{T, \kappa}. \quad (3)$$

联立解此二方程式, 可得:

$$W_{T, \kappa} = \sigma_{\kappa, \Gamma} (1 + \cos \theta). \quad (4)$$

对于潤湿必須遵守下列条件:

$$\sigma_{T, \Gamma} > \sigma_{\kappa, \Gamma} + \sigma_{\kappa, T}. \quad (5)$$

潤湿角的大小, 对多孔燒結骨架的浸漬过程有很大的影响。潤湿角愈小, 則浸漬得愈为良好。

捷雅金(Дерягин)詳尽地研究了浸漬理論基础, 其理論基本观点的实质如下文所述。

假設浸漬层前沿的某部分在某一時間內移动到新的位置, 而在这时填充了体积为 Δv 和表面为 ΔS 的孔隙, 則:

$$p \Delta v = \Delta S, \quad (6)$$

式中 p ——在已浸漬体积的 l 层中, 由于液体的內摩擦而产生的压力降;

● 此处原为 Металл (金屬)。——譯者注

A ——潤湿比功。

$$l = K \frac{\Sigma}{\delta^2} \sigma \cos \theta, \quad (7)$$

式中 l ——被浸漬层的厚度；

K ——渗透系数；

δ ——孔隙体积与物体总体积之比；

Σ ——被浸漬物体的比表面；

σ ——液体的表面張力；

θ ——潤湿角。

固体表面和液体的相互作用，总是伴随有放热或吸热发生（潤湿热）。

此热量可用下列方程式表示：

$$-\Delta N = S \left(F_{\pi} - T \frac{dF_{\pi}}{dT} \right), \quad (8)$$

式中 S ——固体面积；

ΔN ——1克物体浸沒在液体中所放出的热量；

F_{π} ——潤湿液体的总表面。

表面張力随温度的升高而降低，即 $\frac{\partial \sigma}{\partial T} > 0$ ，因此，新表面的形成，总是伴随有熵的增加。

在制造所謂“发汗”材料即被用来作为冷却壁的多孔材料时（液体在一定压力下流经此壁），这些材料的渗透性及其稳定性具有很大的意义。表面張力的大小，对渗透性和稳定性指数的影响很大，材料的渗透性通常随着表面張力的增加而减弱。

表面張力对燒結过程同样也有重要的影响，是加速还是减慢燒結过程，須根据表面張力的大小而定。

§ 3 固体表面与气体的相互作用

固体表面和气体的相互作用，在粉末冶金中有着广泛的应用。

气体在固体（吸附剂）表面上的吸附是自发的过程。換句話說，被吸附在吸附剂表面上的物质，能降低吸附剂对于周圍介質