

Р·基費尔 П·施华尔茨柯普弗 著

硬 质 合 金

中 国 工 业 出 版 社

75.633
538
C.2

P. 基費尔 П. 施华尔茨柯普弗著

硬 质 合 金

王 少 刚 等 译 校

21.477/24

中 国 工 业 出 版 社

书中詳細地闡述了金屬陶制硬質合金生产、性能和应用的各项重要問題。敘述了硬質合金原始組分的制取方法和其結構及性能。討論了各种难熔金屬的碳化物、氮化物、硼化物和硅化物的制取方法。此外，还介紹了硬質合金用作切削、耐磨和高溫材料等問題。本书是近年来国外出版的关于粉末冶金方面的重要著作。

本书不仅可供粉末冶金方面的科学工作者、工程师、技术員和有关大专院校的师生閱讀，同时对相近的科学技术部門的工作人員也頗有裨益。

本书原著是德文版本，中譯本是由俄譯本轉譯的。参加本书翻譯工作的人員有：王少剛、历志、李沐山、李盛揚、梁振和、張超凡、鄒伯雅。全稿最后經過少剛、鳳麟校訂。

Р.Киффер и П.Шварцкопф

ТВЕРДЫЕ СПЛАВЫ

Перевод под редакцией

проф. докт. В. П. Елютина,

канд. техн. наук Л. П. Малькова

и канд. техн. наук А. К. Натансона

Металлургиздат

Москва 1957

硬 質 合 金

王 少 剛 等 譯 校

冶金工业部图书編輯室編輯（北京羅市大街78号）

中国工业出版社出版（北京谷廊園路西10号）

（北京市书刊出版事业許可證出字第110号）

中国工业出版社第三印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店經售

开本850×1168 1/32·印张19·字数498,000

1963年9月北京第一版·1963年9月北京第一次印刷

印数0001—1,930·定价（10-7）3.15元

統一書号：15165·1761（冶金-272）

俄文版前言

金属陶制硬质合金在现代技术中的意义越来越大，除已相当普遍地采用硬质合金作切削和耐磨工具外，正日益广泛地应用到高温和重负荷方面。因为许多难熔金属的硬质化合物和以它们为基制成的各种合金都具有热强和热安定性能。

这部《硬质合金》专论，乃是粉末冶金方面的两位权威专家 R·基费尔 (R. Kieffer, 奥地利) 和 P·施华茨柯普弗 (P. Schwarzkopf, 美国) 合写的一部巨著，参加编写这本书的还有许多其他著名学者。作者在高度的科学水平上广泛地阐述了金属陶制硬质合金的生产、性能和应用的一些极为重要的问题。

专论第一篇分析了属于所谓的难熔金属硬质化合物和用作硬质合金主要组份的那些物质的构造及原子键合的理论概念。作者不仅正确地把 Д·И·门捷列夫周期系 IV—VI 族过渡金属的碳化物、氮化物和硼化物划入这一类，甚至把它们硅化物也列入其中，因为不论难熔金属硅化物单独使用还是用作硬质合金组元，无疑地，对于用作所谓《高温》材料（适合在高温下工作）都会引起人们的兴趣。从这个观点出发，在硬质合金专论中增辟篇幅不大的一章来讨论特硬非金属材料是完全合理的。

此外，还详尽地研究了各种难熔金属的碳化物、氮化物、硼化物和硅化物（以及这些化合物的多元系）的制取方法、结构和性能。

专论的第二篇和第三篇阐述了各种金属陶制硬质合金（其中也有对于我们广大工程技术人员不太熟悉的一些新合金）的生产工艺、性能、试验和技术检验方法以及应用。

书中以较多的篇幅着重阐述了用硬质合金作切削、耐磨和高温材料的问题。这几章不仅包括有关于硬质合金使用条件的宝贵资料，还分析了硬质合金在相应部门中应用的合理性与可能性的理论和实际前提。

值得读者注意的是，这部专论是第二次世界大战后的一部巨著，

包括了金属陶瓷硬质合金生产和应用的各式各样问题。正是由于这一点，这部著作不仅会引起科学工作者、工程师、技术员、粉末冶金和硬质合金专业的大学生很大兴趣，同时也会引起金属学家和相近科学技术部门的工作人员的兴趣。

1953年夏天，这部《硬质合金》几乎同时于德国和美国问世。美国版中没有硬质合金生产和用作切削与耐磨材料方面的资料（专论第二篇）。另一方面，这一版中作了某些补充，并列出了较完备的参考资料索引。这些补充资料中最有意义的一些材料在校阅译稿的过程中我们已考虑进去了。

编辑认为，修改译文不是自己的任务，所以未将近三年来文献中出现的一些新资料，尤其是Г.В. 薩姆索諾夫 (Г.В. Самсонов) 和Я.С. 烏曼斯基 (Я.С. Уманский) 合著的《难熔金属的硬质化合物》一书（冶金工业出版社，1956年版）中提到的国内外的新资料，包括进去。然而，为了便于读者查考，我们还是将1953—1956三年中发表的有关硬质合金的资料补充到参考资料索引中了。

本书是由莫斯科钢铁冶金学院稀有金属冶金与粉末冶金教研組的工作人员技术科学副博士М.А. 馬烏拉赫 (М.А. Маурах) (1、14、15和16四章)，Е.И. 莫茲茹欣 (Е.И. Мозжухин) (14、15、16三章)，А.К. 納坦遜 (А.К. Натансон) (2、3、4三章) 以及工程师Л.М. 阿布拉姆松 (Л.М. Абрамсон) (12和13两章)，Б.Е. 列文 (Б.Е. Левин) (第1章)，А.М. 拉道金 (А.М. Ладогин) (7—11章) 和Г.С. 切利科維爾 (Г.С. Чериковер) (5和6两章) 等合譯的。

——編 輯

目次

俄文版前言

緒論..... 1

第一篇 难熔金属硬质化合物

(碳化物, 氮化物, 硼化物, 硅化物)

第一章 特硬金属化合物理論..... 10

A. 晶体結構..... 10

1. 碳化物和氮化物 (間隙相) 2. 硼化物和硅化物

B. 原子間的作用力..... 24

1. 过渡金属的电子結構与特性 2. 过渡金属的金属化合物的电子結構

B. 硬度計算..... 36

第二章 碳化物..... 39

A. 制取方法..... 39

1. 鑄造碳化物的制取 2. 用固体碳碳化金属 (或氧化物) 粉末 3. 用含碳气体碳化金属 (或氧化物)
4. 由气相沉积碳化物 (沉积法) 5. 用化学法从铁碳合金或融熔金属中分离碳化物 (溶解法)
6. 融盐电解 7. 难熔碳化物的精制及致密 (无孔隙) 燒結材料的生产

B. 碳化鈦、碳化鋯和碳化鈮..... 57

1. 碳化鈦 2. 碳化鋯 3. 碳化鈮

B. 碳化鈾、碳化鈾和碳化鈾..... 83

1. 碳化鈾 2. 碳化鈾 3. 碳化鈾

Г. 碳化鉻、碳化鉍和碳化鎢..... 98

1. 碳化鉻 2. 碳化鉍 3. 碳化鎢

Д. 碳化鈦、碳化鈾和碳化鈾..... 126

1. 碳化鈦 2. 碳化鈾 3. 碳化鈾

E. 碳化物的可比性能.....	130
Ж. 复杂碳化物.....	130
1. 关于复杂碳化物组份的相互作用 2. 复杂碳化物的制取 3. 二元碳化物系统 4. 三元与更复杂的碳化物系统	
第三章 氮化物.....	169
A. 氮化物的制取.....	169
1. 在碳参与下用氮或氨来氮化金属的氧化物 2. 金属、氢化物和氯化物的氮化 3. 气相沉积 (在金属丝上沉积) 4. 氮化物的精制和烧结材料的制取	
B. 钛、锆和钨的氮化物.....	173
1. 氮化钛 2. 氮化锆 3. 氮化钨	
B. 钒、铌和钽的氮化物.....	181
1. 氮化钒 2. 氮化铌 3. 氮化钽	
Г. 铬、钼和钨的氮化物.....	187
1. 氮化铬 2. 氮化钼 3. 氮化钨	
Д. 铜系元素的氮化物.....	191
1. 氮化钴 2. 氮化铀 3. 氮化镱和氮化铀	
E. 氮化物的可比性能.....	193
Ж. 氮化物系统和氮化物—碳化物系统.....	195
1. 氮化物—氮化物 2. 氮化物—碳化物	
第四章 硼化物.....	203
A. 硼化物的制取.....	203
1. 金属与硼的熔合 2. 金属和硼的烧结 3. 在铝、镁、硅或碳参与下使氧化物相作用 4. 金属 (氢化物、氧化物、碳化物) 与碳化硼相作用 5. 融盐电解 6. 气相析出 (沉积法) 7. 硼化物的精制和烧结制品的生产	
B. 钛、锆和钨的硼化物.....	208
1. 硼化钛 2. 硼化锆 3. 硼化钨	
B. 钒、铌和钽的硼化物.....	215

1. 硼化鈮	2. 硼化鈮	3. 硼化鉬	
Г. 鉻、鉬和鎢的硼化物			221
1. 硼化鉻	2. 硼化鉬	3. 硼化鎢	
Д. 銅系元素的硼化物			230
1. 硼化鈦	2. 硼化鈷		
Е. 硼化物的可比較性能			232
Ж. 硼化物—硼化物系統, 硼化物—碳化物系統, 硼化物—氮化物系統			234
1. 硼化物—硼化物	2. 硼化物—碳化物		
3. 硼化物—氮化物			
第五章 硅化物			237
А. 硅化物的制取			237
1. 熔合或燒結金屬及硅	2. 用硅還原金屬氧化物		
3. 金屬氧化物和 SiO_2 在碳參與下相作用	4. 鋁熱法		
5. 銅硅化物法	6. 用硅的鹵化物處理金屬		
7. 熔鹽電解			
Б. 硅化鈦、硅化鎢和硅化鈹			241
1. 硅化鈦	2. 硅化鎢	3. 硅化鈹	
В. 硅化鈮、硅化鈮和硅化鉬			244
1. 硅化鈮	2. 硅化鈮	3. 硅化鉬	
Г. 硅化鉻、硅化鉬和硅化鎢			249
1. 硅化鉻	2. 硅化鉬	3. 硅化鎢	
Д. 銅系元素的硅化物			255
1. 硅化鈦	2. 硅化鈷	3. 硅化鎳和硅化鈷	
Е. 硅化物的可比較性能			257
Ж. 硅化物系統			257
1. 硅化物—硅化物	2. 硅化物—碳化物和硅化物—氮化物	3. 硅化物—硼化物	
第六章 特硬非金屬材料			259
А. 概述			259
Б. 某些硬質材料			261

1. 金刚石 2. 碳化硼 3. 碳化硅 4. 氧化
铝

第二篇 硬 质 合 金

第七章	历史概述.....	266
第八章	生产工艺.....	276
A.	原材料.....	277
1.	氧化物、金属、非金属 2. 碳化物	
B.	硬质合金生产.....	287
1.	混合料制备 2. 硬质合金刀片(毛坯)的冷压 制和机械加工 3. 压制的硬质合金制品的烧结	
4.	热压制	
第九章	硬质合金的烧结过程.....	298
A.	制取难熔金属硬质化合物时的扩散过程.....	298
B.	碳化物+粘结金属的混合物的液相烧结过程.....	308
1.	钴钴(BK)硬质合金烧结时的过程 2. WC-TiC-Co (TK)硬质合金的烧结过程 3. WC-TiC-TaC(NbC)- Co 硬质合金的烧结过程 4. 含镍和铁的碳化物的烧结 过程 5. 硬质合金热压制时的过程 6. 浸渍法	
第十章	硬质合金的检查.....	329
A.	原材料.....	329
1.	化学分析 2. X射线照相研究 3. 颗粒大 小和粒度; 松装比容和震实比容	
B.	成品.....	333
1.	化学分析 2. 比重和相对密度的测定 3. 抗 弯强度的测定 4. 硬度测定 5. 磁性的研究	
6.	X射线照相研究 7. 孔隙度检查 8. 显微结 构和宏观结构分析 9. 切削寿命的试验 10. 其 他试验	
第十一章	硬质合金的性能.....	353
A.	商业牌号.....	354

1. 钨钴(BK)硬质合金 2. 钨钼钴硬质合金(TK 合金)
3. WC-TaC(NbC)-Co 硬质合金 4. WC-TiC-TaC(NbC)-Co 硬质合金

B. 各种非市场上的硬质合金..... 378

1. 碳化钨与各种粘结剂构成的合金 2. WC-TiC-Co 硬质合金
3. WC-TaC(NbC)-Co 硬质合金
4. WC-TiC-TaC(NbC)-Co 硬质合金 5. WC-Mo₂C-Co(Ni) 硬质合金
6. WC-Mo₂C-TiC-Ni (Co) 硬质合金
7. WC-ZrC 基硬质合金 8. WC-VC, WC-Cr₃C₂ 和 WC-NbC 基硬质合金
9. 无钴硬质合金

第十二章 作为耐磨材料的硬质合金..... 402

A. 磨损的一般问题..... 402

1. 磨损因素 2. 硬质合金的耐磨性的试验方法

B. 硬质合金拉丝模..... 410

1. 一般资料 2. 硬质合金拉丝模的制造 3. 硬质合金拉丝模的使用及维护

B. 采矿工业中的硬质合金..... 417

1. 概论 2. 旋转式钻孔用工具 3. 冲击式凿岩工具

Г. 硬质合金弹心..... 435

Д. 硬质合金耐磨零件..... 438

第十三章 硬质合金在切削加工方面的应用..... 446

A. 考虑到硬质合金工具特点的切削原理..... 448

1. 基本概念 2. 切削阻力 3. 切削温度 4. 切削刃的寿命
5. 硬质合金与金属切削机床

B. 硬质合金工具的制造..... 477

1. 钨硬质合金的工具的制造 2. 硬质合金工具的刃磨

B. 硬质合金工具用于切削加工的实践..... 485

第三篇 高温材料

第十四章 对高温材料的要求.....	486
A. 熔点——高温强度的准则.....	486
B. 高温材料必须具有之性能.....	491
第十五章 难熔金属硬质化合物.....	501
A. 用作高温材料的碳化物.....	501
1. 无粘结剂的热压碳化钛和碳化锆 2. 有粘结剂的	
烧结碳化钛 3. 含碳化钛的复杂组合物 4. 其他	
碳化物基高温材料 5. 用作保护涂层的难熔碳化物	
B. 其他难熔化合物.....	533
1. 氮化物 2. 硼化物 3. 硅化物 4. 硫化	
物 5. 碳化硼、氮化硼、碳化硅	
第十六章 陶瓷和其他材料（氧化物、硅酸盐等等）.....	542
1. 致密材料 2. 陶瓷保护涂层 3. 陶瓷-金属组	
合物 4. 其他烧结材料（燃气轮机叶片用的）	
結 論.....	551
參 考 文 獻.....	554

緒 論

技术中（特别是硬质合金与磨料工业中）使用的特硬材料，根据其来源和制造方法可分为天然硬质材料和人造硬质材料；金刚石、刚玉等属于前者，难熔碳化物、硼化物、氮化物和硅化物则属于后者。

用特硬材料制造铸造和金属陶瓷硬质合金之冶金过程，要求这类材料除硬度高（例如，莫氏单位8—9）和熔点高外，同时还应具有金属性，并能与铁族金属熔合。假如根据这些要求来进行特硬材料分类，则将其分为下面两组：

1) 特硬金属化合物（难熔金属硬质化合物）。属于此类者有Д.И. 門捷列夫元素周期系IV—VI族过渡金属的碳化物、硼化物、氮化物和硅化物；

2) 高硬度非金属材料。金刚石、刚玉及其他硬质矿物，碳化硅和碳化硼等皆属于此类。

在这本书中，注意力主要集中于第一组特硬材料。非金属硬质材料在耐磨和耐热方面的应用有限，故仅用不大的一章来讨论。

第一组特硬金属化合物^①实际上与《难熔和超难熔硬质材料》是一回事，K·别克尔在他著的《难熔硬质材料及其在技术中的应用》一书中就是这样来看待Д.И. 門捷列夫元素周期系IV、V和VI族金属的碳化物、硼化物和氮化物的。

上述化合物的特点如下：

1) 熔点高：与碳、钨和钼的熔点相近，在某些情况下甚至比它们的熔点还高；

2) 硬度非常高：除极少例外，皆可达莫氏硬度标9—10单位；

3) 化学安定性高：在室温下，浓酸、浓酸混合物和氧化性硷溶

① 这里和以后，这个名词仅代表难熔金属硬质化合物——碳化物、硼化物、氮化物、硅化物（編輯注）。

液或者根本不与这些化合物（致密的）起反应，或对其影响微弱；

4) 具有金属性：在光泽、热、电性能方面表现得尤为明显；同时，这类化合物几乎都具有超导电性；

5) 能与铁族金属熔合；在这些金属中的溶解度强烈地依赖于温度；在室温下这个溶解度常常是微乎其微的；

6) 几乎不例外地形成间隙相^①；

7) 弹性模数值非常高。

特硬金属化合物的主要代表为 WC、TiC 和 TaC 等碳化物，次之为 VC、NbC 和 Mo_2C 等，它们与粘结金属（钴和镍）一起构成了一切现代硬质合金的基础。硼化锆和硼化钛亦具有工业意义，一般用来制备耐磨和耐热材料。

应当指出，除上述特硬难熔金属化合物外，也还有其他硬度高和难熔的化合物，例如，含 Al、Be 等系统中的金属间相（金属互化物）。又如高速钢中的硬质二元碳化物，或者钴—铬—钨系统的金属互化物。所有这些化合物本书中都将不进行讨论。

金属钽和铌，以前分别被划入元素周期系第Ⅳ和Ⅵ族，然而根据最新的原子构造概念，它们和钨、钼以及超铀元素应同属Ⅵ系。钨在元素周期系第Ⅵ族中钼的下面，性质亦与钼相近。非金属与钨系元素形成的化合物能局部水解。另一方面，它们与Ⅳ—Ⅵ族过渡金属有某些相似处。非金属与钽及铌的化合物具有金属性。曾建议用碳化铌作硬质合金的组份。基于此点，书中简短地阐述了钽、铌及某些超铀元素与碳、氮、硼和硅构成的化合物。

表1为元素周期系，对于以后讨论意义较大的元素均用粗实线框起。除注明原子序外，还注明了元素的原子量和电子结构。

铁族金属与合金的硬质组份（一方面），以及同碳、硼、氮和硅间（另一方面）的相互作用，对于金属陶瓷硬质合金的粉末冶金过程皆具有特殊意义。在室温下稳定的碳化铁 Fe_3C 可形成二元碳化物，

① 1930年，海格发表了他的研究特硬化合物晶体结构的重要结果时，似乎，根据这些物质的晶体结构（间隙相）便能将其准确地分类；然而后来的研究表明，这样分类是不可能的（见第一章）。

不稳定的碳化镍和碳化钴也能形成稳定的二元碳化物。元素周期系 IV—VI 族过渡金属在钴或镍中的溶解度，在钴和镍的熔点下就不太大，而在室温下更小。因此，钴和镍都是生产硬质合金的最适宜的塑性粘结金属。

表 2 中列举了元素周期系 IV—VI 族难熔过渡金属与碳、氮、硼和硅形成的化合物，同时还给出了其晶体结构、熔点、硬度和电导率等的已知数据。应当指出，与纯金属的情形一样，同一族的碳化物，熔点亦随序数增加而升高。对于氮化物、硼化物和硅化物（至少在其部分已知类型的化合物中）也可以看到同样的情况。从 IV 经过 V 到 VI 族，即自左而右，难熔金属硬质化合物的熔点下降，但是这些金属的熔点却是升高。有关碳化物、氮化物和硼化物的原子构造、晶体结构、熔点和硬度间的关系的资料将在第一章内详述。

应用特硬金属化合物的最初阶段是与切削合金的发展（从碳素钢和合金钢开始；经过高速钢和司太立合金，而到现代金属陶制硬质合金）密切联系着的。

现代金属陶制硬质合金基本上是由钨、钛及钽的碳化物（及其固溶体）与金属粘结剂（主要是钴）构成的。

耐磨性、硬度和切削寿命主要与合金的金属碳化物含量相关。虽然很早就知道了碳素钢有可淬性，可是仅仅在十九世纪末叶才发现和分离出来了碳化铁 Fe_3C 。从那时以后，化学家们又借适当的方法致力于分离其他纯碳化物的工作。相继得到纯碳化铁 Fe_3C 之后，又分离出了碳化钨 WC 和碳化钛 TiC 。稍迟，又分离出了铁与钨和钽构成的二元碳化物以及碳化钼——现代高速钢和司太立合金的主要组份。

天才的法国化学家和冶金学家穆阿桑最先系统地研究了碳化物与其他特硬化合物，研究出了在温度极高的电弧炉中制取难熔碳化物的方法。《碳化物与硅化物》一书的作者霍尼格什米德早在十七年前就曾这样宣称过：《穆阿桑奠定了碳化物化学的基础，并使之达到了

	IA	IIA	元素周期系					
第1周期 0	1H 1.008 1							
第2周期 2	3Li 6.940 1	4Be 9.02 2	过渡元素					
第3周期 2-8	11Na 22.997 1	12Mg 24.32 2						
第4周期 2-8	19K 39.096 8-1	20Ca 40.08 8-2	IIIA 21Sc 45.10 9-2	IVA 22Ti 47.90 10-2	VA 23V 50.95 11-2	VIA 24Cr 52.01 13-1	VIIA 25Mn 54.93 13-2	
第5周期 2-8-18	37Rb 85.48 8-1	38Sr 87.63 8-2	39Y 88.92 9-2	40Zr 91.22 10-2	41Nb 92.91 12-1	42Mo 95.95 13-1	43Tc 99 13-2	44Ru 101.7 15-1
第6周期 2-8-18	55Cs 132.91 18-8-1	56Ba 137.36 18-8-2	57-71 La-Lu 稀土元素	72Hf 178.6 32-10-2	73Ta 180.88 32-11-2	74W 183.92 32-12-2	75Re 186.31 32-13-2	76Os 190.2 32-14-2
第7周期 2-8-18-32	87Fr 223 18-8-1	88Ra 226.05 18-8-2	89-101 Ac-Mv 锕系元素					
镧系元素 (稀土) 2-8-18			57La 138.92 18-9-2	58Ce 140.13 19-9-2	59Pr 140.92 20-9-2	60Nd 144.27 21-9-2	61Pm 147 22-9-2	62Sm 150.43 23-9-2
锕系元素 2-8-18-32			89Ac 227 18-9-2	90Th 232.12 19-9-2	91Pa 231 20-9-2	92U 238.07 21-9-2	93Np 237 22-9-2	94Pu 239.2 23-9-2

如此地步，一直到今天这门化学还未超出当时的范围。他得到了现今已知的所有碳化物，研究了它们的物理和化学性质，并根据自己的实验结果确定碳化物的结构都非常简单，碳与大多数元素只能形成一种化合物》。

穆阿桑，霍尼格什米德，维捷肯德等人的研究工作首先具有理论意义，并为广泛研究特硬金属化合物打下了基础。

当时硬质难熔过渡金属碳化物并未立即找到应用，因为在那个时期工业对这种材料的需求尚不那么迫切。

由于电工学，特别是白炽灯生产的进步，二十世纪初(1909年)

表 1

元素的原子序示于符号之左；符号之下为原子量。				IIIB	IVB	VB	VIB	VIIB	0
最下面一行数字表示外层轨道上的电子数。									2 He 4.003 2
在第一竖行中（于周期名称下面）给出了内层轨道上的电子数。				5 B 10.82 3	6 C 12.010 4	7 N 14.008 5	8 O 16.0000 6	9 F 19.00 7	10 Ne 20.183 8
				13 Al 26.97 3	14 Si 28.06 4	15 P 30.98 5	16 S 32.064 6	17 Cl 35.457 7	18 Ar 39.944 8
-VIIIA-		IB	IIB						
27 Co 58.94 15-2	28 Ni 58.69 16-2	29 Cu 63.57 18-1	30 Zn 65.38 18-2	31 Ga 69.72 18-3	32 Ge 72.60 18-4	33 As 74.91 18-5	34 Se 78.96 18-6	35 Br 79.916 18-7	36 Kr 83.7 18-8
45 Rh 102.91 16-1	46 Pd 106.7 18-0	47 Ag 107.880 18-1	48 Cd 112.41 18-2	49 In 114.76 18-3	50 Sn 118.70 18-4	51 Sb 121.76 18-5	52 Te 127.61 18-6	53 I 126.92 18-7	54 Xe 131.3 18-8
77 Ir 193.1 32-17-0	78 Pt 195.23 32-17-1	79 Au 197.2 32-18-1	80 Hg 200.61 32-18-2	81 Tl 204.39 32-18-3	82 Pb 207.21 32-18-4	83 Bi 209.00 32-18-5	84 Po 210 32-18-6	85 At 211 32-18-7	86 Rn 222 32-18-8
63 Eu 152.0 24-9-2	64 Gd 156.9 25-9-2	65 Tb 159.2 26-9-2	66 Dy 162.46 27-9-2	67 Ho 163.4 28-9-2	68 Er 167.2 29-9-2	69 Tm 169.4 30-9-2	70 Yb 173.04 31-9-2	71 Lu 174.99 32-9-2	
95 Am 24-9-2	96 Cm 25-9-2	97 Bk 26-9-2	98 Cf 27-9-2	99 Aht 28-9-2	100 Ct 29-9-2	101 Mv 30-9-2			

就已掌握了制造钨丝的粉末冶金法。库里茨将此法运用于生产之后，人们才对用作白炽灯丝的极难熔材料的生产发生了兴趣。研究工作的范围逐渐扩大到过渡金属的氮化物和硼化物，这些化合物，正像阐明的那样，在电导率良好的情况下是难熔的。后来采用固态碳或含碳气体将金属渗碳，以代替制取成分经常不定的铸造碳化物的穆阿桑古老方法。氮化物一般都是用氨或氮处理金属（或金属氧化物与炭黑的混合物）的方法制备的。这些制取难熔金属硬质化合物的方法的发展是与弗利德利克和吉季格，阿格捷和莫耶尔斯，奥尔特尔杜姆，别克尔等研究家的名字联系在一起的。在这个时期还较准确地测定了碳化物、

表2 过渡金属硬质化合物的某些性能

化合物	结构*	熔点 °C	电阻率 微欧·厘米	硬 度 公斤/毫米 ²	化合物	结构*	熔点 °C	电阻率 微欧·厘米	硬 度 公斤/毫米 ²
TiC	ГПК	3140	68.2	3200	TiB ₂	Г	2900	15.2	3400
ZrC	ГПК	3530	75	2600	ZrB ₂	Г	2990	9.2	2200
HfC	ГПК	3890	109	9**	HfB ₂	Г	3060	10	9**
VO	ГПК	2830	156	2800	VB ₂	Г	2100	16	8—9**
NbC	ГПК	3500	74	2400	NbB ₂	Г	2900	65.5	+8**
TaC	ГПК	3880	30	1800	TaB ₂	Г	3000	86.5	
Cr ₃ C ₂	D5 ₁₀	1895		1300	CrB ₂	Г	1850		1800
Mo ₃ C	ГК	2690	97	1500	MoB ₂	Г	2250		1380
WO	Г	2870	53	2400	W ₂ B ₅	Г			
TiN	ГПК	2950	21.7	8—9**	TiSi ₂	斜方晶格	1540	123	870
ZrN	ГПК	2980	13.6	+8**	ZrSi ₂	〃	1700	161	1030
HfN	ГПК	3300			HfSi ₂	Г	1650	9.5	1090
VN	ГПК	2050	86	+9**	VS ₂	Г	1950	6.3	1050
NbN	ГПК	2050		+8**	NbSi ₃	Г	2400	8.5	1560
TaN	Г	3090	135	+8**	CrSi ₂	Г	1570		1150
Cr ₂ N	Г				MoSi ₂	正方晶格	2030	19.2	1290
Mo ₃ N	ГПК	分解 温度			WSi ₂	〃	2150	33.4	1090
W ₂ N	ГПК	同上							

* ГПК——面心立方晶格；ГК——密集六方晶格；Г——六方晶格。

** 莫氏标。

氮化物和硼化物的物理性质，特别是熔点（按皮兰法^①测定的）及电导率等。

阿格捷和莫耶尔斯用万-阿尔克耳法（沉积法）制得了碳化物、氮化物和硼化物。与难熔碳化物相反，难熔氮化物和硼化物仅有理论意义。仅氮化钛（最初是在炼铁高炉中发现的，呈固溶体TiC与TiN状）作为碳化钛的必然伴生物出现在钛钨硬质合金中。

难熔金属硬质化合物，特别是碳化钨，早就引起灯泡工业广大工

① 试样的中部具有减小了的（一般钻一透孔）截面，电流直接通过它来加热（编辑）。