

难熔化合物分析

〔苏联〕Г. В. 薩姆松諾夫等著

黃靜華 陸時言 詹琮珠 譯

· 上海科学技术出版社

羧酸衍生物分析

（上册） 王 强 主编

化学工业出版社

（北京）

54.6
794

难熔化合物分析

〔苏联〕Г. Б. 薩姆松諾夫等著

黃靜華 陸時言 詹琰珠 譯

沈錫恩 校

210559/13

上海科學技術出版社

內 容 提 要

在本书中叙述了难熔化合物的物理和化学性质,制备它们的主要方法以及应用领域,概述了难熔化合物主要成分:碳、硼、氮及硅的测定法,并详述了所有已知难熔化合物的化学分析法。

本书可供机器制造业、化学工业、航空工业,以及科学研究所实验室的工作人员作为实用手册之用;并可供高等学校及大学化学系有关专业的师生参考。

АНАЛИЗ ТУГОПЛАВКИХ СОЕДИНЕНИЙ

Г. В. Самсонов 等著

Металлургиздат • 1962

难 熔 化 合 物 分 析

黄静华 陆时言 詹琼珠 译

沈 锡 恩 校

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许可证出 093 号

上海市印刷五厂印刷 新华书店上海发行所发行

开本 850×1156 1/32 印张 7 6/32 插页 1 排版字数 187,000

1965 年 2 月第 1 版 1965 年 2 月第 1 次印刷

印数 1—5,500

统一书号 13119·634 定价 (科六) 1.00 元

譯 者 序

随着科学技术的日益发展,要求有既能耐高温又能在特殊侵蚀介质中抗蚀的材料。属于这一类的化合物有金属(类金属)难熔化合物,如钨、钼、钽、铌、钒、钛、锆、铪及稀土金属铈、镧、钇等的硼化物、碳化物、氮化物、硅化物、磷化物和硫化物;非金属难熔化合物碳化硼、碳化硅、氮化硼及氮化硅等。它们在很大程度上决定着碳素钢、合金钢及硬质合金的性质。

由于难熔化合物在生产和应用方面的发展,难熔化合物的分析任务亦日渐繁重,但到目前为止,除在期刊和一些技术资料中载有关于这方面的资料之外,对于许多难熔化合物的化学分析法已出版的书籍很少。本书作者收集了不少资料,内容比较丰富,不少分析方法也切实可行。此外作者还详细地叙述了难熔化合物的化学及物理属性,这对具体分析工作也是重要的。因此,尽管我们的翻译经验不多,我们还是把这本书译出来,为这方面的分析工作提供参考资料。错误之处,在所难免,敬希读者们指正。

譯 者

一九六四年七月于上海

07745

目 录

译者序

第一章 难熔化合物概论	1
类金属化合物	10
非金属化合物	20
难熔化合物在工程技术中的应用前景	26
第二章 难熔化合物的化学性质	35
碳化物的化学性质	35
过渡金属碳化物的化学性质	35
氮化物的化学性质	46
非过渡金属氮化物	46
过渡金属氮化物	47
硼化物的化学性质	50
碱土金属硼化物	50
稀土金属硼化物	50
过渡金属硼化物	52
硼化物对无机溶剂的稳定性	58
元素周期系第 IV、V 和 VI 族过渡金属硅化物的化学性质	58
硅化物与无机溶剂的关系	65
过渡金属磷化物的化学性质	66
稀土硫化物的化学性质	66
非金属化合物的化学性质	69
碳化硼的化学性质	69
碳化硅的化学性质	73
氮化硅的化学性质	75
氮化硼的化学性质	77
磷化硼的化学性质	79
第三章 难熔化合物中主要成分的测定	80
试样的分解	80
难熔化合物的酸溶	80

熔融法.....	81
总碳量的测定法	82
气体容量法.....	83
吸收-重量法	87
氢氧化钡容量法(不过滤 BaCO_3 沉淀)	89
电导法.....	91
游离碳的测定法	94
物理方法.....	94
化学方法.....	95
计算法测定游离碳.....	97
氮的测定法	98
杜马法.....	98
基耶达法.....	99
少量氮的比色测定法	100
总硼和游离硼的测定法	104
总硼的测定	104
游离硼的测定	105
硅的测定法	106
重量法	106
容量法	114
比色法	115
硅化物中总硅的测定	116
游离硅的测定	117
第四章 难熔化合物的分析	118
过渡金属和碱土金属碳化物的化学分析法	118
碳化钛的分析	118
碳化锆的分析	123
碳化钽的分析	130
碳化铪的分析	132
碳化铌的分析	135
碳化钨的分析	137
碳化钽的分析	140
碳化钼的分析	141
碳化钨的分析	142
碱土金属碳化物的分析	143
氮化物的化学分析法	146
氮化钛、氮化锆、氮化钽及氮化铌的分析	146

氮化钒的分析	148
氮化铬 (Cr_2N) 的分析	149
CrN 的分析	150
硼化物的化学分析法	152
碱土金属硼化物的分析	152
稀土元素镧、铈、镨、铈、钕、钐、钆、铽、镱以及钇的硼化物的分析	153
硼化铟的分析	155
硼化钛的分析	157
硼化锆的分析	160
硼化铪的分析	164
硼化钽的分析	165
硼化钒的分析	166
硼化铌的分析	167
硼化钽的分析	168
硼化铬的分析	169
二元硼化物 (Ti, Cr) B_2 的分析	170
硼化钼 Mo_2B_5 的分析	170
硼化钨的分析	171
硼化镍的分析	173
硼化钴的分析	176
硅化物的化学分析法	177
硅化钛的分析	177
硅化锆的分析	180
硅化钒的分析	181
硅化铌和硅化钽的分析	182
硅化铬的分析	183
硅化钼的分析	184
硅化钨的分析	185
稀土硫化物的化学分析法	187
总论	187
硫化铈的分析	189
磷化物的化学分析法	192
磷化钛的分析	192
磷化锆的分析	194
非金属化合物的化学分析法	195
碳化硼的分析	195
碳化硅的分析	202

A. II. 米克拉謝夫斯基的碳化硅分析法.....	204
丰克和紹埃尔的碳化硅分析法	206
氮化硼的分析	207
氮化硅的分析	210
附 录.....	212
参考文献.....	213

第一章 难熔化合物概論

冶金、化学、机械制造工业和动力学的发展,以及在核物理、原子动力学、噴气机和噴气技术、电子学和半导体等領域内的研究,都与熔点达 4000°C 的难熔化合物的利用密切相关。

难熔化合物化学的发展始于 19 世紀 90 年代的莫伊散*。目前难熔化合物化学已成了无机化学和冶金学中内容丰富的一个分支。它除了用于經典技术部門之外,还用于其他新領域,如火箭技术、核动力学、近代电子学等学科之中。

图 1 示出难熔化合物的組元在門捷列夫元素周期表中的位置。从图可見, II~VII 族奇数副族的元素、VIII 族、鑷、銻族的元素以及 II 和 III 周期的輕非金属元素 (B、C、N、O、Si、P、S) 和鋁均屬此类組元。这些元素彼此結合形成下列两个难熔化合物主类^[1]:

1. 金属与非金属結合的化合物。硼化物、碳化物、氮化物、氧化物、硅化物、磷化物和硫化物属于此类。

2. 非金属与非金属結合的化合物, 特別是硼和硅的碳化物、硼和硅的氮化物和磷化物、硼硅合金及各种多組元非金属合金等属于此类。

金属与非金属結合的化合物通常称为类金属难熔化合物, 这是因为它們的外形, 特別是其属性不仅和金属相象, 而且主要是和金属与金属相互結合的化合物, 即金属互化物相象。絕大多数类金属化合物均由过渡金属形成。过渡金属与非过渡金属不同, 它們除了外面有价电子外, 尚有未饱和的内电子壳层, 内层电子亦如价电子一样参与形成化学鍵。

由于除了价电子外, 金属的内电子和非金属的价电子也参与

* H. Moissan (1852~1907) 法国化学家——譯注。

过渡金属与非金属之间的结合，因此这些化合物在化学上是很牢固的，这从它们具有高的硬度、难熔性、良好的化学稳定性、大的生成热和很高的晶格能等方面表现出来。

由于有很多比较自由的电子，使它们具有很高的导电性（往往比相应的金属还高）和传热性，并使某些难熔化合物在真空中在电场和热的作用下能发射电子（热发射）的能力，以及其中某些化合物在 $15\sim 17^{\circ}\text{K}$ 的较高温度下能变为超导态的能力（即实际上在没有电阻下通过电流）。

某些类金属难熔化合物有半导体性：首推许多硅化物、硫化物、氮化物和磷化物。

某些类金属难熔化合物有较高的难熔性和硬度，除了因为它们有坚固的化学键之外，还由于它们有结构上的特点。

许多碳化物和氮化物，其中包括钛、锆、铪、钒、铌、钽的碳化物和氮化物就是那种所谓间隙相，即它们的结构是由小的非金属原子嵌入金属晶格孔隙（原子间隙）中而形成的。这样的嵌入强化了晶格，因而使其难于塑性变形，同时其脆性有了显著的提高。

在硼化物的结构中，形成链、网和骨架状（图2）的硼原子构形

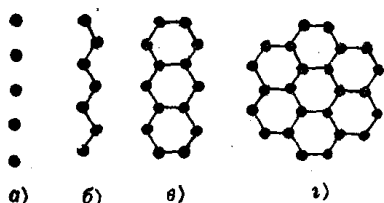


图2 硼化物结构中，硼原子的构形

a—孤立的硼原子 (Me_2B)；b—由硼原子组成的单链 (MeB)；c—由硼原子组成的双链 (Me_3B_4)；d—由硼原子组成的网络 (MeB_2)

是坚固的，硅化物的晶格亦同样坚固。但由于硅原子间有坚固的共价键，因而强烈地减弱了硅原子和金属原子间的键强，导致形成层状结构（图3）。在那些层状结构中由金属原子组成的结构单元与硅原子层有明显区别。这些可以解释硅化物熔点较低，经常比相应的金属的熔点为低并有蠕变的倾向，即在不太高的温度下，加微小的负荷有缓慢的塑性变形的倾向。

在晶格中，形成有非金属原子缺位的缺陷结构的能力是间隙相型难熔化合物的重要性质，但在个别罕有的情况下，如氮化铌

在晶格中，形成有非金属原子缺位的缺陷结构的能力是间隙相型难熔化合物的重要性质，但在个别罕有的情况下，如氮化铌

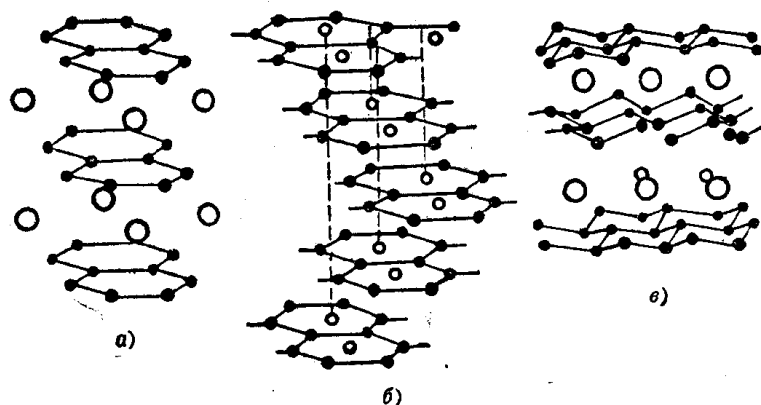


图3 在硅化物晶格中,由硅原子构成的结构单元

a —由硅原子构成的石墨形面网; b —同 a , 但以金属原子为中心;
 c —由硅原子构成的金刚石形面网

NbN 在晶格中则是金属原子缺位的。当形成这种缺陷结构, 或者形成以难熔化合物晶格为基的缺位结构时, 非金属含量减少至某一限度时, 结构仍然保持不变, 只是相应的晶格参数以及物理性质发生变化, 如硬度和电阻的减小, 非金属含量低于此限度时, 晶格发生改变。所以间隙相型的类金属难熔化合物具有一定的均匀范围。

对于某些难熔金属化合物, 均匀范围很大, 原子数达到百分之几十。事实上, 在均匀范围内, 化合物的化学稳定性改变就很大, 一般随着非金属含量的降低, 其稳定性也降低。在均匀范围内, 缺陷晶格的空位容易接受外来原子, 致使难熔化合物的性质显著地改变, 而且使生产十分纯净的难熔化合物的工艺过程变得复杂起来。

有关难熔类金属化合物物理性质的主要数据列于表1。关于它们的属性和构造方面更详细的报导已有专论叙述^[2~5]。

非金属与非金属结合的化合物称非金属难熔化合物类, 在这些化合物的晶格中, 原子间键有共价键的特征, 有方向性和刚性。所有这些化合物均具有半导性, 室温下有高的电阻及非常高的化学稳定性, 照例也有层状的、链状的、骨架状的结构群或结构单元

表1 难熔金属及其碳化物、氮化物、硅化物、硼化物、碳化物和硫化物的物理性质

金属, 化合物	分子量	比重, 克/厘米 ³	形成热, 千卡/克分子	焓, 卡/度·克分子	热容 (20°C), 卡/克分子·度	熔点, °C	热膨胀系数 (20~1000°C), $\alpha \times 10^6$	热导率 (20°C), $\lambda \cdot 10^3$ 卡/厘米·度·秒	比电阻, 微欧·厘米	电阻温度系数, $\frac{1}{\alpha_p} \cdot 10^3$ 度 ⁻¹	显微硬度, 公厘/毫米	弹性模数, $E \cdot 10^3$ 公厘/毫米 ²	耐压强度, 公厘/毫米 ²	抗折强度, 公厘/毫米 ²
Ti	47.90	4.5	0	7.2	140	1725	8.8	36	55.0	3.97	160	7.8~11.8	—	—
Zr	91.22	6.5	0	9.3	69.3	1860	6.3	40	41.0	4.35	97	8	—	—
Hf	178.60	13.1	0	13.1	35.1	2130	6.1	52.6	30.0	4.43	200	9.8~14.0	—	—
V	50.95	6.0	0	7.0	127	1720	9.7	70	26.0	2.80	65	12.9~14.7	—	—
Nb	92.91	8.5	0	8.5	64.7	2455	7.2	125	13.1	3.95	88	8.7~10.6	—	—
Ta	180.88	16.6	0	9.9	36	2990	6.5	130	12.4	3.85	100	18.8~19.2	—	—
Cr	52.01	7.2	0	5.68	106	1860	6.2	160	18.9	2.5	150	25.9	—	—
Mo	95.95	10.2	0	6.83	60	2625	4.9	320	5.2	4.71	190	33.2~36.7	—	—
W	183.92	19.3	0	8.0	32.3	3410	4.3	400	5.03	4.82	350	35.2~41.5	—	—
TiO	59.91	4.93	43.85	5.8	8.04	3147	7.74	58	52.5	1.16	3000	46.0	138.0	87
ZrO	103.23	6.9	44.1	8.5	14.6	3530	6.73	49	50.0	0.95	2930	35.5	167	—
HfO	190.61	12.6	~81	—	—	3390	5.60	15	45.0	1.42	2910	35.9	—	—
VO	62.96	5.36	30.2	6.77	7.97	2810	4.2	59	65	—	2090	43.0	62	—
NbO	104.92	7.56	33.6	8.9	8.92	3480	6.5	34	51.1	0.86	1960	34.5	—	—
TaO	192.89	14.3	36.8	10.0	8.79	3880	8.3	53	42.1	1.07	1600	29.1	—	—
Cr ₂ O ₃	180.05	6.68	21.01	20.4	23.38	1895	11.77	46	75.0	2.33	1350	38.8	—	—
Mo ₂ O	203.91	9.18	-4.2	19.8	—	2410	7.8	16	71.0	3.78	1500	54.4	—	—
WO	195.93	15.55	+9.1	8.5	8.53	2720	3.84	70	19.2	0.495	1780	71.0	56	35
TiN	61.91	5.2	80.5	7.24	8.86	3205	9.35	46	25	2.48	1990	25.6	129.8	—
ZrN	105.23	6.97	82.2	9.3	10.88	2980	7.24	49	21.1	4.3	1520	—	100	—
HfN	192.60	13.84	88.2	15.1	—	2980	6.9	—	33	—	1640	—	—	—

(續表 I)

金 属, 化 合 物	分子量	比重, 克/厘米 ³	形成热, 千卡/克 分子	焓, 卡/度· 克分子	热容 (20°C), 卡/克分 子·度	熔 点, °C	热膨胀系 数 (20~ 1000°C), $\alpha \times 10^6$	热 导 率 (20°C), $\lambda \cdot 10^3$ 卡/ 厘米·度·秒	比电阻, 微欧·厘米	电阻温 度系数, $\alpha_p \cdot 10^3$ 度 ⁻¹	显微硬 度, 公 斤/毫 米	彈性模数, $E \cdot 10^3$ 公 斤/毫米 ²	耐压强 度, 公 斤/毫 米 ²	抗折强 度, 公 斤/毫 米 ²
VN	64.95	6.04	60.0	8.9	9.08	2360	8.1	27	85.0	0.7	1520	—	—	—
NbN	106.91	8.4	56.8	10.5	10.41	2300	10.1	9	78.0	—	1400	—	—	—
TaN	194.88	13.8	60.0	12.2	9.7	3030	3.6	20.0	128	0.03	1060	—	—	—
Cr ₂ N	66.01	6.1	25.2	18.0	15.75	分解	9.41	52	76	—	1570	—	—	—
Mo ₂ N	205.90	8.0	16.6	—	8.98	分解	4.5	42.7	—	—	630	—	—	—
WN	197.92	12.1	17.2	—	—	分解	—	—	—	—	—	—	—	—
TiB ₂	69.54	4.45	70.0	7.8	10.57	2380	8.1	58	14.4	2.78	3370	54.0	135.0	—
ZrB ₂	112.86	5.8	-78.0	10.7	12.00	3040	6.88	58	16.6	1.76	2250	35.0	158.7	—
HfB ₂	200.2	10.5	—	14.2	—	3250	5.73	—	8.8	3.6	2900	—	—	—
VB ₂	72.59	4.6	—	2.9	—	2400	7.5	—	19.0	3.16	2800	27.3	—	—
NbB ₂	114.55	6.0	>36	10.4	—	3000	7.9~8.3	40	34.0	1.39	2600	—	—	—
TaB ₂	202.52	11.7	>52	13.9	—	3100	5.12	26	37.4	1.48	2500	26.2	—	—
CrB ₂	73.65	5.6	30	9.4	12.24	2200	11.1	53.4	84	2.6	2100	21.5	127.9	62
Mo ₂ B ₅	246.00	8.0	~50	12.21	—	2100	—	64	18	3.3	2350	—	—	35
W ₂ B ₅	421.94	11.0	25~45	28.3	—	2300	—	76	43	4.26	2660	—	—	—
TiSi ₂	104.08	4.35	42.9	—	6.63	~1540	—	—	16.9	6.3	890	26.4	—	21
ZrSi ₂	147.40	4.88	38.0	—	—	~1700	—	—	75.8	1.30	1060	26.8	—	—
HfSi ₂	234.80	7.2	—	—	—	1750	—	—	—	—	930	—	—	—
VSi ₂	107.13	4.42	75	—	—	1660	—	—	66.5	3.51	960	—	—	—
NbSi ₂	149.09	5.45	30	—	—	2150	—	—	50.4	—	1050	—	—	—
TaSi ₂	237.06	8.83	26.2	—	—	2200	—	—	46.1	3.32	1400	—	—	—

(續表 1)

金屬， 化合物	分子量	比重， 克/厘米 ³	形成熱， 千卡/克 分子	熱， 卡/度· 克分子	熱容 (20°C)， 卡/克分 子·度	熔點， °C	橡膠膨脹系 數 (20~ 1000°C)， $\alpha \times 10^6$	熱導率 (20°C)， $\lambda \cdot 10^3$ 卡/ 厘米·度·秒	比電阻， 微歐·厘米	電阻溫 度系數， $+ \alpha_p$ ， 10 ³ 度 ⁻¹	显微硬 度，公 斤/毫 米	彈性模數， $E \cdot 10^3$ 公 斤/毫米 ²	耐壓強 度，公 斤/毫 米 ²	抗折強 度，公 斤/毫 米 ²
CrSi ₂	108.18	4.40	28.6	—	12.64	1500	—	15	9.4	2.93	1130	—	—	—
MoSi ₂	152.13	6.30	26.0	—	13.98	2030	5.1	70	21.6	6.38	1200	43.0	113.9	35
WSi ₂	240.10	9.33	22.4	—	58	2165	—	—	12.5	2.91	1070	—	—	—
TiP	78.88	4.08*	63.4	—	—	1900	—	—	—	—	1500	—	—	—
ZrP	122.20	5.1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
VP	81.93	4.72	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
NbP	123.89	6.4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
TaP	211.86	11.04	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
CrP	82.99	5.25	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
MoP	130.93	7.20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
WP	214.90	11.7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
YS	120.98	4.51	—	—	—	2040	—	—	—	—	—	—	—	—
Y ₂ S ₃	274.02	3.87	—	—	—	1900	—	—	—	—	—	—	—	—
LaS	170.98	5.75	—	11.3	—	1970	—	—	—	—	677	—	—	—
La ₂ S ₃	374.02	4.93	342	11.0	—	2100	—	—	2·10 ⁵	—	360	—	—	—
CeS	172.19	5.88	117.9	11.3	—	2450	—	—	90	—	683	—	—	—
Ce ₂ S ₃	376.44	5.25	300.5	12.3	—	1840	—	—	3·10 ⁵	—	403	—	—	—
PrS	172.98	6.80	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

* 計算

+ 比重計

(續表 1)

金 属, 化 合 物	分子量	比重, 克/厘米 ³	形成热, 千卡/克 分子	焓, 卡/度· 克分子	热容 (20°C), 卡/克分 子·度	熔 点, °C	热膨胀系 数 (20~ 1000°C), $\alpha \times 10^6$	热 导 率 (20°C), $\lambda \cdot 10^3$ 卡/ 厘米·度·秒	比电阻, 微欧姆· 厘米	电阻温 度系数, $+ \alpha_p \cdot 10^3$ 度 ⁻¹	显微硬 度,公 斤/毫 米 ²	彈性模数, $E \cdot 10^3$ 公 斤/毫米 ²	耐压强 度,公 斤/毫 米 ²	抗折强 度,公 斤/毫 米 ²
Pr ₂ S ₃	378.02	5.27	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
NdS	176.33	6.24	—	—	—	2140	—	—	—	—	—	—	—	—
Nd ₂ S ₃	384.72	5.49	342	—	—	2200	—	—	—	—	330	—	—	—
SmS	182.41	5.64	—	—	—	1940	—	—	—	—	—	—	—	—
Sm ₂ S ₃	396.88	5.82	—	—	—	1900	—	—	—	—	—	—	—	—
EuS	184.06	5.71	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
GdS	189.33	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Gd ₂ S ₃	410.73	6.06	—	—	—	1885	—	—	—	—	—	—	—	—
DyS	194.58	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Dy ₂ S ₃	421.23	5.97	—	—	—	1490	—	—	—	—	—	—	—	—
ErS	199.34	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Er ₂ S ₃	430.75	6.07	—	—	—	1630	—	—	—	—	—	—	—	—
Yb ₂ S ₃	442.29	6.02	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
ThS	264.12	9.56	120	—	—	2400	—	2·10 ⁵	—	—	—	—	—	—
Th ₂ S ₃	560.31	9.69	306	—	—	1900-2000	—	—	—	—	250	—	—	—
US	270.14	10.31	—	—	—	2000	—	—	—	—	—	—	—	—
U ₂ S ₃	572.35	8.94	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Np ₂ S ₃	570.21	8.8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
PuS	276.07	10.61	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Pu ₂ S ₃	584.21	8.41	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Am ₂ S ₃	582.21	8.50	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

表2 碳化物、氮化物、硅化物和硼化物的物理化学和机械性质

性 质	化 合 物			
	B ₄ C	SiC	BN	Si ₃ N ₄
化学计量特性				
分子量	55.28	40.09	24.82	140.30
含量, % (重量)				
硼	78.30	—	43.6	—
硅	—	70.04	—	60.2
碳	21.70	29.96	—	—
氮	—	—	56.4	39.8
结晶性质				
结构	菱面体	六面体 菱面体 立方体*	六面体	六面体
晶格周期, Å				
a	5.595	*	2.504	7.76**
c	2.165	—	6.661	5.62
c/a	2.165	—	2.662	0.726
比重	2.52	3.2	2.20	3.18
热化学性质				
生成热, 千卡/克分子	13.8	25.7	50.7	179.5
焓, 卡/克·度	6.47	3.935	0.84	—
燃烧热, 千卡/克	149.7	—	90.2	—
晶格能, 千卡/克	149.7	—	—	—
分解蒸汽压, 毫米水银柱				
1200°	—	1.2·10 ⁻³	9	3.34
1997°	—	—	—	760
2045°	—	7.7	158	—
2227°	—	760	—	—
2500°	—	—	760	—
解离能, 千卡/克分子	—	—	49.5	—
热容, 卡/克·度				
25°	0.6	0.228	0.11	0.17
250°	0.13	0.30	0.13	0.25
1850°	0.40	0.66	0.33	—
热学性质				
熔点, °C	2350 (分解)	2600 (分解)	3000***	1900 (分解)
沸点, °C	>3500	—	—	—
热膨胀系数 (20~1000°C) ×10 ⁶	4.5	5~7	5~7	2.75
热导率, 卡/厘米·度·秒				
100°	0.29	0.02	—	0.04
300°	0.22	—	0.036	—
热导率, 卡/厘米·度·秒				
500°	0.18	—	—	—