

JINSHU PENGHUAWU YU
HANPENG HEJIN

金属硼化物与 含硼合金

郑学家 主编

Boron



化学工业出版社

JINSHU PENGHUAWU YU
HANPENG HEJIN

金属硼化物与 含硼合金

郑学家 主编

Boron

常州大学图书馆
藏书章



化学工业出版社

· 北京 ·

金属硼化物是硼化合物的一个大系列,它在国民经济各部门中有着广泛应用。本书详细介绍了金属硼化物的发现及其发展,硼化物的分类及系列化图,一般金属硼化物、特殊性能金属硼化物、稀土金属硼化物等。另外,本书附录还介绍了金属硼化物生产中的工业卫生和一些金属硼化物的分析测试方法。

本书可供从事金属硼化物研究、应用的技术人员,从事特种材料研究的技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

金属硼化物与含硼合金/郑学家主编. —北京:化学工业出版社, 2012. 5
ISBN 978-7-122-13581-0

I. 金… II. 郑… III. ①金属-硼化物②含硼合金
IV. ①O613.8②TL344

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 028476 号

责任编辑: 靳星瑞
责任校对: 宋 玮

文字编辑: 糜家铃
装帧设计: 韩 飞

出版发行: 化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)
印 刷: 北京永鑫印刷有限责任公司
装 订: 三河市万龙印装有限公司

710mm×1000mm 1/16 印张 11½ 字数 169 千字 2012 年 6 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 78.00 元

版权所有 违者必究

前 言

金属硼化物是硼化合物的一个大系列，它在国民经济各部门、工农业生产中有着广泛的应用，在现代科学技术、核工业、宇航、国防、高新技术领域发挥了重要的作用，如在机械加工、电子工业、能源工业、冶金工业、石油开采及石油化工各领域、化学工业、轻工业及材料工业等各部门有着广泛的应用。

稀土元素硼化物中的硼化镧与六硼化钙，用作半导体高温整流材料、掺杂材料、电子管材料、阴极射线材料以及高温核反应器中子的吸收材料。

钛、锂、铍、钒、锰、铬、钼、钨、钴、镍、锆、铅、铈、钽等金属的硼化物炼制硬度大，它们是耐磨性能好，耐热、抗氧化、电阻与温度有线性关系的特种合金，可用于金属陶瓷、耐磨涂层、高温电阻、坩埚内衬、真空喷镀和耐腐蚀化工设备。磷化硼可用作光学吸收及超硬无机材料。

含硼非晶型合金为节能硼化物，它们可代替硅钢片，节能 50% 以上。

另外，如金属硼化物复合材料（硼化物金属陶瓷）以及硼钛、硼锆基等在核工业、火箭喷嘴、高温轴承、热电保护管、汽车部件等制造中都有一定的应用。

为此，我们在化学工业出版社的大力支持下，联合了从事金属硼化物开发和生产的多位作者，在广泛查阅国内外文献资料的基础上编写了本书。在“十二五”刚刚来临的时候，为适应国家“十二五”硼工业发展的需要，我们将它奉献给广大读者和硼行业的研究者们。

本书包括：金属硼化物的发现及其发展；硼化物的分类及系列化图；一般与特殊性能的金属硼化物；在常用金属硼化物中，我们将硼（酸）锂和硼酸盐抗粉化剂两个品种也一并列入；另外还有稀土元素及其硼化物；特别是体现时代新潮流的节能金属硼化物——非晶型合金；几种金属硼化物的分析测试方法以及有关金属硼化物的一些常用的物理化学数据等，以及金属硼化物的工业卫生。本书共分七章。附录中收录了一些分析测试方法。

本书编写过程中得到化学工业出版社的大力支持，东北大学张显鹏教授、原包头稀土研究院郝占忠研究员热心提供宝贵的技术资料，大连理工大学吕秉玲教授对本书的部分章节提出宝贵意见并进行修改，丹东市化工研究所金英花总工程师、大连金玛科技集团公司王海林提供有关技术资料。我们特向他们表示诚挚的谢意！在这里也向编写本书时引用的文献书籍的作者们致以深切的谢意！

本书由郑学家担任主编，倪坤、董振伟、孟宪友、王立新、李力、吕晓姝、孙成高担任副主编；其他参编人员有：宋明志、乃学瑛、张吉昌、郑吉岩、关玉姣；最后由郑学家统稿。

本书在编写上可能会有许多不足之处，敬请硼行业同行及广大读者批评指正。

郑学家

2011年12月于旅顺

目 录

第一章 金属硼化物的发现及其发展历史	1
一、金属硼化物的复合材料	1
二、二硼化镁的超导电性能	2
三、钕铁硼	3
四、硼化镧	4
五、其他稀土硼化物的发现和发展方向	6
六、分类	7
第二章 一般金属硼化物	9
第一节 概述	9
一、特性	9
二、制备方法	10
三、常用金属硼化物的发展前景	16
第二节 硼化铝	17
一、二硼化铝	17
二、十二硼化铝	17
第三节 硫化硼、磷化硼和硅化硼	18
一、硫化硼	18
二、磷化硼	18
三、硅化硼	20
第四节 硼化钼、硼化钒、硼化铌和硼化铀	20
一、硼化钼	20

二、硼化钒	21
三、硼化铌	22
四、硼化铀	23
第五节 硼化钨和硼化钼	23
一、硼化钨	23
二、硼化钼	24
第六节 三硼酸锂	24
第七节 硼酸盐抗粉化剂	25
第八节 硼化锰	26
第九节 硼化钡	28
第十节 硼化铍	30
第十一节 硼化钙	31
第十二节 硼化钛	34
第十三节 硼化锆	38
第十四节 硼化铁	40
一、硼化铁	40
二、含硼生铁	43
第三章 特种性能的金属硼化物——二硼化镁	45
一、二硼化镁的性质	45
二、二硼化镁的合成工艺方法、应用及发展	47
第四章 稀土元素及其硼化物	51
第一节 稀土元素及其硼化物总论	51
一、稀土元素的特性及应用	51
二、稀土元素硼化物的特性、合成工艺及应用	55
第二节 钹铁硼	57
第三节 硼化镧和硼化铈	61
一、硼化镧	61
二、硼化铈	62
第四节 稀土金属硼化物的发展前景	62

第五章 金属硼化物的复合材料	65
第一节 硼纤维及其相关材料	65
一、硼纤维	65
二、硼纤维复合材料	66
第二节 硼化钛（锆）金属复合材料	71
一、二硼化钛复合材料	71
二、硼化锆金属复合材料	72
第三节 金属硼化物复合材料的发展前景	73
第六章 含硼合金	75
第一节 硼对钢和合金性能的影响	75
一、硼对不锈钢性能的影响	75
二、硼对钢断裂韧性和缺口拉伸强度的影响	76
三、硼对钢和合金性能的影响	76
四、硼对耐热钢和耐热合金性能的影响	78
第二节 常用含硼合金及硼钢的组成	80
第三节 节能含硼合金——非晶、纳米晶含硼合金	83
一、非晶态合金的性能及应用	83
二、非晶、纳米晶含硼合金的发现	86
三、含硼非晶型合金的特性及用途	90
四、含硼非晶型合金的制造工艺	91
五、非晶、纳米晶合金	93
第四节 含硼非晶型合金的发展前景	94
附录	97
附录一 金属硼化物分析测试方法	97
附录 A（提示的附录）	108
附录 B（提示的附录）	111
附录 C 仪器工作条件（参考件）	125
附录 D 仪器工作条件（参考件）	128
附录 E 仪器工作条件（参考件）	131

附录 F 仪器工作条件 (参考件)	135
附录二 稀土元素的物理化学数据	147
附录三 金属硼化物的物理化学数据	159
附录四 金属硼化物的工业卫生	168
参考文献	170

· 第一章 ·

金属硼化物的发现及其发展历史

一、金属硼化物的复合材料

早在 19 世纪人类在合成工艺方面就已发现气相-固相和固相-固相的燃烧合成现象。

1825 年, Berzelius 发现非晶型锆在室温下燃烧并生成氧化物。1892 年, Moissen 叙述了氧化物和氮化物的燃烧合成。1895 年, Goldechmidt 用铝粉还原碱金属和碱土金属氧化物, 发现固相-固相燃烧反应, 并描述了放热反应从试料一端迅速蔓延到另一端的自蔓延现象。20 世纪铝热反应得到工业应用。但是, 将燃烧合成和冶金、机械等技术结合起来, 发展成为具有普遍意义的制备材料新技术并用于工业生产, 还应归功于前苏联科学家的努力。

从 20 世纪 30 年代以来, 美国研究了很多关于金属与间隙化合物相容性的问题, 这一组合最早的实例是碳化钨与钴。在这种复相材料中, 碳化钨的晶粒由钴粘牢, 它的强度与韧性均较铸造的碳化物为优。这是在 1922 年发现的, 它是新的硬质合金工业的诞生。

1951 年, 有人曾热压 85% 硼化铬及 15% 镍, 发现生成一个熔点大约在 1040℃ 的硼化镍。在 BatteUe Memorial Institute 进行的持久强度试验结果表明, 硼化铬基金属陶瓷在 820℃、1000h 的持久强度只有钴基合金 Vitallium 的 1/4。

我国在 20 世纪 70 年代已利用 Mo-Si 的放热反应来制备 MoSi₂ 粉末。从 80 年代开始, 原冶金部钢铁研究总院、西北有色金属研究院、南京电

光源材料研究所、北京科技大学、武汉工业大学和中南工业大学等单位先后开展了 SHS（自蔓延高温合成）的研究。1989 年，美国加州大学 Davis 分校工学院的 Mtmir 教授应邀在北京科技大学介绍 SHS。1991 年 3 月，SHS 技术的创始人、前苏联结构宏观动力学研究所的 Merzhanov 及 Borovinskaya 等 4 人应中国有色金属学会的邀请，在北京有色金属研究总院举办 SHS 讲习班，促进了自蔓延高温合成在我国的研究和开发。自蔓延高温合成研究得到了国家自然科学基金委员会、国家高技术“863”新材料委员会、国家教委、原冶金部、轻工部等国家部委甚至企业的资助，“八五”期间国家高技术“863”计划还设立了金属、非金属材料复合的自蔓延高温合成技术。1992 年，原冶金部钢铁研究总院与前苏联科学院结构宏观动力学研究所组建了合资公司——北京华联特种材料股份有限公司，专门利用自蔓延高温合成技术生产各种陶瓷粉体，年产量达到 20t。1994 年，第一届全国自蔓延高温合成学术会议在武汉召开。1995 年 10 月，第三届国际 SHS 会议在我国武汉举行。在“863”计划的资助下，SHS 法生产陶瓷内衬钢管在我国已工业化规模生产。

二、二硼化镁的超导电性能

二硼化镁晶体属于六方晶系，由硼和镁组成，早在 1950 年已经被科学家们发现。最近，日本在制作了 165 个二硼化镁样品之后，惊喜地发现二硼化镁具有超导电性。2001 年 1 月，日本青山学院大学教授秋光纯宣布，他的研究小组发现金属间化合物二硼化镁具有超导电性，超导转变温度高达 39K，全世界凝聚态物理学界为之兴奋。二硼化镁结构简单，易于制作和加工，有着广阔的应用前景。

李俊义指出，中国安泰公司非晶型合金和纳米晶型产业发展历程：

1976~1995 年：非晶带材基础研究阶段，非晶带材小批量试制及初步应用，非晶带材生产中试阶段（百吨级），非晶铁芯及元器件生产中试阶段，纳米晶带材基础研究阶段；

1996~2000 年：非晶带材及制品产业化阶段（千吨级），配电变压器

铁芯生产中试阶段，纳米晶带材生产中试阶段；

2001~2010年：纳米晶合金超薄带产业化阶段，非晶带材大规模生产阶段（4万吨）。

三、 钕铁硼

我国较早开发钕铁硼并产业化的公司是北京三环公司。钕铁硼从实验室到工业规模生产仅经历了3~4年，其发展势头和实用化比其他材料快几百倍，其速度是惊人的。日本住友公司钕铁硼的销售额达100亿美元。20世纪80年代最后两年，西方国家NdFeB磁体的产量为650t，其中日本为370t（占57%），美国、欧洲、非洲、东南亚市场状况较好，非常活跃。

“十五”期间，我国钕铁硼磁体的总产量达5万吨左右，2010年达到8万吨。我国生产点分布广，如浙江、四川、大连、吉林、北京。我国在20世纪末，国际测定太空目前物质的“阿尔法”装置其工艺材料由四川徐阳、北京三环公司提供。

在钕铁硼应用领域方面，目前西方国家钕铁硼最大的用户是计算机外围设备的驱动器（音圈电机），占总消耗的57%。磁盘驱动设备的发展要求体积小、存储能力大、时间短、磁道密度大。用钕铁硼磁能级小、体积小、重量轻，有助于提高速度与功率。对我国来说，作为信息技术的计算机，在蓬勃发展日益普及的今天，对钕铁硼来说是一个大的市场。

最引人注目的是核磁共振成像仪（MRI）。日本在1988年研制成功用NdFeB磁体作为磁体的MRI，并在当年生产了50台，被列为日本1988年度十大新产品之一。MRI是检查人体内部病变，用于早期诊断肿瘤等疑难病症的大型医疗仪器。每台MRI使用2t钕铁硼。我国卫生部门计划在今后二十年内每县设置一台，平均每年生产130台，据预测，这就需钕铁硼260t/a，市场的前景是相当可观的。

从长远来看，电机将是钕铁硼的主要用户。美国通用汽车公司已大规模使用汽车启动电机。我国国内用于试制2Q-5汽车启动电机，功率由原

来的 0.5kW 增加为 1.5kW。而这种钕铁硼电机不需要电激磁，没有激磁线圈与铁芯，没有损耗和发热，具有体积小、重量轻、比功率大和效率高等优点。据西欧国家预测，21 世纪钕铁硼永磁材料在电机方面的应用将占钕铁硼量的 40%。

除此之外，磁力机械、音响器件也是大宗用户。未来是磁的世界，磁渗透到生活的广大领域，我国如上海的磁浮列车已经产业化了，展望钕铁硼的市场前景是非常好的，关键是我们是否能抢占这个大市场。

四、 硼化镧

在军事领域，硼化镧单晶是雷达中大功率电子管阴极的最佳选材；在航空、航天工业领域，用于等离子体发动机和推进器的制造。作为气象卫星上许多重要器件的关键材料，用硼化镧制成的耐高温喷嘴，在航空、航天领域有广泛的用途；在核工业领域，由于硼化镧具有很强的抗辐射性，在核工业中可用作抗辐射的建筑用砖以及各种包装材料；在电子工业领域，用于大功率电子管和磁控管、电子束和离子泵以及加速器用阴极材料等。在高科技仪器仪表中，用于电子显微镜和电子探针仪的点光源、选择光学过滤器、软 X 射线单色器等；在家电行业中，硼化镧在中、低温下可获得高密度流和高亮度，可用于高清晰（等离子体）超薄型电视机显像管阴极材料，极具开发价值；在冶金工业中，作为高效添加剂在兵器和军工车辆的特殊钢中有很大的应用潜力，还可制成熔融金属的容器（如坩埚等）。在医疗器械领域，用于等离子体医疗手术仪。用该材料作阴极能产生等离子体，对细胞组织有切割和凝结作用，可应用于咽喉、腹腔手术以及肿瘤和泌尿科手术等；在环保方面，电子束最宜于对烟气的处理，被国际上公认为 21 世纪烟气处理的新技术，它没有二次污染，被称为“终极工艺”，而且还能变废为宝，所生成的硫酸铵和硫硝铵复合盐是上等的化肥；在材料加工设备中，用硼化镧做成的电子焊机，可达到高能密集焊接工艺的要求，在航天、航空及兵器等领域有着广泛应用；在生物工程领域，将硼化镧粉末涂覆在玻璃上，用特殊的光源透过该玻璃照射种子，可提高农作物产量，据乌克兰专家提供的数

据,可增产 15%;在特殊玻璃方面,澳大利亚的研究人员 Stefan Schelm 和 Geoff Smith 开发出一种廉价的含六硼化镧晶粒的塑料聚合体,将它压在玻璃片中央可以抵挡波长低于红光的“热波”波长。当倾斜观察该玻璃的时候,它散发淡蓝色的雾气,而以其他角度观察的时候,该玻璃为透明状,略呈绿色。这种新型的玻璃可以只让光线射入,而把大部分热量拒之窗外,使办公室在夏天的时候也不至于像温室一样闷热难耐。虽然加入晶粒的重量只占到 0.02%,但红外线的穿透率会下降到 5%。

长期以来电子显微镜的阴极主要使用金属钨(W),它的缺点是在实际的工作温度(2200~2400℃)下,W发生激烈的蒸发,因此使用的寿命短,最长在 100h 之内,这样也就不能作为连续运转几千小时的电子束曝光机中的阴极材料。在电子管仪器中,如果使用氧化钡(BaO)为主体的阴极材料,其残余气体剩得少,但在高温下通过大电流时,覆盖层就会被击穿遭破裂,并且有接触大气时能生成氢氧化物及活化困难等一些缺点。而六硼化镧恰好解决了如上述钨、钼等阴极材料的弊病,如把 LaB₆ 粉状喷涂在铯带上,1400℃时,发射电流可达到 13A/m,可在 30~40MeV 直流加速器使用寿命大于 2000h,在电子速曝光机上,1430℃其亮度是钨丝的 6 倍,用在等离子体源上效果更好。

六硼化镧是一种新型阴极发射材料,它与传统的钨、钼阴极材料相比,具有电子逸出功率低,发射电流高度大,抗中毒性强,性能较高,使用寿命长等优点。

六硼化镧用作大功率电子仪器阴极,另外它还用极难熔金属真空电子束焊接装置。国外如日本电气化学公司和日本科学技术厅无机材料研究所已经开发研究成功六硼化镧。早在 20 世纪 50 年代,国外有些科学家就提出了 LaB₆ 作为热电子阴极发射材料,当时他们就对 LaB₆ 和 W 等金属常用材料做了技术性能的比较,并提出了有关数据。另外,原苏联对合成工艺也做了大量工作。国际市场进口一根(火柴杆大小)用于扫描电镜 LaB₆ 单晶体阴极就需 100 美元,而粉末体价格为 2 万~3 万元/kg,单晶体 15 万~20 万元/kg,多晶体 10 万元/kg。国内近期 40~50g 的硼化镧坩埚就需要 2000~2500 元人民币。

五、其他稀土硼化物的发现和发展方向

稀土硼化物在 20 世纪 80 年代前属国防、军工领域的重要材料，各国严守机密，实行技术封锁，除少数专利外，未作公开报道。80 年代后，转向民用，研究从此活跃起来，现已成为金属间化合物、无机非金属材料、陶瓷材料以及冶金、固体物理和化学等交叉学科的研究热点。

乌克兰能生产稀土硼化物粉末、多晶和单晶等系列产品，采用区域提纯等高难度的工艺技术手段制备出性能优异的 LaB_6 单晶，并开发了管、片线材产品，综合研究水平处于国际领先地位。已将该材料广泛用于国防和民用工业，如大功率发射阴极、加速器、电子束和离子束的关键部件。世界上现有的大尺寸硼化镧单晶，都是乌克兰提供的。他们为加拿大提供了一套制作难度极高的管状硼化物单晶，用于制造一种特殊用途的等离子束。

日本近年来在单品应用方面的研究进展迅速，已将其用于各类电子显微镜阴极；东芝公司和日本国立无机材料所合作，在新一代彩色电视机显像管阴极材料方面开始了应用研究； LaB_6 和 SrB_6 单晶体已经应用于高清晰彩电上。美国也开展了 LaB_6 的粉末、多晶、压实材料的研究，粉末已进入商品化。单晶生长方面，用熔丝法生长的丝状单晶已开始在显微镜阴极中采用。

另外，英国、法国、瑞士等国家也相继在实验室条件下研究硼化镧材料。

我国包头稀土研究院从 20 世纪 60 年代起，开展了稀土硼化物粉末及其冷压块、热压块和异型块的工艺研究，产品包括二元稀土硼化物 LaB_6 、 CeB_6 、 PrB_6 、 NdB_6 、 SmB_6 、 EuB_6 、 YB_6 等；三元稀土硼化物 $(\text{La}_{0.4}\text{Eu}_{0.58})\text{B}_6$ 、 $(\text{La}_{0.41}\text{Sm}_{0.56})\text{B}_6$ 、复合化合物 $(\text{La}_x\text{Ba}_{1-x})\text{B}_6$ 和 $(\text{Sm}_x\text{Ba}_{1-x})\text{B}_6$ 。20 世纪 80 年代初，又自行设计制造了生产稀土硼化物单晶专用的双电弧加热悬浮区熔炉，并获得国家专利。用它生产的六硼化镧单晶，其性能已达国际水平。

其次，国内的湖南稀土研究所和山东大学在硼化物制造及其性能测试

方面也做了大量的工作。目前它们都可以生产六硼化镧粉末、多晶和单晶等产品，为我国稀土硼化物的研究做出了贡献。

六、 分类

本书将金属硼化物划分成以下几类：

- ① 金属硼化物根据它们的应用情况分成一般金属硼化物、常用金属硼化物及特种性能的金属硼化物，如将硼化铝等作为一般金属硼化物，而将硼化钛、硼化锆、硼化钙等列为常用金属硼化物；
- ② 二硼化镁由于其具有特殊的性能如超导性，将把它列为特种性能的金属硼化物；
- ③ 稀土元素及其硼化物，我们将其专门列一章成为一大类金属硼化物如镧、铈等 17 种稀土元素硼化物，还有钕铁硼永磁材料专门划成一个大类；
- ④ 硼化钛复合材料等列为一类；
- ⑤ 含硼合金特别是非晶型合金、非晶型纳米合金作为节能的硼化物，本书将其列成一个大类。

各种金属硼化物系列化图如图 1-1 所示。

	Be ₃ B Be ₂ B BeB ₂ BeB ₄ (BeB ₉)								
	Mg ₃ B ₂ MgB ₂ MgB ₄ MgB ₆ MgB ₁₂							AlB ₂ AlB ₁₀ ABr ⁻ AlB ₁₂	SiB ₆
KB ₆	CaB ₆	ScB ₂ ScB ₆ ScB ₁₂	Ti ₂ B TiB TiB ₂ Ti ₂ B ₅	V ₃ B ₂ VB V ₃ B ₄ VB ₂	Cr ₄ B Cr ₂ B Cr ₅ B ₃ Cr ₃ B ₂ CrB Cr ₃ B ₄ CrB ₂	Mn ₄ B Mn ₂ B MnB Mn ₃ B ₄ MnB ₂	Fe ₂ B FeB	Co ₃ B Co ₂ B CoB	Ni ₃ B Ni ₂ B NiB

图 1-1

	SrB ₆	YB ₂ YB ₄ YB ₆ YB ₁₂ YB ₆₆	ZrB ZrB ₁₂ ZrB ₂	Nb ₃ B Nb ₃ B ₂ NbB Nb ₃ B ₄ NbB ₂	Mo ₂ B Mo ₃ B ₂ MoB MoB ₂ Mo ₂ B ₅	Tc ₃ B Tc ₇ B ₃ TcB ₂	Ru ₇ B ₃ Ru ₁₁ B ₈ RuB _{1.1} RuB _{1.5} RuB ₂	Rh ₇ B ₃ RhB _{1.1}	Pd ₃ B Pd ₅ B ₂
	BaB ₆	LaB ₄ LaB ₆ (LaB ₉)	HfB HfB ₂	Ta ₃ B Ta ₂ B Ta ₃ B ₂ TaB Ta ₃ B ₄ TaB ₂	W ₂ B WB W ₂ B ₅ (WB ₆)	Re ₃ B Re ₇ B ₃ ReB ₂	OsB _{1.2} OsB _{1.5} OsB ₂	IrB _{1.1} IrB _{1.35}	PtB
			ThB ThB ₄ ThB ₆ ThB ₆₆		UB ₂ UB ₄ UB ₆ UB ₁₂	PuB ₂ PuB ₄ PuB ₆ (PuB ₁₀₀)			
LaB ₄ LaB ₆ (LaB ₉)	CeB ₄ CeB ₅	PrB ₄ PrB ₆	NdB ₄ NdB ₆		SnB ₄ SmB ₅	EuB ₄ EuB ₆	GdB ₄ GdB ₆	TbB ₄ TbB ₆ TbB ₁₂	DyB ₄ DyB ₆ DyB ₁₂
ErB ₄ ErB ₆ ErB ₁₂	TmB ₄ TmB ₆ TmB ₁₂	YbB ₄ YbB ₆ YbB ₁₂	LuB ₂ LuB ₄ LuB ₆ LuB ₁₂					HoB ₄ HoB ₆ HoB ₁₂	

图 1-1 各种金属硼化物系列化图