



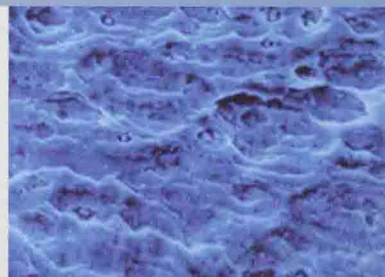
殷为宏 汤慧萍 编著

难熔金属材料 深加工技术

Downstream Processing Technology
for Refractory Metals



化学工业出版社



殷为宏 汤慧萍 编著

难熔金属材料 深加工技术

Downstream Processing Technology
for Refractory Metals



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书涉及的难熔金属材料深加工技术是把前期生产出来的加工材（板材、带材、棒材、丝材、锻件等）转变成所需形状和尺寸的零件或组件的高附加值技术。本书系统地、扼要地阐述了难熔金属族群中最主要、最重的成员钨、钼、钽、铌、钽及其合金材料的主要深加工技术，较全面地反映了现代难熔金属材料深加工的水平和现状，为解决难熔金属材料变成制品时的成形特殊困难提供技术、方法和科学依据。

全书共 10 章，主要内容包括难熔金属材料深加工技术与材料的性能关系、难熔金属材料的主要性能、机械加工技术、冲压成形技术、电火花加工技术、电解加工和化学加工技术、表面处理技术、表面防护技术、连接技术和深加工技术组合集成的实例等。本书把难熔金属材料加工过程的特殊性和科学依据作为主线，不仅收集了国内外难熔金属材料深加工方面的重要成果和信息，而且还尽可能地展现当前这类材料深加工的发展动向，也从侧面反映出一些国际上有重要影响的难熔金属材料专业研发单位和生产企业的水平。

本书可供从事材料科学与工程技术人员，特别是从事难熔金属材料研发人员和生产企业技术人员参考，亦可作为高等院校材料专业和相近专业师生的参考书。

图书在版编目（CIP）数据

难熔金属材料深加工技术/殷为宏，汤慧萍编著．

北京：化学工业出版社，2015.3

ISBN 978-7-122-22773-7

I. ①难… II. ①殷…②汤… III. ①难熔稀有金属-金属材料-生产工艺 IV. ①TG146.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2015）第 008902 号

责任编辑：窦 臻

文字编辑：冯国庆

责任校对：王 静

装帧设计：关 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 装：北京云浩印刷有限责任公司

787mm×1092mm 1/16 印张 20 字数 506 千字 2015 年 4 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：98.00 元

版权所有 违者必究

前言

难熔金属由于具有许多优异特性，甚至是独树一帜的特性，而被广泛应用于国民经济的许许多多部门。现代的国防建设、高技术的发展、工业部门的进步和人民生活质量的提高都与难熔金属材料的发展和支撑分不开，因此，难熔金属材料在现代人类文明发展中已确立了自己的突出地位。难熔金属材料的研发和生产水平、应用程度在一定程度上已成为一个国家综合国力的标志。

本书涉及的难熔金属材料深加工技术是把前期生产出来的各种加工材（板材、带材、棒材、丝材、锻件等）转变成所需形状和尺寸的零件或组件的高附加值技术，包括塑性成形、连接、材料改性等。深加工技术把材料直接推向应用，这对于把先进材料或材料组合有效地推向市场起着极为重要的作用。

本书定位的难熔金属是钨、钼、钽、铌、铪，前4个元素是元素周期表中难熔金属族群里最主要、最重要的成员，拥有矿物资源丰富、产量大、应用面宽等特点，在我国这些特点尤为突出，铪独特的超高温抗氧化性能成为钨、钼、钽、铌超高温结构材料的重要抗氧化涂层而备受青睐。

我国已成为当今世界上难熔金属材料的大国，在钨工业方面，已是世界上资源储量第一、产量第一、贸易第一和消费第一的“四个第一”国家；钼业方面已成为资源储量、产量和消费量第一的“三个第一”国家；我国的钽业已进入世界“三强”行列（美国、中国、德国）。尽管如此，我国目前仍不是世界难熔金属材料的强国，主要反映在难熔金属材料深加工环节比较薄弱，具体体现在难熔金属材料的零件、组件的使用性能还赶不上西方发达国家，如奥地利、美国、德国，因而深加工制品出口竞争力低，不少深加工制品尚需进口。以钨业为例，我国钨资源加工制品出口结构中，中间产品（APT、钨铁、钨酸）和再加工制品（钨粉）2012年分别占50.50%和27.68%，两者之和为78.18%，加工材（板材、带材、棒材、丝材、硬质合金）只占21.83%，而深加工产品就更少了。2012年进口的钨丝价格是出口钨丝价格的3.90倍，深加工制品的进口/出口的价格比则更大。造成这一局面的原因之一是对深加工重视不够，无论是难熔金属材料研发单位、生产厂家，还是这些材料的使用部门，至今仍把深加工当作一个辅助工序，于是在材料加工与使用之间形成一个真空地带，产生了技术薄弱环节，并成为制约当前难熔金属材料产业发展的瓶颈。至今我国还没有一个像奥地利普兰西金属公司那样的难熔金属材料制品专业的加工厂家。

鉴于我国难熔金属材料深度加工薄弱和这方面的专著仍缺乏的现状，作者编写了这部难熔金属材料深度加工专著，介绍难熔金属材料深度加工的多种技术，以及多种技术组合的深加工制品，以供有关技术人员参考，为解决难熔金属材料变成制品时的成形特殊困难提供技术、方法和科学依据，以便共同努力，推进我国难熔金属材料深加工的发展。

在选择难熔金属材料零件、组件成形技术时，首先要考虑材料的物理化学性质、力学性能和工艺性能，另外还要考虑零件的结构、尺寸要求、生产批量、生产条件以及环保等因素，以此为基础选出经济合理的深加工方案。本书主要介绍难熔金属材料的主要性能和以下难熔金属材料深加工技术：机械加工、冲压成形、表面处理、表面防护、连接、电火花加

工、电解加工和化学加工等。

在本书的编写过程中，作者得到本单位——西北有色金属研究院的大力支持，对此表示衷心感谢；作者引用了《中国材料工程大典》、《材料科学与工程手册》中的部分内容，参阅了国内外许多学者和专家的文献著作，在此谨向他们一并表示感谢。

由于本书是一部尝试性的专著，加之作者水平有限，因此在取材和论述等方面存在不妥、不足和疏漏，敬请读者批评指正。

股为宏 汤慧萍
于西安 西北有色金属研究院
2014 年 10 月

目 录

第 1 章 引言——难熔金属材料深加工技术与难熔金属材料性能的关系 1

1.1 深度加工技术与材料的物理性质关系	1
1.2 深度加工技术与材料的化学性质息息相关	2
1.3 深度加工技术与材料的力学性能的关系	3
1.4 深加工技术与材料的组织性能关系	3
参考文献	4

第 2 章 难熔金属材料的主要性能 5

2.1 钨和钨合金的性能	5
2.1.1 钨的性能	5
2.1.2 钨合金的性能	9
2.2 钼和钼合金性能	20
2.2.1 钼的性能	20
2.2.2 钼合金的性能	22
2.3 钽和钽合金性能	29
2.3.1 钽的性能	29
2.3.2 钽合金的性能	34
2.4 铌和铌合金性能	40
2.4.1 铌的性能	40
2.4.2 铌合金的性能	44
2.5 铪和铪合金的性能	54
2.5.1 铪的性能	54
2.5.2 铪合金的性能	56
参考文献	57

第 3 章 难熔金属材料深加工中的机械加工技术 60

3.1 车削加工	60
3.1.1 车刀几何参数和车削工艺参数	60
3.1.2 车削设备	61
3.1.3 钨及其合金的车削加工	61
3.1.4 钼及其合金的车削加工	67

3.1.5 铌的车削加工	67
3.1.6 钽的车削加工	68
3.1.7 铱的车削加工	69
3.2 铣削加工	69
3.2.1 刀具的几何参数	69
3.2.2 铣削工艺参数	69
3.3 钻削加工	70
3.4 切断	71
3.4.1 砂轮片切割	71
3.4.2 阳极-机械切割	71
3.4.3 圆盘切割和弓形锯切割	71
3.4.4 难熔金属材料板、带材的剪切	72
3.5 磨削加工	72
3.5.1 磨削的种类和功能	72
3.5.2 磨削设备	73
3.5.3 磨具选择	73
3.5.4 磨削的基本参数	74
3.5.5 钨及其合金的磨削加工	76
3.5.6 钼及其合金的磨削加工	78
3.5.7 钽、铌的磨削加工	78
参考文献	78

第4章 难熔金属材料的冲压成形加工技术

79

4.1 概述	79
4.1.1 金属冲压变形	80
4.1.2 金属板料成形性的评价	82
4.2 冲裁加工(剪切分离)技术	84
4.2.1 冲裁加工机理	84
4.2.2 剪切分离种类和工序性质	85
4.2.3 冲裁设备的选用	87
4.2.4 冲裁模设计	88
4.2.5 冲裁工艺	97
4.3 冲压成形技术	100
4.3.1 成形分类和基本工序	100
4.3.2 弯曲技术	102
4.3.3 拉深技术	110
4.3.4 翻边技术	117
4.3.5 胀形技术	119
4.4 旋压成形技术	121
4.4.1 旋压成形分类和工艺特点	121
4.4.2 旋压设备	123

4.4.3	材料的可旋性	125
4.4.4	锥形件的旋压	125
4.4.5	管形件旋压	128
4.4.6	确定难熔金属材料旋压工艺主要参数小结	131
4.4.7	常见的旋压产品缺陷及消除办法	134
4.4.8	难熔金属板料旋压成形和制品实例	135
4.5	矫直技术	137
4.5.1	概述	137
4.5.2	板材辊式矫直	137
4.5.3	丝材矫直	138
4.6	难熔金属材料深加工中的有限元模拟技术	140
4.6.1	塑性加工工艺分析模型	140
4.6.2	塑性加工有限元法	142
4.6.3	深加工模拟实例	143
参考文献		148

第5章 难熔金属材料深加工中的电火花加工技术

150

5.1	电火花加工原理及影响材料放电腐蚀的主要因素	150
5.1.1	电火花加工原理	150
5.1.2	影响材料放电腐蚀的主要因素	151
5.2	电火花加工结构和切削速度	152
5.2.1	结构	152
5.2.2	切割速度	152
5.3	电火花加工在难熔金属材料深加工中的应用	152
5.4	电火花线切割加工	153
5.4.1	电火花线切割加工机床构成	153
5.4.2	电火花线切割加工分类及其特性	154
5.4.3	高速走丝电火花线切割加工	155
5.4.4	低速走丝电火花线切割加工	157
5.5	电火花成形加工	158
5.5.1	电火花成形加工的机床构成	159
5.5.2	电火花成形加工方法	159
5.6	难熔金属材料电火花加工产品实例	161
5.6.1	钨及其合金准直片	161
5.6.2	钨、钼模具	161
参考文献		162

第6章 难熔金属材料深加工中的电解加工和化学加工技术

164

6.1	电解加工技术	164
------------	---------------------	------------

6.1.1	电解加工原理	164
6.1.2	电解加工间隙	165
6.1.3	电解液	167
6.1.4	影响电解加工的工艺参数	168
6.1.5	电解加工设备	169
6.1.6	电解加工在难熔金属材料深加工中的应用	169
6.2	化学加工技术	171
6.2.1	化学铣切加工	171
6.2.2	光刻加工	172
	参考文献	174

第7章 难熔金属材料深加工中的表面处理技术

175

7.1	除油清洗	176
7.1.1	化学除油	176
7.1.2	有机溶剂（或水蒸气）除油	177
7.1.3	电化学除油	177
7.2	金属表面除氧化皮	179
7.2.1	钨、钼表面除氧化皮	179
7.2.2	钽、铌表面除氧化皮	180
7.3	阳极氧化	181
7.3.1	阳极氧化原理	181
7.3.2	阳极氧化的工艺参数	181
7.4	电化学抛光、化学抛光和机械抛光技术	183
7.4.1	电化学抛光	184
7.4.2	化学抛光	187
7.4.3	机械抛光	190
7.4.4	电化学-机械复合抛光	191
7.4.5	各种抛光方法所能达到的表面粗糙度比较	193
	参考文献	194

第8章 难熔金属材料的表面防护技术

195

8.1	难熔金属材料领域里常用的表面防护技术	196
8.1.1	热喷涂技术	196
8.1.2	熔结涂层技术	200
8.1.3	物理气相沉积（PVD）	201
8.1.4	化学气相沉积（CVD）	205
8.1.5	电镀技术	207
8.1.6	化学热处理技术	208
8.2	钨及其合金的氧化与防护	209

8.2.1 钨的氧化行为	209
8.2.2 钨的抗氧化防护涂层	210
8.3 钼及其合金的氧化与防护	211
8.3.1 钼及其合金的氧化	211
8.3.2 钼合金涂层防护	211
8.4 钽及其合金的氧化与防护	217
8.4.1 钽及 Ta-10W 合金的氧化行为	217
8.4.2 钽合金的涂层防护	217
8.5 铌及其合金的氧化与防护	219
8.5.1 铌及其合金的氧化行为	219
8.5.2 铌合金化防护途径	220
8.5.3 铌合金的抗氧化防护	221
8.6 铱涂层	230
8.6.1 铱的氧化行为	230
8.6.2 铱涂层制备	230
8.7 覆盖层检测与质量评估	235
8.7.1 覆盖层外观检测	235
8.7.2 覆盖层厚度的检测	236
8.7.3 覆盖层结合力(附着力)的检测	237
8.7.4 覆盖层硬度的测定	238
参考文献	239

第9章 难熔金属材料深加工中的连接技术

241

9.1 机械连接技术	241
9.1.1 咬接	241
9.1.2 铆钉连接	241
9.1.3 螺纹连接	245
9.1.4 难熔金属铆接制品实例	246
9.2 焊接技术	247
9.2.1 TIG 焊接	247
9.2.2 MIG 焊接	250
9.2.3 电子束焊接	252
9.2.4 钎焊	254
9.2.5 扩散焊	258
9.2.6 电阻焊	259
9.3 难熔金属材料焊接	260
9.3.1 难熔金属的焊接特性	260
9.3.2 钨的焊接	261
9.3.3 钼及其合金的焊接	263
9.3.4 钽及其合金的焊接	265
9.3.5 铌及其合金的焊接	268

9.3.6 铌及其合金的焊接	274
9.3.7 异种难熔金属的焊接	276
9.3.8 难熔金属及其合金与其他有色金属的焊接	277
9.3.9 难熔金属及其合金与钢的焊接	280
9.3.10 钨与石墨的焊接	284
9.3.11 钼及钼合金对玻璃的封接	288
参考文献	290

第 10 章 难熔金属材料深加工技术组合集成的产品实例

292

10.1 超高温钨丝网发热体	292
10.1.1 钨发热体类型及规格	292
10.1.2 超高温钨丝网发热体的制作	293
10.2 超高温氢气炉的数字模拟	295
10.2.1 炉体模型装置	295
10.2.2 边界条件	295
10.2.3 材料数据	296
10.2.4 求解程序	296
10.2.5 超高温氢气炉的数字模拟结果	296
10.3 钨钼复合靶制备	300
10.3.1 制备流程	300
10.3.2 制备工艺	300
10.3.3 复合靶面层与基体层的结合情况	301
10.3.4 本节小结	301
10.4 宇航用铌合金热源密封盒	302
10.4.1 密封盒结构	303
10.4.2 密封盒制备流程	303
10.4.3 密封盒制备内容	303
10.4.4 本节小结	305
参考文献	306

后记

308

第 1 章

引言

——难熔金属材料深加工技术与 难熔金属材料性能的关系

本书涉及的难熔金属材料深加工技术是把前期生产出来的各种加工材（板材、带材、棒材、丝材、锻件等）转变成所需形状和尺寸的零件或组件的高附加值技术，它既是制造全过程中生产高质量、低成本产品的关键，又是现有技术、新研究和设计转变为可用的产品的核心，对于将先进材料或材料组合有效地推向市场起到极为重要的作用。

本书定位在难熔金属钨、钼、钽、铌、铪及其合金材料的深度加工技术，包括冲压成形、机械加工、连接、表面处理、表面防护、电火花加工、电解加工和化学加工等。

在难熔金属材料深加工过程中，必然要解决材料在变成制品时的成形过程中的特殊困难，包括塑性成形、连接、材料改性等。因此在设计难熔金属材料零件或组件成形时，首先要考虑材料的物理性质、化学性质、力学性能、组织性能和工艺条件等，另外还要考虑零件的结构、尺寸要求、生产条件等因素。难熔金属的许多特殊性能，如极高的熔点、高温下在大气中易被氧化，钨、钼的室温脆性和高硬度等，都会给制品成形过程带来同钢铁、铜、铝成形时截然不同的特殊困难，因而这类材料深加工时要求提供特殊的成形条件，如高温、保护性环境（如真空、惰性气体保护等）。产品的使用性能是上述两方面考虑的汇合点，因为使用性能是材料固有性质同产品设计、工程能力和人们需求相融合在一起的要素。材料的性质使零件、组件或机器达到所希望的性能，度量使用性能的指标有寿命、速度（组件）、能量效率（机器）、安全性和寿命期费用。一句话，材料的深加工技术同材料的性能息息相关。

1.1 深度加工技术与材料的物理性质关系

深度加工技术中的冲压成形、表面防护、连接技术同难熔金属材料的物理性质有着密切关系。以冲压成形为例，冲压成形是在外力作用下借助压力机或其他设备对板材施加压力，

使材料发生分离或塑性变形,以获得一定形状和尺寸零件的一种金属塑性加工技术,涉及材料的晶型。钨、钼、钽、铌虽然都具有体心立方晶型,都有 48 个滑移系,本应有良好的塑性变形性能,但由于它们之间的延性-脆性转变温度 (DBTT) 相差甚大,结果导致它们的冲压性能差异十分大,钽、铌的 DBTT 很低 ($<150^{\circ}\text{C}$),很容易加工成形,而钨、钼的 DBTT 都十分高,特别是钨,其 DBTT 达 $350\sim 500^{\circ}\text{C}$,冲压成形作业只能在它们的再结晶温度与 DBTT 之间的温区内进行,否则,材料会碎裂,导致作业失效。钨的高 DBTT 可以认为是由本征和外赋的特性所制约的,本征是在一个活性滑移系统中体积弹性模量 k 对剪切模量 μ 的比率的表征,比率低意味着脆性, DBTT 高;比率高意味着塑性, DBTT 低。钨的 k/μ 比值在 $1.22\sim 2.02$ 之间,而钽、铌的 k/μ 值在 $3.12\sim 4.03$ 之间。间隙杂质对钨、钼脆性影响十分显著,其中氧是最有害元素,微量氧就使它们的 DBTT 直线上升。在材料的防护技术中,防护层的结构设计至关重要,它涉及防护层与基材的膨胀性能匹配问题,力求两者膨胀系数要匹配。在钎焊技术中,钎料的熔点及其对基体的浸润性是必须考虑的,钎焊钨和钼的钎料很多,熔点从 618°C 到 2996°C ,有纯金属的,有合金的,因此根据用途选择合适的熔点和浸润性好(即浸润角尽可能小)的钎料十分重要。

1.2 深度加工技术与材料的化学性质息息相关

材料在不同环境中的稳定性是不同的,它涉及氧化、腐蚀、挥发等化学性质问题。难熔金属材料及其合金是一类高温结构材料,在保护性环境中(真空、氢、惰性气体),它们的高温使用性能可以得到充分发挥,但在氧化性环境中,其高温使用性能受到严重挑战。宇航、航空、原子能工业对这类难熔金属材料在大气环境中的使用温度要求是超过 1050°C ,但是,钨、钼抗氧化性能很差,钼在 $720\sim 800^{\circ}\text{C}$ 时,就会产生“灾害性”氧化(因 MoO_3 挥发导致的),钨在 1000°C 以上也由于 WO_3 挥发而发生“灾害性”氧化。铌和钽的高温氧化速率也极其迅速,铌氧化随温度而变化的复杂过程与氧化产物的多晶体系转变过程相关。钽从 300°C 开始氧化,到 350°C 时,其延伸率由室温的 33.2% 降至 27.1% ,温度继续上升,下降更快。为了解决难熔金属材料在氧化性环境中抗氧化性差的问题,人们采用了涂层技术加以解决。例如,铌在 2100°C 时仍能保持低的氧渗透率和较高的强度,成为钨、钼等高温结构材料在氧化环境中应用的超高温抗氧化涂层而备受青睐。在焊接技术中,母材的化学成分直接影响到其冶金性能,因而也影响到材料的焊接性,也是选择焊接方法时必须考虑的重要因素,对于难熔金属及其合金等较活泼材料应选用惰性气体保护焊接。在材料表面处理技术中,人们可以通过碱洗和酸洗等化学处理过程来达到材料表面洁净的目的。难熔金属材料的沉淀强化和弥散强化过程中体内形成的碳化物和氧化物微粒实质上是化学反应的体现,生成的微粒会影响材料的塑性、韧性、强度、硬度等性能,从而使各种深度加工技术组合更加扩大化、复杂化和精细化。材料化学成分对材料的可加工性能影响极大。钨的固溶强化可通过添加 Ta、Nb、Cr、V 等得到实现。钨的软化则通过添加 Re 实现。杂质元素如 O、C 对钨、钼、钽、铌的塑性影响十分明显,它们的含量高,强度会迅速增加,塑性却迅速下降。

1.3 深度加工技术与材料的力学性能的关系

材料力学性能是材料在外力作用下所显示的弹性和非弹性反应相关或涉及应力-应变关系的性能,是金属材料冲压成形加工中最令人关注的指标。反映板料冲裁性能的一些材料特征值有:屈服极限 σ_s 、强度极限 σ_b 、屈强比 σ_s/σ_b 、硬度HV、延伸率 δ 、断面收缩率 ψ 、加工硬化指数 n 、各向异性系数 r 、弹性模量 E 等,它们可归成以下几类参数:①塑性参数,包括伸长率、断面收缩率、爱力克辛值等;②变形抗力参数,它是材料在外力作用时抑制开始产生塑性变形的能力,其主要参数有抗拉强度、抗压强度和抗剪强度;③屈服强度参数,它是材料开始塑性变形时所需的应力。屈服条件的判定准则有屈雷斯加(H. Tresca)屈服条件(即最大切应力屈服条件)和米席斯(Von Mises)屈服准则等;④弹性模量参数,它是构件刚性的表征,刚性越大,拉伸件弹性变形越小;⑤硬度参数,它是衡量固体材料软硬程度的力学性能指标,也可以说是表征材料的弹性、塑性、形变强化、强度和韧性等一系列不同物理量组合的综合性能指标。在一定条件下,可以由硬度值大致推测出材料的强度值。

室温下,钨、钼、铌的强度大,硬度高,低温延性差,车削加工性能差,其相对加工性 K_v 值仅为 ≤ 0.15 ,而一般铜、铝为 >30 ,一般钢和铸造铁为 $1.0\sim 1.6$,因此切削过程中材料易脆裂,车削刀具易磨损;而钽、铌虽然与钨、钼同属难熔金属体系,但许多力学性能与钨、钼差异甚大,表现在强度、硬度较低,冷加工塑性和韧性大,虽然容易车削加工,但在切削、磨削过程中切削材料消耗功大,切削热就多,刀与屑易粘连,粘刀严重,并导致温度不断升高,钽、铌会吸收氧、氮气体,在料件表面易形成一层坚硬而粗糙的氧化层,使切削过程的冲击和振动增大,刀具易崩刀、破坏。在焊接技术中,母材的上述力学性能会影响焊接过程的顺利进行,例如电子束焊的焊接头的热影响区较窄,与一般电弧焊相比,其接头具有较好的力学性能和较小的热影响区,因此宜用于难熔金属材料的焊接。

1.4 深加工技术与材料的组织性能关系

不同状态的材料(如加工态、退火态、烧结态、淬火态等)有不同微观组织,因而其力学性能差异显著。以钽为例,用粉冶金法制成的坯料轧成1mm厚的板材时,其轧制态的抗拉强度 σ_b 为853MPa,延伸率 δ 仅为7.5%,板料经过1200℃、1h退火处理之后,其 σ_b 大幅度降至303MPa,而 δ 大幅度升至51.3%,由于力学性能在退火前后的变化很大,材料的深加工性能必然相差很大。

在检验板料冲压成形性能的三种试验方法中,金属学试验是其中之一,材料的结晶方位、晶粒度是重要的试验内容。冲压分离工序中的整修变形机理是切削机理,在反映整修性能的材料特征值方面,材料的组织性能是主要考虑的一个方面,材料的组织越致密,晶粒越细,则其断面越光洁,尺寸精度越好。

综上所述,要想进行合理的难熔金属材料深加工,首先必须了解和掌握材料的基本属

性,即物理性质、化学性质、力学性能和材料的组织性能。为此,本书开头部分先较系统地展示钨、钼、钽、铌、钇及其合金的性质和性能,然后介绍各种深度加工技术,为各种难熔金属材料转化为相应的所需组件或零件提供技术依据和参考。

参 考 文 献

- [1] 冯端等. 金属物理学. 金属力学性能: 第3卷 [M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [2] 沈其文. 材料成形工艺基础 [M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1999.
- [3] 师昌绪, 李恒德, 周廉. 材料科学与工程手册 (上册) [M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [4] 黄伯云等. 有色金属材料工程 (上) [M] //中国机械工程学会, 中国材料研究会, 中国材料工程大典编委会. 中国材料工程大典: 第5卷. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [5] 《稀有金属手册》编委会. 稀有金属手册 (上册) [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1992.
- [6] 稀有金属材料加工手册编写组. 稀有金属材料加工手册 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1984.
- [7] 叶帷洪, 王崇敬. 钨——资源、冶金、性质和应用 [M]. 北京: 冶金出版社, 1993.
- [8] 冯端, 师昌绪, 刘治国. 材料科学导论——融贯的论述 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- [9] 黄天佑等. 材料加工工艺. 第2版 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2010.

2.1 钨和钨合金的性能

2.1.1 钨的性能

2.1.1.1 钨的物理性质

钨的主要物理性质列于表 2-1 和表 2-2。钨有许多物理性质在所有金属中是独树一帜的。比如钨的熔点高达 3410°C ，是所有金属中最高的；它的蒸气压和蒸发速率是所有金属中最低的（图 2-1 和图 2-2）；它的热膨胀系数随温度升高的变化在难熔金属家族中是最小的（图 2-3）。钨的所有这些突出性能为钨在各种工程中开辟了广泛的重要的应用领域。

表 2-1 钨的一些物理常数

名 称	数 值	名 称	数 值
原子序数	74	2273K	1.72×10^2
原子量	183.85	沸点/ $^{\circ}\text{C}$	5900~6000
密度/ (g/cm^3)	19.30	蒸发热(沸点下)/ (kJ/g)	4.957
晶格常数及类型/nm		固体钨的蒸发速度/ $[\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$	
630 $^{\circ}\text{C}$ 以上稳定	α -W 呈体心立方结构,属 A2 或 Im3m 型, $\alpha=0.31585$	2600K	4.28×10^{-8}
	β -W 呈立方晶格结构,	2800K	8.28×10^{-7}
630 $^{\circ}\text{C}$ 以下稳定	属 A15 或 Pm3n 型, $\alpha=0.50370, \alpha=0.5037$	3100K	1.06×10^{-5}
		3000K	9.85×10^{-5}
原子半径/nm	0.1368	3273K	2.06×10^{-4}
离子半径/nm	0.068(W^{4+})	液体钨的蒸气压/Pa	
	0.065(W^{6+})	4263K	133.32
熔点/ $^{\circ}\text{C}$	3410 ± 20	4780K	1333.22
熔化热/ (kJ/g)	255	5159K	5332.88
升华热/ (kJ/g)	4.396	6200K	101324.72
比热容/ $[\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$		固体钨的蒸气压/Pa	
293K	1.34×10^2	2273K	1.59×10^{-7}
773K	1.42×10^2	2503K	8.81×10^{-6}
1273K	1.51×10^2	3003K	9.44×10^{-3}
		3573K	2.27

续表

名 称	数 值	名 称	数 值
热导率/[W/(m·K)]		20℃	5.5
293K	1.67×10^2	1000℃	34
1100K	1.17×10^2	2000℃	66
2000K	1.0×10^2	电子发射电流(2730℃)/(A/m ²)	141500
线胀系数/℃ ⁻¹		热中子吸收截面/m ²	$(19.2\pm 1.0)\times 10^{-28}$
300K	4.4×10^{-6}	辐射热/(W/cm ²)	
773K	4.6×10^{-6}	400K	0.0042
1273K	5.2×10^{-6}	1200K	1.8700
2273K	6.2×10^{-6}	2000K	22.6000
电阻率/ $\mu\Omega\cdot\text{cm}$		2800K	108.2000
-196℃	0.61	3600K	327.4000

表 2-2 在各个结晶方向上钨的逸出功和逸出功温度系数

发射体晶向	发 射 面	逸 出 功/eV	温度系数/($\times 10^{-5}\text{eV}/^\circ\text{C}$)
[310]	(100)	4.59	—
[100]	(110)	5.15	-10.9
[110]	(110)	5.79	-17.0
[310]	(110)	5.02	—
[310]	(111)	4.49	+3.5
[310]	(211)	4.93	-14.3
[310]	(310)	4.21	-3.2
[110]	(610)	4.32	+5.0
多晶体	—	4.52	—

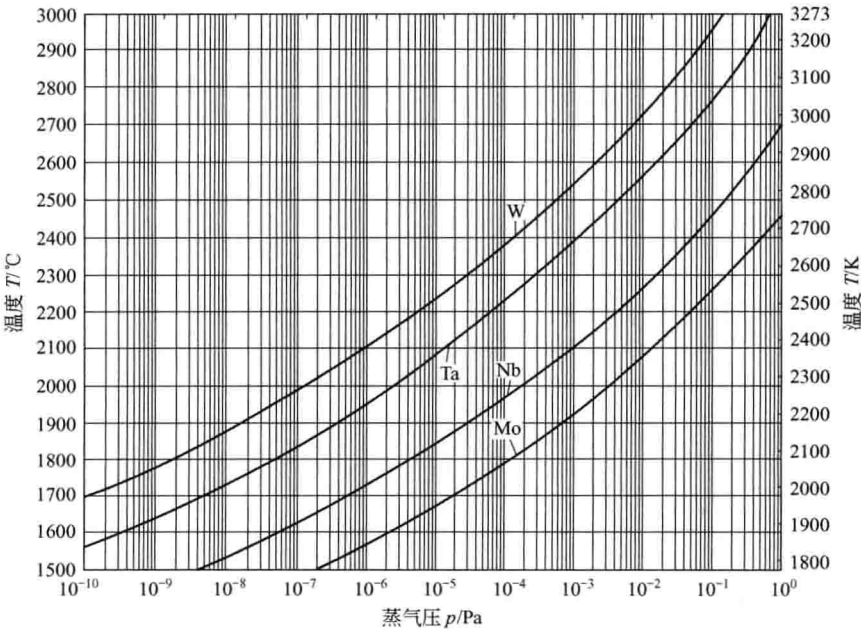


图 2-1 难熔金属蒸汽压比较