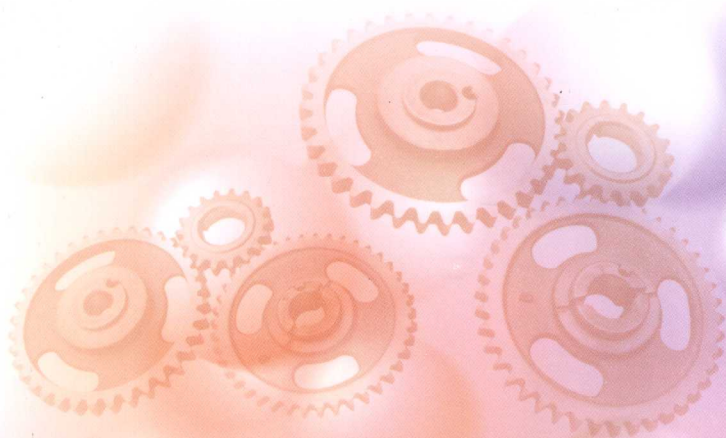


高硬度材料的焊接

李亚江 等著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

高硬度材料的焊接

李亚江 等 著

北 京
冶金工业出版社
2010

内 容 提 要

本书针对工程中一些高硬度材料(如陶瓷、硬质合金、金属间化合物、耐磨钢等),对其焊接性和焊接工艺等做了简明阐述。在工程结构中高硬度材料是经常遇到的,而且焊接中出现问题的较多。书中分析了这些高硬度材料的焊接特点,给出了相关焊接技术数据及针对一些典型工程结构的焊接应用实例。本书内容涉及的是科研和生产中经常遇到的高硬度材料的焊接难题,解决这些焊接难题需采用的新工艺和成功的经验,突出新颖性、先进性和实用性等特色。

本书供从事与新材料开发和焊接技术相关的工程技术人员使用,也可供高等院校师生、科研和企事业单位的科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

高硬度材料的焊接/李亚江等著. —北京:冶金工业出版社,2010.4

ISBN 978-7-5024-5185-1

I. ①高… II. ①李… III. ①材料—焊接工艺
IV. TG44

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 015819 号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 postmaster@cnmip.com.cn

责任编辑 张爱平 美术编辑 李 新 版式设计 葛新霞

责任校对 卿文春 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-5185-1

北京兴华印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2010 年 4 月第 1 版,2010 年 4 月第 1 次印刷

169mm×239mm;17.75 印张;343 千字;272 页

48.00 元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100711) 电话:(010)65289081

(本书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

前 言

当代科学技术发展对工程材料提出了新的要求,焊接技术也必须满足工程材料日益发展的需要。在工程结构中高硬度材料的焊接是经常遇到的,而且在焊接生产实践中出现问题较多,有时甚至阻碍了整个工程(或焊接结构)的进展。书中涉及的高硬度材料,是指除常规钢铁和有色轻金属之外已经开发的具有高硬度和特殊性能的材料,如新型陶瓷材料、硬质合金、金属间化合物、难熔金属及合金、高硬度耐磨合金等。这些材料的主要特点是硬度高、塑韧性差,在应用(或焊接)中极易产生裂纹,焊接难度很大并日益受到工程界人士的重视。

本书特点是内容简明,与高新技术的应用密切相关,针对先进陶瓷材料、硬质合金、金属间化合物、难熔金属及合金等,对这些材料的特点、焊接性和焊接工艺要点做了简明阐述,力求突出新颖性、先进性和实用性等特色。书中未涉及系统的基本原理阐述,注重实践和应用技术的阐述,选用的一些有代表性的成功的应用实例,具有很好的应用前景。

本书供从事与材料开发和焊接技术相关的工程技术人员使用,如焊接工程技术人员、管理人员,特别是新产品研发人员,也可供大、中专院校师生、科研和企事业单位的科技人员参考。

参加本书撰写的人员还有:王娟、刘鹏、马海军、张永兰、夏春智、蒋庆磊、沈孝芹、黄万群、刘强、张蕾、吴娜等。

向所引文献的作者表示诚挚的谢意。书中存在的不妥之处,敬请广大读者批评指正。

作 者

2009年11月30日

目 录

1 概述	1
1.1 高硬度材料的分类和性能特点	1
1.1.1 高硬度材料的分类	1
1.1.2 高硬度材料的性能特点	1
1.2 高硬度材料的应用	6
1.2.1 先进陶瓷	6
1.2.2 金属间化合物	6
1.2.3 难熔金属及合金	7
1.2.4 硬质合金	7
1.2.5 高硬度耐磨钢	8
2 先进陶瓷材料的焊接	10
2.1 陶瓷的分类及性能	10
2.1.1 陶瓷的分类	10
2.1.2 结构陶瓷的性能特点	11
2.1.3 几种常用的结构陶瓷	12
2.2 陶瓷与金属的连接方法及适用材料	17
2.2.1 陶瓷与金属连接的基本要求	17
2.2.2 陶瓷与金属连接存在的问题	17
2.2.3 陶瓷与金属的连接方法	19
2.3 陶瓷与金属的焊接性分析	25
2.3.1 焊接应力和裂纹	25
2.3.2 界面润湿性差	28
2.3.3 界面反应和结合强度	29
2.4 陶瓷-金属异种材料的钎焊	33
2.4.1 陶瓷表面的金属化	34
2.4.2 陶瓷钎焊的钎料	36
2.4.3 陶瓷金属化钎焊工艺	39
2.4.4 陶瓷-金属的活性金属化法钎焊	40
2.4.5 陶瓷与金属钎焊结构应用实例	42

2.5 陶瓷与金属的扩散焊	44
2.5.1 陶瓷与金属扩散焊的特点	45
2.5.2 扩散焊的主要工艺参数	45
2.5.3 陶瓷与金属扩散焊的应用实例	47
2.6 陶瓷与金属的电子束焊接	54
2.6.1 陶瓷与金属电子束焊的特点	54
2.6.2 陶瓷与金属电子束焊的工艺过程	54
2.6.3 陶瓷与金属电子束焊应用实例	55
3 硬质合金与钢的焊接	57
3.1 硬质合金的分类、性能及用途	57
3.1.1 硬质合金的分类及用途	57
3.1.2 硬质合金的性能	61
3.2 硬质合金的焊接特点	62
3.2.1 一般焊接性特点	62
3.2.2 基体材料的选择和槽形设计	63
3.3 硬质合金与钢的钎焊	67
3.3.1 硬质合金与钢的钎焊特点	67
3.3.2 硬质合金用钎料与钎剂	70
3.3.3 硬质合金与钢的钎焊工艺特点	73
3.3.4 钎焊硬质合金的缺陷及防止措施	76
3.3.5 硬质合金与钢的真空钎焊技术	78
3.4 硬质合金与钢的焊接实例	79
3.4.1 YT15 合金与 40 钢的火焰钎焊	79
3.4.2 YT05 硬质合金与 40Cr 钢的真空钎焊	80
3.4.3 CW50 钢结硬质合金与 45 钢的焊接	81
3.4.4 YG8 硬质合金与 0Cr13 不锈钢的真空钎焊	82
3.4.5 YG8 硬质合金与 42CrMo 钢的真空钎焊连接	86
3.4.6 Cu 基微晶钎料高频钎焊 0Cr18Ni9Nb 钢与 YG6 硬质合金	89
4 金属间化合物的焊接	93
4.1 金属间化合物的分类及特性	93
4.1.1 金属间化合物的分类	93
4.1.2 金属间化合物的特性	94
4.2 Ti-Al 金属间化合物的焊接	102

4.2.1	TiAl 同种材料的焊接	102
4.2.2	TiAl 与 40Cr 钢的焊接	105
4.2.3	TiAl 与 SiC 陶瓷的焊接	108
4.2.4	Ti ₃ Al 合金的扩散焊	113
4.3	Ni-Al 金属间化合物的焊接	115
4.3.1	NiAl 合金的瞬时液相扩散焊	115
4.3.2	Ni ₃ Al 合金的熔焊	117
4.3.3	Ni ₃ Al 与碳钢的焊接	120
4.3.4	Ni ₃ Al 与不锈钢的焊接	122
4.3.5	Ni ₃ Al 与工具钢的焊接	124
4.4	Fe-Al 金属间化合物的焊接	124
4.4.1	Fe ₃ Al 金属间化合物的熔焊	125
4.4.2	Fe ₃ Al 填丝 TIG 接头的剪切强度	132
4.4.3	Fe ₃ Al 堆焊及焊条电弧焊	133
4.4.4	Fe ₃ Al 金属间化合物的固相焊	135
4.4.5	Fe ₃ Al 连接的其他方法	144
5	难熔金属及合金的焊接	146
5.1	难熔金属的性能特点	146
5.1.1	难熔金属的物理和化学性能	146
5.1.2	难熔金属的化学成分	147
5.2	难熔金属的焊接性特点	150
5.2.1	钨、钼及其合金的焊接性特点	150
5.2.2	铌及其合金的焊接性特点	152
5.2.3	钢与 W、Mo、Nb 焊接的特点	153
5.3	难熔金属及其合金的焊接工艺特点	153
5.3.1	钨、钼及其合金的焊接	153
5.3.2	铌及其合金的焊接	158
5.3.3	钨与钢的焊接	162
5.3.4	钼与钢的焊接	164
5.3.5	铌与钢的焊接	167
5.3.6	钨、钼、铌异种金属的焊接	169
6	铸铁材料的焊接	173
6.1	铸铁的种类和性能	173

6.1.1	铸铁的分类及特点	173
6.1.2	影响铸铁性能的因素	176
6.1.3	铸铁焊接的应用	178
6.2	灰铸铁的焊接	179
6.2.1	灰铸铁的焊接特点	179
6.2.2	灰铸铁的焊接工艺特点	181
6.3	球墨铸铁的焊接	190
6.3.1	球墨铸铁的焊接特点	190
6.3.2	球墨铸铁的焊接工艺特点	190
6.4	白口及其他铸铁的焊补	192
6.4.1	白口铸铁的焊接	192
6.4.2	可锻铸铁的焊接	194
6.4.3	蠕墨铸铁的焊接	195
6.4.4	变质铸铁的焊补	196
6.5	铸铁与钢的焊接	198
6.5.1	灰铸铁与碳钢的焊接	199
6.5.2	可锻铸铁与碳钢的焊接	202
6.5.3	球墨铸铁与碳钢的焊接	204
6.6	铸铁材料焊接的实例	206
6.6.1	灰铸铁电机底座的焊接	206
6.6.2	灰铸铁与碳钢的焊接实例	207
6.6.3	柴油机球墨铸铁机体的焊接	210
6.6.4	球墨铸铁与碳钢的焊接实例	212
6.6.5	铸铁与不锈钢的焊接	212
7	二次硬化高强钢的焊接	214
7.1	二次硬化高强钢的分类及性能	214
7.1.1	二次硬化高强钢的分类	214
7.1.2	二次硬化高强钢的性能特点	216
7.2	马氏体时效钢的焊接	218
7.2.1	马氏体时效钢的焊接性特点	218
7.2.2	马氏体时效钢的焊接工艺	219
7.2.3	马氏体时效钢的焊接实例	223
7.3	Ni-Co 系超高强度钢的焊接	224
7.3.1	Ni-Co 系超高强度钢的性能和用途	224

7.3.2	Ni-Co 系超高强度钢的焊接特点	226
7.3.3	Ni-Co 系超高强度钢的焊接工艺特点	226
7.3.4	Ni-Co 系超高强度钢的焊接实例	227
8	高硬度耐磨钢(合金)的焊接	228
8.1	高硬度耐磨钢(合金)的种类及性能	228
8.1.1	高硬度耐磨钢(合金)的种类	228
8.1.2	高硬度耐磨钢(合金)的性能特点	232
8.2	高硬度耐磨钢(合金)的焊接性特点	236
8.2.1	耐磨高锰钢的焊接性特点	236
8.2.2	耐磨合金的焊接性特点	241
8.3	高硬度耐磨钢(合金)的焊接工艺特点	243
8.3.1	高硬度耐磨钢的焊接方法	243
8.3.2	焊接材料的选用	245
8.3.3	焊接工艺操作要求	250
8.4	高硬度耐磨钢(合金)的焊接实例	255
8.4.1	耐磨高锰钢辙叉的焊接	255
8.4.2	阀门的高硬度耐磨层堆焊	259
8.4.3	挖掘机铲斗的焊接	267
8.4.4	刮板运输机构件的焊接	268
8.4.5	辙叉与钢轨的焊接	269
	参考文献	271

1 概 述

高硬度材料的焊接问题是经常遇到的,而且在焊接实践中出现问题较多,有时甚至阻碍了整个工程(或焊接结构)的进展。高硬度材料(如陶瓷、金属间化合物、硬质合金等)的主要特点是硬度高、塑韧性差,焊接中极易产生裂纹,焊接难度很大并日益受到工程界人士的重视。解决高硬度材料的焊接问题对其发展、应用和推动科技进步、促进社会发展起着重要的作用。

1.1 高硬度材料的分类和性能特点

1.1.1 高硬度材料的分类

新材料的开发与应用是现代科学技术发展的重要组成部分。随着航空航天、新能源、电力等工业的发展,人们对材料的性能提出了越来越高的要求。开发在特殊条件下使用的结构材料是新材料的发展趋势之一,而高硬度结构材料的发展是其中重要的组成部分。

高硬度材料,指正在发展的、具有优异性能和特殊用途的材料,这类材料的一个突出特点是硬度和强度高,但塑性和韧性差,焊接难度很大。高硬度材料涉及的面很广,并且处于不断地开发和应用中。

目前工程中经常用到的高硬度材料主要包括:先进陶瓷、硬质合金、金属间化合物、难熔金属及合金等,此外,高硬度耐磨钢、合金铸铁等也可以归类为高硬度材料。这些材料的一个共同特点是硬度高、塑性和韧性差,焊接中极易产生裂纹,采用常规的熔焊方法很难进行焊接。

高硬度材料的发展及应用与高新技术的发展密切相关,而且具有独特的和难以替代的作用。例如先进陶瓷材料、金属间化合物和难熔材料的开发与应用,为开发能源、开发太空和海洋、探索航空航天等领域提供了重要的物质基础。先进材料是高新技术发展必要的物质基础,常成为新技术革命的先导。

本书针对高硬度材料(如先进陶瓷、硬质合金、金属间化合物等),对这些材料的焊接性特点、焊接材料和工艺要点做简明阐述,突出新颖性、先进性和实用性等特色,推进高硬度材料焊接技术的发展及应用。

1.1.2 高硬度材料的性能特点

从高硬度材料的合成和制造工艺来看,先进陶瓷、硬质合金、金属间化合物、难

熔合金等,所采用的必要的制备方法包括一些高技术手段获得的极端条件(如超高压、超高温、超高速冷却速度等);其次是先进陶瓷、硬质合金、金属间化合物和难熔合金等的研发与计算机技术和先进的自动控制技术的发展和應用密切相关,对材料的质量控制要求非常严格。因此,高硬度材料具有高强度、耐高温、耐腐蚀、抗氧化等一系列优点。

1.1.2.1 先进陶瓷材料

先进陶瓷材料又称高性能陶瓷、精细陶瓷、新型陶瓷或高技术陶瓷,是以精制的高纯、超细人工合成的无机化合物为原料,采用精密控制的制备工艺获得具有优异性能的新一代陶瓷。

陶瓷是指以各种金属的氧化物、氮化物、碳化物、硅化物为原料,经适当配料、成形和高温烧结等人工合成的无机非金属材料。先进陶瓷在组成、性能、制造工艺及应用等方面都与传统的陶瓷截然不同,组成已由原来的 SiO_2 、 Al_2O_3 、 MgO 等发展到了 Si_3N_4 、 SiC 和 ZrO_2 等。采用先进的物理、化学方法能够制备出超细粉末。烧结方法也已由普通的大气烧结发展到在控制气氛中的热压烧结、真空烧结、微波烧结等先进的烧结方法。先进陶瓷具有特定的精细组织结构和性能,在现代工程和高新技术中起着重要的作用。

广义的先进陶瓷包括人工单晶、非晶态(玻璃)、陶瓷及其复合材料、半导体、耐火材料等,属于无机非金属材料。陶瓷材料一般分为功能陶瓷和结构陶瓷两大类,生物陶瓷可以归入功能陶瓷(也可以单独列出)。与焊接相关的主要是结构陶瓷。

先进陶瓷具有优异的物理和力学性能,如高强度、高硬度、耐磨、耐腐蚀、耐高温和抗热振性等,而且在电、磁、热、光、声等方面具有独特的功能。

与金属材料相比,陶瓷材料的线膨胀系数比较低,一般在 $10^{-5} \sim 10^{-6}/\text{K}$ 的范围;熔点(或升华、分解温度)很高,有些陶瓷可在 $2000 \sim 3000^\circ\text{C}$ 的高温下工作且保持室温时的强度,而大多数金属在 1000°C 以上就基本上丧失了强度性能。因此,陶瓷作为高温结构材料用于航空发动机、切削刀具和耐高温部件等,具有广阔的前景。

先进陶瓷的发展趋势有三个方面:

(1) 由单相、高纯材料向多相复合陶瓷方向发展,包括纤维(或晶须)补强的陶瓷基复合材料、异相颗粒弥散强化复相陶瓷、两种或两种以上主晶相组合的自补强材料、梯度功能复合材料以及纳米-微米陶瓷复合材料等。

(2) 从微米级尺度(从粉体到显微结构)向纳米级方向($1 \sim$ 数百纳米)发展,即向介于原子或分子与常规的微米结构之间的过渡性结构区发展。将出现与以往的微米级陶瓷材料不同的化学和物理性质,如超塑性和电、磁性质的变化等。

(3) 陶瓷材料的加工,如剪裁、形状设计和连接(焊接)等。

1.1.2.2 硬质合金

硬质合金是以碳化钨(WC)为主成分,钴(Co)为黏结相制成的烧结碳化物。硬质合金的抗弯强度可以达到1500~2800 MPa,而且保留了碳化钨的耐高温性能和高温硬度,常温硬度也很高。影响硬质合金性能的因素主要有:碳化钨中的碳含量、加钴粉混合均匀性和烧结质量。为了改善硬质合金的某一特性,可以在以碳化钨为主成分的硬质相中添加TiC、TaC、NbC等硬质碳化物,也可在钴黏结相中添加Ni、Cu、Fe等金属。

硬质合金真空烧结比氢气烧结质量好,烧结密度不小于98%,是烧结材料中密度最高的材料之一。在热等静压设备中进行处理的硬质合金,密度可达到99.999%,精密仪表轧辊、大型柱塞、金刚石生产用顶锤等,均能用热等静压工艺得到高质量产品。

硬质合金主要用于制造各种刀具、模具、矿山工具和耐磨件。除了碳化钨基硬质合金外,还有碳化铬基硬质合金、钢结硬质合金等。硬质合金焊接一直受到人们的关注。严格地说,硬质合金也是一种典型的金属陶瓷。

1.1.2.3 金属间化合物

A 历史发展

金属间化合物的研究始于20世纪30年代,目前主要集中于Ni-Al、Ti-Al和Fe-Al三大合金系。Ni-Al和Ti-Al系金属间化合物价格昂贵,主要用于航空航天等领域。与Ni-Al和Ti-Al系金属间化合物相比,Fe-Al系金属间化合物除具有高强度、耐腐蚀等优点外,还具有成本低和密度小等优势,具有广阔的应用前景。

钢铁材料加热后会逐渐变红、变软(直至熔化成钢液)。高温是大多数金属的大敌,金属在高温下会失去原有的强度,变得“不堪一击”。金属间化合物却不存在这样的问题。在700℃以上的高温下,大多数金属间化合物会更硬,强度甚至会升高。可以说在高温下方显出金属间化合物的英雄本色。

金属间化合物具有这种特殊的性能,与其内部原子结构有关。所谓金属间化合物,是指金属和金属之间,类金属和金属原子之间以共价键形式结合生成的化合物,其原子的排列具有高度有序化的规律。当它以微小颗粒形式存在于金属合金的组织中时,将会使金属合金的整体强度得到提高,特别是在一定温度范围内,合金的强度随温度升高而增强,这就使金属间化合物在高温结构应用方面具有极大的潜在优势。

但是,伴随着金属间化合物的高温强度而来的,是其较大的室温脆性。20世纪30年代金属间化合物刚被发现时,它们的室温延性大多数为零,也就是说,一折就会断。因此,许多人预言,金属间化合物作为一种大块材料是没有实用价值的。

80年代中期,美国科学家在金属间化合物室温脆性研究上取得了突破性进展。他们往金属间化合物中加入少量硼,可使它的室温伸长率提高到50%,与纯

铝的延性相当。这一重要发现及其所蕴含的发展前景,吸引了各国材料科学家展开了对金属间化合物的深入研究,使之开始以一种崭新的面貌在新材料领域登台亮相。

目前,除了作为高温结构材料外,金属间化合物的其他功能也被相继开发,稀土化合物永磁材料、贮氢材料、超磁致伸缩材料、功能敏感材料等相继问世。金属间化合物的应用,极大地促进了高新技术的进步与发展,促进了结构与元器件的微型化、轻量化、集成化与智能化,导致新一代元器件的不断出现。

金属间化合物这一“高温材料”最大的用武之地是在航空航天领域,如密度小、熔点高、高温性能好的钛铝金属间化合物等具有极诱人的应用前景。

B 特点

金属间化合物是指金属与金属或类金属之间形成的化合物相,属金属键结合,具有长程有序的超点阵晶体结构,原子结合力强,高温下弹性模量高,抗氧化性好,因此形成一系列新型结构材料,如具有应用前景的钛、镍、铁的铝化物材料。

金属间化合物不遵循传统的化合价规律,具有金属的特性,晶体结构与组成它的两个金属组元的结构不同,两个组元的原子各占据一定的点阵位置,呈有序排列。典型的长程有序结构主要形成于金属的面心立方、体心立方和密排六方三种主要晶体结构。例如 Ni_3Al 为面心立方有序超点阵结构, Ti_3Al 为密排六方有序超点阵结构, Fe_3Al 为体心立方有序超点阵结构。许多金属间化合物可以在一定范围内保持结构的稳定性,在相图上表现为有序固溶体。

决定金属间化合物相结构的主要因素有电负性、尺寸因素和电子浓度。金属间化合物的晶体结构虽然较复杂或有序,但从原子结合上看仍具有金属特性,有金属光泽、导电性及导热性等。然而其电子云分布并非完全均匀,存在一定的方向性,具有某种程度的共价键特征,导致熔点升高及原子间键出现方向性。

金属间化合物可以分为结构用和功能用两类,前者是作为承力结构使用的材料,具有良好的室温和高温力学性能,如高温有序金属间化合物 Ni_3Al 、 NiAl 、 Fe_3Al 、 FeAl 、 Ti_3Al 、 TiAl 等。后者具有某种特殊的物理或化学性能,如磁性材料 YCo_5 、形状记忆合金 NiTi 、超导材料 Nb_3Sn 、贮氢材料 Mg_2Ni 等。

与焊接相关的主要是结构用金属间化合物,最具应用前景的是 Ni-Al 、 Ti-Al 、 Fe-Al 系金属间化合物,如 Ni_3Al 、 NiAl 、 Ti_3Al 、 TiAl 、 Fe_3Al 、 FeAl 等。

与无序合金相比,金属间化合物的长程有序超点阵结构保持很强的金属键结合,具有许多特殊的物理、化学性能,如电学性能、磁学性能和高温力学性能等。含 Al 、 Si 的金属间化合物还具有很高的抗氧化和抗腐蚀的能力。由轻金属组成的金属间化合物密度小,比强度高,适合于航空航天工业的应用要求。

1.1.2.4 难熔金属及合金

难熔金属一般指熔点高于 1650°C 并有一定储量的金属,如钨、钼、铌、锆等。

以这些金属为基体,添加其他元素形成的合金称为难熔金属合金。制造耐 1093℃ 以上高温结构材料所使用的难熔金属主要是钨、钼、铌、钽。在难熔金属合金中钼合金是最早用作结构材料的合金,例如 Mo-0.5Ti-0.1Zr-0.02C 合金具有良好的高温强度和低温塑性,在工业上广泛应用。铌合金的出现迟于钼合金,但发展很快,航天工业中使用的主要是中强铌合金和低强高塑性的铌合金。工业上应用的钨合金材料有掺杂硅、铝、钾等氧化物的高温钨丝、钨钼电极、钨铼电极等。

难熔金属最重要的优点是有良好的高温强度和耐蚀性能。主要缺点是高温抗氧化性能差。钨、钼的塑性-脆性转变温度较高,在室温下难以塑性加工;铌和钽的可加工性、焊接性、低温延性和抗氧化性优于钼和钨。

塑性-脆性转变温度是衡量难熔金属及合金低温塑性的重要参数(特别是钨和钼)。在难熔金属中,钽具有最好的塑性和最低的转变温度(-196℃ 以下)。铌塑性较钽差,但优于钼和钨。钨的室温塑性最差,转变温度最高。钼的转变温度在室温上下。转变温度与材料受力状态和形变速度有关,也与材料的组织结构和表面状态有关。添加某些元素,以及进行较大的塑性加工是改善钨、钼低温塑性的途径。

1.1.2.5 高硬度耐磨钢

高硬度耐磨钢是耐磨损性能强的钢铁材料的总称,耐磨钢是当今耐磨材料中用量最大的。磨损是结构件失效的主要形式之一,磨损造成了能源和原材料的大量消耗。根据统计,能源的 1/3 到 1/2 消耗于摩擦与磨损。美国机械工程师学会(ASME)和美国能源发展局(ERDA)提出的一项减轻摩擦和磨损的发展计划,可使美国每年节支 160 亿美元,即能源消耗的 11%。据美国刊物介绍,美国几大类产品每年由于磨损所造成的损失是:飞机 134 亿美元,船舶 64 亿美元,汽车 400 亿美元,切削工具 28 亿美元。

据中国电力、建材、冶金、采煤和农机 5 个部门的不完全统计,每年备件消耗钢材在 150 万吨以上,以煤矿所用刮板输送机为例,由于中部槽磨损所造成的损失每年为 1~2 亿元人民币。如果再考虑到其他机械设备磨损造成的经济损失和钢材消耗将是很惊人的。

耐磨钢作为一种专用钢始于 19 世纪后半叶,至今已有 100 多年的历史。高锰钢是一种碳、锰含量较高的耐磨钢,由于它在大的冲击磨料磨损条件下具有很强的加工硬化能力,同时兼有良好的韧性和塑性,以及生产工艺易掌握等优点,因此目前仍是耐磨钢中用量最大的一种(尤其是在矿山等部门)。

近几十年来,低、中合金耐磨钢的开发与应用发展很快,这类钢具有较好的耐磨性和韧性,生产工艺简单,经济性合理,在许多工况条件下适用。为适应矿山采运机械与工程机械发展的需要,20 世纪 70~80 年代研制的高硬度耐磨钢在国际上形成系列并标准化。这类钢是在低合金高强钢基础上发展起来的,一般采用轧

后直接淬火 + 回火,或控轧控冷工艺进行强化,可节约能源,且合金含量低,价格便宜,但硬度高,耐磨性好。因此,这类耐磨钢很受用户欢迎。日、英、美等国的一些钢铁公司都生产这类耐磨钢。

耐磨钢种类繁多,大体上可分为高锰钢,中、低合金耐磨钢, Cr-Mo-Si-Mn 钢及特殊耐磨钢等。一些合金钢(如马氏体不锈钢、轴承钢、合金工具钢及合金结构钢等)在特定的条件下也作为耐磨钢使用。由于它们来源方便,性能优良,在耐磨钢的使用中也占有一定的比例。

中、低合金耐磨钢中所含的化学元素有 Si、Mn、Cr、Mo、V、W、Ni、Ti、B、Cu、RE 等。很多大中型球磨机的衬板用 Cr-Mo-Si-Mn 或 Cr-Mo 钢制造,美国大多数磨球用中、高碳 Cr-Mo 钢制造。在较高温度(例如 200 ~ 500℃)的磨料磨损条件下工作的工件或由于摩擦热使表面经受较高温度的工件,可采用 Cr-Mo-V、Cr-Mo-V-Ni 或 Cr-Mo-V-W 等合金耐磨钢,这类钢淬火后,经中温或高温回火时,有二次硬化效应。

1.2 高硬度材料的应用

对于现代材料而言,材料是物质,制造是途径(或手段),应用是目的。在先进材料的使用条件下,必须考虑环境的特殊要求,如高温、低温、腐蚀介质等。结构件均有一定的形状配合和精度要求,因此高硬度材料还需有良好的可加工性能,如铸造性、冷(或热)成形性、焊接性、切削加工性等。

1.2.1 先进陶瓷

先进陶瓷原料丰富、产品附加值高,应用领域广阔。但由于陶瓷塑性和韧性差,加工困难,不易制成大型或形状复杂的构件,因而单独使用受到一定的限制。特种陶瓷是随着现代电器、无线电、航空、原子能、冶金、机械、化学等工业以及电子计算机、空间技术、新能源开发等尖端科学技术的飞跃发展而发展起来的。在实际应用中,常采用连接技术制成陶瓷-金属复合构件,这样既能发挥陶瓷与金属各自的性能优势,又能降低生产成本,具有很好的应用前景。

陶瓷-金属焊接已获得广泛的应用,例如用于汽车发动机增压器转子(可以降低尾气排放)、陶瓷/钢摇杆、陶瓷/金属挺柱、火花塞、高压绝缘子、电子元器件(如真空管外壳、整流器外壳)等。

1.2.2 金属间化合物

近 20 年来,人们开始重视对金属间化合物的开发应用,这是材料领域一个带有根本性的转变,也是今后材料发展的重要方向之一。金属间化合物由于它的特殊晶体结构,使其具有其他固溶体材料所没有的性能。特别是固溶体材料通常随着温度的升高而强度降低,但某些金属间化合物的强度在一定范围内反而随着温

度的上升而升高,这就使它有可能作为新型高温结构材料的基础。另外,金属间化合物还有一些性能是固溶体材料的数倍乃至二三十倍。

Ni-Al、Ti-Al 金属间化合物适合用于航空航天材料,具有很好的应用潜力,已受到欧、美等发达国家的普遍重视。一些 Ni-Al 合金已获得应用或试用,如用于柴油机部件、电热元器件、航空航天飞机紧固件等。Ti-Al 合金可替代镍基合金制成航空发动机高压涡轮定子支承环、高压压气机匣、发动机燃烧室扩张喷管喷口等;我国宇航工业正试用这类合金制造发动机热端部件,前景广阔。

Fe_3Al 金属间化合物由于具有高的抗氧化性和耐磨性,可以在许多场合代替不锈钢、耐热钢或高温合金,用于制造耐腐蚀件、耐热件和耐磨件,其良好的抗硫化性能,适合于恶劣条件下(如高温腐蚀环境)的应用。例如,火力发电厂结构件、渗碳炉气氛工作的结构件、化工器件、汽车尾气排气管、石化催化裂化装置、加热炉导轨、高温炉算等。此外,由于 Fe_3Al 金属间化合物具有优异的高温抗氧化性和很高的电阻率,有可能开发成新型电热材料。 Fe_3Al 还可以和 WC、TiC、TiB、ZrB 等陶瓷材料制成复合结构,具有更加广泛的应用前景。

1.2.3 难熔金属及合金

20 世纪 40 年代中期以前,主要是用粉末冶金法生产难熔金属。40 年代后期至 60 年代初,由于航天技术和原子能技术的发展,自耗电弧炉、电子轰击炉等冶金技术的应用,推动了包括难熔金属在内的、能在 $1093 \sim 2360^\circ\text{C}$ 或更高温度下使用的耐高温材料的研制工作。这是难熔金属及其合金生产发展较快的时期。60 年代以后,难熔金属虽然有韧性、抗氧化性不良等不足,在航空航天工业中应用受到限制,但在冶金、化工、电子、光源、机械工业等部门,仍得到广泛应用。主要用途有:

(1) 用作钢铁、有色金属合金的添加剂,钼(Mo)和铌(Nb)在这方面的用量约占其添加剂总用量的 $4/5$;

(2) 用作制造切削刀具、矿山工具、加工模具等硬质合金,钨在这方面的用量约占其总用量的 $2/3$,钽、铌和钼也是硬质合金的重要组分;

(3) 用作电子、电光源和电气等部门的灯丝、阴极、电容器、触头材料等,其中钽在电容器中的用量占其总用量的 $2/3$ 。

此外,难熔金属及合金还用于制造化工部门耐蚀部件、高温高真空的发热体和隔热屏、穿甲弹芯、防辐射材料、仪表部件、热加工工具和焊接电极等。我国早在 20 世纪 50 年代已用粉末冶金工艺生产难熔金属制品。现在已能生产多种规格的难熔金属及其合金产品。

1.2.4 硬质合金

硬质合金具有一系列优良的性能,主要用途如下:

(1) 切削工具。硬质合金可以制作各种各样的切削工具,我国切削工具用硬质合金的用量约占整个硬质合金产量的 $1/3$,其中用于焊接刀具的约占 78% ;而数控刀具用硬质合金仅占可转位刀具用硬质合金的 20% ;此外还有整体硬质合金钻头、整体硬质合金小圆锯片、硬质合金微钻等切削工具。

(2) 地质矿山工具。我国地质矿山用硬质合金约占硬质合金生产总量的 25% ,主要用于冲击凿岩用钎头、地质勘探用钻头、矿山油田用潜孔钻、牙轮钻以及截煤机截齿、建材工业用冲击钻等。

(3) 各类磨具。用作各类磨具的硬质合金约占硬质合金生产总量的 8% ,有拉丝模、冷镦模、冷(热)挤压模、热锻模、成形冲模以及拉拔管芯棒等。近十几年轧制线材用各类硬质合金轧辊增速很快,我国轧辊用硬质合金已占到硬质合金生产总量的 3% 。

(4) 结构件和耐磨件。硬质合金用来做结构零件的产品很多,如旋转密封环、压缩机活塞、机床夹头、磨床芯轴、轴承轴颈等;硬质合金制成的耐磨零件有导轨、喷嘴、柱塞、铲雪机铲板等。此外,用于生产金刚石用的顶锤、压缸用硬质合金用量也很大。

(5) 其他用途。硬质合金的用途越来越广,在民用领域不断扩展,如表链、表壳、高级箱包拉链头、硬质合金标牌等。

1.2.5 高硬度耐磨钢

高硬度耐磨钢广泛用于矿山机械、煤炭采运、工程机械、农机、建材、电力、铁路运输等部门。例如,球磨机的钢球、衬板,挖掘机斗齿、铲斗,各种破碎机的轧壁、齿板、锤头,拖拉机和坦克的履带板、风扇磨机的打击板,铁路辙叉,煤矿刮板输送机中部槽中板、槽帮、圆环链,推土机用铲刀、铲齿、刃板,大型电动轮车斗用衬板,石油和露天铁矿穿孔用牙轮钻头等。以上所列举的还仅限于属于经受磨料磨损的耐磨钢应用。

矿石和水泥磨机中使用的研磨介质(钢球、钢棒和衬板)是消耗量很大的钢铁磨损件。在美国,磨球大多数用碳钢和合金钢锻造或铸造,它们占磨球总消耗量的 97% 。在加拿大,消耗的磨球中钢球占 81% 。据统计,中国每年消耗磨球约 100 万吨以上,全国磨机衬板年消耗量超过 20 万吨,我国煤矿用刮板输送机中部槽每年消耗超过 8 万吨钢板。

耐磨钢一般是用电炉或转炉冶炼的,产品以铸件为多。近年来,锻、轧等热加工钢材正在增多。一般机械中使用的耐磨钢件的生产方法与其他工件没有区别,只是在热处理或表面处理工艺方面有所不同,以达到耐磨性的要求。除基体外第二相的数量、形状和分布对钢件的耐磨性有重要影响,这要从钢的化学成分设计、冶炼、热加工、热处理等方面统筹考虑,以便从冶金方面达到提高耐磨性的要求。