

Advanced Technology
in High-entropy Alloys

先进高熵合金技术

张勇 陈明彪 杨潇 等编著



化学工业出版社

高熵合金是近年来发展起来的新型合金材料,有望突破传统材料的性能极限,已经成为近年来材料科学发展新的热点和方向之一。本书综合了大量作者多年在国内、国外发表的宝贵科研成果,共分为11章:第1章介绍高熵合金的发展过程;第2章介绍高熵非晶合金的一系列性能;第3章~第4章对高熵合金进行系统介绍,进而更好地预测其性能;第5章~第7章介绍高熵合金的设计理念、制备方法等;第8章对高熵合金性能进行深入介绍;第9章主要介绍高熵合金的相形成规律;第10章重点介绍高熵合金的抗辐照性能;第11章介绍其应用的新领域与新技术。

全书内容以作者深厚的理论知识和丰富的长期科研实践经验为基础,具有很强的理论性、科学性、系统性和实用性,视野独特,体系齐全,充分反映了该领域的前沿和关注的问题,是适应于高熵合金研究及其知识普及和应用的重要著作。本书可供广大新材料、非晶材料、材料科学等领域的科研人员、技术人员阅读或参考,也可作为相关专业大专师生的教学参考书或教材。

图书在版编目(CIP)数据

先进高熵合金技术/张勇等编著. —北京:化学工业出版社, 2018. 3

ISBN 978-7-122-31388-1

I. ①先… II. ①张… III. ①合金-研究 IV. ①TG13

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第012460号

责任编辑:朱彤

文字编辑:向东

责任校对:边涛

装帧设计:刘丽华

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:河北鹏润印刷有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张15½ 字数394千字 2019年1月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888

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

高熵合金是近年来采用多主元混合引入“化学无序”获得的新型合金材料，其主要特点是没有主导元素或主元。传统的合金材料大多数是稀释的固溶体，一般分为溶质和溶剂，高熵合金则是分不出何为溶质，何为溶剂的高浓度固溶体。目前高熵合金的概念已经扩展到了高熵陶瓷、高熵薄膜、高熵钢、高熵高温合金、铝镁系高熵轻质合金、高熵硬质合金等。近年来的研究发现高熵合金在低温下仍有很高的断裂韧性，在抵抗高温软化方面强于传统的合金材料，也就是在韧脆转变温度和合金软化温度之间的服役温度范围更为宽广，表现出宽温域服役的特点。同时，也有大量报道高熵合金具有更强的抗辐照性能，其辐照导致的体积膨胀明显低于锆合金和不锈钢。一般认为，高熵合金的无序复杂结构使得原子的自由程更短，离位原子和空位复合的概率更高，和 ODS 合金靠相界面及纳米晶材料靠晶界吸收空位的机制明显不同。

目前有关高熵合金的研究还处于探索性阶段，主要集中在高校和研究院所，如美国加州大学伯克利分校和橡树岭国家实验室研制出低温高韧性的高熵合金；德国马普研究所和美国麻省理工学院探索具有孪晶增韧（TWIP）和相变增韧（TRIP）的双相高熵合金。这些研究都表明：高熵合金的发展潜力巨大，其应用领域将十分广泛。核能领域需要大量的特殊材料，需要具有抗辐照、抗氧化、抗腐蚀、耐高温、焊接性好、组织稳定性好等特点的材料。传统的合金设计理念面临许多挑战，高熵合金的提出，为此开辟了新的方法。

需要强调的是，中国多个机构和一些学者在高熵合金领域做出很多前沿性的成果，国家自然科学基金委工程材料学部也新增了高熵合金的研究方向。北京科技大学新金属国家重点实验室的张勇教授（我曾指导过的博士生）认为：“我们几乎已经探索过传统金属的所有方面，而对于高熵合金这方面的研究是全新的。”张勇教授是我国最早对高熵合金的理论与制备技术及应用进行深入、系统、广泛的研究的科研人员之一，他领导的研究组在块体高熵合金、高熵合金薄膜、高熵合金纤维等方面均有前沿性工作，他提出了高熵合金的相形成判据，发展了高熵合金理论。张勇等统计了大量的高混合熵合金，从原子尺寸错配度、混合焓和混合熵角度进行系统分析，并用 Adam-Gibbs 方程作出了解释；提出的“熵”和“焓”在熔点附近的平衡参数 Ω 在高熵合金研究中发挥了

重要作用。张勇教授在高熵合金方面的研究活动及成果已在国内乃至国际产生了重要影响，并被同行所熟知。

目前人们对高熵合金的研究还处于初始阶段，作为一个材料研究的新兴领域，高熵合金有着很高的研究价值与广阔的应用前景。目前关于高熵合金的书籍还很少，这与快速发展的高熵合金领域不相适应。因此，迫切需要出版一本高熵合金方面的内容全面、系统的专著。张勇教授根据高熵合金学科的发展，组织相关科研人员撰写了这本高熵合金专著。该专著系统概括总结了高熵合金在基本理论、设计、制备、应用等方面的研究进展，综合了近年来高熵合金的新理论和技术成果以及编者多年的科研成果。该著作内容全面、系统而深入，是适应于高熵合金研究及其知识普及和应用的重要著作。相信此书对高熵合金研究者、相关技术人员和教师及学生具有重要的指导意义。相信此书能进一步推动高熵合金这一新兴领域在国内的发展，引领更多的科研工作者去探索高熵合金这一丰富领域。

中国工程院院士

中国核学会理事长

李冠兴

2018年5月

探索新材料是人类永恒的目标之一。传统探索新材料的方法主要是通过改变和调制化学成分，调制结构及物相、调制结构缺陷来获得新材料。近几十年来，人们发现通过调制材料的“序”或者“熵”，也能获得新型材料。如非晶合金就是典型的通过快速凝固，引入“结构无序”而获得的高性能合金材料。实际上，通过改变和调制“结构序”和“化学序”都可以获得性能独特的新材料。高熵合金就是近年来采用多主元混合引入“化学无序”获得的新型材料。所以，高熵合金实际上还有不同的名字，如多组元合金、多主元合金、成分复杂合金、高浓度复杂合金、多基元合金等。从玻尔兹曼的“构型熵”公式不难发现，高熵合金或材料表现为更多的主元（组分）和更高的主元（组分）浓度。从热力学上看高熵合金可以具有更低的吉布斯自由能，在某些情况下可能表现出更高的相和组织稳定性。动力学上，高熵合金或材料表现出缓慢和迟滞的特性，当然材料的特性绝不是仅仅由“熵”决定的，热力学焓的作用也非常重要。近年来的研究发现高熵合金在硬度、抗压强度、韧性、热稳定性等方面具有潜在的显著优于常规金属材料的特质，在耐高温合金、耐磨合金、耐腐蚀合金、耐辐照合金、耐低温合金、太阳能热能利用器件等方面有重要应用前景。

目前，世界上很多研究机构及一些学者进行了大量研究。中国大陆多个机构和一些学者在高熵合金领域做出很多前沿性的成果，国家自然科学基金委工程材料学部也新增了高熵合金的研究方向。例如，本书的主要作者张勇教授（曾在我的课题组做博士后科研工作），是大陆最早对高熵合金的理论与制备技术及应用进行了深入、系统、广泛的研究的科研人员之一，他领导的研究组在块体高熵合金、高熵合金薄膜、高熵合金丝等方面均有前沿性工作。他提出了两种新的高熵合金，发展了高熵合金理论，提出的“熵”和“焓”在熔点附近的平衡参数 Ω 在高熵合金研究中发挥了重要作用。张勇教授的高熵合金方面研究活动及成果已在国内乃至国际产生了影响，并被同行所熟知；他多次担任中国材料研究学会年会的“高熵和噪声”分会主席，曾参与主办了美国MRS秋季会议高熵合金分会，参与主办了国内大陆多次高熵合金研讨会。

遗憾的是中国内地目前关于高熵合金的书籍还很少，这和快速发展的高熵合金领域不相适应。令人高兴的是，张勇教授根据高熵合金学科的发展，组织

相关专家一起撰写了这本高熵合金专著。该专著系统概括总结了在高熵合金基本理论、设计、制备、应用，典型高熵合金研究，高熵合金发展前景等方面迄今所取得的成果。这些作者都是活跃在高熵研究前沿的专家学者，在高熵合金领域卓有建树。所以，该著作内容全面、系统而深刻，是适应于高熵合金研究及其知识普及和应用的重要著作。相信此书对高熵合金研究者、相关技术人员和教师及学生产生积极的作用，进一步推动高熵合金这一新兴领域在国内的发展。

中国科学院院士
中国科学院物理研究所研究员

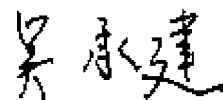


2018年5月

高熵合金自 20 世纪 90 年代由中国台湾学者叶均蔚教授明确发现并开始进行系统试验与理论研究以来，因其在硬度、抗压强度、韧性、热稳定性等方面具有潜在的显著优于常规金属材料的特质，及其作为耐高温合金、耐磨合金、耐腐蚀合金、耐辐照合金、耐低温合金、太阳能热能利用器件等方面的前景，在二十多年里已被世界上多个研究机构及一些学者进行了大量研究，并产生了相当数量的学术论文、发明专利、专著等成果。如美国加州大学伯克利分校和橡树岭国家实验室在 *Science* 上发表了低温高韧性的高熵合金文章；德国马普研究所和美国麻省理工学院在 *Nature* 上发表了同时具有孪晶增韧 (TWIP) 和相变增韧 (TRIP) 的双相高熵合金。我国也有多个机构和一些学者进行着研究，并已产生了很多前沿性的成果，在中国内地目前只有部分关于高熵合金的书籍，如张勇著的《非晶与高熵合金》、梁秀兵等编著的《电弧喷涂亚稳态复合涂层技术》和我编著的《金属材料学》第三版，再加上高熵合金领域发展很快，目前迫切需要一本有关高熵合金方面内容全面、系统的专著出版。本书的作者张勇和陈明彪都是我指导过的研究生，陈明彪教授在青海大学曾主讲多门材料科学方面的课程。张勇教授自 21 世纪初在北京科技大学新金属材料国家重点实验室开始高熵合金研究以来，对高熵合金的理论与制备技术及应用进行了深入、广泛的研究，在块体高熵合金、高熵合金薄膜、高熵合金丝等方面均有一些前沿性研究；提出了两种新的高熵合金，发展了高熵合金理论。张勇的高熵合金方面的研究活动及成果已在国际上产生了影响，并被同行所熟知；多次担任中国材料研究学会年会的高熵和噪声分会主席，曾参与主办了美国 MRS 秋季会议高熵合金分会，参与主办了国内多次高熵合金研讨会。此书是适应高熵合金研究及其知识普及和应用的重要著作，其内容全面、系统而深刻，基本概括总结了在高熵合金领域的基本理论、

设计、制备、应用，以及典型高熵合金研究和高熵合金发展前景等方面迄今所取得的成果。我期望本书对高熵合金研究者、相关技术人员和教师及学生产生积极的作用。

北京科技大学教授

Handwritten signature in black ink, reading '吴建' (Wu Jian).

2018年1月

探索新型材料是人类文明发展进程中的永恒追求。传统研发新材料的办法是基于一种或两种主元或组分，通过添加少量的其他主元或组分，以达到优化材料性能的目的，满足人类的实际使用要求。近年来，人们开始从调节材料的“序参量”，有序或无序的程度，或者“熵参量”来研究和发展材料。“序参量”也分“结构序”和“化学序”参量。前者主要指空间结构上的序，后者主要指化学占位上的序。众所周知的例子，如非晶合金、有序金属间化合物高温材料、高熵合金等。

高熵合金是基于“化学无序”发展的新材料，主要提出了从熵的角度开发和研究合金材料，突破了过去合金材料基元的限制。到目前为止，高熵合金经历了三个主要阶段：第一，五元-等原子比-单相固溶体合金；第二，四元或五元-非等原子比-多相合金；第三，高熵薄膜或陶瓷。

第一个阶段主要是研究熵如何稳定化学无序的固溶体结构或结构无序的非晶结构，熵和焓如何协同作用影响合金相的形成，并提出各种预测高熵合金相形成的判据；高熵合金的强化机制，特别是固溶强化，因为高熵合金是典型的“浓固溶体”区别于传统合金“稀固溶体”；并总结出了高熵合金的五大特点，即高温稳定性好、低温高韧性、抗辐照肿胀率、缓慢扩散效应、晶界能和层错能低。

第二个阶段的研究是基于实际的工程应用，需要降低合金的成本，先报道了五元-非等原子比-双相合金，实现了孪晶增韧（TWIP）和相变增韧（TRIP）同步产生，导致其强度和室温塑形同步提高；具有良好铸造性能的共晶高熵合金；具有良好综合性能和高温性能的析出强化高熵合金等。

第三个阶段主要是以混合组分为基础，如几种碳化物或几种氮化物或氧化物，形成陶瓷的置换固溶体，预期得到更高的热稳定性或生物相容性。混合的办法可以是物理气相沉积（PVD）、磁控溅射（Sputter）、固相反应、烧结等。

本书将为读者提供关于高熵材料一个概括的总结，为对高熵合金感兴趣的读者提供一个引子，以便将来进行更深入、系统的研究。本书总共分为 11 章，具体分工如下：张勇负责全部的统筹安排和撰写，其中张蔚冉负责第 1 章撰写，王军强、赵昆、高选桥和霍军涛负责第 2 章撰写，左婷婷和张涛负责第 3 章、第 7 章、第 11 章撰写，田付阳负责第 4 章撰写，陈明彪负责第 5 章和第 6 章撰写，杨潇负责第 8 章和第 9 章撰写，夏松钦负责第 10 章撰写。在本书撰写中，张敏和李冬月在排版和校对方面做了细致的工作。编著者对此表示衷心的感谢和崇高的敬意！

由于高熵合金是近期研究的热点，涉及的学科多、发展快，加上编著者水平和学识有限，在取材和论述方面会存在不妥之处，敬请广大读者批评指正。

张 勇
2018 年 3 月

第 1 章 绪论 / 001

1.1 材料的发展	001
1.1.1 材料的定义及其分类	001
1.1.2 金属材料的发展简史	003
1.1.3 高熵合金的发现	003
1.2 高熵合金的发展	007
1.2.1 高熵合金的历史背景	007
1.2.2 高熵合金的相关发展	007
1.2.3 高熵合金的研究成果	009
1.3 高熵合金的热力学基础	010
1.4 高熵合金及其定义	013
1.5 高熵合金的特性	015
1.5.1 高熵效应	015
1.5.2 晶格畸变效应	016
1.5.3 缓慢扩散效应	018
1.5.4 “鸡尾酒”效应	018
1.5.5 热稳定性	020
1.6 高熵合金的制备	023
1.6.1 块状高熵合金	024
1.6.2 薄膜高熵合金	026
1.6.3 丝状高熵合金	027
1.6.4 粉末高熵合金	029
1.7 高熵合金的研究热点	030
1.8 对高熵合金现存问题的阐述	041
1.8.1 高熵合金定义问题	041
1.8.2 相形成问题	042
1.8.3 缓慢扩散效应问题	044
1.9 高熵合金的未来研究方向	045
1.9.1 理论研究	045
1.9.2 应用方向	047
1.10 高熵合金与“材料基因组”计划	048
参考文献	050

第 2 章 高熵非晶合金及相关材料 / 054

2.1 非晶合金概述	054
2.1.1 非晶合金形成判据及体系分类	054
2.1.2 非晶合金热学性能和弛豫	056
2.1.3 非晶合金力学性能	057
2.1.4 非晶合金磁功能特性	057
2.1.5 非晶合金化学功能特性	058
2.2 高熵非晶合金概述和分类	058
2.3 高熵非晶合金的力学性能	062
2.4 高熵非晶合金的化学性能及生物相容性	065
2.5 高熵非晶合金的磁性能	069
2.5.1 高熵非晶合金的磁热性能	069
2.5.2 高熵非晶合金的软磁性能	071
2.6 小结与展望	074
参考文献	074

第 3 章 高熵合金的概念 / 076

3.1 高熵合金的定义	076
3.1.1 高熵合金的狭义定义	076
3.1.2 高熵合金的广义定义	078
3.2 高熵合金的表达方式	079
3.3 高熵合金的分类	079
3.3.1 按微观结构划分	079
3.3.2 按元素组成划分	080
3.3.3 按维度划分	080
3.4 典型的高熵合金结构模型	080
3.4.1 面心立方结构	080
3.4.2 体心立方结构	080
3.4.3 密排六方结构	081
3.4.4 非晶结构	081
3.5 高熵合金的四大效应	081
3.5.1 热力学上的高熵效应	081
3.5.2 结构上的晶格畸变效应	083
3.5.3 动力学上的迟滞扩散效应	084
3.5.4 性能上的“鸡尾酒”效应	085
参考文献	087

第 4 章 第一性原理方法在高熵合金中的应用 / 089

4.1 第一性原理方法的简要介绍	089
4.2 第一性原理方法在高熵合金中的应用	090
4.2.1 高熵合金可计算模型	090

4.2.2	高熵合金的电子密度	091
4.2.3	高熵合金的相稳定性	094
4.2.4	高熵合金热力学量预测	094
4.2.5	高熵合金的力学性质	094
4.2.6	高熵合金层错能计算	098
4.3	高熵合金的晶格畸变	101
4.4	高熵合金的缓慢扩散	102
	参考文献	104

第5章 高熵合金的设计 / 106

5.1	概述	106
5.2	多主元高熵固溶体合金的设计	107
5.2.1	多主元高熵固溶体合金设计依据理论	107
5.2.2	多主元高熵固溶体合金设计考虑因素	109
5.2.3	多主元高熵固溶体合金设计方法	109
5.2.4	多主元高熵固溶体合金的合金化理论	111
5.2.5	合金元素选择与合金系设计	113
5.3	高熵合金设计研究实例	118
	参考文献	123

第6章 高熵合金的制备方法 / 124

6.1	高熵合金制备需要考虑的问题	124
6.2	熔铸法制备高熵合金	124
6.2.1	高熵合金熔铸方法	124
6.2.2	高熵合金液凝固技术方法	124
6.2.3	高熵合金真空电弧熔炼法	124
6.2.4	真空感应熔炼	125
6.2.5	定向凝固制备高熵合金单晶	126
6.2.6	真空熔体快淬法制备非晶高熵合金薄带	126
6.3	机械合金化法制备高熵合金	128
6.4	制备高熵合金薄膜	129
6.5	“高通量法”制备高熵合金	131
6.6	高熵合金复合材料的制备	131
6.6.1	原位自生合成反应制备薄膜	131
6.6.2	机械合金化法制备陶瓷高熵合金复合材料	132
6.7	高熵合金的热加工	132
	参考文献	132

第7章 高熵合金的组织特征 / 133

7.1	高熵合金的凝固原理	133
7.2	高熵合金的组织	134

7.2.1	单相单晶组织	134
7.2.2	单相多晶组织	135
7.2.3	单相非晶组织	138
7.2.4	多相共晶组织	139
7.2.5	多相其他组织	143
参考文献		149

第 8 章 高熵合金的性能特点 / 151

8.1	力学性能	151
8.1.1	室温力学行为	151
8.1.2	高温力学性能	152
8.1.3	低温力学性能	154
8.1.4	疲劳性能	155
8.1.5	断裂韧性	155
8.1.6	锯齿流变行为	156
8.1.7	影响力学性能的因素	157
8.2	耐磨性能	159
8.3	抗氧化性能	159
8.4	抗腐蚀性能	160
8.5	物理性能	161
8.5.1	电学性能	161
8.5.2	磁学性能	163
8.6	抗辐照性能	165
参考文献		166

第 9 章 高熵合金的相形成规律 / 169

9.1	多主元合金的相平衡条件	169
9.2	多主元高熵合金的微观结构特征	170
9.2.1	高熵合金的相结构	170
9.2.2	高熵合金的组织	172
9.3	影响多主元高熵合金相稳定性的因素	175
9.3.1	混合熵	175
9.3.2	混合焓	176
9.3.3	原子尺寸	176
9.3.4	电负性差	177
9.3.5	价电子浓度	177
9.3.6	其他因素	177
9.4	多主元高熵合金的相形成规律	177
9.4.1	多主元固溶体形成准则	178
9.4.2	非晶形成能力判据	185
参考文献		186

第 10 章 高熵合金的抗辐照性能 / 188

10.1 引言	188
10.2 高熵合金抗辐照性能研究初衷	188
10.3 高熵合金的抗辐照性能	190
10.3.1 堆外离子辐照是高熵合金抗辐照性能研究的重要课题	190
10.3.2 高熵合金辐照行为研究概述	192
10.4 传统核结构材料	199
10.4.1 锆及锆合金	199
10.4.2 不锈钢及高镍合金	200
10.5 未来高熵合金抗辐照材料展望	200
10.5.1 纳米孪晶材料	200
10.5.2 SiC 陶瓷	202
10.5.3 新型高熵合金复合材料展望	203
参考文献	204

第 11 章 高熵合金的应用前景 / 206

11.1 高熵合金应用研究	206
11.1.1 高性能高熵合金涂层	206
11.1.2 高温高熵合金	210
11.1.3 焊料或焊丝	212
11.2 高熵合金的发展趋势	213
11.2.1 抗辐照材料	213
11.2.2 选择性吸收涂层	214
11.2.3 低温结构材料	215
11.2.4 热电材料	215
11.2.5 超导材料	216
11.2.6 大磁熵材料	216
11.2.7 高熵软磁材料	225
参考文献	226
索引	228

第 1 章

绪论

1.1 材料的发展

1.1.1 材料的定义及其分类

任何事物都有结构，不管是虚拟的还是实际的，并且任何结构都是有序和无序的统一。序是有层次的，对每个层次上的序的度量非常重要，既可以用标量，也可以用矢量来表征。熵，作为热力学里的参数，一般认为是无序度或混乱度，也可以是有序度的倒数。朗道的相变理论就是建立在序参量的基础之上。有序或无序的变化，是目前研究最多的，所以熵是一个很重要的参量。当然，目前研究较多的拓扑相变，是以物质的聚集形态为度量指标，但同时也有熵的变化，如一维的纤维、二维的薄膜、三维的块体材料。拓扑相变对材料里的电子很重要，特别是金属材料，因为一般认为金属的价电子是自由的。一个特殊的例子就是在测量合金的矫顽力时，最好采用环形样品，如图 1-1 所示。



图 1-1 测量磁性矫顽力用的拓扑环形样品

本书主要谈实际的事物，即材料，一般认为有用的物质就是材料。实际上物质都是有用的。材料目前可分为硬材料和软材料。以力学性能，如强度、模量、韧性、塑性等性能为主要指标的材料为硬材料，以其他性能为主要指标的为软材料。欧洲人对玻璃有独特的钟爱，而中国人更倾向于使用陶瓷。图 1-2 为欧洲早期使用的玻璃器皿和中国的陶瓷器皿。两种材料的工艺特点完全不同，玻璃的成型是在玻璃软化温度以上塑性成型，即吹塑玻璃成型，如图 1-3 所示。相对于玻璃使用单一的氧化硅原料来说，陶瓷一般采用多种原料，然后将多种原料组合从而实现特定效果，后来这一现象被人类广泛使用，如中药的配方就是许多不同的药材混合在一起。而很多情况下，多种原料的组合是生活经

验的积累，具体的原理仍需要利用现代的科学分析方法进行验证，特别是原料之间的交互作用，一级、二级或三级等高级作用。



图 1-2 欧洲早期使用的玻璃杯 (a) 和中国的陶瓷器皿 (b)



图 1-3 玻璃的热塑成型过程

随着材料历史的不断发展，究其最后，以按成分对材料进行分类较为常见，例如按塑料、钢铁、木材等分类。这样的分类，既能直接反映材料的本质属性，又具有形象生动的效果。随着社会的发展，尤其是工业革命之后，生产工具等的发展在很大程度上取决于金属材料。金属材料的发展为社会的发展奠定了重要的物质基础，是人类社会发展史上最具有代表性的物质之一。由于纯金属材料的应用非常有限，所以多数金属材料是由不同种金属元素或金属元素与非金属元素相结合而成。如奠定第一次工业革命物质基础的钢铁就是以铁和碳为基础的金属材料。金属材料是指金属元素或以金属元素为主构成的具有金属特性材料的统称，通常分为黑色金属、有色金属和特种金属材料。黑色金属又称钢铁材料，包括含铁 90% 以上的工业纯铁，含碳 2%~4% 的铸铁，含碳小于 2% 的碳钢，以及各种用途的结构钢、不锈钢、耐热钢、高温合金、精密合金等，广义的黑色金属还包括铁、铬、锰及其合金；有色金属是指除铁、铬、锰以外的所有金属及其合金；特种金属材料又涵盖结构金属材料 and 功能金属材料两大类。与陶瓷材料、高分子材料相比，金属材料具有强度高、塑性好的综合优势，因而可保障其作为功能结构材料的安全性。