

带翼的金属——铝的趣话（2）

Metal with Wings: Anecdote of Aluminum (2)

供稿|贾成厂 / JIA Chengchang

内
容
导
读

虽然电解法制备铝工艺的开发成功使铝离开了贵金属家族，告别了首饰店，但铝及其合金的优异性能仍然能够让铝在众多的领域大显身手。从小小的牙膏管到庞大的飞机，都能见到铝的身影，足见铝的应用十分广泛。铝之所以在应用方面地位显赫，仅次于钢铁成为第二大类金属，当然是有原因的。现在就让我们再次走进铝的世界，对其性能与应用一探究竟吧。

含量丰富、产量高

如图 1 所示，地壳的金属元素中，铝的含量最多，占地壳总量的 7.73%，其前两位分别是氧和硅，但都是非金属元素。铁虽然是人类使用量最大的金属，但其在地壳中的含量却仅有铝的 2/3，至于我们常用的铜，在地壳中的含量仅有铝的约 1/1000。在常见的沙滩和岩石中，随便抓一把泥土，都会含有铝的氧化物（ Al_2O_3 ）。这为大规模地提炼和广泛地使用金属铝提供了充足的来源^[1]

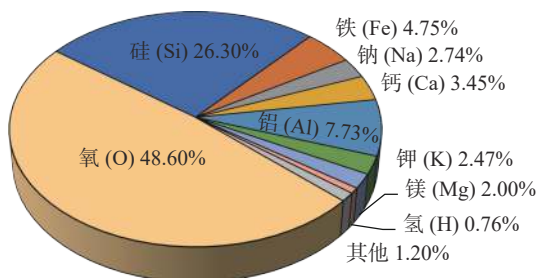


图 1 地壳中各元素的质量分数

铝主要以铝硅酸盐矿石存在，还有铝土矿和冰

晶石。铝的氧化物（ Al_2O_3 ）有 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 和 $\beta\text{-Al}_2\text{O}_3$ ，通常是一种白色无定形粉末，在含有不同的杂质的情况下会呈现多种颜色。例如含微量 Cr^{3+} 的 Al_2O_3 呈红色，通常被叫做红宝石；含有 Fe^{2+} ， Fe^{3+} 或 Ti^{4+} 的呈蓝色，通常被称为蓝宝石。 Al_2O_3 还有很多优异的性能，其硬度高（仅次于金刚石）、熔点高、耐酸碱腐蚀。因此也有着广泛的用途，例如轴承，磨料、耐火材料等。 Al_2O_3 坩埚可以承受 1800 °C 的高温。

图 2 为世界各国铝土矿的储量比例，其中几内亚（占全球储量的 25.51%）、澳大利亚（21.36%）和巴西（12.41%）3 国已探明储量占全球的近 60%。中国的铝土矿的储量并不算高，仅占全球的 2.86%。

根据国家自然资源部发布的《中国矿产资源报告 2023》，截至 2022 年底，我国铝土矿储量为 67552.60 万 t。如图 3 所示，主要分布在山西（34.5%）、广西（20.2%）、贵州（18.3%）及河南（17.9%）。

作者单位：北京科技大学材料科学与工程学院，北京 100083

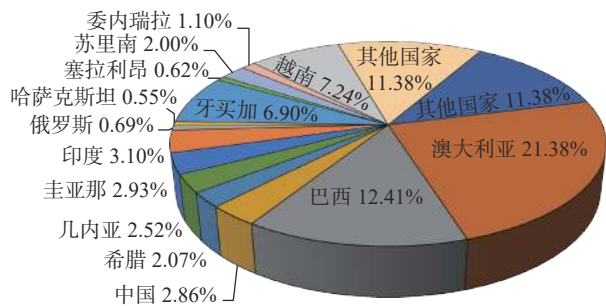


图2 世界各国铝土矿的储量比例

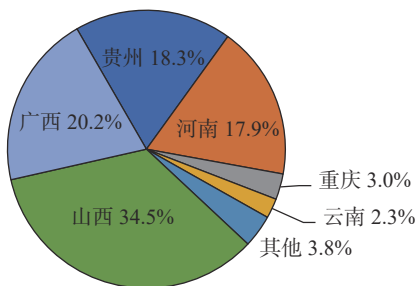


图3 中国铝土矿的储量比例

图4为全球铝的消费领域和增长情况，从1950年到2020年的70年间，增长了上百倍。其中建筑工程、交通运输、电子电器等领域的增长最为迅速。

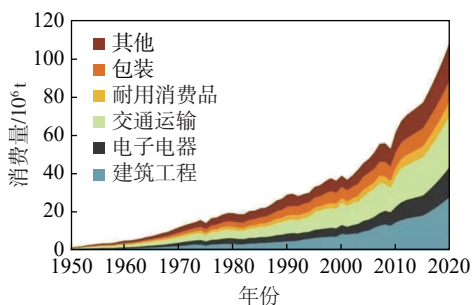


图4 全球铝的消费领域和增长

全球铝总产量为4930万t，总产能为6370万t。图5为世界各国电解铝所占的比例。中国的电解铝产量占全球总量的57.18%，海湾国家占8.93%，中东欧占6.36%，亚洲（不包括中国）占6.34%，北美占6.09%，西欧占5.11%等。铝的主要消费国：日本，美国，中国。铝的主要进口国：美国，日本。铝的主要出口国：加拿大，俄罗斯，中国，墨西哥。

性能优异

铝具有十分优异的性能^[2]。

1) 铝的密度很小，为2.7 g/cm³。仅为铜的

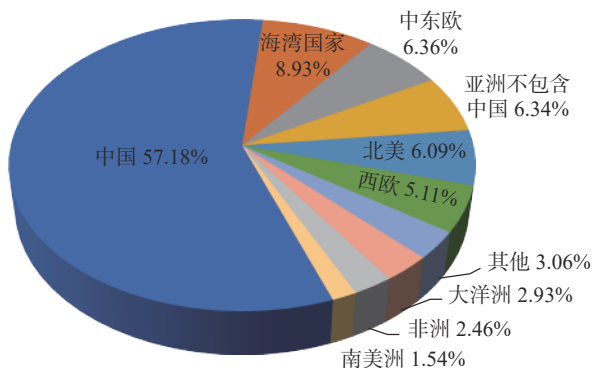


图5 世界各国电解铝的比例

1/3，铁的1/2.9，是较轻的金属之一。铝的比强度（强度与重量之比）高，有些铝合金的比强度甚至高于钢铁。

2) 铝的导电性仅次于银和铜。但铝的密度要小得多，所以在输送相同电量的情况下，如果使用铝线，所需材料的量仅为铜线的一半。就是说，按单位质量计，铝的电导率则超过了铜。所以，一般情况下，高压线多数使用铝线。

3) 铝是热的良导体。金属铝的导热能力是铁的3倍。

4) 铝有较好的延展性。铝的延展性仅次于金和银，1 g铝可拉成37 m的细丝，也可展成面积达50 m²的铝箔，在100~150℃时铝箔的厚度甚至可薄至3 μm（图6）。

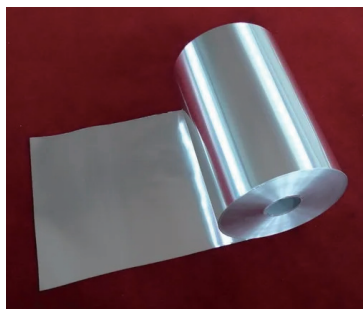


图6 铝箔

5) 铝具有良好的耐腐蚀性，这是由于它能够在表面形成致密的氧化铝（Al₂O₃）膜，保护内部的铝不再被氧化。

硬度与强度的提高

铝号称“从黏土中提炼出来的银”，其优异的导电性、导热性、延展性、耐蚀性等已人所共知。然

而，纯铝有一个致命的弱点：它太软了，不够坚固。就是说，铝的力学性能如强度与硬度不够高，这一弱点严重影响了铝的应用，因此，材料科学家们就在想，如何能够使铝在保持原有良好性能的基础上，变得更加强韧呢？

合金元素的作用

我们日常使用的金属大多为合金，合金的硬度往往要比构成这种合金的基体金属高得多，例如在铁中加入碳，在铜中加入锡等。据此，材料科学家们在努力寻找适合于铝的合金元素，即铝的“盟友”，它们的加盟能使铝更坚强。在这个过程中，正像科学史上的许多次事件一样，也有其中的偶然性因素。

在第一次世界大战期间，武器越发引起人们的重视，枪炮等武器主要是由钢铁制作的，钢铁制作的武器在硬度等方面完全能够胜任，但钢铁比较沉重，在搬运或携带时都不够方便，那么能否找到一种钢铁一样坚固，但比钢铁轻的材料来制备武器呢？当时承担这项任务的是科学家维尔姆。维尔姆想到了铝，当时电解炼铝法已经应用于生产，铝的产量也很高，价格还比较便宜，而且铝还不会生锈。

然而，铝不够坚硬。很多金属自己的力学性能不好，但是一旦找到合适的元素，形成合金却坚硬无比。比如说：铁+碳=钢，铜+锡=青铜。维尔姆想到，能不能像在铁中加入碳、在铜中加入锡那样，找到适合于铝的合金元素，开发出一种铝合金呢？于是，维尔姆将一种又一种的金属掺入铝中，但是一次又一次地失败了；他又将多种金属逐一地加入到铝中进行试验，但是始终未能取得成功。

有一天，维尔姆像往常一样用锤子敲打他所配制的铝合金新材料，以检测并确认其硬度，当敲打到在铝中添加了少量的铜和镁的合金时，只听到“当”的一声，锤子反弹起来，而合金上却没有出现像往常一样被锤子敲打后凹陷的现象。为了确认是不是由于所用的力气太小才未出现凹陷，维尔姆再一次使出了最大的力气往这块合金上敲，在他觉到整个手臂被震得发麻时，合金依然完好无损。这着实让维尔姆大喜过望。这样，通过合金化使铝的硬度得到了有效地提高^[3]。

神奇的“时效”——淬火后的偶然事件发现了硬铝

含铜、镁和锰的铝基合金比纯铝的硬度有了很大的提高，但如何使其强度也得到提高呢？当时的科学家认为，淬火能使这种合金更坚硬。所以对于铝合金，也实施了类似于钢铁材料的热处理，把铝合金加热到 600℃，之后进行水淬火。这样，铝合金的强度确实有所增加，但由于不同的铝合金试样所得到的实验结果不太一致，当时就怀疑是不是所使用的仪器与测量精度所引起的。于是，他们对仪器进行检查与校准，这样就花了几天时间。在这段时间里，由于忙于仪器，所以对合金试样也无暇过问。当仪器检查完毕，继续进行试验时，令人难以置信的事情发生了，合金强度几乎比以前提高到了 2 倍！这一现象使得当时的研究人员兴奋不已。为了确认这一激动人心的结果，他们又进行了一次又一次的重复试验，终于发现了铝合金强度提高的规律，在淬火后的 5~7 d 内呈现出连续增加的现象。就这样，非常偶然地发现了一种令人震惊的现象，这就是铝合金淬火后的时效。图 7 为 Al-Cu 合金的时效效果，经过 1 d 左右的时效，合金的硬度得到大幅度的提高。

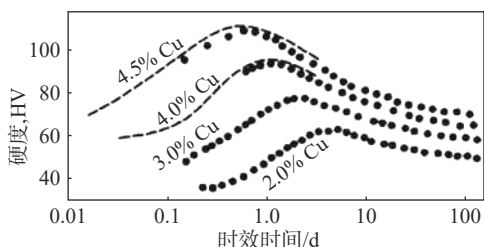


图 7 不同 Cu 质量分数的 Al-Cu 合金的时效效果

材料领域的很多现象都是实践先于理论。当时并不知道铝合金淬火时效后合金内部的微观组织发生了什么变化，就是说并未十分了解铝合金时效的机理，然而却找到了合金的最佳成分，并确定了热处理的最优工艺条件。随后，关于铝合金时效取得了专利。之后，一家德国公司购买了这一专利权，并生产出了第一批被命名为“杜拉铝”的新合金。这种合金也被称之为“硬铝”。

寻找比钢铁轻，却与钢铁一样坚固的材料梦想终于成为了现实。一种坚硬的铝合金诞生了！它是

通过在铝中添加少量铜和镁，经过淬火与时效而实现的。你看，铝很幸运，找到了自己的小伙伴，而且不仅是一个，有镁，硅，铜等，这些小伙伴很喜欢与铝一起玩耍，组成了“铝合金”天团，通过热处理，得到一种比钢还坚硬的物质。铝立刻就从奶油小生变成了硬汉，从颜值派变成了实力派。从一块普普通通的铝块，再到又硬又轻的铝合金，这样的转变就让人对铝刮目相看，而且铝摇身一变就成了在工业界无可匹敌的利器，可谓是让人望尘莫及。

铝及其合金的广泛应用

铝合金有什么特点呢？硬：刀枪不入；轻：身轻如燕；耐腐蚀：百毒不侵。所以在诸多领域有着广泛的用途。

航空航天

以前的飞机，都是用木头和布制造出来的，简直是拿生命开玩笑啊！当时没有找到又轻又硬的替代品，所以只能这样应付着。但是从二战开始，用铝合金制造飞机就开始流行起来了，尤其是作为当时大国之一的英国，最喜欢用铝合金制造飞机。反法西斯战争这场战役，铝合金也做出了不少贡献，说他是功臣一点也不为过^[4]。

1818年，飞机中开始大量使用铝合金，从此，铝的命运就与飞机制造业牢固地联系在一起了。铝把原来的“飞行书柜”一举变成了现代的巨型客机（图8），一架超音速飞机上铝及其合金部件约占全机部件的70%。被誉为“带翼的金属”是当之无愧的。



图8 飞机蒙皮是铝合金, 承力框架是硬铝和超硬铝

铝合金强度高且仍较轻，还广泛应用于宇宙火箭、航天飞机、人造卫星等。1970年，我国发射了

第一颗人造卫星“东方红”I号，充分展现了我国的国力，但是，可能很多人并不知道，该卫星的外壳全部用铝及其合金制成。美国的“阿波罗”11号宇宙飞船所用金属材料中，铝及其合金也占据了3/4左右。可以毫不夸张地讲，在人类送上天空的金属中，铝是首屈一指的。

汽车

当时用了许多铝合金制造飞机是因为战争，但是战争完了之后，怎么办？铝不制造飞机可以制造什么呢？聪明的人们把本来要制造飞机的铝合金，全用在了汽车上。图9给出了在汽车中铝合金的应用状况。

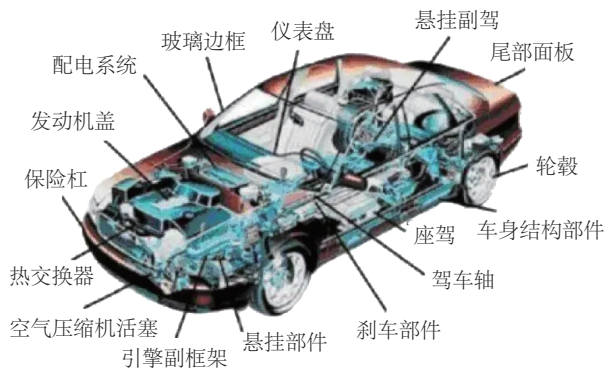


图9 铝合金在汽车中的应用

铝材料使用之前，汽车主要使用钢材，自重很大，油耗和油费很高，这戳痛了很多人的心。于是，汽车行业开始大规模使用铝合金材料来替代钢材——这大大降低了车身重量，降低油耗，可谓消费者的福音。铝合金和汽车也是绝配，在保障安全的同时又不影响汽车的性能，而且还耐腐蚀，这样的汽车走到哪里都是最拉风的。瞬间，人们在了解到铝合金的各种优点后发现了商机，都开始研究如何用铝合金制造汽车，什么奥迪、宝马、奔驰纷纷都用上了铝合金。以前都是用钢来制造汽车的，贪图它够硬、能保障安全，但是铝合金的出现，却取代了钢，因为钢实在太重了，耗油不说，还不能保障速度。用铝合金代替一部分钢，效果是杠杠的^[5]。

现在大家都在研究全铝发动机、全铝车身，只是为了更进一步提升汽车的性能，不过最多也是把近一半的钢结构变成铝合金。因为铝合金相对于钢

铁来说还是比较贵，而且工艺也更为复杂，所以铝合金技术的成本也日渐增高，到最后只有豪车品牌才能玩得起这玩意。

其他交通运输

铝合金还广泛应用于火车、船舶等其他交通运输的制造工业，如一艘大型客船的用铝量常达几千吨。图 10 是铝合金客船。



图 10 铝合金客船

电器制造业

铝的导电性很好，且在铝的表面会形成化学性质非常稳定的氧化铝膜，该氧化膜不仅具有一定的绝缘性，而且其耐腐蚀性非常好，因此，铝在电器、电线、电缆、无线电等行业中都有着广泛的用途。

催化行业

铝热剂，是铝粉和难熔金属氧化物的混合物，用引燃剂点燃后反应剧烈进行，得到氧化铝和金属，并放出大量的热，温度可到 2500℃，这可以用来熔炼难熔金属和焊接钢轨等。铝还是良好的脱氧剂，在炼钢中得到广泛应用。铝粉和石墨、TiO₂ 按一定比例混合均匀，涂在金属上，经高温煅烧，可以制成耐高温的金属陶瓷，这在火箭及导弹技术领域有着重要应用。

燃烧领域

铝燃烧时能放出大量的热并发出耀眼的光，利用铝的这一特性，可以制造爆炸物（图 11）。例如将铝粉、硝酸铵、木炭及其他可燃性有机物进行混合，就可以制成威力很大的铵铝炸药；用铝热剂还可以做成炸弹和炮弹，可以攻击敌方难以着火的目标，以及坦克、大炮等。



图 11 铝是现代高能炸药的核心强化成分

装饰领域

铝粉具有银白色的光泽，这与一般金属粉末的颜色多为黑色截然不同，利用铝粉的这一特性，可以用来做涂料，由于它与银的颜色很接近，所以也称为银粉、银漆。这样的涂料不仅外表美观，而且还能够保护被涂层的铁制品等不被腐蚀。

低温领域

铝的熔点不高，但是很耐低温，还有一点可贵的是，在低温度下铝的强度不仅不降低，反而增加，且没有脆性。因此，铝是理想低温装置材料，例如可以用于冷冻库、冷藏库、南极雪上车辆等。

光、热、声领域

铝对光的反射性能很好，反射紫外线的性能比银还强，而且，铝的纯度越高，其反射能力也越好。利用铝的这一性能，可以用来制造诸如太阳灶反射镜等高质量的反射镜。图 12 是由铝合金制备的太阳能热水器。铝的吸音性能较好，音响效果也比较好。利用这一性能，广播室、现代化大型建筑室内的天花板等都可以采用铝，能够取得不错的效果。家庭中的门窗如果采用铝合金边框。也能够起到一定的吸音效果。



图 12 太阳能热水器

日常生活

各种铝箔广泛用于包装香烟、糖果等。一些食品添加剂中也含有铝，像明矾，膨松剂，发酵剂等。在一些油条，馒头，麻花，粉丝及些膨化食品（薯片一类）等中也有使用。图13为铝在不同消费领域所占的比例。

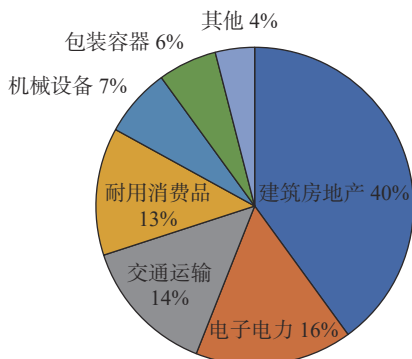


图13 铝在不同消费领域所占比例

主要铝合金的种类

1) 铝硅合金是品种最多、用量最大的一类铸造铝合金。含硅质量分数4%~13%，热胀系数小，有良好的铸造性能和耐磨性能。在铝硅合金中添加0.2%~0.6%镁，由于铝硅合金的力学性能良好，所以可用于结构件的制造，例如壳体、缸体、箱体和框架等。在铝硅合金中添加适量的铜和镁，可使其力学性能和耐热性得到进一步提高，此类合金可用于制造活塞等部件。

2) 铝铜合金也是一类重要的铝合金，其强化效果在铜质量分数为4.5%~5.3%时最佳，此外，适当地加入锰和钛，还能进一步提高其室温强度与高温强度，还可以改善其铸造性能。此类合金可用于制作承受大的动载荷与静载荷铸件。

3) 铝镁合金是密度最小的铝合金，这是由于镁的密度比铝还要低、而且，铝镁合金还是强度最高的铸造铝合金。其强化效果在镁质量分数12%时最佳。室温下有良好的综合力学性能和可切削性，在大气和海水中的抗腐蚀性能好。可用于雷达底座，飞机的发动机机匣、螺旋桨、起落架等零件的制作。

4) 铝锌合金可“自行淬火”，指铝锌合金在铸造后自然冷却的条件下就有淬火作用。无需再经额外的淬火热处理，对此类合金进行变质热处理，可以获得较高的强度，而且，经稳定化处理后尺寸比较稳定，因此可以在模型、型板及设备支架等部件中得以应用。

铝的应用前景

当前铝行业存在着产能过剩、利用率不足等问题，短期内铝行业前景难言乐观。但铝本身具有很多优势，首先，铝在地壳中储量非常丰富，其次，相对其他金属，铝还具有很多优点，所以在未来的应用中，铝仍具有非常广泛的前景。例如，由于汽车的轻量化日益受到重视，探讨大面积采用铝合金来代替钢材，进而使汽车重量更轻，是一个十分重要的话题，这也是汽车制造商目前正在努力实现的目标。随着技术进步，铝合金产品不仅在航天航空、交通运输、电子电力、建筑等传统应用领域仍将快速增长，在新的领域也会快速增长^[6]。

结束语

地壳中含量最多的金属元素，因其冶炼的成本高而曾经跻身于贵金属家族。身价跌落后能够凭借其优异的性能而从奶油小生变成了硬汉，从颜值派变成了实力派。由于在航空航天领域的大显身手与杰出贡献而被誉为“带翼的金属”。此外还在众多的领域得到广泛的应用。

参考文献

- [1] 閃惜珊. 地壳中元素含量排名(地球内部含量最多的10种元素). (2022-06-30)[2024-01-24]. <https://www.fshuiren.com/h/2022061326130.html>
- [2] 初中学习大师. 备受青睐的金属铝. (2022-02-22)[2024-01-24]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1725450320104970456&wfr=spider&for=pc>
- [3] 曾宝俊格致工作坊. 铝：一种后来居上的金属元素. (2020-09-30)[2024-01-24]. https://www.sohu.com/a/421802794_819016
- [4] 航空产业网. 历久弥新的航空铝合金. (2022-01-08)[2024-01-24]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1721362403475639128&wfr=spider&for=pc>
- [5] 郑晖, 赵曦雅. 汽车轻量化及铝合金在现代汽车生产中的应用. 锻压技术, 2016, 41(2): 1

[6] 金属百科. 铝的用途和应用前景. [2024-01-24]. <http://baike.asianmetal.cn/metal/al/application.shtml>

作者简介: 贾成厂, 北京科技大学教授、博士生导师。1982年毕业于北京钢铁学院金属材料系, 获学士学位。1987年获日本东北(TOHOKU)大学硕士学位。1990年获得日本东北(TOHOKU)大学博士学位。1990—1994年日本神奈川科学城博士后、总工程师。获国家发明专利30余项。在国内外学术期刊上发表论文300余篇, 其中SCI检索100余篇, EI检索近200篇。编著学术专著近20本:《复合材料教程》《陶瓷基复合材料导论》《烧结金属含油轴承》《金属基复合材料导论》《超硬材料与工具》《金属粉末凝胶注模成形》《烧结实践与科学基础》《韩凤麟教授论文集》等。获教育部科技进步二等奖、中国冶金教育协会优秀教材一等奖、高等教育国家级教学成果一等奖(参加)、北京市教育教学成果一等奖(参加)、中国有色金属学会优秀期刊二等奖、中

国金属学会优秀工作者、“挑战杯”全国大学生科技竞赛优秀指导教师、复合材料学会《复合材料学报》杰出编委、北京科技大学“我爱我师——我心中最优秀的教师”、师德先进个人、优秀党员、先进工作者、教学成果一等奖、科技论文SCI收录奖等荣誉。主要社会兼职: 中国复合材料学会名誉理事、中国金属学会粉末冶金分会名誉理事、中国机械工程学会粉末冶金分会名誉理事、中国有色金属学会粉末冶金与陶瓷分会理事、中国钢结构协会粉末冶金分会名誉理事、中国有色加工协会特聘专家、中国建材工业协会粉体分会理事、中国机协粉末冶金分会特聘专家, 北京粉末冶金研究会名誉理事长, 担任《复合材料学报》名誉编委、《粉末冶金技术》顾问、《粉末冶金工业》编委、《中国钨业》编委、《粉末冶金材料科学与工程》编委、《中国材料科技与设备》编委、《金属世界》编委、特邀撰稿人,《热喷涂技术》编委、《有色金属工程》编委。