

科学

原来如此



无所不在的 材料

主编 奚同庚

上海科学技术文献出版社

科学 原来如此

无所不在

材料



上海科学技术文献出版社

图书在版编目(CIP)数据

无所不在的材料 / 奚同庚主编. — 上海: 上海科学技术文献出版社, 2011.1

ISBN 978 - 7 - 5439 - 4690 - 3

I. ①无… II. ①奚… III. ①材料科学 - 普及读物
IV. ①TB3 - 49

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 263402 号

本书出版得到上海科普创作出版专项资金的资助

责任编辑: 张 树 陈云珍

封面设计: 周 婧

插图: 汪伟俊

科学原来如此丛书

无所不在的材料

主 编 奚同庚

出版发行: 上海科学技术文献出版社

地 址: 上海市长乐路 746 号

邮政编码: 200040

经 销: 全国新华书店

制 版: 南京理工排版校对有限公司

印 刷: 常熟市华顺印刷有限公司

开 本: 787 × 1092 1/16

印 张: 15.25

字 数: 285 000

版 次: 2011 年 1 月第 1 版 2011 年 1 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 978 - 7 - 5439 - 4690 - 3

定 价: 30.00 元

<http://www.sstlp.com>

前言

人类利用材料的历史,几乎和人类的文明史一样悠久。人类早期的历史,就是以所用的材料来划分成“石器时代”、“青铜时代”和“铁器时代”的。在远古时代,人们首先利用自然界现成的石材、木材和植物纤维做材料。自从人类发明了“钻木取火”技术以后,开始利用火的高温对自然界的物质加工,用火将水和土制成的泥胎烧制陶瓷,用炭和火加工铜、锡的矿石制造青铜,开始了人类制造和利用陶瓷材料及金属材料的历史。其后又发明了用火法冶金生产钢铁的技术。钢铁的应用促进了多种生产技术的大发展。从18世纪开始,人类发明了产生和利用电的技术,电化学方法制造了一大批不能利用炭和火生产的金属新品种。特别值得一提的有:利用电使人类能够大量生产铝、镁和钛。轻而强韧的铝、镁、钛合金成为制造飞机的主要材料,促进了航空工业的建立和发展。核燃料铀的生产则为原子能技术铺平了道路。起初,金属和陶瓷的生产全靠能工巧匠凭经验得来的技艺,“知其然而不知其所以然”。这些经验的积累和技艺发明确实难能可贵,但只凭经验和技艺,未免事倍功半,走许多弯路。例如,工业革命初期,对钢铁材料的需要促使人们改进炼铁技术。在炼铁的高炉中,氧化铁和一氧化碳作用生成金属铁。但人们发现在高炉中一氧化碳并未被全部利用,高炉顶部冒出的气体仍含大量一氧化碳。当时人们就想:这大概是因为高炉还不够高,一氧化碳和铁矿石接触还不够的缘故吧。于是努力建设更高的高炉,企图提高一氧化碳的利用率。但将高炉加高到30米后,意想不到的,顶部气体中的一氧化碳含量并未减少,白白花了巨额投资建炉却一无所获!后来,人们才从化学原理得知:许多化学反应进行的程度都取决于化学平衡。到达平衡后,化学反应就不会进一步进行了。一氧化碳和氧化铁的化学反应不可能使一氧化碳反应完全,正是受了化学平衡的制约。这类教训使冶金工作者认识到物理化学知识的重要,从而产生了“冶金物理化学”这门学科。另一个盲目经验的例子是淬火技术的发明。古代奴隶主为惩罚反抗的奴隶制定了残酷的“炮烙之刑”,结果注意到:用来烫死奴隶的烧红的金属剑表面会变得特别坚硬。当时,人们以为这是死者的灵魂附着在剑上的缘故,后来才知道,许多金属材料烧热后再急冷都会变硬,即“淬火效应”。奴隶的躯体在此不过起了快速冷却金属材料的作用罢了,于是改用冷水代替奴隶的躯体对钢铁与其他合金淬火了。如今,包括快冷技术在内的热处理方法已经



使材料科学家发明了包括非晶态合金等等一大批新材料。

现代化学和物理的兴起促进了材料制造从技艺到科学的发展。从19世纪初开始,人类开始了发现各种化学元素的热潮。为了发现新元素,人们不仅到处查找稀奇的矿石和水体,甚至还到太阳的光谱里去找线索,真可谓是“上穷碧落下黄泉”,结果发现了几十种稀有金属,为材料研制提供了丰富的信息和物质来源。从原子、分子学说开始,人类对物质的微观结构的认识逐步深化,对新材料的发明起了指导作用。人们开始了解:给我们制造衣料的棉、麻、丝的分子是长链状的,而有弹性的橡胶的分子形状恰好有点像弹簧,正是分子结构决定了这些材料的特性。发现这个“结构—性质关系”的秘密后,就促使20世纪上中叶化学家合成了一大批人造的链状分子的化合物作为人造纤维,许多类似弹簧状的分子的化合物作为人造橡胶,并且发明了以石油、煤炭为原料,大量制造人造纤维、人造橡胶和塑料的方法。这些高分子材料(被称为“三大合成材料”)在生活和生产中,其重要性已经与金属材料、陶瓷材料鼎足而立了。

从20世纪中叶开始,原子能、计算机、航空航天等等新技术层出不穷,对新材料的要求日新月异。近年来,人们觉悟到:人类对宏观物体的知识已经比较丰富,对原子—分子尺度的微观世界的知识因近代物理的进步也大有进展,但对比原子—分子大若干倍、而又比宏观物体小许多数量级的“不大不小不多不少”的微观粒子体系,即“纳米世界”的研究和利用都很不够。于是纳米材料和器件研究成了“大热门”。纳米技术研究正酝酿着材料科学技术的新突破。

在漫长的历史长河中,中国人曾经对材料技术作出过杰出的贡献。中国人最早用磁性材料做指南针,瓷器是世界公认的中国的伟大发明。“九秋风露越窑开,夺得千峰翠色来”,精美的中国瓷器曾输出到世界四大洲。中国是最早会炼铜、炼铁的国家之一。早在春秋战国时代,中国人就有了相当规模的金属工业生产。据考证,对钢铁生产至关重要的冶金炉鼓风技术还是由中国传入欧洲的。但后来,西方国家兴起了工业革命,发展了材料科学技术,成为“船坚炮利”的列强,反过来侵略中国,使我国遭受了一百多年被侵略的历史屈辱。如今,我们中华民族正经历着伟大的复兴过程。近年来,我国钢铁、水泥、金属铝等多种材料的产量已稳居全球第一。但我国目前还只是材料生产大国,还够不上材料科学强国。我国在新材料研制和有关的理论研究方面,总体水平与先进国家还有一定差距。我们要继续努力发展材料科学技术,为促进国民经济和高新技术的进一步繁荣发展而奋斗。

陈念貽

2005年4月



目 录

太空是孕育新材料的摇篮	001
航天器“头盔”的耐热材料	004
宝石世界	006
人工晶体家族中的新宠儿——闪烁晶体	011
生物材料探秘	013
PTC 半导体陶瓷——暖风机的“心脏”	015
奇妙的压电陶瓷	019
夜光壁揭秘	022
神奇的纳米技术和纳米材料	025
灵敏的人工鼻——半导体气敏陶瓷	028
“泰坦尼克号”海难的启示	031
漫话压电晶体	033
神奇的等离子喷涂人工骨骼	036
潇洒一挥铁电 IC 卡	040
壮观故宫话琉璃	042
形形色色的新型玻璃	044
“洁身自好”的新材料——纳米二氧化钛	047
水泥——从都市的“脊梁”到人体的脊梁	049
从景泰蓝说起	051
反光材料	054
新型吸附材料——活性炭纤维	056
不可等闲视之的碳/碳复合材料	058
21 世纪的绿色能源——固体氧化物燃料电池	060
看得见原子的显微镜	062
“战略新材料”碳化硅	064



超导材料	067
帮助集成电路“退热”的材料	070
透明陶瓷	072
反磨损“卫士”——高温耐磨陶瓷涂层	075
现代建筑玻璃	078
中国古陶瓷	080
古陶瓷的科技鉴定	083
陶器	086
兵马俑群和唐三彩	089
形状记忆合金——“永不忘本”的功能材料	092
铠甲和防弹衣	097
“性格顽强”的硬汉——钨	100
从拿破仑死亡之谜说开去	102
面团一样的金属	104
黄金——永恒的魅力	106
神奇的稀土	108
最轻的金属锂	110
善解人意的减振合金	112
被驯服了的金属——超塑性合金	114
年轻有为的多面手——钛	116
秦青铜兵器不锈之谜	119
带翼的金属——铝及其合金	121
从“愚蠢的合金”到高技术的宠儿——金属玻璃	123
金属中的氢脆	125
垃圾堆中发现的珍宝——不锈钢	127
“哑巴金属”——减振合金	129
汽车制造业“新宠”——泡沫金属材料	130
见不得光的金属——铯	133
“轻柔活泼”的两姐妹——碱金属钾和钠	135
迎接钛时代的来临	137

华夏发明数第一——钢铁冶炼技术	139
信息社会的宠儿——稀磁半导体材料	144
金属也能呼吸吗	146
华夏天竺术有别——中国与印度古代的炼锌技术	148
形状记忆高分子材料	150
不怕紫外线的纤维	152
蜘蛛丝里有学问	154
“工业味精”——有机硅	156
塑料水晶——有机玻璃	158
水中溶解的纤维	160
奇妙的弹性纤维	162
可以发出荧光的纤维	164
未来我们穿什么——新型服装面料	166
与光对话——光致变色有机材料	168
能吸铁的塑料	170
可降解塑料——绿色世界的希望	172
塑料之王的王者风范	174
现代生活的伴侣——胶粘剂	176
功能强大的人造树叶——染料敏化太阳能电池	178
膜科学技术的魅力	180
“筛”出海洋中的淡水——分离膜材料	183
由大闸蟹说开去	185
绿色化学创造绿色生活	187
液晶显示材料	190
碳纤维及其复合材料	193
有机硅在生命科学中闪光	195
从排球比赛的换人说起	198
绿色溶剂——离子液体	200
力大无穷的环氧树脂	202
奇妙的“人造金属”	204



作用奇特的氟碳材料	206
从黑色幽灵说起	209
功能梯度材料	212
材料设计——新材料研制的先导	215
降服雷电的利器	219
组织工程——再造生命奇迹	221
探索太阳能电池的奥秘	223
薄如纸的显示器	226
生活的朋友——氟	228
光折变材料——光子计算机的心脏	230
调节人造卫星“体温”的材料	232

太空是孕育新材料的摇篮

20 世纪人类最伟大的创举之一就是摆脱地球的束缚,冲破大气层的阻拦,进入了“太空”这一前人从未到达过的全新疆界。1957 年 10 月 4 日,前苏联成功地将第一颗人造卫星送入太空。1961 年 4 月 12 日,前苏联航天员尤里·加加林乘“东方 1 号”宇宙飞船成功地进入环绕地球飞行的空间轨道,成为世界上第一个太空人。1969 年 7 月 20 日,乘坐“阿波罗 11 号”登月舱的美国宇航员阿姆斯特朗在月球上留下了人类的第一个脚印。近半个世纪以来,航天领域的每一次创举都使人类的探索精神得以升华。时至今日,组建中的国际空间站已成为世界上最具影响的空间活动。2003 年 10 月 15 日,我国“神舟 5 号”宇宙飞船将航天英雄杨利伟送入太空,使中国成为继俄罗斯、美国之后第三个独立地掌握了载人航天技术的国家,这一壮举极大地增强了中华民族的自信心和自豪感。

航天科技的迅猛发展,已经成为引领新科学、新技术,带动国民经济发展的的重要手段。空间科技成果在地面生产和生活中的推广和应用,正在不断改善和提高着人类的生活质量,使得空间科学及其应用成为当今人类最具显示度和影响力的活动。空间材料科学作为空间科学与应用领域中的重要分支,是传统的材料科学向空间环境的延伸,是发展材料科学新理论、探索材料制备新工艺和拓展材料应用新领域中最活跃的前沿性交叉学科之一。

目前的空间材料科学研究主要集中在利用空间的微重力环境。那么,什么是微重力呢?在解释微重力概念之前,首先应从失重谈起。对于失重,人们早就熟悉。譬如,在电梯中急速下降和从高处跌落下来,都会在瞬间处于失重状态。卫

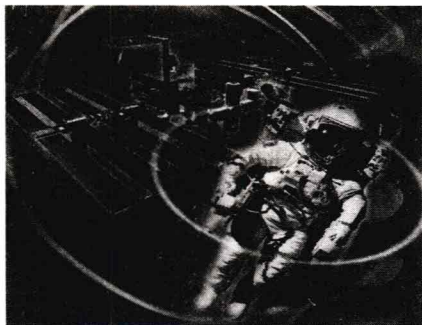


图 1 组建中的国际空间站

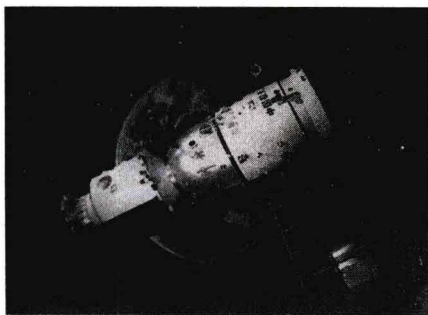


图 2 中国的“神舟号”飞船

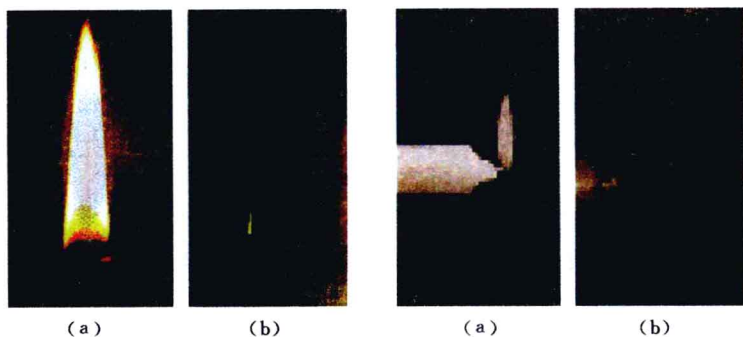
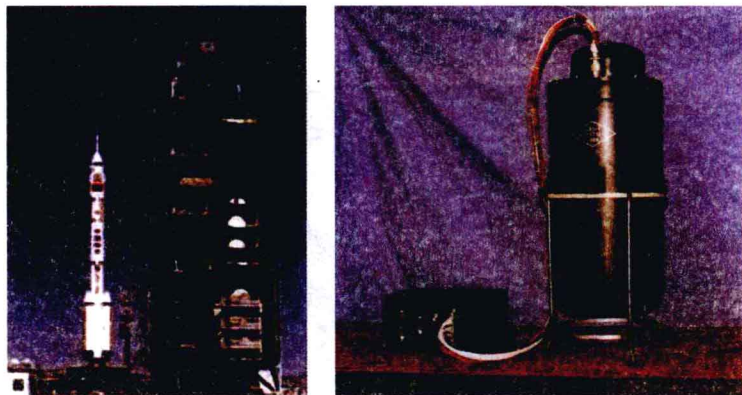


图3 燃烧现象的天地之别:(a)地面
(b)太空

星、飞船、空间站等航天器上的各种仪器设备,当它们在外层空间沿轨道飞行时,由于环绕地球旋转产生的离心力和重力近似达到平衡,都长期处于失重状态中。随着研究的深入,人们逐渐认识到所谓的“失重”、“零重力”或“无重力”的环境是无法实现的。由于某种因素的干扰,会造成重力加速度的变化,总是有微小的残余重力存在,不可能形成完全真正的“零重力”环境。因此,从科学和规范的角度来看,称“微重力”更为确切。

多年来,人们在重力场中已经形成了许多传统的物理概念,并推导出一些公式,形成了物理规律,似乎已经建立起不可动摇的理论体系。但是,在空间微重力条件下,以往的科技知识就显得十分贫乏了。以司空见惯的燃烧现象为例,在地面重力环境中,点燃的蜡烛会熊熊燃烧,呈现如图3(a)所示的火焰。而在空间微重力条件下,点燃的蜡烛会呈现出如图3(b)所示的状态,这是由于在微重力条件下,重力引起的对流效应受到抑制,火焰得不到氧气的供给因而无法持续燃烧。再例如,在地面装有油、水和沙粒的试管中,沙粒总是下沉,而油滴总是上浮。而在空间微重力环境中,沙粒并不下沉,油滴也不上浮,三者可以实现均匀混合。总之,在微重力环境中,很多物理概念,包括流体中的对流与沉淀效应、浸润现象、热交换规律、摩擦及电泳等物理过程,都必须重建新的物理模型,总结新的规律,创建新的定理或定律。

图4 待发射的“神舟3号”飞船(左)和飞船上的多工位晶体生长炉(右)



空间的这种极其特殊的环境条件可以转化为人类可利用的宝贵资源,成为众多领域开展深入研究的有效工具。仅以空间材料科学研究为例,在空间环境下制备具有重要科学和应用价值的少量贵重材料、关键的技术材料,以满



足高新技术领域对特殊材料的需求,同时还可获得在地面用传统方法不能制备或合成的新型材料等。

发达国家对空间材料的科学研究一直给予高度的重视。自1969年前苏联发射的“联盟6号”飞船首次搭载了名为“火星”的空间材料实验装置以来,经过几十年的不懈努力,国外空间材料科学领域已经取得了一批研究成果,并展现出美好而诱人的应用前景。

我国的空间材料实验装置研制始于20世纪80年代末,虽起步较晚,但已取得长足发展。在我国载人航天工程中,应用系统的多工位晶体生长炉就是一种适合在“神舟号”飞船上进行空间材料生长研究的通用装置。该装置由中国科学院上海硅酸盐研究所等单位联合研制,能在一次空间飞行任务中完成半导体光电子晶体、氧化物功能晶体、金属及合金、非晶与复合材料等多种不同材料的空间实验需求。该装置曾先后参加了我国“神舟1号”、“神舟2号”和“神舟3号”飞船的空间飞行实验。在3次空间实验中,多工位晶体生长炉技术状态良好,圆满完成了空间飞行实验任务。



图5 “神舟3号”飞船上制备并安全回收的实验样品

(刘 岩)



航天器“头盔”的防热材料

当你在夏夜纳凉的时候,一定见到过划破夜空的流星。它那短促而明亮的光辉像昙花一现,瞬即消逝。大家知道,这是流星与大气摩擦生成的高温使流星燃烧而发出的光焰。

有人曾经计算过,一个质量仅 1 千克的流星,如果用第一宇宙速度(每秒 7.91 千米)冲入大气层,相互摩擦生成的总热量竟高达 117 万焦耳。实际上,大多数流星的速度要比第一宇宙速度高,摩擦生成的热量当然足以把流星烧成灰烬了。

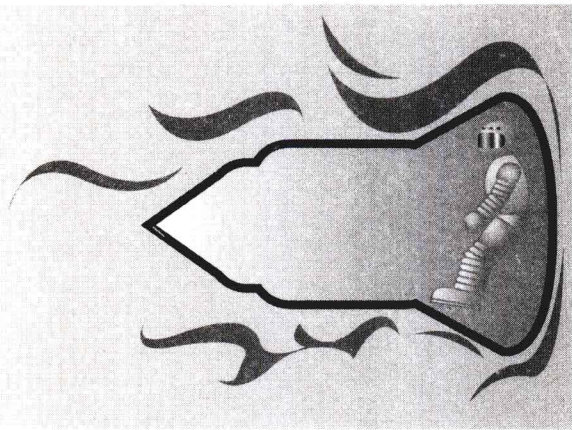
航天器、宇宙飞船(载人或不载人)或者洲际导弹返回地球时也要经历与流星类似的遭遇。而且,由于宇宙飞船舱和洲际导弹的质量大得多,摩擦生成的热量就更惊人了。以一艘几吨重的宇宙飞船来说,当它以每小时超过 20 000 千米的速度(略大于音速)重返大气层的时候,它的能量抵得上 40 列满载疾驰的火车,这些能量都将在宇宙飞船舱返回地球稠密大气层过程中,由于与空气摩擦而转变成惊人的热能,以致在宇宙飞船头部附近的空气温度竟高达摄氏五六千度以上。我们通常称之为气动加热。难怪有人把宇宙飞船重返大气层比喻成闯过“火烧关”。

所有元素中碳的熔点最高,也只有 $3\,700\text{ }^{\circ}\text{C}$,实在难以经受“火烧关”的考验,还是大自然给了我们解决这一难题的启示。当人们分析陨石——这些宇宙中飞来的“不速之客”的化学成分时,有趣地发现陨石的表面虽已发生过熔融,但里面的化学成分并没有发生明显变化。这个现象

告诉我们,陨石下落过程中尽管表面经受几千度的高温而炽烈地燃烧,但由于穿过大气层时间很短,摩擦生成的热量都消耗在陨石表面的燃烧中了,传到陨石内部的热量很少。

那么,我们可不可以给飞船或洲际导

航天器头盔示意图





弹的头部戴上一顶特制的“头盔”，让重返大气层时产生的巨大的气动热绝大部分消耗在“头盔”上，从而保护飞船和导弹安然闯过“火烧关”呢？循此思路，人们找到了一种防热材料做成的“头盔”，帮助飞船和导弹闯过了“火烧关”。

防热材料种类不少，但都有一些共同的特点：导热系数低，即隔热能力大；比热容大，即每克物质升温 1°C 所需要的热量多；热发射率大，即材料向外辐射热量（散热）的本领大。这些都大大减少了通过防热“头盔”传导到飞船或导弹头部内的热量。不过最主要的是防热材料都有共同的“看家本领”：当防热“头盔”高速闯入稠密大气层进入“火烧关”的时候，防热材料受热从固态变成液态的熔解热，从液态变成气态的汽化热，或从固态直接变成气态的升华热都很大，从而在防热“头盔”不断烧蚀过程中能吸收大量的热量。第一层烧蚀掉了，第二层再烧蚀……每一层都吸收了大量的热，就是不让气动热量大量传入飞船或导弹内部。最后，防热材料虽然“粉身碎骨”，“壮烈殉职”，却使飞船和导弹闯过“火烧关”，安然返回地球。这种“风格很高”的防热材料也称为烧蚀材料。

前苏联发射的“东方3号”宇宙飞船的宇航员波波维奇曾绘声绘色描述了飞船进入大气层时防热材料烧蚀的壮丽情景：透过舷窗看到了烟雾，然后又看到了火焰，颜色极其壮观，有红色的、金黄色的、蓝色的，同时还伴有“噼啪”声，而这时飞船内温度却始终维持在正常水平。

烧蚀材料有的是有机和无机材料的复合材料，有的则是无机材料的复合材料，但都含有纤维材料。这是因为飞船或导弹头部高速冲入大气层时，除掉高温高热外，还有速度快得可怕的气流从它表面上冲过去，就是所谓超高速超高温气流冲刷，纤维能起到一种像骨架那样的补强作用。烧蚀材料中的有机树脂则由于易产生升华，所以是一种飞船常用的能消耗大量热量的材料。洲际导弹进入大气层速度更快，对烧蚀材料的要求更高。

航天器的防热“头盔”的厚度要恰到好处。太薄了，在通过大气层烧蚀时会烧穿，造成船（弹）毁人亡的严重后果；太厚了，重量增加，减少了航天器的有效载荷。因此，防热“头盔”的厚度和重量要通过大量实验的热计算，进行精打细算地设计，做到“斤斤计较”，因为每增加一份重量，运载火箭的推力就要增加“几十倍”。

（奚同庚）

宝石世界

说起宝石,人们立刻就会在脑海中浮现出那些五光十色、晶莹剔透的颗颗小玩意儿,要知道在世界上已经发现的2 000多种矿物中,仅有少数几十种矿石能切出宝石来。由于宝石的瑰丽、稀罕、珍贵,古代人们曾把它看作是伟大、神秘力量的源泉,以至把宝石佩带在身上,作为克邪护身的法宝。宝石还是一种艺术珍品,与古董、钱币、邮票一样备受收藏家的宠爱,当然更多的宝石是作为装饰品而存在的。随着人造宝石技术的发展 and 人们生活水平的提高,宝石除了制作传统饰品外,现在甚至连钢笔套、别针、眼镜框架、领带夹针上都要镶嵌几颗宝石。

硬度是宝石最基本的条件,如果宝石太软,就很容易擦伤,甚至被破坏。享有“宝石之王”美称的金刚石就是因为它的硬度在迄今发现的矿物中是绝对的冠军。不言而喻,宝石的颜色也是十分重要的,有时两颗宝石就是因为颜色的差别,可使它们的价值有天壤之别。颜色是由于材料对光的吸收的不同而形成的,阳光是由红、橙、黄、绿、青、蓝、紫七种颜色的光混合而成的,阳光射入红宝石时,其中的蓝黄绿等颜色光被它吸收,剩下的红光射入人们的眼中而使人感觉到红色。无色宝石不吸收射入的光,金刚石就是一种无色宝石。有时,由于宝石中含有各种杂质而使它着色,例如水晶就有绿色、紫色、棕色等多种颜色。

从矿中开采出来的宝石,必须经过精心加工,才能成为漂亮的装饰品。对于无色宝石来说,它的加工尤为重要。例如金刚石俗称钻石,它的身价昂贵,除了上面讲的“坚硬无比”之外,就是它的五光十色。光学上有一种叫做色散的现象,例如一束白光通过一个玻璃棱镜后,分成了红、橙、黄、绿、青、蓝、紫七道光,



红宝石和
蓝宝石饰品



这就是色散现象。经过特殊的设计和琢磨,将钻石表面加工成许许多多小面,光线射入钻石后,就会出现很强的色散现象,因而人们就看到了五颜六色。金刚石之所以光耀夺目是因为它有很强的折光本领,光线射入金刚石后经过折射,强烈地作用于人眼,人就看到了它璀璨夺目的光彩。目前,宝石的加工技术已经达到了登峰造极的地步。利用电脑控制的全自动设备按预先设计的图案,在一颗小小的钻石上竟然能奇迹般地加工出一百多个小面。现在,连不太昂贵的宝石也普遍采用这种刻面技术,使宝石更加惹人喜爱。

随着人们生活水平的提高,自然界埋藏的宝石远远满足不了人们对装饰的需求。早在17世纪,科学家们就开始对各种各样的矿物进行了研究,并在实验室里模仿各种地质

成矿条件,进行人造宝石的研究。在人造宝石的大家庭中,最早问世的是红宝石。1900年法国化学家维纳尔发明了生成红宝石的技术,图1是他最早使用的炉子,图2是这炉子的示意图。上方料仓中的氧化铝粉经敲击落下,经氢氧焰高温熔化后,滴落在下方的支座上冷却析晶,就得到了红宝石。现代人造红宝石的生产仍沿用着这种古老的工艺原理,当然生产控制是很自动化的。人造红宝石的性质与天然红宝石没有多大差别,单凭肉眼是很难鉴别的。与此同时,人们还培育出了白宝石、尖晶石等宝石。白宝石与红宝石都是氧化铝单晶体,只是红宝石中含有少量的铬,使它变成了红色。

天然的金刚石是很少的,更不用说是大颗粒的金刚石了。19世纪初,意大利佛罗伦萨科学院的几个院士打算用放大镜对它的折光性能进行研究,当聚焦后的太阳光照到金刚石上时,突然冒出一缕青烟,转眼间金刚石就不翼而飞了!后来才弄明白,金刚石是地壳内部的碳在高温高压条件下经过漫长岁月而变成的。经过科学家们的努力,1955年美国一家公司宣布在高温超高压设备中合成出了人造金刚石,它的硬度和发光



有色宝石头饰



本领与天然金刚石一样,但当时得到的人造金刚石的颗粒是很小的。现在虽然细颗粒人造金刚石的生产技术已经成熟,但由于生成大颗粒人造金刚石的技术要求高,难度大,得率低,所以大颗粒的人造金刚石的价格也十分昂贵。

宝石级的金刚石的制造十分困难,所以人们一直在寻找金刚石的代用品。20世纪80年代,前苏联科学家发现了一种以氧化锆为主要成分的人造宝石,他们在实验室里模拟火山喷发的装置,在 $3\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度下,使锆和其他组分生成化合物,然后逐渐冷却得到了氧化锆宝石。这种氧化锆宝石的光学性质与金刚石十分接近,色散本领比金刚石还好一点,硬度虽不及金刚石,但也不软,特别是价格较便宜,所以很受人们欢迎。

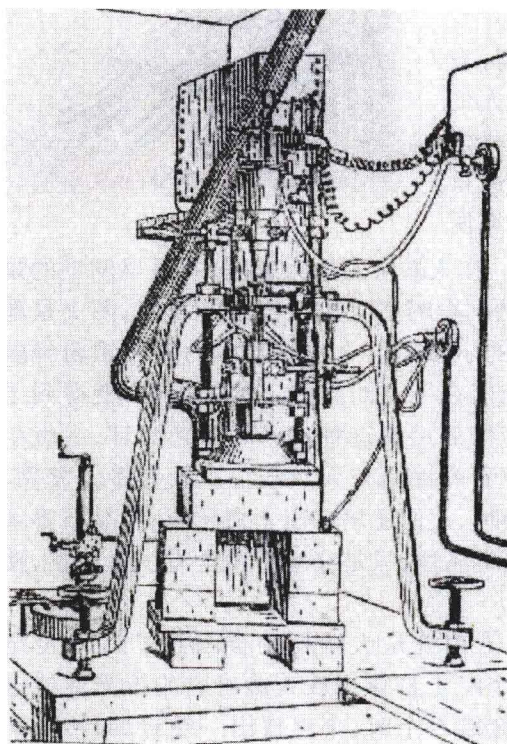


图1 维纳尔最早使用的焰熔炉

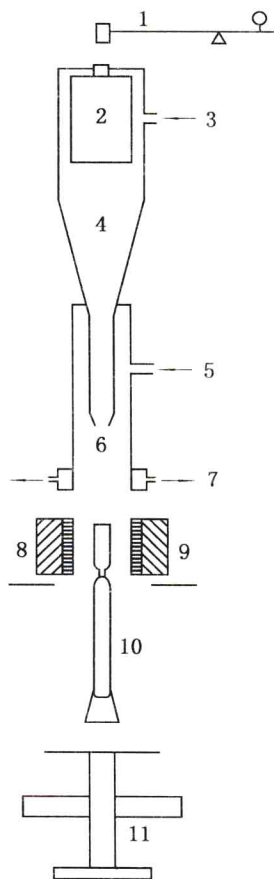


图2 维纳尔焰熔炉示意图

在宝石制造过程中,人们还想方设法做成不同颜色的宝石,即在制造

