

# 现代玻璃材料科学之父

## 奥托 肖特

吴 限

(德国弗莱贝格工业大学 09599)

### 1. 引言

玻璃作为一种常见的无机固体材料,已被人们使用了几千年,埃及、美索不达米亚、中国、欧洲都有关于当地早期玻璃制造和使用的考古发现。今天,玻璃已然渗透到了人们生产生活中的各个领域,小到温度计,大到空间望远镜,可以说,当今世界已经离不开玻璃。回看历史,实际上在很长一段时间里,玻璃的用途极为有限,人们主要将其用作装饰物、工艺品、器皿和建筑材料等,其制造工艺在很大程度上依赖着玻璃匠人代代相传的经验方法。直到19世纪中后期,情况才开始有了明显改变,玻璃的种类和用途开始迅速扩大,一系列特种玻璃相继问世,玻璃工业随即“量子跃迁”成了极具创新力和拥有广阔应用前景的工业新领域,而促成这一变化则主要归功于当时的一位德国科学家和企业家,正是他开创了用现代科学方法来研究和开发新型玻璃,从而赋予这个具有数千年使用史的传统材料以无以伦比的活力,此人就是本文所要叙述的现代玻璃材料科学之父——奥托·肖特(Otto Schott)。

### 2. 肖特早年生涯——从出生到博士

肖特1851年12月17日出生在德国西部的维滕市,其父亲西蒙·肖特(Simon Schott)是个传统的玻璃工匠,与人共同经营一个玻璃作坊。这样的家庭环境显然对肖特今后的职业生涯产生了重要影响。1858至1865年间,肖特在出生地维滕接受小

学和职业中学教育。1867至1869年,他在离维滕不远的哈根市的皇家省级职业学校继续接受教育,该校重视自然科学,肖特在此对物理和化学产生了浓厚兴趣,据肖特回忆,对于这两门科目,他始终能够取得优异的成绩。毕业后,肖特游学于法国北部,在那里参观了包括化工厂、玻璃厂和煤矿在内的多家企业,并结识了一位来自西门子公司(该公司不是指通常所说的电器西门子公司,而是由西门子家族的第一成员掌管的玻璃制造厂,当时以开发出新型玻璃熔炉而闻名)的工程师,他们彼此间产生信任,这位工程师带肖特前往比利时,并在那里又参观了熔炉制造厂和制镜厂。回到德国后,肖特以志愿者身份在哈根附近的一家生产酸碱盐的化工厂工作,该厂的主管埃尔伯斯(L. Elbers)是大名鼎鼎的德国分析化学家——伏累森纽斯(C. Fresenius)的学生,他向肖特传授了化学定性和定量分析的相关知识。

1870年,肖特前往亚琛工业大学,开始了他的大学生涯。在亚琛,肖特选择化学作为他的专业方向,在那里工作的兰多尔特(H. Landolt)教授给他留下了深刻的印象。兰多尔特是德国著名化学家,以用物理方法研究化学而著名,他与伯恩施坦(R. Börnstein)一同编撰的《物理化学数据表》乃是自然科学领域的经典文献。而肖特所欣赏的正是兰多尔特将物理与化学相结合的研究思路。在亚琛期间,肖特在兰多尔特的实验室用容量法对锌进行了分析测定,并将结果发表在《伏累森纽斯分析化学学报》上,这应该是肖特发表的第一篇科学论文。

1873年,肖特转至维尔茨堡大学,目的是为了追随在那里任教的工业化学家瓦格纳(R. Wagner)。但是,令肖特没料到的是,瓦格纳在维尔茨堡大学没有自己的实验室,其研究偏重理论而非实践,对于这一点,肖特感到颇为失望,于是便又转到莱比锡大学,在那里加入了农业化学家克诺普(W. Knop)的实验室。克诺普非常信任肖特,甚至允许他在实验室从事玻璃方面的研究。

肖特毕业心切,很快于1874年6月19日向莱比锡大学哲学系提交了关于玻璃制造的博士论文(莱比锡大学建于1409年,是一所年代久远的德国传统大学)。论文主审人为柯尔贝(H. Kolbe)和施托曼(F. Stohmann)。柯尔贝是当时很有名望的化学家,曾首次合成出醋酸,并首次在化学中提出“合成”概念,1865年担任莱比锡大学教授之前,一直作为德国化学泰斗本生(R. Bunsen)的继任者在马尔堡大学任教。初阅肖特的论文后,柯尔贝一方面觉得自己对玻璃制造方面知之甚少,想听听施托曼的意见,另一方面也指出,该论文的文字表述不够专业。施托曼则认为,论文总的来说没有问题,建议批准答辩。然而,柯尔贝在读完整篇论文后再次提出意见,认为肖特论文的文字表述有严重问题,完全不符合一个经过专业训练的化学家的标准,要求作者拿回去修改。肖特作修改后,提交柯尔贝,柯尔贝看后将其直接退回,理由是只有第一部分作了修改,而其余部分则没动。同年12月16日,肖特将论文第二次正式提交莱比锡大学哲学系,主审人为柯尔贝和齐尔科(F. Zierkel),这次,柯尔贝给的评语措辞更为严重,认为肖特缺乏取得博士学位的基本能力,明确表示不予通过。齐尔科也表示不予通过,审核团其他成员大也都给予差评。柯尔贝甚至建议哲学系不要将论文退还肖特,以免肖特拿它向别处提交博士申请,但肖特还是想办法要回了自己的论文。在导师克诺普的建议下,肖特于1875年1月13日将论文递交给耶拿大学哲学系(耶拿大学建于1558年,同样极富历史传统),经过审核团12名成员的评议与审核,最终认为肖特的论文合格,可以进行答辩。其中,化学教授高特(A. Geuther)评论道,肖特通过自己的实验,对玻璃的形成和去玻璃

化从基本层面作了详细阐释,论文没有问题,准予答辩。答辩在同年2月6日下午3时进行,考官为化学教授高特、数学与物理教授斯奈尔(K. Snell)以及自然史、矿物学和地质学教授施密特(E. Schmid)。结果肖特顺利通过答辩,当天即获得了博士证书。

肖特的博士论文题为《论玻璃制造的理论与实践》,共60页。引言部分的第一句写道“玻璃制造一直缺乏科学研究”,一针见血地指出当时该领域存在的问题。论文主体列为三部分,分别从原材料、熔融和结晶产物方面进行了详尽阐述。在原材料部分,肖特提议使用硅酸钠或使用石膏、硫酸钠和碳的混合物,以减少硫元素的损失。在熔融部分,肖特将此过程划分为两个阶段,即真熔融过程和澄清过程,前者是化学过程,后者则主要是物理过程,通过实验证明,只有通过缓慢加料,才能达到完全熔融状态,从而避免缺陷的生成。肖特还仔细研究了硫酸盐熔融过程中发生的化学变化,证实了硫酸盐与一氧化碳反应,产生出二氧化碳。最后,在结晶产物部分,肖特研究了所谓的去玻璃化即玻璃结晶现象。在此,他将表面结晶和整体结晶区分开来,并提出了其可能的机理。他认为,玻璃是晶态硅酸盐溶于非晶态硅酸盐的固态溶液,结晶过程即为前者析出过程,他力图从分子动力学角度进行解释,并通过实验予以证明。肖特还在论文中精心绘制了许多插图,配合文字说明所述论点(图1)。

总体而言,肖特的博士论文尝试通过科学理论和科学实验,对玻璃制造过程中所观察到的现象作出基本层面的解释,并提出改进措施,按照今天的标准,乃是一篇富有创新思想的研究型论文。该论文之所以被莱比锡大学的审委会“封杀”,现在看来主要有如下几个原因:首先,玻璃制造在当时被看作一门技术,而非科学(正如肖特博士论文第一句所强调的),当时的一些较传统的科学家不太能接受一篇论文涉及较多的“技术”问题。其次,论文主审人柯尔贝虽然学术名望颇高,但也以其对学术新思想不够宽容而著名,例如,当年轻的范特霍夫(J. van't Hoff,第一届诺贝尔化学奖获得者)提出碳的立体化学概念时,柯尔贝便不分青红皂白地嘲笑他的观点,不把他放在眼里,而后来事实证明,范特霍

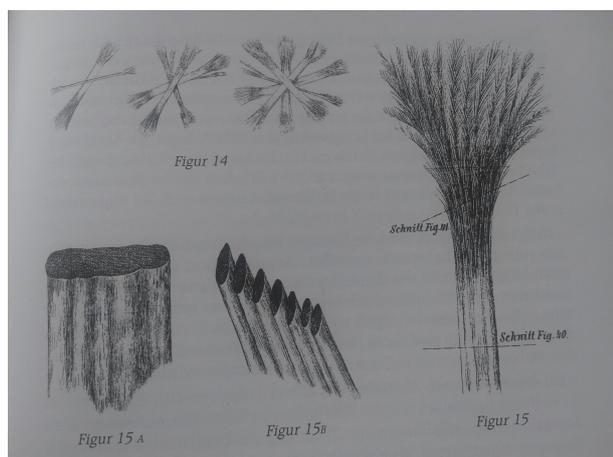


图1 肖特博士论文中的一些描述玻璃结晶的插图(图片来源: Jürgen Hendrich, Otto Schotts Dissertation Jena 1875, Jena: Verlag Dr. Bussert & Stadeler, 2001)

夫是对的。另外,柯尔贝在成为教授之前,曾担任科学编辑和作家,说明其文字功底很强,他拿自己的文字水平来衡量肖特的论文,于是得出了上文提到的负面结论。第三,肖特毕业于一所职业中学,而非更高一级的文理中学,这使得其简历看上去不够“上档次”,给论文审核带来了负面影响,关于这一点,肖特自己曾有所提及。实际上,这种“简历偏见”在现今的德国社会依然存在。受肖特耶拿玻璃基金会资助,由耶拿大学保管的肖特博士论文被加以编辑整理,于2001年由德国布萨特-施塔德勒出版社以书籍形式重新出版。

### 3. 耶拿三杰——蔡司、阿贝和肖特

取得博士学位后,肖特回到之前离家乡不远的化工厂,在那里从事玻璃研究至1878年,之后干脆把家中的地窖和阁楼当作实验室,继续开展他的研究工作。1875~1881年间,肖特发表了多篇论著,包括《玻璃熔融的化学过程》和《关于普通玻璃的结晶产物》(这两篇的内容分别是其博士论文的后两部分,稍作修改)、《关于玻璃的组成》、《关于玻璃与硬玻璃的冷却》、《玻璃制造中从硫和格劳布盐获取石膏》、《玻璃硬化研究》以及《关于无机熔融化合物——一系列化学晶体学研究》。颇有意思的是,上述最后一篇论著由德国布伦瑞克市的费维克出版社出版,该出版社以擅长出版科学著作闻名,历史

上曾出版过不少化学经典专著,而当年强烈批评肖特的柯尔贝曾在那里担任科学编辑。

尽管已不在耶拿,但肖特与耶拿似乎缘分未尽。1879年,他给耶拿大学的物理教授阿贝(E. Abbe)写信,说他最近制得了一种锂成分含量较高的轻质玻璃,可能具有优异的光学性能,请阿贝帮助检测一下该玻璃的物理性能,并随信寄去了样品。阿贝这个名字在物理界并不陌生,光学里著名的阿贝公式( $d = \frac{\lambda}{2n \sin \alpha}$ )就是以他命名的(图2)。阿贝1840年1月23日出生于爱森纳赫,1857~1861年间在耶拿大学和格廷根大学学习物理和数学,并在格廷根大学取得博士学位,之后前往法兰克福,在那里的物理学会工作,1863年取得耶拿大学数学和物理讲师资格,1870年成为耶拿大学教授,之后还担任过耶拿天文台台长。肖特比阿贝小将近八岁,1879年他给阿贝写信之时,后者已经是享有世界声誉的物理学家。不过,肖特给阿贝写信不仅仅是因为他在光学领域的显赫地位与学术成就,还有一个重要原因在于,阿贝当时与设在耶拿的蔡司工厂关系密切。蔡司公司如今是世界上赫赫有名的光学仪器和



图2 耶拿市路边竖立的纪念阿贝及其公式的石碑(球上刻有阿贝公式)(作者摄于耶拿)

精密机械制造商,以其创立者蔡司(C. Zeiss)命名。

蔡司于1816年9月11日出生在离耶拿不远的魏玛市,1834~1838年在耶拿大学机械师科纳(F. Körner)门下做学徒,并在此期间聆听了不少大学数学和自然科学的课程,但蔡司并没有走学术道路,而是按照既定的人生规划成为了一名机械师。1838~1845年间,蔡司游学并工作于斯图加特、达姆施塔特、维也纳和柏林,扩充了自己在物理、数学和机械方面的知识。1845年,他回到耶拿,并于次年开办了一家机械作坊,此即为今天蔡司公司的前身。1847年,蔡司制造了他的第一架显微镜,此后,显微镜就一直是蔡司厂的重点产品。1866年,蔡司开始与比他年轻24岁的阿贝正式合作,后者凭借其扎实的光学理论知识帮助蔡司改进和优化显微镜的制造。两人合作非常成功,蔡司工厂在短短几年之内发展成为当时世界上最先进的显微镜制造商。1875年,蔡司慷慨地让阿贝成为公司的合伙人,阿贝从此进入蔡司公司的管理层。

正是在这样的背景下,肖特给阿贝写了上述信件。阿贝对肖特寄来的玻璃样品做了相应的检测后,回信说道,该富锂玻璃在光学性能上并不比其他玻璃优异,不过,却具有极高的均匀度,此种均匀度甚至连当时最好的玻璃厂也无法做到。肖特的此次主动询问无论如何引起了阿贝对他的注意,事实上,此时的蔡司公司正遇到了技术瓶颈,他们所生产的光学仪器的性能已无法进一步提升,其原因就在于缺乏可以胜任的玻璃,要知道,玻璃可是光学仪器的核心部件。在玻璃供应方面,蔡司公司没有自己的生产加工厂,完全依靠从外部买进,而当时世界上没有一家工厂可以生产出满足蔡司公司为提升光学仪器性能而需要的特种玻璃。阿贝考虑到,既然肖特精通玻璃化学,可以让他尝试先以实验的方式制备出一些新型玻璃,看看性能如何。1881年1月,肖特和阿贝在耶拿碰面,制订了合作计划,肖特将通过改变玻璃的化学组成,力图得到符合蔡司公司要求的性能优异的新型玻璃。他分别试验了磷酸玻璃,硼酸玻璃,硅酸玻璃和硼硅酸玻璃,经历了多次失败后,终于在制备第93号

样品时得到了令人满意的结果。

双方的合作取得重大进展后,肖特于1882年1月移居耶拿,开始了与蔡司公司的深度合作。同年3月,阿贝和肖特将研究结果递交给费斯特(W. Foerster),后者是柏林天文台台长和德国皇家标准计量委员会会长。经费斯特的推荐,普鲁士文化部决定全力资助肖特的研究,但同时要求肖特解决当时的一个棘手问题——温度计零点误差。肖特很快找到问题所在,发现如果玻璃中同时含有钾和钠,就会产生零点误差。1884年,肖特通过改变配方,成功制造出所谓温度计标准玻璃,大大提高了温度计的精确度。1885年7月23日,肖特、阿贝和蔡司父子在耶拿正式成立肖特及同伴玻璃技术实验室,后来发展为肖特及同伴玻璃厂以及今天的肖特股份公司。蔡司、阿贝和肖特之间相互合作、相互信任,不畏艰难共同开辟玻璃材料新领域的成功故事,已被作为科学技术史上的经典佳话而广为传诵。2016年9月11日,值蔡司200年诞辰之际,耶拿市举办了卡尔·蔡司日的专题活动,活动期间,特意给前来参观的市民们制作并赠送了蔡司、阿贝和肖特的纪念牌(图3)。

#### 4. 从实验室到股份公司——引领现代玻璃材料

1886年,肖特的实验室已能生产四十多种光学玻璃以及上文提到的新型温度计玻璃,名曰“耶拿



图3 耶拿三杰(上为蔡司,左下为阿贝,右下为肖特)(作者摄于耶拿)

标准温度计玻璃”，这种玻璃含元素锂，几乎不受热膨胀影响，是理想的温度计材料。肖特和蔡司公司的紧密合作很快使得所生产的特种玻璃种类迅速扩充，包括各种耐热，耐压，抗腐蚀玻璃和满足特殊要求的光学玻璃和医用玻璃，为肖特赢得了世界声誉。到1900年，产品已有一半销往国外，肖特的玻璃成为许多领域不可或缺的材料。1918年，推出高级家用耐热玻璃，后以商品名 Jenaer Glas® (耶拿玻璃)在市场上销售，成为玻璃材料中的经典品牌。1920年，肖特及同伴玻璃技术实验室更名为肖特及同伴玻璃厂。肖特自己于1926年退休，1935年8月27日，在耶拿去世。

二战之后，美国为了防范当时苏联获取技术资料，将肖特厂最重要的高职人员和玻璃专家迁往德国西南部(人称“41个玻璃工的迁移”)，他们于1950年开发出著名的实验室玻璃品牌 DURAN®。如今，DURAN®玻璃仪器在德国高校和研究所仍得以普遍使用。1952年，新肖特厂在西德的美因茨成立，而留在耶拿的老肖特厂在东德依然被保留。东、西德合并前，新老肖特厂同时存在并彼此独立运营(蔡司厂也经历同样的命运)。东、西德合并后，西德肖特接管东德肖特，从此肖特玻璃厂又恢复成一家，总部在美因茨。2004年，肖特玻璃厂正式更名为肖特股份公司。今天，位于耶拿的厂区依然保留着当年肖特住过的房子，里面的照片和实物生动展示了肖特的生平和肖特厂的历史(图4)。除此之外，厂区内还建有一座现代化的玻璃博物馆，参观者可以学习到不少关于玻璃材料的知识。该博物馆设计得颇为精良，里面不但有大量的文字图片和实物展示，而且还有不少多媒体演示设备，旁边的开关被精心地制作成玻璃沙漏，参观者将沙漏翻转180度，屏幕上即开始放映相应的节目，同时沙漏里的沙开始掉落，沙掉落完毕，视频也正好放完，下一个参观者只需再次将沙漏翻转180度，便可以观赏视频了。而沙漏里的沙子意指玻璃材料的主要原材料——二氧化硅。十分难能可贵的是，该博物馆和肖特故居均向公众免费开放。

## 5. 肖特成功之道——执着+创新+主动

回眸肖特的一生，他的成功除了家庭环境的影



图4 肖特故居(作者摄于耶拿)

响以及阿贝和蔡司的帮助和合作等外部因素，笔者认为，更重要的还是在于他自身的因素，总结起来，有如下几点：

1)对自己从事的研究领域的执着。肖特在莱比锡大学提交博士论文失败，并饱受著名学者对其能力的多番指责，可他没有就此失去信心、停止脚步或是转向其他领域，而是仍坚持走自己的道路，继续在玻璃制造领域进行着前人未曾做过的科学探索。即使在无正式职位且对于未来没有任何把握的情况下，依旧能够坚持在家中继续进行玻璃研究，足以见得他对自己所从事领域的热爱与追求。这样的执着精神可不是所有人都具有的。

2)学科交叉型的创新思维。在肖特之前，玻璃制造是一个纯技术领域，其生产工艺大都以传统经验为基础，玻璃工匠和技术工人似乎从未想到过用科学方法来开发新型玻璃或改进玻璃性能。另一方面，19世纪70年代欧洲的物理和化学学科发展已经达到了一定的高度，而德国在自然科学的许多领域也已经超越英国和法国，涌现出了一大批世界著名的科学家，但他们当中却很少有人将所掌握的科学知识运用于玻璃制造。简言之，当时制造玻璃的人不懂科学，懂科学的人不问津玻璃制造。肖特正是看到了问题之所在，凭借自己的知识与能力将

两个原先毫不相干的领域搭接起来,从而开创出了一片新的天地。

3)主动寻找机遇。肖特为推广自己的研究成果,主动将样品寄给给物理学家阿贝,在此之前,他一定做过一番调查研究,认为按阿贝当时的工作领域和职位身份,尤其是他跟蔡司公司的关系,应该会对新型玻璃产生兴趣。后来果然不出其所料,得到阿贝和蔡司的重用,从而造就了科学史和企业史上的一段佳话。如果不是肖特当年的主动出击,历史可能就是另一番景象。积极寻找机遇和创造机遇,这点对于那些盼望成功的人而言尤为重要。

## 6. 结语

如今,德国耶拿市有以肖特命名的街道,耶拿大学也设有以肖特命名的材料研究所(图5),当年的老肖特厂依然作为肖特股份公司的一部分矗立在耶拿市内,与蔡司公司相隔不远(图6)。肖特作为耶拿科技史上的三杰之一,获得了这座城市对他的感激与尊敬。但笔者也明显感觉到,当今的德国民众对科学史和技术史的兴趣并不高,耶拿市中心曾举办过有关肖特公司和蔡司公司历史的展览,其中有很多制作精细和难得一见的科技和企业方面的史料,但参观者寥寥无几,而同样的地方如果有绘画展或摄影展,就会有一大堆人围观。之前提到的免

费开放的肖特故居和玻璃博物馆,笔者曾多次拜访,每次里面的参观者都极为稀少,甚至除笔者外别无他人,虽然独占馆厅的感觉很好,但场面如此冷清不得不令人惋惜。这与当前西方发达国家普遍兴盛的反科技(尤其反化学化工)思潮和所谓的环保主义(实为极端环保主义)不无关系。无论将来人类社会向怎样的方向发展,奥托·肖特对现代玻璃材料所作的贡献将作为科学技术发展道路上的里程碑而永载史册。



图5 耶拿大学奥托·肖特材料研究所(作者摄于耶拿)



图6 耶拿市的蔡司公司楼(左)和相隔不远的肖特公司楼(右)(作者摄于耶拿)