

张志中, 朱虎, 张征宇, 2010. 石英丝弹性元件的研究与制作. 震灾防御技术, 5(4): 500—505.

# 石英丝弹性元件的研究与制作<sup>1</sup>

张志中 朱 虎 张征宇

(中国地震局地球物理研究所, 北京 100081)

**摘要** 本文介绍了烧焊熔凝石英的实验设备, 拉制及焊接石英丝、石英弹簧等元件的技术。同时, 还简要介绍了熔凝石英的物理、化学特性和应用情况。

**关键词:** 熔凝石英 石英弹簧 石英丝 焊接

## 引言

1889年, Boys发现熔凝石英可以抽成非常坚韧的微丝, 这种丝具有优良的化学物理特性(斯特朗, 1954)。随后, 他用石英丝代替金属丝, 改进了Michell-Cavendish的扭称, 测出地球的平均密度为 $5.527\text{g/cm}^3$ 。1895年, 他发表了这一重要结果(Bullen, 1975), 石英丝也由此身价倍增。

高纯度、全透明的熔凝石英也称石英玻璃, 采用天然水晶或人工合成的四氯化硅等为原料, 经高温气炼或高温水解等工艺制成, 但因含有氢氧基而影响它的光学性能。上世纪70年代, 发明了高频等离子制造石英玻璃技术, 生产出了不含氢氧基的石英玻璃。而今, 石英玻璃在半导体工业、原子能技术、光学及其他精密仪器、光导纤维、电光源制品及化学分析的实验设备等方面, 得到广泛的应用。

## 1 实验设备

石英工作室要求清洁、照明充足、通风良好。烧焊石英丝元件时, 若沾有尘埃、汗渍或指纹, 烧焊后会影响到它的性能。工作室最好用油漆墙面、水磨石地板, 以便于用水冲洗。石英玻璃的工作温度为 $1756\text{—}1800^\circ\text{C}$ , 超过 $2000^\circ\text{C}$ 便蒸发成气体, 对人体有害。烧焊石英玻璃用氢氧焰, 烧焊工具可用专业2号或3号焊枪, 它的气阀可以调节, 可以控制微量气体, 并配有5—7个不同口径的喷嘴。烧焊细小的石英丝元件要用小吹管, 要备有 $0.1\text{—}0.5\text{mm}$ 不同口径的2、3支吹管, 通常要自己制作。吹管通过橡皮管接在焊枪的喷嘴, 藉焊枪的气阀调节吹管火焰的强度。

实验桌最好用大理石或水磨石台面, 这样不会因工作不慎而烧伤台面。若用木质台面,

**1 基金项目** 地震行业专项(200708003)《核电厂地震安全问题研究》资助

[收稿日期] 2010-05-20

[作者简介] 张志中, 男, 生于1954年。高级工程师。早期从事地震仪器研制工作。现主要从事历史地震和工程地震工作。

E-mail: zhizhong1954@126.com

在近火焰或放置灼热的石英器件处，要衬垫瓷板或大理石板。放置石英丝元件的容器，其底面以深色或黑色为宜，以便于鉴别。烧焊石英玻璃发出的光非常刺眼，含有大量紫外光，故要戴深色眼镜，眼镜最好用灰色镜片，其透光度以 10%—20% 为宜。但普通玻璃也能阻断紫外光，所以廉价的太阳眼镜也可敷用。

实验室要备有 40—200 倍的工具显微镜、螺旋千分卡、游标卡尺、钢板尺，同时还要有镊子、钳子、玻璃钟罩、实验支架等。实验支架应轻便灵活，可以上下升降，前后左右微动，随意调到所需的位置。用实验支架夹固零件并调整好位置，可以保证烧焊的准确性。

## 2 石英杆和石英丝的拉制

拉制石英细杆要用大口径喷嘴的焊枪，根据石英棒料的直径和拉成细杆的粗细调好火焰。石英玻璃的热膨胀系数很小，石英棒不需预热就可以直接放在火焰中加热，不必担心会迸裂。操作时两手平握石英棒，在火焰中不断旋转加热，使其熔接在一起，稍稍拉细，向左或向右移动数毫米至十多毫米，再把它烧熔拉细，使石英棒的中间形成一个眼球体，把眼球体烧熔，在离开火焰时双手拉开，就可得到粗细均匀的石英杆（图 1），石英杆的直径及长度由眼球体的大小及拉杆的速度决定，熟练的操作人员可以正确地拉出所需尺寸的石英杆。拉制直径 0.1—1.5mm 的石英杆并不难，直径 2mm 以上的石英棒商店有售，不需自己制作，拉杆时若石英棒没有熔透或夹有烧结杂物，则拉出的杆是不均匀的。

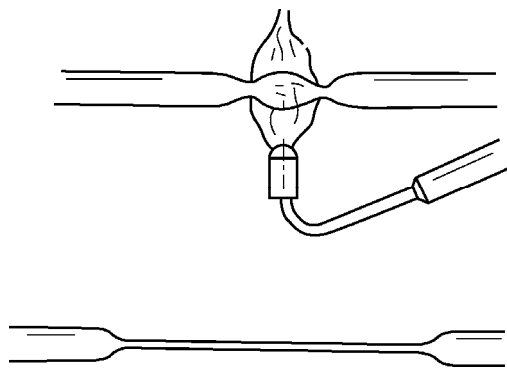


图 1 石英杆的拉制

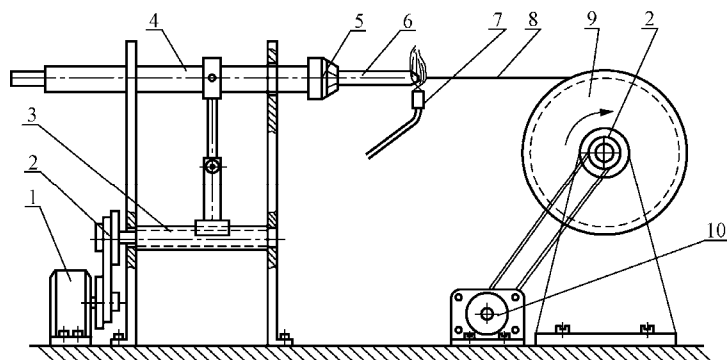
Fig.1 Control of quartz bar

熔凝石英的熔点与沸点很接近，操作时要眼明手快，蒸发的石英粉尘不仅对人体有害，还会在石英棒的表面形成白色烧结层，再次拉杆或焊接要用火焰把它烧净，否则会影响拉出杆子的均匀性及焊接牢度。

拉制石英丝要用纯度为 99.997% 以上无气泡、无气线的优质石英棒料。手工拉制石英丝与拉制石英杆的方法很类似，不过，它不需要先烧成眼球体。先把粗棒中间拉成长十几、二十毫米、直径 0.1—0.2 mm 的细杆，调小火焰，把细杆的某一小段烧熔，在离开火焰的同时双手迅速拉开，便能拉出直径十几至数十微米的长石英丝。烧熔的石英量多少、拉丝速度的快慢，决定拉出丝的粗细。直接拉出 10 $\mu$ m 以下的丝径比较困难，简单的方法是把粗丝放在浓度为 40% 的氢氟酸中腐蚀，可以得到几微米的细丝。经氢氟酸浸泡的石英丝要用氢氧化钾溶液及蒸馏水反复清洗才能使用。这种细丝外表明亮光滑，它的抗断强度和抗扰强度都有一定的提高（Reinkober, 1937）。

手工拉制石英丝成品率较低，并与工作人员的技术熟练程度有关。为了改变这种状况，作者研制了 1 台拉丝机（图 2）。拉丝机由供料机构与拉丝机构两部分组成，供料机构由电机带动蜗轮、蜗杆减速，均匀地把石英棒料送往火焰熔化；拉丝机构由变速电机带动一只旋转的圆盘，它一面拉丝，一面把拉出的石英丝烧在圆盘上。调节进料速度及圆盘的转速，可以拉出不同直径的石英丝。供料棒与拉丝圆盘之间要相距 1m 以上，以保证拉出的丝足够冷却

后再绕在圆盘上，这样拉出的丝是笔直的。这台拉丝机可以拉制丝径 15—100 $\mu\text{m}$ ，长 100 多米的石英丝，任意截取 1m 长的丝，其两端的直径不会差 2 $\mu\text{m}$ 。



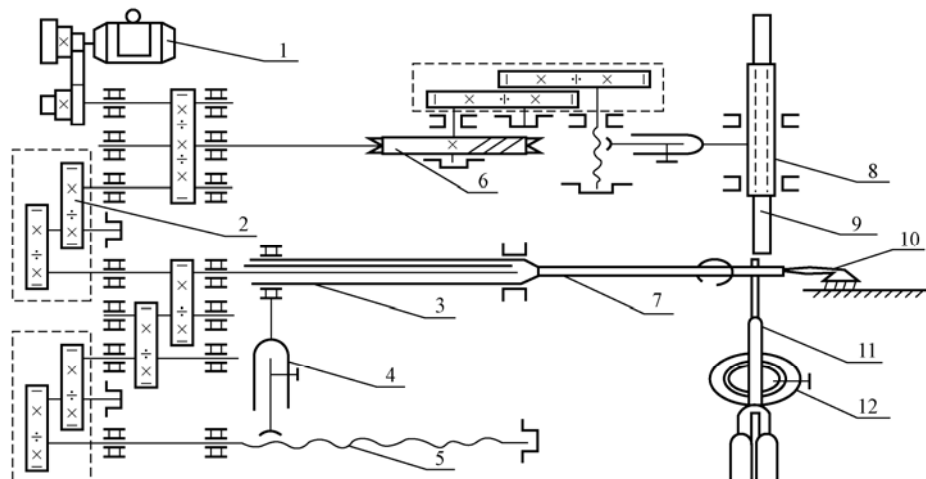
1—电动机；2—塔形皮带轮；3—进料螺杆；4—进料杆；5—三爪卡头；  
6—石英棒料；7—喷枪；8—拉丝盘；10—变速电机

图 2 石英丝拉制机

Fig.2 Drawing of machine for quartz fiber making

### 3 石英弹簧的绕制

为研制石英弹簧重力仪，作者曾研制了 1 台石英弹簧绕制机。绕簧机由 1 台电机带动 3 套变速齿轮，分别驱动供料轴、绕簧旋转轴杆以及绕簧轴前移螺杆（图 3）。供料轴由蜗轮蜗杆减速并改变轴向，不断地供给石英原料。供料石英棒的垂直方向为绕簧轴，其间为焊枪的喷嘴口，把送来的石英棒端头烧熔，进料速度通过变速齿轮调节。绕簧轴由装有键槽滑动配合的轴杆和轴套构成，轴套通过连杆、半开螺母与前移螺杆连接。轴套既能转动又能随前移螺杆的转动在轴杆上滑动前进，绕簧轴固定在轴套的端头，可以拆卸及更换不同直径的绕簧轴，它的转速及移动速度（即弹簧的节距）分别由另外 2 套变速齿轮调节。在绕簧机上能否



1—电机；2—齿轮变速器；3—绕簧轴杆和轴套；4—连杆及半开螺母；5—绕簧轴前移螺杆；  
6—蜗轮蜗杆减速器；7—绕簧轴承；8—供料轴；9—石英棒料；10—顶针；11—喷枪；12—喷枪座架

图 3 石英弹簧绕制机

Fig.3 Drawing of machine for helical quartz spring making

绕制出均匀的石英弹簧，取决于供料石英棒的均匀程度、火焰的强度和位置是否合适、绕簧轴的转速和进料速度的配合。此外，机床要平稳，转速要均匀。该台绕簧机可绕出圈径 5—20 mm、丝径 20—300 $\mu\text{m}$ 、节距 0.1—4mm、圈数达 1000 圈以内的石英弹簧。

## 4 石英丝元件的焊接

焊接细小的石英丝零件是焊接的基本技术，像石英弹簧重力仪这样的灵敏度极高的系统就是由石英框架、石英摆、摆扭丝、石英弹簧等 10 多个石英丝元件烧焊成一体而制成的。限于篇幅，本文仅介绍几种有代表性的烧焊方法。

“T”字形接头：烧制“T”字形接头，先要在石英杆的两头烧焊上保护支架，以防止焊接时石英杆变形。保护支架与石英杆连成封闭的三角形或四边形。然后在石英杆上烧个石英珠，再把石英珠与石英杆烧成一体，杆上便形成一凸出的鼓包，把另一根石英杆烧焊在鼓包上，除去保护支架，便成为完美的“T”字形接头（图 4）。

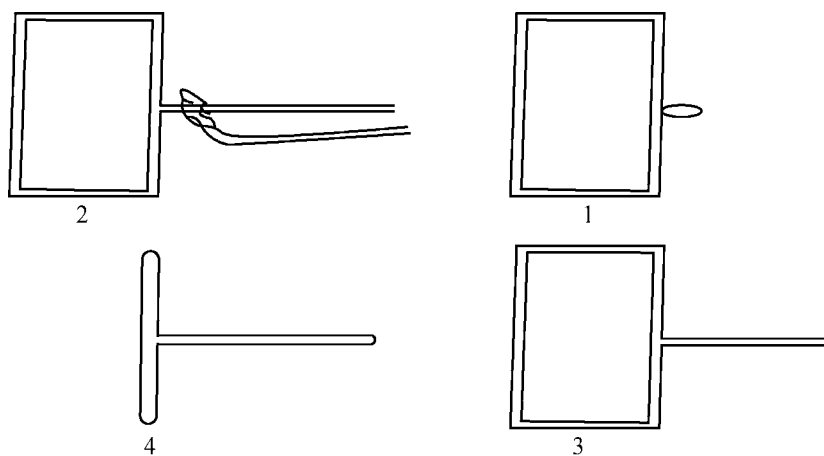


图 4 T 字形接头的焊接

Fig.4 Welding of "T-shaped" joints

石英丝的接头：石英丝又细又光滑，不容易直接固定在其他物体上。把石英丝的两头烧上石英接头，便可以烧焊在石英支架上，或用火漆、虫胶粘结在其他物体上。用小吹管烧焊石英丝的接头比较容易，把石英丝和石英杆靠在一起，用小吹管烧熔石英杆，石英熔化后的表面张力把石英丝收缩进去，离开火焰，同时轻轻拉直石英丝，再把离接头 2mm、3mm 处的石英杆烧下来，便烧成一个石英丝的接头。按同样的方法烧出石英丝的另一个接头。

石英弹簧的接头：选出与石英弹簧丝径相同的石英丝，把它烧在实验支架的石英杆上，在丝的头弯一个直角，弯出的长度与弹簧圈的半径相同，将石英弹簧放在另一只实验支架的石英杆上，石英丝的弯头与弹簧起始头靠在一起，用小吹管把这处烧焊在一起便成，用同样的方法烧弹簧另一端的接头，这样整根弹簧的接头都已接好。

## 5 结语

石英丝及石英弹簧有很高的弹性限度，永久性形变小，能耐高温且热膨胀系数小，熔凝石英粘度系数很小，石英丝和石英弹簧耐耗小，工作时不会因内部分子摩擦而实际损失能量，固有很好的回零性，这是任何一种金属都不具备的，它在地球物理观测仪器中应用很广。所

以有很多仪器,像我们熟悉的磁变仪、石英弹簧重力仪、水氦仪、水平摆倾斜仪等都用石英丝弹性元件制成。如美国 Worden 重力仪、国产 GSM 石英台网重力仪,观测精度可达  $0.1 \times 10^{-8}$  牛顿(毫加),整个重力仪的灵敏度系统(称为心脏部分)包括框架台网、台网、扭丝全部都用熔凝石英丝,而仪器总重只有 3.5kg。另外还有灵敏度为 0.001"的 SQ-71 石英水平摆倾斜仪;灵敏度高达 0.005"的 SSQ-1 数字石英摆倾斜仪及支架吊丝;水氦仪器的石英支架和石英扭丝等。石英丝弹性元件能在许多精密仪器中得到应用,这不仅与石英玻璃优良的化学、物理特性相关,而且也与拉制石英丝的设备简单易置、弹性零件容易制作等原因有关。用石英材料制成的地倾斜仪有灵敏度高、稳定性好等优点,它可以连续记录地面的倾斜变化。例如:观测固体潮并用它研究地球内部的弹性模量;监视地面的倾斜变化以预测地震、火山爆发或矿区由于地下水、天然气及其它有用矿产资源的开采而引起的地面沉降、塌方;观测大地震造成的地动位移并用以研究震源机制;此外还可以用于检查某些要求特殊的基准平台的微小倾斜变化等。

总体而言,石英丝及石英弹簧具有以下优点:

(1) 熔凝石英的热膨胀系数很小,近室温时为  $0.42 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}$  (Kaye, 1910), 有较低的粘滞系数 ( $1 \times 10^6$  泊), 软化温度为 1600—1650 $^\circ\text{C}$ 。用石英玻璃制成的仪器热形变非常小,石英弹簧称可以在 900 $^\circ\text{C}$  以下的高温条件下工作。

(2) 石英丝有很高的抗断强度,除钨丝外没有一种其他金属丝的强度可以与之相比。直径 40 $\mu\text{m}$  的石英丝,其抗断强度为  $5.4 \times 10^{-4} \text{ N/cm}^2$ ,丝越细,其抗断强度越高。

(3) 石英玻璃的内摩擦系数很小,不到金属材料的 1/1000。因内耗很小,用石英丝悬挂的扭摆,振幅衰减非常小。此外,石英丝的回零性能也非常好。

(4) 石英玻璃的比重为 2.20,莫氏硬度为 6—7 度。在常温下,除氢氟酸外,石英玻璃不受其他酸类的腐蚀,用石英玻璃做的仪器架重量轻,硬度高。石英吊丝因不会氧化而寿命很长。

(5) 烧焊石英丝的工作设备简单,容易配置,但工作室的卫生条件非常重要。石英玻璃性能脆、易碎,比较娇嫩,所以在操作或搬运石英玻璃及其制品时,必须小心谨慎。

利用石英丝弹性元件,作者先后制成了高精度石英弹簧重力仪、磁变仪的石英吊丝、航天部门实验用的石英弹簧,监测地壳形变的石英水平摆倾斜仪等。

其缺点是比较脆弱、吸湿性强、弹性温度系数较大,在空气中振动会带电等,但有些缺点如采取一定的措施是可以克服的。

## 参考文献

斯特朗 J., 1954. 物理实验室应用技术. 北京: 商务印书馆出版, 152—174.

Bullen K.E., 1975. The Earth's Density. London Chapman and Hall, 17—19.

Kaye G.W.C., 1910. The Expansion and Thermal Hysteresis of Fused Silica. Phil. Mag. & J.Sci., 6th series, 20: 718—728.

Reinkober O., 1937. Die Festigkeit und Elastizitat Von dunnen Quarzfaden. Physik. Zeitschr., 38(4): 112—122.

## The Making of Quartz Fibers and Helical Quartz Springs

Zhang Zhizhong, Zhu Hu and Zhang Zhengyu

(Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China)

**Abstract** The paper introduces the equipment and method for making quartz fibers and helical quartz springs, as well as the technique for welding quartz fibers and springs. Their physical and chemical properties and the related application situations are also discussed in the paper.

**Key words:** Fused quartz; Quartz spring; Quartz fiber; Welding