激光封接金属与玻璃的研究现状

陈长军[1,2]，徐梦璇[1]，张敏[1]，李雷[1]，唐建[1]

1.苏州大学机电工程学院激光加工中心　江苏苏州　215021

2.哈尔滨工业大学先进焊接与连接国家重点试验室　黑龙江哈尔滨　150001

摘要：玻璃和金属是工业中常见的两种材料，在物理和化学性质上均具有独特的性能。近年来，玻璃和金属的封接体由于其独特的性能而获得了关注，并且应用在医疗、航空航天和微电子等行业中。然而，传统的金属与玻璃的封接技术会导致热物理性质的差异而形成残余应力和界面的连接失效。激光焊接技术具有高精度、能量集中和快速加工的特点，从而在玻璃与金属的加工中得到了迅速的应用。介绍了传统封接金属与玻璃的应用和弊端，并对比分析了激光焊接金属和玻璃的研究进展。还对激光封接金属与玻璃的未来方向提供了思路，可以作为研究和应用激光封接金属与玻璃的一个借鉴。

关键词：激光焊接；封接；金属与玻璃封接体；应用

Recent status of laser welding glass to metal sealings

CHEN Changjun[1,2], XU Mengxuan[1], ZHANG Min[1], LI Lei[1], TANG Jian[1]

1. Laser Processing Research Center, School of Mechanical and Electric Engineering, Soochow University, Suzhou 215021, Jiangsu, China

2. State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, Heilongjiang, China

Abstract: Glass and metals are both common materials applied in various industries, due to their unique characteristics in terms of physicochemical and mechanical properties. Recently, glass to metal sealing components with the attractive and excellent performance have gained popularity, and have been extensively exploited in aerospace, microelectronics and medical. However, conventional glass/metal joining methods often lead to problems involving thermal residual stresses and impaired joint strength owing to mismatches in thermal expansion and interfacial bonding nature. Laser technique with the benefits of high precision, energy concentration and fast processing plays an increasingly prominent role in the joining of glass to metals. This review investigates the applications and limitations of conventional welding methods for the joining of glass to metal. Comprehensive analysis in the progress of research on laser joining glass to metal is critically reviewed. Finally, the article provides an overview on potential future strategies for laser joining of glass to metals, offering a creative thought for the fabrication of glass to metal composite structures. Therefore, this work can serve as the basis for the research of laser joining glass and metals.

Keywords: laser welding; sealing; glass to metal sealing; applied

基金项目：江苏省重点研发计划资助（BE2021049）；先进焊接与连接国家重点试验室开放课题研究基金资助（AWJ-23Z01）。

第一作者：陈长军，博士，教授，从事激光增材制造与再制造和激光焊接的科研与产业化，E-mail：503047820@qq.com。

1 序言

玻璃具有卓越的抗氧化性、耐腐蚀性、高透明度和高硬度等特点，是建筑、医疗和电子产业的重要材料之一。金属材料因其可塑性强、机械强度高和加工性能好等优点，在工业领域应用广泛。然而在很多场合下，单一材料的应用已经难以满足实际生产的需求，因此玻璃需要与韧性高、抗冲击能力强的金属结合在一起[1]，两者组成的复合体不仅可以保证单一材料的优良性能还可以兼备良好的绝缘性、透光性和隔热性等。

高硼硅玻璃具有良好的化学稳定性，且与普通玻璃相比其耐热性能更好、抗化学腐蚀能力更强，常用于药品容器、光学设备、试验室仪器和航空器材等领域，具有良好的推广价值和社会效益。TC4（Ti-6Al-4V）钛合金于1954年由美国研制成功，是世界上开发最早、应用最为广泛的（α+β）钛合金种类。其中Al元素的加入固溶强化了α相，明显提高了钛合金在室温下的强度；而V元素的加入则强化了β相，在提高强度的基础上还能改善钛合金的塑性。由于其较好的综合性能和良好的生物相容性，已被广泛应用于航空航天、汽车和生物医疗等领域[2-4]。这两种材料以复合形式使用，可以为制造业提供更多的可能性，如应用于太阳能真空集热管、手机玻璃盖板和光学器件等领域[5-8]。

现有连接玻璃与金属的方法有很多，但是由于技术固有缺陷或工艺方法上的限制，这些传统的连接技术已无法满足现代快速、持续发展的工业体系对高效率、高质量和低污染的需求。因此，寻找一种能够高效率且高灵活性连接玻璃与金属的新型技术是非常重要的。随着激光加工技术的不断进步，其连接玻璃与金属的潜力受到研究者们的广泛关注。然而玻璃和金属的熔点、热膨胀系数和热导率之间的显著差异，给玻璃与金属的直接焊接带来了很大的挑战。众多学者通过研究提出用缓冲层来减少两者较大的物理特性差异对焊接接头性能的不利影响，从而开发出一种可行的激光焊接工艺，不仅可以为玻璃与金属的可靠性结合提供重要的理论基础，还可以促进激光焊接技术在玻璃与金属结合方面的应用，为激光焊接玻璃与金属的快速发展和产业化应用提供指导。

2 玻璃与金属封接技术概述

随着玻璃与金属封接体应用领域的逐渐扩大，玻璃与金属的连接方法也随之不断发展，在工业制造领域主要包括胶接、机械连接、钎焊、熔封、阳极键合和激光焊接等。

2.1 胶接

胶接[9-12]是通过使用胶粘剂填充玻璃与金属之间的缝隙，利用胶粘剂的化学性质和粘附力形成结合层，实现玻璃与金属的连接。常用的胶粘剂有环氧树脂、有机硅胶、聚氨酯胶粘剂、聚丙烯酸树脂等。胶接工艺操作简单、不需要昂贵的设备支持、适应材料类型广泛。然而，胶接接头强度较低，易受大气湿度、温度和化学物质的影响老化，导致粘接失效。此外，若胶粘剂透明度不高会影响到玻璃的透光性。在存在湿气、高温、化学物质等场合，则不能满足应用要求。

2.2 机械连接

机械连接[13，14]是通过机械力，利用螺栓、螺钉、铆钉等机械元件将玻璃与金属固定在一起的方法。机械连接方式操作简单、结合紧固，适用于需要频繁拆卸的结合件。但是，机械连接需要预先对玻璃和金属进行开孔，会给样件带来损伤。此外，通过机械连接的结合件密封性一般较差。这一封接体一般应用在要求不高的场合，如门窗玻璃、门柜等。

2.3 钎焊

钎焊[15，16]是对熔点较低的金属材料（钎料）进行加热，使钎料熔化而玻璃和金属都不发生熔化，熔化后的钎料流动性好，充满玻璃与金属之间的缝隙，冷却凝固后实现两者的连接。钎焊的优点是可以实现高强度的连接，适应于精密、复杂的连接件。但由于钎料和玻璃的润湿性不够好，为实现玻璃与金属的高强度连接，通常需要在钎料中加入活性元素来提高钎料与玻璃之间的润湿性能。特殊的钎料和加工设备都会造成整体工艺成本的提高，从而限制这种技术的广泛应用。对于这一点，即使是在航空航天领域，人们也一直在寻找封接效果好、成本低的钎焊料。

2.4 熔封

熔封[17，18]是利用高温使玻璃与金属的接触面都

达到软化点，在热力作用下熔合形成连接。熔封形成的连接接头坚固且具有良好的气密性，适用于真空、防止液体或气体泄漏的场景。然而，熔封对工作温度和时间的要求较高，适用于软化点较低的玻璃，对于软化点较高的玻璃，当达到软化点后，过高的温度可能会使金属表面产生破裂的氧化膜，严重影响两者的结合。

对于实际工件的封接，目前常用的方法有3种。

1）首先对用于封接金属封接部件的封接部位（金属）进行预氧化处理；其次对预氧化处理后金属封接部件的封接部位进行预玻璃化处理（有的情况下这一步骤可以省略）；然后在加热条件下对玻璃管封接部位玻璃和预玻璃化（或者没有预先玻璃化）的金属封接部位进行封接。此时的加热是对玻璃和金属的待封接部位同时进行加热，有的时候是整个封接体都进行了加热。此种封接方法的弊端显而易见。

2）高温熔融玻璃焊料作为导电体，在电极间将玻璃焊料通电熔融，被封接的部分浸渍到通电回路中去，因浸渍部分及其附近会产生一定的焦耳热，使被封接的部分加热，从而造成浸渍完毕后在封接部位粘上一层玻璃焊料而形成封接层，起到良好的封接作用。此法利用在玻璃上直接通电所产生的热达到与金属熔封目的。这是基于玻璃在高温时属于离子导电，且随着温度升高，电阻迅速下降，比金属更易导电的原理。

3）采用外加热源，如抛物线型太阳能槽集热器，该集热器的长度为4.06m，外部的玻璃管直径为120mm，壁厚为3mm。内部的可伐合金管的直径为100mm。为了实现较高的力学性能，可伐合金管里面镶嵌一个厚度为1mm且直径在4～6mm的玻璃管，该新型抛物线型太阳能槽集热器吸收管实物如图1所示[18]。这一类型的材料如果放在炉子中进行高温加热封接，是不适合自动化批量生产的。于是采用了高频感应加热设备来封接可伐合金和玻璃组成的抛物线型太阳能槽集热器。该高频感应装置产生的感应涡电流在金属部件表面上产生热量实现加热，从而实现金属和玻璃之间的封接。此时需要依据该工件的形状设计成一个特别的形状进而控制工艺过程。采用红外测温计来测量工件表面上的温度，反馈给设备的闭环控制系统来进行温度控制，防止温度超过限制。这一装置实现了可伐合金表面预氧化层的制备和后续的封接加热以及后续的保温冷却3个过程中，同传统的火焰加热工艺相比，避免了火焰加热所带来的污染问题和提高了封接效率。使用这一感应加热装置的另外一个优点在于可以精确控制温度和非常容易的实现了非接触加热。图2所示为采用感应加热装置进行封接抛物线型太阳能槽集热器的示意[18]。

图1　抛物线型太阳能槽集热器吸收管实物

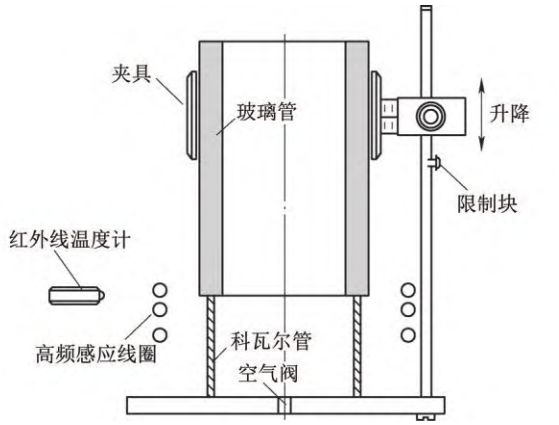


图2　采用感应加热装置进行封接抛物线型太阳能槽集热器的示意

如果玻璃的软化点比较高，玻璃和金属的封接体形状比较复杂或体积较大的时候，采用传统的炉中高温就会带来对玻璃和金属的损伤。此时就需要在玻璃和金属之间添加熔点比较低的过渡层材料或采用超声波、激光等手段进行封接。

2.5　阳极键合

阳极键合[19-22]是一种在热场和静电场的共同作用下实现两者材料结合的方法。在加热环境下，玻璃和金属在静电场中发生离子迁移，在结合界面发生氧化反应，形成化学键合，实现两种材料的连接。阳极键合是一种直接键合方法，不需要钎料或粘接剂等其他中间层，形成的接头密封性好。但阳

极键合需要在加热环境下进行，而且对玻璃和金属表面的平整性要求比较高。

2.6 激光焊接

激光焊接[23-26]是利用激光束将玻璃和金属加热到熔点或熔融状态，使其熔化并形成连接。激光束是由高能量的光子组成的窄束，能够在极短的时间内提供大量的热量。当激光束透过玻璃照射到金属表面上时，金属吸收激光能量使玻璃与金属接触面迅速升温熔化，快速冷却后形成焊接接头。激光焊接技术可以提供较高的能量密度，减少热影响区的影响；非接触的加热方式，可以避免传统焊接中污染问题的发生；可控性强，使焊接过程更加精确；自动化程度高，与机器人技术配合使用，不仅可以实现高维度的焊接还可以提高生产效率[27-30]。随着激光技术的不断进步，激光焊接将持续发展，并在更多领域内得到应用。

3 改善玻璃与金属封接件结合性能的研究现状

由于玻璃和金属在物理和化学性质上的显著差异，使得它们的直接焊接存在很多困难，无法获得可靠的封接性能。针对这一挑战，一直以来研究人员不断探索，已经研究出多种可以减小这种差异对焊接接头不利影响的方法。

部分学者通过在玻璃和金属之间加入适当的填充材料来实现玻璃和金属的匹配封接。易瑞祥[31]研究了在Sn-Zn钎料中加入不同含量的Zn对石英玻璃/2024铝合金钎焊接头的影响，获得了最适合石英玻璃和2024铝合金结合的Sn-Zn钎料。严增濯[32]在文章中指出一种石英玻璃和金属的过渡封接法，将石英玻璃管依次与热膨胀系数不断提高的玻璃封接，经过多次对接，玻璃热膨胀系数与金属的热膨胀系数匹配，最后实现石英玻璃和金属的间接封接。罗大为等[33]为解决Pyrex玻璃和可伐合金不匹配封接的问题，在两者之间引入与可伐合金匹配封接的DM308玻璃作为过渡层，通过可伐合金与DM308玻璃的匹配封接再到DM308玻璃与Pyrex玻璃的匹配封接，最终实现Pyrex玻璃和可伐合金的匹配封接。HASANABADI等[34]将Ni电镀到AISI 430合金表面，完成硅酸盐玻璃和AISI 430合金的结合。通过拉伸和冲击试验，发现在较短的加热时间内（少于5h）镀镍AISI 430由于界面处枝晶的发展表现出比未镀镍样品更高的粘附强度。HUO等[35]为提高玻璃和钢的激光焊接结合强度，提出一种在两种材料界面加入Cr金属薄膜和Cr^{3+}溶液的方法。其焊缝形貌表明，和未添加Cr的情况下相比，在不锈钢表面添加铬的焊缝更窄且更平滑。同时，Cr薄膜或溶液的存在可以使焊缝处裂纹显著减少，进而提高焊缝质量。CHOU等[36]为解决固体氧化物燃料电池玻璃和金属结合界面$SrCrO_4$的形成带来的强度退化问题，在Crofer 22 APU不锈钢表面渗铝，以减少或防止铬酸锶的形成。结果表明，与表面未镀铝的Crofer 22 APU相比，即使是在空气中老化的样品，镀铝样品的强度也没有降低。

还有一些学者通过改变玻璃组成成分，研发出适合与金属封接的特种玻璃。季鑫[37]为了提高玻璃/金属电子元器件的可靠性，在ST-4CK铁封玻璃的基础上试图开发出更可靠的铁封玻璃。通过在ST-4CK中加入适量的Al_2O_3颗粒，使玻璃强化并实现与10#钢的气密封接。此外，在ST-4CK玻璃的基础上研发了一种SiO_2-BaO-K_2O-Na_2O-Al_2O_3-ZnO-CaO七元系微晶玻璃，不仅提高了ST-4CK玻璃的抗开裂性能，还实现了与10#钢的良好封接。罗夏林等[38]对硼硅玻璃成分进行改进，利用高温固相法制备了以SiO_2和BaO为主要成分的SiO_2-BaO体系的特种玻璃，通过与碳素钢、合金等金属的高温熔融封接，在玻璃和金属的结合界面处未发现裂纹和气泡，获得了具有良好的力学性能和密封性的封接元件。艾强等[39]根据钛合金热膨胀系数，在DM-308玻璃、TF-5玻璃和铋酸盐系玻璃中掺入不同氧化物使它们的热膨胀系数与钛合金相近，从而提高玻璃和金属的结合能力。通过试验发现铋酸盐系玻璃与金属能实现良好的封接，两者热膨胀系数差异在$0.5\times10^{-6}K^{-1}$内。TIAN等[40]探讨了一种与可伐合金4J29相似的硼硅酸盐玻璃（GD480S）中SiO_2与B_2O_3的比值对玻璃性能的影响。研究发现，随着SiO_2与B_2O_3的比值从4.18增加到5.77，玻璃的膨胀系数从4.95×10^{-6}/℃下降到4.55×10^{-6}/℃，使玻璃和金属密封良好，满足了工业管状接收器的要求。KAUR等[41]制备了一种组成为（$60-x$）SiO_2-15CaO-10Al_2O_3-（$10+x$）Na_2O-5TiO_2（x=0，5，10，15）的玻璃，利用浆料技术将玻璃沉积在Crofer 22 APU上，玻璃与不锈钢之间的扩散形成良好光滑的结合界面，含10%Na_2O的玻

璃与Crofer 22 APU具有良好的粘合性。COILLOT等[42]为满足固体氧化物燃料电池合规密封的需求，提出了一种利用柔性玻璃密封代替刚性密封的方法，开发出一种K_2O-Na_2O-La_2O_3-B_2O_3-ZrO_2-SiO_2系列的柔性密封玻璃，使其在粘合温度（900℃）和工作温度（800℃）下都具有良好的粘合性，可实现柔性密封。

由于填充材料的存在可能会加大玻璃和金属结合工艺的复杂性和成本，特种玻璃的研发对成本和技术都有很高的要求，所以大部分学者的研究主要集中于对金属进行高温预处理，使其表面生成氧化膜作为缓冲层，减小玻璃和金属结合时由于性能差异大而带来的不利影响。LI等[43]采用不同氧化温度和保温时间对304不锈钢进行预氧化来研究界面特性对304不锈钢与硼硅酸盐玻璃封接面剪切强度的影响，试验发现玻璃与304不锈钢之间直接的界面氧化还原反应形成的键合强度远低于氧化物溶解形成的键合强度，但过度氧化会使氧化膜出现缺陷从而降低密封件的结合强度。SUSAN等[44]在密封奥氏体不锈钢和碱硅酸钡玻璃之前，在不锈钢表面制备了一层薄薄的氧化物充当过渡层，发现氧化物在后续的结合过程中扩散到玻璃中。LEI等[7]通过试验发现可伐合金在0.3～0.8 mg/cm^{2}的氧化增重内，可以增加金属和玻璃之间的化学和机械结合强度。随着可伐合金表面氧化增重的增加，玻璃和金属的密封强度呈现先增加后降低的趋势。SHEN等[45]指出为保证玻璃/金属结合件具有良好的密封性和机械强度，必须对金属进行预氧化，但同时过度预氧化可能会因气泡的形成而对接头机械强度产生不良影响。刘唐冰[46]为提高玻璃/金属继电器密封性，对气氛炉的氧化温度、氧化时间和氧化气氛进行研究，发现可伐合金经氧化后单位面积增重在0.07～0.15mg/cm^{2}范围内，可实现继电器底座组的密封封接，泄漏率≤1.0×10^{-3}Pa·cm^3/s的底座组比例大于70%。LI等[47]对Fe-16Cr合金进行热处理，在金属表面形成了不同粗糙度的氧化膜。通过检测，发现氧化膜中存在与Fe-16Cr合金热膨胀系数相近的氧化物Cr_2O_3，这种致密的Cr_2O_3氧化膜可以实现玻璃和Fe-16Cr合金的良好润湿。氧化膜的存在不仅促进了流动的玻璃在氧化膜中的渗透，其合适的表面粗糙度也可促进玻璃和Fe-16Cr合金之间的润湿性。LI等[48]对304不锈钢进行预氧化处理，通过对氧化物晶须生长形貌、细晶粒形貌和粗晶粒形貌的观察，研究氧化物形貌对硼硅酸盐玻璃和304不锈钢密封件结合行为的影响。结果表明，密封后晶须完全溶解到玻璃中，有效增强了玻璃和304不锈钢之间的结合，粗粒形态氧化物和玻璃形成的结合较弱。CHEN等[49]首先对Ti进行预氧化，然后利用高温熔封技术实现Ti和K9玻璃的连接。剪切强度结果表明，合适的氧化膜可以提高Ti-K9玻璃的接头强度，未经预氧化、氧化膜过薄或氧化膜厚但疏松的Ti都无法与K9玻璃成功结合。刘加豪等[50]在对TC4钛合金和玻璃的真空热压连接研究过程中发现，对TC4钛合金进行预氧化处理，表面生成的具备合适厚度的氧化膜可以强化玻璃和金属的连接效果，这是因为在热压过程中，氧化膜首先与玻璃发生化合反应形成冶金结合，接着两者的完全化合反应促使玻璃和金属内主要元素Ti、O、Si相互扩散，形成新的Ti-O-Si氧化物，从而实现TC4钛合金和玻璃的牢固结合。

以上国内外学者的大量研究表明，可以采取多种方法提高玻璃和金属的封接强度，例如：在玻璃和金属之间加入合适的填充材料、研发适合与金属封接的特种玻璃、对金属进行预氧化处理等。通过以上前处理技术，成功的封接了金属与玻璃，这些前处理技术也同样可以应用到激光焊接金属与玻璃。

4　激光焊接玻璃与金属的研究现状

激光焊接作为一种高效、精确的连接技术，在工业制造领域得到了广泛应用。它具有非接触性、焊接速度快、高能量密度和快速加热等优势[27-30]，因此成为了金属焊接的重要方法。激光焊接玻璃与金属目前主要存在两种形式，一种是利用超快激光直接焊接，另外一种是添加中间层进行间接焊接。

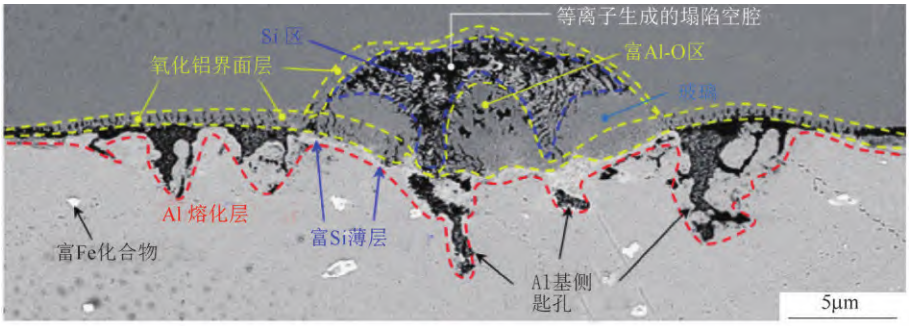
4.1　玻璃与金属直接激光焊接的研究现状

近年来，国内外很多研究人员为减少玻璃金属焊接工艺的复杂性，一直致力于玻璃和金属直接焊接的研究。CIUCA等[51]利用皮秒脉冲激光实现了石英玻璃和铝的精密焊接，发现焊缝形成过程十分复杂，包括在结合界面形成受限等离子体腔、玻璃的非线性吸收和通过光束散射在金属基板上形成多个次级键孔，同时在焊接区域还观察到纳米晶硅

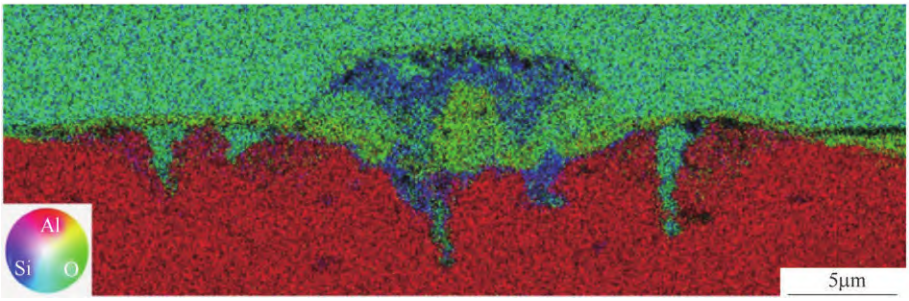
和过渡氧化铝相的形成，典型横截面如图3所示。CARTER等[52]对比了激光平均功率和焦点深度对Al6082与SiO_2和BK7的皮秒激光焊接的影响，发现焊接结果对焦点深度依赖较大，可用的焦距范围在两种材料中均被限制为约200μm，而对激光平均功率具有较大的包容性。UTSUMI等[53]使短脉冲激光透过玻璃照射到铜球表面，实现两者的直接结合，发现激光辐照次数过多或能量过大，会在玻璃表面形成裂纹。ZHANG等[54]在不施加任何辅助压力和不添加中间层的情况下，利用1kHz飞秒脉冲激光实现了铝硅酸盐玻璃和铝、铜、钢的直接焊接，研究发现激光烧蚀作用和合适的脉冲能量是玻璃和金属成功焊接的基础。ZHAN等[55]利用飞秒激光对铝和熔融硅进行焊接，研究发现适当的脉冲能量和焦点预补偿可以提高焊接界面的能量沉积效率，并减少熔融硅内部损伤，焊缝处的Al和Si的混合程度越高，焊件剪切强度越高。FENG等[56]在未添加任何中间层和非光学接触下利用纳秒激光实现了石英玻璃和铜的直接连接，通过对焊接参数的调整获得了无裂纹和孔洞等缺陷的焊接接头，接头剪切强度可达33.4MPa，约为石英玻璃剪切强度的80%。接头区域的纺锤形机械互锁和界面反应形成的Cu-O-Si系化学结合是实现接头高剪切强度的主要原因。

4.2 玻璃与金属间接激光焊接的研究现状

尽管利用超快激光可以实现玻璃和金属的直接焊接，但仍然存在焊接接头可靠性不足等问题，想要玻璃和金属焊件在实际生产中得到广泛应用，仍需要通过金属表面改性或添加中间层的方法来提高焊件结合强度。LIN等[57]利用激光束局部加热的特性实现了石英与阳极氧化铝的结合，发现激光结合方法比传统的热结合方法结合强度更高。ZHANG等[58]首先利用微弧氧化工艺在铝合金表面制备一层氧化物，然后利用毫秒级脉冲激光器对高铝玻璃和铝合金进行焊接，发现微弧氧化涂层在焊接过程中可作为激光能量的吸收及缓冲层，促进两者连接。通过调整激光工艺参数得到了44.27N的最大剪切强度，发现两种材料能够实现连接归因于激光作用下焊缝内部形成的混合镶嵌结构及发生化学反应生成新相$Al_2Si_4O_{10}$。涂治等[59]为减小由于玻璃和金属化学和物理性能差异过大带来的焊接难度，利用高温炉在可伐合金表面制备氧化层，试验发现玻璃和金属的结合是通过氧化膜与玻璃的浸润熔合实现的，合适的氧化膜厚度是得到良好焊接质量的先决条件。贾林等[60]利用光纤激光器对经过表面预处理的可伐合金和DM308钼组玻璃进行焊接，发现靠近金属基体表面氧化膜化学键与金属相似，外层氧化



a）主光束相互作用区域和周围相关特征的注释BSE-SEM图像



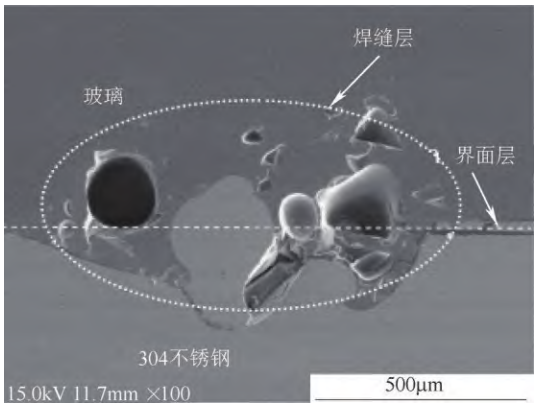
b）同一区域的相应彩色编码Al、Si、O EDS图

图3 单个焊接轨迹的典型横截面[51]

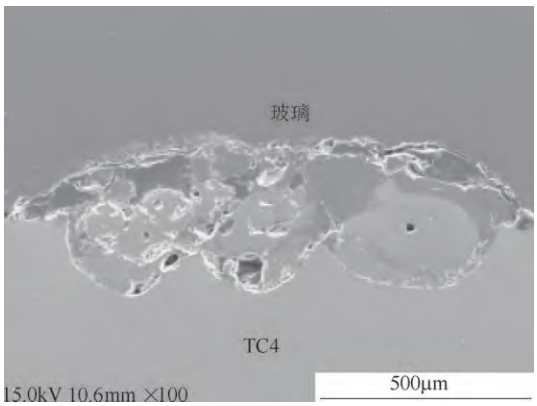
膜化学键类型与玻璃相似。激光作用时，金属表面Fe_3O_4和Fe_2O_3氧化层与SiO_2发生反应生成Fe_2SiO_4，是两者能够实现紧密结合的重要原因。贾林等[61]在可伐合金表面预氧化处理的基础上，在金属和玻璃之间添加Mo-Mn-Ni和Ni_2O_3-MnO_2-B_2O_3中间层，焊接结束发现Mo-Mn-Ni中间层可以减少焊接接头边缘的裂纹，但玻璃内气泡数量变化微小；而Ni_2O_3-MnO_2-B_2O_3中间层减少了玻璃侧微裂纹及内部气泡，但对缓解接头微裂纹影响不明显。HUO等[35]提出了在硅玻璃和不锈钢之间添加Cr金属膜和Cr^{3+}溶液来进行焊接加固的方法，然后利用纳秒光纤激光器进行焊接。通过对焊接参数的研究，获得了41.4MPa的最大剪切强度，与未添加Cr时相比提高了40%。Cr金属膜和Cr^{3+}溶液缓解了过度激光烧蚀对材料的影响，得到了比未添加Cr时更窄、更光滑的焊缝，在焊缝中还观察到Fe-O-Si和Cr-Si键。铁敏等[62]为提高玻璃和金属结合的可靠性，提出对可伐合金表面进行激光毛化处理的方法，在最佳工艺参数下得到的激光毛化后的金属与玻璃的最高接头强度为12.9MPa，比未毛化情况下提高了122.4%，这是因为金属经激光毛化后，熔融玻璃在其表面的润湿性更好，形成机械结合从而实现两者的可靠连接。

通过上述研究发现，对于不同金属表面改性或添加中间层的方法不同，会引起激光焊接的强度以及结合机制不同。同时目前对激光焊接玻璃与钛合金的研究鲜有报道，针对TC4钛合金与塑料[63-66]的相关激光焊接研究涉及较多。LIANG等[63]研究纳秒脉冲光纤激光系统在TC4钛合金表面制备的不同激光凹槽纹理对钛合金与CFRTP激光连接的影响。WANG等[64]使用紫外飞秒激光系统对TC4钛合金表面进行槽加工，研究了凹槽对CFRTP/TC4焊接接头的影响。JIAO等[66]为了提高CFRTP与TC4合金的连接质量，提出了金属表面激光覆膜方法。还有学者[67]将超薄Ti膜作为中间层，用于辅助连接玻璃和玻璃，研究发现在未添加任何中间层的情况下，两个玻璃结合界面具有缺陷，而Ti膜的添加获得了更均匀且无损伤的结合界面。

相比于激光焊接TC4钛合金与塑料的广泛研究，关于TC4钛合金与玻璃的激光焊接方面研究较少，刘星等[68]探索了建筑用玻璃和高温预氧化处理的TC4钛合金的毫秒脉冲激光焊接，进行了3道20mm焊线长度的焊接，通过对工艺参数的探索，得到了140.76N的最大剪切强度。他们认为，玻璃和金属接触面形成的镶嵌结构对两者的结合起主要作用，激光辐射区附近形成的粘附物对两者的结合起辅助作用。邹涛等[69]对比了玻璃/不锈钢和玻璃/TC4钛合金的激光焊接，重点分析了焊件断口形貌、截面形貌和焊缝处物相的差异，垂直于焊缝剖开截面如图4所示。结果表明，玻璃与两者的连接机理基本类似，焊缝中玻璃与金属熔化后相互渗透形成的镶嵌结构及界面处的粘附物是两者能够实现连接的主要原因。此外，激光作用下玻璃与钛合金焊件为化学结合，而玻璃与不锈钢焊件主要为机械混合。LI等[70]为增强TC4钛合金和高硼硅玻璃的结合能力，对钛合金进行激光表面处理，使金属表面局部氧化，如图5所示，发现钛合金的表面能在激光表面处理后增加，这促进了钛合金与玻璃之间的相容性，从而提高玻璃与钛合金激光透射焊接的结合强度。是否还有其他方法可以提高这两种材料的结合强度作者并未指出，因此为了推动TC4钛合金与玻璃可



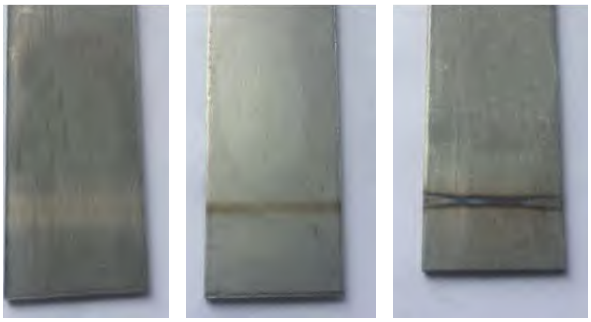
a）玻璃/不锈钢



b）玻璃/钛合金

图4　焊件截面形貌[69]

靠封接的快速发展和应用，试图对TC4钛合金采取多种表面预处理方法来优化其焊接性能，为TC4钛合金与玻璃的激光焊接提供更多的理论基础。



a）40W　　b）50W　　c）60W

图5　表面处理后的TC4钛合金[70]

由于超快激光诸多的优异性能，从而在很多玻璃与金属的封接体中得到了应用。采用超快激光封接金属与玻璃甚至可以不需要额外添加光吸收材料作为中间吸收体，这得益于超快激光的高精密、高空间分辨力的选择性和多材料的适应性以及非线性吸收。非线性吸收特性使得玻璃与金属的封接可以直接实现对间隙的填充，从而可以在多个领域中得到了应用，如电子、通信、航空航天和军事工业等。以上场合中的玻璃与金属封接体在采用胶水等手段进行封接的时候很容易发生胶水的老化和气化。胶水在发生老化和气化的时候，不仅造成封接体性能的下降，而且还会直接污染周边的功能器件，进一步加剧了气密件的危害。

由于超快激光在进行微加工的时候需要的能量同传统的封接相比能量要少，从而非常适合对各种不同的服役于苛刻环境中的包装材料和部件的焊接，以及应用于微流体系统、光学器件、光电器件和生物芯片等领域中[71-82]。图6所示为采用超快激光在集成芯片上封接的陶瓷及其相应的焊接样品。该样品是一个防止光从基体材料中发生透射，从而允许可见光——超紫外光能够通过陶瓷外壳进入光电器件。图7所示为一个采用超快激光焊接石英玻璃-金属后所得到的植入式血压传感器封装器件。该封装器件具有焊缝细小精密的特点，从而显著的降低了该探测器的尺寸。该封装式压力传感器可以很好地满足体内压力的反馈，并且不存在焊缝处发生气体泄漏的危险。图8所示为采用飞秒激光焊接的玻璃

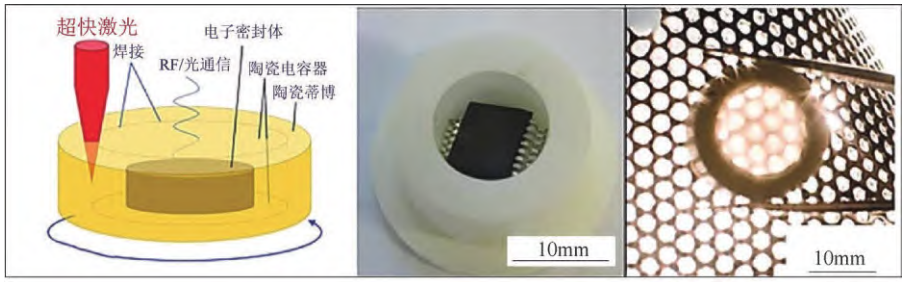


图6　一个电子有效载荷具有透明的陶瓷管和盖帽的密封体[72]

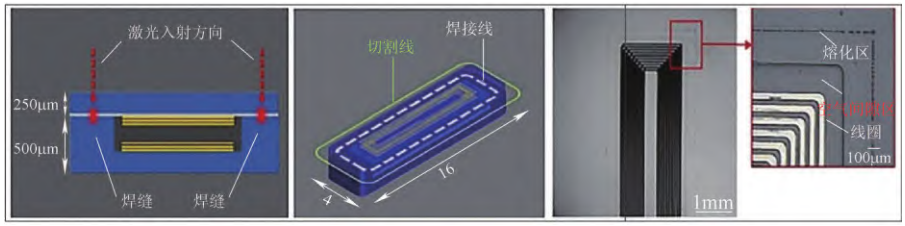


图7　植入式血压传感器的集成体[71]

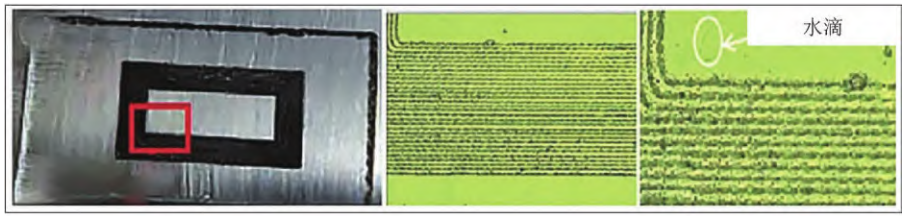


图8　真空封接的连接头[76]

-可伐合金微型封接体。对该封接体进行真空气密性测试。测试结果显示，浸泡在水中前后的过程中没有观察到任何变化。这一结果表明激光焊接的玻璃-可伐合金部件的良好的封接性能。这一部件已经应用在武器和高功率激光中的光学窗口当中[75]。

由于超快激光焊接时优异的热管理能力、高精密选择性的焊接光纤的端盖，通过工艺参数优化实现对热效应的控制而实现了焊接，如图9所示。其加工的精度达到了毫米级别。由于热主要集中在焦点位置附近的体积范围内，端盖和熔覆区域的焊接需要不对中心纤芯区域和光纤的气孔微观结构造成损伤。光纤的端盖的组装对光纤的端头提供了在不同的环境中足够的保护和密封，减少自光纤终端反射造成的菲涅尔反射效应。

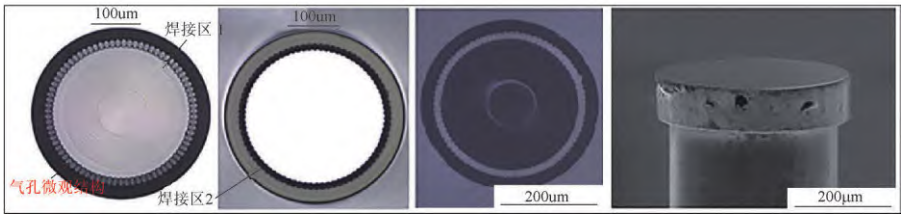


图9　光纤端帽的组装体[77]

同时，超快激光在焊接玻璃与金属时，在消费电子领域也得到了巨大的潜在应用，如柔性显示屏的组装，此时的玻璃不仅起到了保护易碎的显示屏避免其受到摩擦磨损的损伤，同时也提供了独特的功能特性，包括疏油性和抗反射。随着超快激光焊接的快速发展，可以确定的是激光焊接金属与玻璃的应用范围会更加广泛。

（1）封接性能测试　关于玻璃与金属的封接测试，从公开报道的资料来看，大多是拉伸性能或剪切性能的表征，即开展的是封接强度的测试。如笔者开展的激光封接手机玻璃与金属封接体的强度测试结果表明，其断裂强度不低于母材玻璃的90%。

但玻璃与金属的封接应用场合特别多，不仅涉及强度的测试，还涉及到气密性的测试。如笔者对金属与玻璃的激光封接体，其中内窥镜封接后在150℃下保温30min后，经过测试其气密性，等级可以达到IPx7，取出后冷却至室温，采用着色显示剂进行着色，无肉眼可见的裂纹。

（2）气密性测试　气密性既是外壳亦是电子元器件或者功能器件的重要指标之一。气密性不好则使得外界水汽、有害离子或有毒有害的物质、气体等进入元器件的腔体内而产生漏电或功能失效、参数变化等失效形式的发生。以太阳能中空吸收管的真空封装为例（见图1），需要使得内腔的真空度保持在0.013Pa的时候，其泄漏率低于10^{-10}Pa·m^3/s。当真空度丧失时，太阳能面板上的选择性涂层就会失效，其热吸收的效率就会显著下降[18]。

采用氦质谱检漏仪来检测该太阳能真空吸热管封接后的气密性，检测装置如图10所示。测试结果表明该封接体的气密性均在10^{-11}Pa·m^3/s。当可伐合金的氧化膜增加的重量为0.3～0.9mg/cm^2，封接后的太阳能真空集热管均满足太阳吸收应用的需求[18]。

（3）热冲击性能　热冲击性能测试是对玻璃与金属的封接体进行筛选和质量保证测试的一个重要手段。玻璃与金属的封接体的界面对热冲击的抗力是非常重要的技术指标，这是因为玻璃与金属的封接体之间的任一失效都会导致其真空气密性的下降，进而造成真空封接体内部部件的失效。

在进行热冲击试验测试的时候，测试温度的选择也是非常重要的环节。以太阳能真空集热管为例，其热冲击温度的选择取决于集热管工作的

图10　玻璃金属封接体的真空气密性测试设备

温度和玻璃的热稳定性。当太阳能真空集热管工作时候，玻璃管的工作温度大概在100℃[27, 28]。此种集热管玻璃本身的热冲击抗力大约为Δ*T*=200℃ 。因此，该集热管的热冲击温度测试的范围应该在0～200℃之间。标准的热冲击测试标准在MIL-STD-883B中给予了介绍。该标准标注描述，将封接体于室温条件下突然浸如冰水混合物中，随后在突然浸入加热炉中进行加热保温[29]。经过一定循环次数的热冲击测试后。样品没有出现裂纹和泄漏即为合格。当测试的温度范围为0～170℃的时候，经过20次热循环，有一个样品中出现了微小的裂纹。而在0～160℃之间进行20次的热循环，并没有出现裂纹。这说明该封接体在Δ*T*＝160℃的热冲击条件下是可以保证服役要求的，这一热循环远远高于该真空集热管的服役要求。

5　结束语

近年来，研究人员发展了各种不同的技术用于金属和玻璃的焊接，以满足不断增长的先进材料和智能制造的需求。然而，玻璃与金属的封接由于两者物理性能和化学性能的差异巨大而仍然面临着巨大的挑战，从而导致采用传统的焊接方式进行封接的时候造成诸如残余应力和接头强度低等问题。本文总结了传统的封接技术和先进的激光焊接技术的研究现状，对更好的理解和促进玻璃与金属的激光焊接起到了促进作用。

先进的激光焊接技术用于玻璃与金属的封接，不仅是一种先进的、新的、清洁的封接技术，更是具有高精密、能量集中和快速的特点。目前全球已经有很多研究人员和工程技术人员将激光技术用于玻璃与金属的封接。同时，已经将激光封接玻璃与金属的技术应用于各种各样的领域，如航空航天、微电子和医疗领域。激光焊接技术具有高效和激光源可以集中加热局部区域的特点，有效地避免了对材料其他区域的热损伤和更加有利于形成一个完整的整体结构。同时研究结果也表明激光封接的强度也超过传统的封接工艺。而且激光封接工艺同传统工艺相比，操作起来也简单，甚至可以直接在大气环境下操作。激光参数的调节也容易，可以在界面获得不同相结构和性能，这都是传统工艺不能实现或很难实现的。

尽管已经在激光焊接玻璃与金属的研究和应用上取得了一定的成就，但也必须承认，激光封接玻璃与金属后的强度还有很大的提升空间，其可靠性和焊接质量还需要进一步的得到提升。

激光参数在整个封接过程中起到十分重要的作用，这是因为它直接影响到最终界面处的显微组织、力学性能和诸如电性能。同时，玻璃或者金属表面的改性处理也是至关重要的一个研究方向。诸如界面处的润湿性，这直接影响到玻璃和金属界面处的扩散程度和玻璃与金属在界面处反应的程度。玻璃和金属界面处反应形成的物质，影响着其热膨胀系数和最终的服役性能，光滑过渡的界面结合物和居于玻璃与金属之间的热膨胀系数，有利于降低残余应力和裂纹的形成。

尽管在激光焊接金属与玻璃的研究与应用上取得了可喜的进展，必须承认的是，仍然存在一些焊接质量和可靠性的问题需要解决，笔者认为主要存在以下几个方面需要进行改进。

1）两者界面处的润湿性的不断改善：润湿性是反应玻璃和金属之间原子扩散或反应的重要指标。

2）金属和玻璃界面反应相形成的规律和控制：不同的化合物具有不同的热膨胀系数和性能，设计出光滑均匀过渡的界面反应物和具有特定热膨胀系数的化合物可以很好的阻止残余应力和裂纹的产生。

3）界面处金属间化合物生成的控制，界面处金属间化合物的生成对整个玻璃与金属封接体的强度起到至关重要的作用。因此，精准调控和优化激光工艺参数对获得高质量的玻璃与金属封接体是非常重要的环节。

4）残余应力和热应力是严重威胁玻璃与金属封接体服役性能的产物，研究其产生机理和控制残余应力和热应力是一个永恒的话题。

5）深刻理解玻璃与金属之间反应的机理，通过数学计算和物理模型的建立，通过模拟来优化激光参数，这对减少试验的错误和发挥激光参数的作用具有十分重要的作用。

随着玻璃与金属的封接应用场合的越来越多，激光器的种类越来越多，激光设备的价格越来越低，而激光器的性能却得到了不断的提升。由此导致玻璃与金属封接的性能将会越来越得到改善和提

高。玻璃与金属封接体相应的应用场合也会越来越多。

总而言之，作为一种高端的加工技术，激光焊接金属与玻璃必然会成为先进焊接技术的热点，为连接玻璃与金属提供更多可能和得到更加广阔的应用前景。

参考文献：

[1] 李卓然，徐晓龙. 玻璃与金属连接技术研究进展[J]. 失效分析与预防，2013，8（2）：123-130.

[2] XUE B，YANG Z，SHI X，et al. Study on the lubrication mechanism of titanium alloys with surface dimples filled with Sn-Ag-Cu and tic under dry sliding friction[J]. Journal of Materials Engineering and Performance，2020，29：5776-5786.

[3] DAS A，SHUKLA M. New generation hopeite coating on Ti6Al4V （TC4） by radio frequency magnetron sputtering for prosthetic-orthopaedic implant applications: synthesis and characterisation[J]. Transactions of the IMF，2020，98（2）：88-96.

[4] JIAO F，YAO C L，ZHAO L，et al. Research on milling force in ultrasonic assisted end milling of titanium alloy thin-walled parts[J]. Key Engineering Materials，2018，764：252-260.

[5] TIAN Y，LI H，LIU W，et al. Elaboration of a novel glass-to-metal seal for tubular solar receiver[J]. Optoelectronics and Advanced Materials-Rapid Communications，2015，9（3）：388-393.

[6] SMEACETTO F，CHRYSANTHOU A，SABATO A G，et al. Glass-to-metal seals for solid oxide cells at the Politecnico di Torino, an overview[J]. International Journal of Applied Ceramic Technology，2022，19（2）：1017-1028.

[7] LEI D，WANG Z，LI J. The analysis of residual stress in glass-to-metal seals for solar receiver tube[J]. Materials & Design，2010，31（4）：1813-1820.

[8] HÉLIE D，LACROIX F，VALLÉE R. Bonding of optical materials by femtosecond laser welding for aerospace and high power laser applications：Photonics North 2012[C]. USA：SPIE，2012，8412：235-241.

[9] JIA C，WIEMER M，GESSNER T. Direct bonding with on-wafer metal interconnections[J]. Microsystem Technologies，2006，12（5）：391-396.

[10] YU J，ZHANG Z，YANG H，et al. Effect of universal adhesive and silane pretreatment on bond durability of metal brackets to dental glass ceramics[J]. European Journal of Oral Sciences，2021，129（2）：e12772.

[11] SU Y，DE ROOIJ M，GROUVE W，et al. The effect of titanium surface treatment on the interfacial strength of titanium-thermoplastic composite joints[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2017，72：98-108.

[12] BENITEZ T, GÓMEZ SY, DE OLIVEIRA AP，et al. Transparent ceramic and glass-ceramic materials for armor applications[J]. Ceramics International，2017，43（16）：13031-13046.

[13] 王花娟，杨杰，刘新东，等. 复合材料机械连接强度影响因素的研究进展[J]. 材料导报，2007（S3）：438-440.

[14] ZHOU L，KATO F，NAKAMURA N，et al. MEMS hydrogen gas sensor with wireless quartz crystal resonator[J]. Sensors and Actuators B：Chemical，2021，334：129651.

[15] YI R，CHEN C，SHI C，et al. Research advances in residual thermal stress of ceramic/metal brazes[J]. Ceramics International，2021，47（15）：20807-20820.

[16] ZHONG Z，ZHOU J，SHEN X，et al. Study on vacuum brazing of glass to Kovar® alloy with Cu-Ni-Sn-P[J]. Welding Journal，2012，91（9）：237-240.

[17] CHERN T S, TSAI H L. Wetting and sealing of interface between 7056 Glass and Kovar alloy[J]. Materials Chemistry and Physics，2007，104（2-3）：472-478.

[18] KOKINI K, PERKINS R W. Thermal stresses in annular glass-to-metal seals under thermal shock[J]. American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal，1984，22（10）：1472-1477.

[19] KOEBEL M M，EL HAWI N，LU J，et al. Anodic bonding of activated tin solder alloys in the liquid state: a novel large-area hermetic glass sealing method[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells，

2011，95（11）：3001-3008.

[20] TORUNBALCI M M，ALPER S E，AKIN T. Wafer level hermetic sealing of MEMS devices with vertical feed throughs using anodic bonding[J]. Sensors and Actuators A：Physical，2015，224：169-176.

[21] SZESZ E M，LEPIENSKI C M. Anodic bonding of titanium alloy with bioactive glass[J]. Journal of Non-Crystalline Solids，2017，471：19-27.

[22] XIONG D，CHENG J，LI H，et al. Anodic bonding of glass–ceramics to stainless steel coated with intermediate SiO_2 layer[J]. Microelectronic Engineering，2010，87（9）：1741-1746.

[23] ZHANG L，WU H，WEN J，et al. Glass to aluminum joining by forming a mechanical pin structure using femtosecond laser[J]. Journal of Materials Processing Technology，2022，302：117504.

[24] WANG Y，LI Y，AO S，et al. Welding of 304 stainless steel and glass using high-repetition-frequency femtosecond laser[J]. Materials Research Express，2021，8（10）：106523.

[25] LI C，TAN J，LUO M，et al. High shear strength welding of soda lime glass to stainless steel using an infrared nanosecond fiber laser assisted by surface tension[J]. Optics and Lasers in Engineering，2023，161：107329.

[26] BAUER I，RUSSEK U A，HERFURTH H J，et al. Laser microjoining of dissimilar and biocompatible materials：Photon Processing in Microelectronics and Photonics III [C]. USA：SPIE，2004，5339：454-464.

[27] TAO W，SU X，CHEN Y，et al. Joint formation and fracture characteristics of laser welded CFRP/TC4 joints[J]. Journal of Manufacturing Processes，2019，45：1-8.

[28] AI Y，LEI C，YUAN P，et al. Analysis of weld seam characteristic parameters identification for laser welding of dissimilar materials based on image segmentation[J]. Journal of Laser Applications，2022，34（4）：042050.

[29] HUANG J，SHI W，XIE Y，et al. Analysis of laser micro welding of copper-aluminum dissimilar metals and its mechanism[J]. Journal of Applied Mathematics and Physics，2019，7（12）：3192-3200.

[30] WU W，HU S，SHEN J. Microstructure，mechanical properties and corrosion behavior of laser welded dissimilar joints between ferritic stainless steel and carbon steel[J]. Materials & Design（1980-2015），2015，65：855-861.

[31] 易瑞祥. 石英玻璃与铝合金超声搅拌钎焊工艺研究[D]. 长沙：中南大学，2022.

[32] 严增濯. 石英玻璃与金属封接技术进展[J]. 光源与照明，2005（4）：14-18.

[33] 罗大为，李雪，沈卓身，等. DM308过渡层对可伐合金与Pyrex玻璃结合机制的影响[J]. 材料热处理学报，2012，33（8）：151-155.

[34] HASANABADI M F, NEMATI A, KOKABI A H. Effect of intermediate nickel layer on seal strength and chemical compatibility of glass and ferritic stainless steel in oxidizing environment for solid oxide fuel cells[J]. International Journal of Hydrogen Energy，2015，40（46）：16434-16442.

[35] HUO J, YUAN J, CHEN Q, et al. Welding reinforcement between silica glass and stainless steel using nanosecond fiber laser with chromium interlayer[J]. Optics and Lasers in Engineering，2024，172：107877.

[36] CHOU Y S，STEVENSON J W，SINGH P. Effect of aluminizing of Cr-containing ferritic alloys on the seal strength of a novel high-temperature solid oxide fuel cell sealing glass[J]. Journal of Power Sources，2008，185（2）：1001-1008.

[37] 季鑫. 提高铁封玻璃抗开裂性能的研究[D]. 北京：北京科技大学，2009.

[38] 罗夏林，于晓杰，王咏丽，等. SiO_2-BaO体系玻璃与金属的封接工艺[J]. 硅酸盐学报，2013，41（6）：858-862.

[39] 艾强，晋小莉，程加奇，等. 电极塞钛合金玻璃封接工艺技术研究[J]. 火工品，2018（4）：15-18.

[40] TIAN Y，SHAO Y，LU P，et al. Effect of SiO_2/B_2O_3 ratio on the property of borosilicate glass applied in parabolic trough solar power plant[J].

Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.，2015，30（1）：51-55.

[41] KAUR B，SINGH K，PANDEY O P. Microstructural study of crofer 22 APU-glass interface for SOFC application[J]. International Journal of Hydrogen Energy，2012，37（4）：3839-3847.

[42] COILLOT D，MÉAR F O，NONNET H，et al. New viscous sealing glasses for electrochemical cells[J]. International Journal of Hydrogen Energy，2012，37（11）：9351-9358.

[43] LI S，HU K，HUI W，et al. Shear strength and interfacial characterization of borosilicate glass-to-metal seals[J]. Journal of Alloys and Compounds，2020，827：154275.

[44] SUSAN D F，VAN DEN AVYLE J A，MONROE S L，et al. The effects of pre-oxidation and alloy chemistry of austenitic stainless steels on glass/metal sealing[J]. Oxidation of Metals，2010，73：311-335.

[45] SHEN Z，ZHANG Y，CHEN Y，et al. Effect of pre-oxidization condition on glass-to-metal sealing[J]. Journal of Non-Crystalline Solids，2019，521：119488.

[46] 刘唐冰. 继电器的密封性一致性研究[D]. 西安：西安电子科技大学，2019.

[47] LI R，TAO M，WANG P，et al. Effect of interconnect pre-oxidation on high-temperature wettability and mechanical properties of glass seals in SOFC[J]. Journal of the American Ceramic Society，2021，104（12）：6172-6182.

[48] LI S，HU K，HUI W，et al. Morphological evolution of oxide layer and its effect on glass-to-metal seal[J]. Journal of Non-Crystalline Solids，2020，549：120355.

[49] CHEN M，WANG M，YANG H，et al. Pre-oxidation of Ti and its diffusion bonding to K9 glass：Microstructure and mechanism properties[J]. Journal of Materials Science，2022，57（12）：6790-6802.

[50] 刘加豪，张德库，韩泽尧，等. B270玻璃-TC4钛合金热压阳极键合连接工艺研究[J]. 真空科学与技术学报，2017，37（7）：674-679.

[51] CIUCA O P，CARTER R M，PRANGNELL P B，et al. Characterisation of weld zone reactions in dissimilar glass-to-aluminium pulsed picosecond laser welds[J]. Materials Characterization，2016，120：53-62.

[52] CARTER R M. Towards industrial ultrafast laser microwelding：SiO_2 and BK7 to aluminum alloy[J]. Applied Optics，2017，56（16）：4873-4881.

[53] UTSUMI A，OOIE T，YANO T，et al. Direct bonding of glass and metal using short pulsed laser[J]. Journal of Laser Micro/Nanoengineering，2007，2（2）：133-136.

[54] ZHANG G，CHENG G. Direct welding of glass and metal by 1 kHz femtosecond laser pulses[J]. Applied Optics，2015，54（30）：8957-8961.

[55] ZHAN J，GAO Y，SUN J，et al. Mechanism and optimization of femtosecond laser welding fused silica and aluminum[J]. Applied Surface Science，2023，640：158327.

[56] FENG Y，PAN R，ZHOU T，et al. Direct joining of quartz glass and copper by nanosecond laser[J]. Ceramics International，2023，49（22）：36056-36070.

[57] LIN H K，HONG S Z，CHUNG B F，et al. Characterization of local laser bonding quartz to anodic aluminum oxide in light emission device[J]. Optical and Quantum Electronics，2017，49：1-8.

[58] ZHANG M，CHAN Y F，CHEN C J，et al. A new sealing technology for ultra-thin glass to aluminum alloy by laser transmission welding method[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology，2021，115（7-8）：2017-2035.

[59] 涂冶，季凌飞，鲍勇，等. 高硼硅3.3玻璃和可伐合金的激光封接界面研究[J]. 应用激光，2011，31（1）：12-14.

[60] 贾林，李红，栗卓新. 工艺参数对可伐合金/DM308钼组玻璃激光焊接接头结合性能的影响[J]. 焊接学报，2018，39（5）：5-9.

[61] 贾林，栗卓新，李红. 中间层对可伐合金4J29/钼组玻璃DM308激光焊接接头结合性能的影响[J]. 焊接学报，2018，39（11）：33-38.

[62] 铁敏，李红，栗卓新，等. 硼硅玻璃与可伐合金的激光熔接工艺[J]. 焊接学报，2016，37（6）：55-58, 74.

[63] LIANG S，SU J，ZHANG H，et al. The effect of groove texturing direction on laser joining of titanium alloy to CFRTP[J]. Optics & Laser Technology，2024，171：110416.

[64] WANG L，RONG Y，WU C，et al. Improving the joint strength of laser-welded CFRTP/TC4 joints via appropriate groove design[J]. Applied Surface Science，2024，644：158752.

[65] WANG H，DONG Y，HU Z，et al. The research on laser welding-riveting hybrid bonding of titanium alloy and carbon fiber reinforced composites[J]. Optics & Laser Technology，2022，155：108405.

[66] JIAO J，ZOU Q，YE Y，et al. Carbon fiber reinforced thermoplastic composites and TC4 alloy laser assisted joining with the metal surface laser plastic-covered method[J]. Composites Part B: Engineering，2021，213：108738.

[67] DE PABLOS-MARTÍN A，HÖCHE T. Laser welding of glasses using a nanosecond pulsed Nd: YAG laser[J]. Optics and Lasers in Engineering，2017，90：1-9.

[68] 刘星，陈长军，王晓南，等. 建筑用玻璃与钛合金TC4的激光封接工艺及性能研究[J]. 中国激光，2015，42（4）：58-64.

[69] 邹涛，陈长军，张敏，等. 建筑用玻璃/不锈钢、玻璃/钛合金激光焊接机理研究[J]. 中国激光，2016，43（9）：76-81.

[70] LI P，XU X，TAN W，et al. Improvement of laser transmission welding of glass with titanium alloy by laser surface treatment[J]. Materials, 2018，11（10）：2060.

[71] KIM S，PARK J，SO S，et al. Characteristics of an implantable blood pressure sensor packaged by ultrafast laser microwelding[J]. Sensors，2019，19：1801.

[72] PENILLA E H，DEVIA-CRUZ L F，WIEG A T，et al. Ultrafast laser welding of ceramics[J]. Science，2019，365：803-808.

[73] JONUSAUSKAS L，REKSTYTE S，BUIVIDAS R，et al. Hybrid subtractive-additive-welding microfabrication for lab-on-chip applications via single amplified femtosecond laser source[J]. Opt. Eng.，2017，56：094108.

[74] FUJIWARA J，TAMAKI T. Measuring sealing degree of welded glass substrates after ultrafast laser microwelding[J]. Appl. Phys. A，2022，128：1076.

[75] ARACELI de PABLOS-MARTIN A，GROSSE C，CISMAK A，et al. Laser-welded steel foils with sapphire substrates[J]. Acta Metall. Sin. -Engl. Lett.，2016，29：683-688.

[76] TAN H，YANG W，HUANG, Q，et al. Embedded thin film fabrication via glass welding by an ultrafast laser[J]. J. Asian Ceram. Soc.，2023，11：62-67.

[77] JI C H，HUANG Y J， CHEN X，et al. Direct microwelding of dissimilar glass and kovar alloy without optical contact using femtosecond laser pulses[J]. J. Cent. South Univ.，2022，29：3422-3435.

[78] HELIE D，GOUIN S，VALLEE R. Assembling an endcap to optical fibers by femtosecond laser welding and milling[J]. Opt. Mater. Express，2013（3）：1742-1754.

[79] XU J，JIANG Q，YANG J，et al. A review on ultrafast laser microwelding of transparent materials and transparent material–metals[J]. Metals，2023，13：876.

[80] 陈长军，张敏，马红岩，等. BT20钛合金表面渗氧研究[J]. 功能材料，2008，39（3）：437-439.

[81] SUGIOKA K, IIDA M, TAKAI H, et al. Efficient microwelding of glass substrates by ultrafast laser irradiation using a double-pulse train[J]. Optics Letters，2011，36（14）：2734-2736.

[82] RICHTER S, DÖRING S, TÜNNERMANN A, et al. Bonding of glass with femtosecond laser pulses at high repetition rates[J]. Applied Physics A，2011，103： 257-261.

MW 20241224