

石英陶瓷与碳纤维增强复合材料间 胶接增强的优化工艺

蒋海峰¹, 李 昕¹, 俞玉澄¹, 扈艳红², 皋利利¹

(1. 上海无线电设备研究所, 上海 201109;

2. 华东理工大学 特种功能高分子材料及相关技术教育部重点实验室, 上海 200237)

摘 要:为提高硅橡胶胶黏剂胶接石英陶瓷和碳纤维增强复合材料的强度和耐温性能,研究了胶接面湿热状态、打磨程度、胶层厚度、操作等待时间等工艺参数对胶接强度的影响。在试片正常烘干、打磨的情况下,当胶层厚度为 0.4 mm、操作等待时间小于 0.5 h 时,胶接效果最优,其压缩剪切强度达到了 3.06 MPa。探索了底涂剂处理对胶接强度和耐温性能的影响。在温度不高于 100 ℃ 时,底涂剂 A 的效果较好。经底涂剂 A 处理后,胶接试片常温下的强度提高了 13.7%,达到 3.48 MPa;100 ℃ 时的强度提升率达到 37.7%。在更高温下,底涂剂 B 的效果更为显著。经底涂剂 B 处理后,胶接试片常温下的强度提升了 10.1%,达到 3.37 MPa;300 ℃ 时的强度提升了 44.0%,达到 1.57 MPa;200 ℃ 时的强度提升率最高,为 49.0%。测试结果为高温条件下石英陶瓷胶接结构的胶接工艺优化及其应用提供了参考。

关键词:石英陶瓷;碳纤维增强复合材料;硅橡胶胶黏剂;工艺优化;底涂剂;胶接增强

中图分类号:V 261.3

文献标志码:A

DOI:10.19328/j.cnki.1006-1630.2019.02.020

Optimizing Process on Enhanced Properties of Adhesive Between Quartz Ceramic and Carbon Fiber Reinforced Polymer

JIANG Haifeng¹, LI Xin¹, YU Yucheng¹, HU Yanhong², GAO Lili¹

(1. Shanghai Radio Equipment Research Institute, Shanghai 201109, China;

2. Key Laboratory of Specially Functional Polymeric Materials and Related Technology of
Ministry of Education, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract: To increase the adhesive strength and the heat-resistance ability of the quartz ceramic and the carbon fiber reinforced polymer when the silicon rubber adhesive is used, the influence of process parameters, such as wet-hot state, grinding degree, adhesive thickness and waiting time before operation of the adhesive surface on the adhesive strength is studied. Under the condition of normal drying and grinding, when the adhesive thickness is 0.4 mm and the waiting time is less than 0.5 h, the best adhesive effect is obtained, and the compressive shear strength reaches 3.06 MPa. The influence of primer coating treatment on the adhesive strength and the heat resistance is further investigated. The effect of primer coating A is better when the temperature is not higher than 100 ℃ and the effect of primer coating B is more significant when the temperature is higher. After the treatment of primer coating A, the compressive shear strength increases by 13.7% and reaches 3.48 MPa at room temperature and the highest increase rate is about 37.7% at 100 ℃. After the treatment of primer coating B, the compressive shear strength increases by 10.1% and reaches 3.37 MPa at room temperature, and it increases by 44.0% and reaches 1.57 MPa at 300 ℃. The highest increase rate is about 49.0% at 200 ℃. The test result provides a reference for the optimization of the adhesive process and the application of quartz ceramic adhesive structure under high temperature.

收稿日期:2018-12-19;修回日期:2019-01-27

作者简介:蒋海峰(1979—),男,硕士,主要研究方向为胶黏剂的应用工艺技术。

通信作者:俞玉澄(1992—),男,硕士,主要研究方向为胶黏剂的应用工艺技术。

Keywords: quartz ceramic; carbon fiber reinforced polymer; silicon rubber adhesive; process optimization; primer coating; enhanced adhesive property

0 引言

石英陶瓷材料因具备优异的热、力、电综合性能而被广泛应用于各种飞行器^[1]。但石英陶瓷由于自身脆性大、易开裂的特点,难以开槽或打孔,无法通过螺接或铆接等机械连接方式,实现与舱体的直接连接,一般需要与连接环胶接后,再与舱体进行连接^[2]。

飞行器飞行速度和机动能力的不断提高,对胶黏剂的胶接强度、耐温能力和密封性能均提出了更高要求。同时,随着近年来飞行器轻量化要求的不断提高,碳纤维复合材料得到广泛应用^[3],其中也包括碳纤维增强复合材料连接环。然而,碳纤维增强复合材料与石英陶瓷的热膨胀系数差异较大,导致胶接体系可能存在较大的内应力,包括收缩应力和热应力^[4]。为降低胶接内应力,一般采用模量低、延伸率高的柔性胶黏剂^[5]。硅橡胶胶黏剂强度较高、柔性好、密封性能优异、耐温能力强,因而得到广泛使用^[6]。

使用胶黏剂胶接时,胶接面的表面状态^[7]、胶层厚度等工艺参数对胶接效果影响较大。陈硕琛等^[8]研究了 5182 铝合金的打磨程度和表面形貌对胶接接头剪切强度的影响,发现使用砂纸打磨可改变铝合金板件的表面形貌,增大其表面粗糙度,从而提高胶接强度。袁辉等^[9]研究了胶层厚度对胶接接头承载力的影响,发现随着胶层厚度增加,胶接接头承载力先增大后减小。此外,使用底涂剂对胶接面进行改性处理,从而实现界面增强也是提高胶接接头质量的重要途径之一。王新良^[10]针对硅橡胶粘接聚丙烯材料,制备了一种以异氰酸酐酸酯硅烷偶联剂为主要成分的底涂剂,在提高胶接强度的同时还改善了胶接界面的耐酸碱性。

目前,国内针对铝合金胶接^[11-12]、碳纤维增强复合材料胶接^[13-14]等领域的研究相对较多,而针对石英陶瓷胶接的研究相对较少。石英陶瓷为典型的多

孔结构,具有较强的吸水性,其表层和浅层受湿热空气的影响更大。因此,与一般材料相比,石英陶瓷的胶接接头质量与胶接面湿热状态的关系更为敏感。同时,石英陶瓷一般应用于高温环境,而传统底涂剂的耐温能力不足,无法满足耐高温胶接中的陶瓷界面增强需求。此外,石英陶瓷产品的胶接操作一般比较复杂,一批产品从开始胶接到全部开始固化所需要的时间较长,使得操作等待时间(指从配胶完成至开始固化的这段时间)的影响也不容忽视。

本文研究了在使用某改性耐高温硅橡胶胶黏剂胶接石英陶瓷与碳纤维增强复合材料时,胶接面的湿热状态、打磨程度、胶层厚度和操作等待时间对胶接效果的影响。在确定合适工艺的基础上,还研究了两种底涂剂对胶接试片在不同测试温度条件下胶接强度的影响,明确了各自适用的温度范围。

1 实验

1.1 胶接试片制备与测试

胶黏剂为加成型硅橡胶胶黏剂,分 A、B 两种组分。其中:A 组分为胶黏剂基体,呈白色;B 组分为固化剂,呈黑色。使用时,A、B 组分按 10 : 1 的质量比混合搅拌均匀至无色差,呈灰色。胶黏剂固化后的使用温度范围为-50 ~ 300 ℃,配好的胶黏剂在使用前应冷藏(0 ~ 4 ℃)储存。石英陶瓷试片由泥浆浇铸法制得,碳纤维增强复合材料试片由树脂传递模塑法制得,详细情况见表 1。

胶接试片的制备流程如图 1 所示,其中,插图胶接试片示意图。

由图可见:胶接试片的粘接面积为 13 mm × 20 mm,其胶层厚度通过调整垫片厚度进行控制。胶接试片的详细制备流程如下:首先,将碳纤维增强复合材料试片和石英陶瓷试片在 100 ℃下烘干 4 h,使用 100 目砂纸对胶接面进行打磨,并用丙酮擦洗

表 1 待粘结试片的成分
Tab. 1 Details of specimens to be adhered

质量分数	组分 1/%	组分 2/%	组分 3/%	尺寸/mm
石英陶瓷试片	SiO ₂ (99.98)	Fe ₂ O ₃ (0.01)	其它 (0.01)	20×15×10
碳纤维增强复合材料试片	碳纤维 T300 (62.40)	环氧树脂 (37.30)	其它 (0.30)	30×20×10

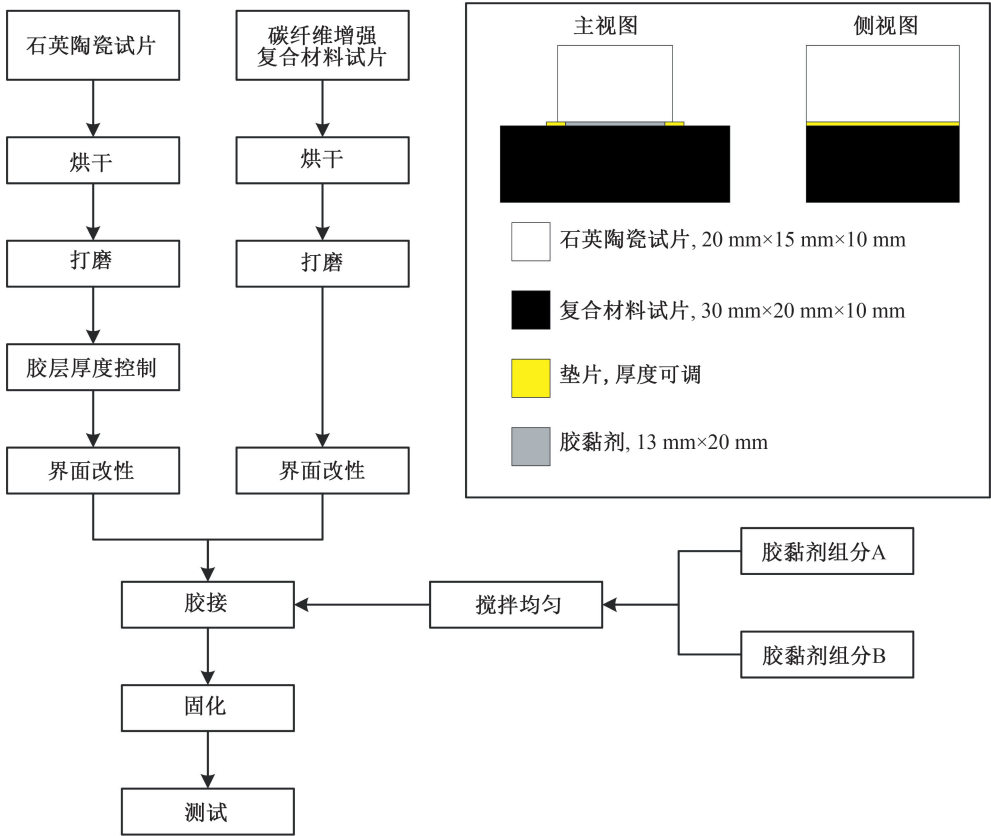


图 1 胶接试片制备流程
Fig. 1 Preparation process of adhesive specimens

干净;然后,在碳纤维增强复合材料表面贴一定厚度的调整垫片;接下来,在室温条件下,使用在 T_1 时刻配置好的胶黏剂将试片进行粘接后,立刻将其放入 100 ℃ 的烘箱中固化 4 h,记录试片放入烘箱的时刻 T_2 ,并计算 $T_2 - T_1$,得到操作等待时间 T_w ;最后,按照 QJ 1634A—1996《胶粘剂压缩剪切强度试验方法》^[15],使用万能试验机 CMT5105,在不同温度条件下,测试固化完成后胶接试片的压缩剪切强

度。相同工艺参数的试片为 1 组,每组共 5 个试片。

1.2 详细实验过程

1) 因石英陶瓷是多孔材料,易受空气中的水分影响,故需要研究湿热状态对胶接强度的影响。同时,考虑到打磨的影响,共制备 8 组不同湿热状态和不同打磨状态的胶接试片,测试和分析其常温条件下的压缩剪切强度。试片状态见表 2。

表 2 不同湿热、打磨状态的胶接试片

Tab. 2 Adhesive specimens with different wet-hot and grinding states

试片编号	湿热状态	打磨状态	胶层厚度/mm	操作等待时间/h
1-1	正常烘干	不打磨	0.4	<0.5
1-2		横竖 2 次	0.4	<0.5
1-3		横竖 4 次	0.4	<0.5
1-4		横竖 6 次	0.4	<0.5
2-1	不烘干,进行湿热处理	不打磨	0.4	<0.5
2-2		横竖 2 次	0.4	<0.5
2-3		横竖 4 次	0.4	<0.5
2-4		横竖 6 次	0.4	<0.5

表中:湿热处理的条件为在 80 ℃,100%相对湿度下处理 6 h;不同打磨状态为不打磨、轻微打磨(横竖各 2 次)、正常打磨(横竖各 4 次)和严重打磨(横竖各 6 次)。

2) 在最优打磨状态的基础上,制备胶层厚度为 0.16 ~ 1.04 mm 的胶接试片,测试其常温条件下的压缩剪切强度,研究胶层厚度对胶接强度的影响,以确定最优的胶层厚度。

3) 在正常烘干、最优打磨状态和胶层厚度的基础上,通过提前配胶来控制操作等待时间,制备 0.5,3,6,10,12,18,24 h 等不同操作等待时间的胶接试片,测试其常温下的压缩剪切强度,研究操作等待时间对胶接强度的影响。

4) 基于上述研究的最优条件,在粘接前使用白

棉布分别蘸取底涂剂 A 和底涂剂 B,在试片的胶接面涂一薄层后晾干 15 min,进行表面改性处理,制备胶接试片。同时,采用同样的条件制备若干组未进行表面改性处理的胶接试片,然后在常温、100 ℃、200 ℃、270 ℃、300 ℃、高温处理后恢复常温等温度条件下对上述胶接试片的压缩剪切强度进行测试,研究不同底涂剂对石英陶瓷与碳纤维连接材料胶接强度和耐温性能的影响。

2 结果与讨论

2.1 湿热和打磨对胶接强度的影响

制备如表 2 所示的胶接试片,压缩剪切强度的测试结果见表 3。

表 3 不同湿热、打磨状态胶接试片的压缩剪切强度
Tab. 3 Compressive shear strength of adhesive specimens with different wet-hot and grinding states

湿热状态	不同打磨状态胶接试片的压缩剪切强度/MPa			
	不打磨	横竖 2 次	横竖 4 次	横竖 6 次
正常烘干	0.80±0.44	1.99±0.59	3.06±0.51	3.12±0.95
不烘干,进行湿热处理	0.51±0.38	1.66±0.63	2.88±0.54	3.08±0.92

由表可见:胶接试片的压缩剪切强度随打磨程度的增大而提高。正常烘干条件下,完全不打磨时,强度仅为 0.8 MPa;横竖打磨各 2 次时,强度提升至 1.99 MPa;横竖打磨各 4 次时,强度达到 3.06 MPa;随着打磨程度的继续提高,强度略微提升,但波动显著增大。湿热处理后,再打磨制备的胶接试片的强度与烘干状态下相比出现了一定的下降,强度下降的幅度随打磨程度的增大而降低。不打磨的试片强度下降了 36.2%,降幅明显;横竖打磨各 4 次的试片强度仅下降了 5.9%,降幅并不明显。由此可以看出,提高打磨程度可在一定范围内提高胶接强度,降低湿热状态对胶接质量的影响,但过度打磨会造成强度离散性增大。因此,横竖各打磨 4 次比较合适。

2.2 胶层厚度对胶接强度的影响

在正常烘干、横竖打磨 4 次的基础上,制备不同胶层厚度的胶接试片,压缩剪切强度测试结果如图 2 所示。

由图可见:随胶层厚度的增大,胶接试片的压缩剪切强度呈现出先增大后减小的趋势,并在胶接厚度为 0.4 mm 时取得最大值 3.06 MPa。当胶层厚度在 0.32 ~ 0.64 mm 时,胶接强度大于最大值的

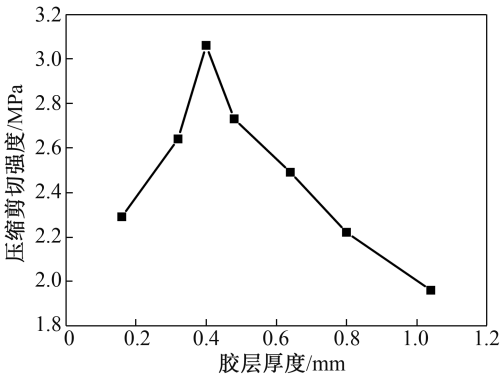


图 2 不同胶层厚度胶接试片的压缩剪切强度
Fig. 2 Compressive shear strength of adhesive specimens with different adhesive thicknesses

80%;当交接间隙为 1.04 mm 时,胶接强度仅达到最大值的 64.1%,为 1.96 MPa。这可能是因为较薄的胶层难以抵消石英陶瓷和碳纤维复合材料的热胀差异带来的内应力^[16],较厚的胶层中存在更多缺陷^[9,17]。因此,最合适的胶层厚度为 0.4 mm。

2.3 操作等待时间对胶接强度的影响

在正常烘干、横竖打磨 4 次、胶层厚度为 0.4 mm 的基础上,制备不同操作等待时间的胶接试片,压缩剪切强度测试结果如图 3 所示。

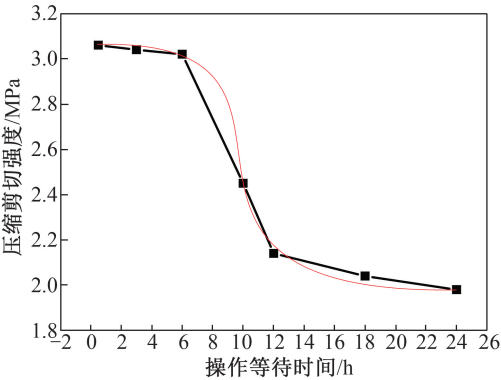


图 3 不同操作等待时间胶接试片的压缩剪切强度
Fig. 3 Compressive shear strength of adhesive specimens with different waiting time before operation

由图可见：胶接试片的压缩剪切强度随操作等待时间的延长而下降。当操作等待时间小于 0.5 h 时，强度最高，为 3.06 MPa；当操作等待时间不大于 6 h 时，强度略微下降，且均大于 3 MPa；当操作等

表 4 底涂剂处理后不同温度条件下的胶接试片压缩剪切强度

Tab. 4 Compressive shear strength of adhesive specimens at different temperatures after treated by primer coatings

测试温度/℃	无底涂剂处理	底涂剂 A 处理		底涂剂 B 处理	
	压剪强度/MPa	压剪强度/MPa	提升率/%	压剪强度/MPa	提升率/%
25	3.06±0.51	3.48±0.53	13.7	3.37±0.79	10.1
100	2.04±0.44	2.81±0.59	37.7	2.61±0.61	27.9
200	1.47±0.21	1.75±0.33	19.0	2.19±0.47	49.0
270	1.19±0.26	1.13±0.35	-5.0	1.73±0.46	45.4
300	1.09±0.31	0.98±0.32	-10.1	1.57±0.50	44.0

使用底涂剂处理前后胶接试片压缩剪切强度随温度的变化趋势如图 4 所示。

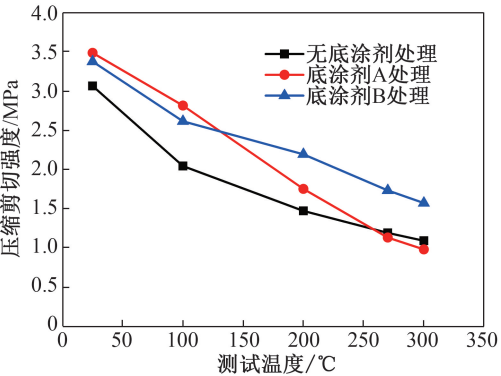


图 4 底涂剂处理后不同温度条件下的胶接试片压缩剪切强度
Fig. 4 Compressive shear strength of adhesive specimens at different temperatures after treated by primer coating

待时间大于 6 h 时，强度的下降速率开始明显加快，至 12 h 时，与直接制备的试片相比下降了 30.1%，降幅十分明显；当操作等待时间大于 12 h 时，强度的下降速率开始放缓，至 24 h 时，与操作等待时间为 12 h 的试片相比仅下降了 7.5%。这可能是因为胶黏剂配置完成后，在等待时间里发生了固化反应，且低温条件下固化交联密度较低^[18]。因此，操作等待时间在 0.5 h 以内是最优的，且在 6 h 以内均是合适的。

2.4 底涂剂处理对胶接强度和耐温的影响

2.4.1 底涂剂处理对石英陶瓷与碳纤维复合材料不同温度下胶接强度的影响

分别使用底涂剂 A 和底涂剂 B 对烘干打磨后试片的胶接面进行处理，再制备胶接试片，然后在室温、100℃、200℃、270℃、300℃等条件下对上述胶接试片的压缩剪切强度进行测试，测试结果见表 4。

由表 4 和图 4 可见：无论是否使用底涂剂对试片的胶接表面进行处理，胶接强度均随温度的升高而降低。无底涂剂处理时，胶接试片在 300℃时的压缩剪切强度为 1.09 MPa，相比室温下的 3.06 MPa 下降了 64.4%。使用底涂剂 A 处理后，胶接试片在常温至 200℃范围内的压缩剪切强度均有一定程度的提高，但当测试温度超过 270℃后，其压缩剪切强度反而出现了轻微下降。当测试温度为 300℃时，试片强度为 0.98 MPa，相比室温条件下的 3.48 MPa 下降了 71.8%，这可能是底涂剂 A 的耐温能力不足，在高温下发生分解，使得胶接界面出现恶化造成的^[19]。使用底涂剂 B 处理后的胶接试片强度在常温和高温下均大于使用底涂剂处理前的强度，与经底涂剂 A 处理的胶接试片强度相比，其在常温下和 100℃时略低，但在 200℃以上时更高。当测试温度为 300℃时，胶接试片的压缩剪切强度

为 1.57 MPa,相比室温下的 3.37 MPa 下降了 53.4%,耐温性能得到明显改善。

不同底涂剂处理对压缩剪切强度的提升比率随温度的变化趋势如图 5 所示。

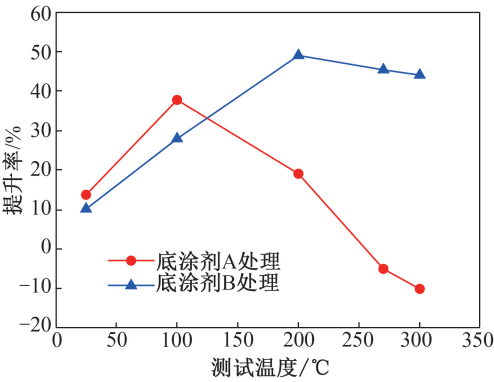


图 5 不同温度下底涂剂处理对胶接强度的提升率
Fig. 5 Increase rate of specimens' compressive shear strength at different temperatures

由图可见:随着测试温度的升高,底涂剂 A 和底涂剂 B 对胶接强度的提升比率均呈现出先增大后减小的趋势。不同的是,底涂剂 A 对强度的提升率在 100 ℃时达到最大值,为 37.7%,但随着测试温度的继续升高,强度提升率开始快速下降,甚至在 270 ℃以上时变成了负值;底涂剂 B 对强度的提升率在 200 ℃时达到最大值,为 49.0%,之后强度提升率随测试温度的升高而缓慢降低,但直至 300 ℃时,仍高于 40%。由此可以看出,底涂剂 A 适用于 100 ℃以下的温度条件,而在更高温度条件下,底涂剂 B 的效果更为显著。

2.4.2 高温处理对底涂剂效果的影响

对不同底涂剂处理前后的胶接试片在粘接固化完成后进行高温处理,处理条件为:200 ℃下保持 5 min后,升温至 290 ℃,升温速率为 18 ℃/min。然后,将试片从炉中取出,待其自然冷却,恢复常温后,对其压缩剪切强度进行测试,测试结果见表 5。

表 5 高温处理对底涂剂效果的影响

Tab. 5 Influence of high-temperature processing on effect of primer coating

表面状态	压缩剪切强度/MPa		提升率/%
	高温处理前	高温处理后	
无底涂剂处理	3.06	3.25	6.2
底涂剂 A 处理	3.48	2.96	-15.0
底涂剂 B 处理	3.37	3.77	11.9

经高温处理后,未使用底涂剂处理的试片的胶接强度提升了 6.2%,达到 3.25 MPa,这可能是硅橡胶在高温下继续固化造成的。使用底涂剂 B 处理的试片在经高温处理后,胶接强度提升了 11.9%,达到 3.77 MPa,这可能是因为底涂剂在高温下参与了硅橡胶的固化反应^[19]。使用底涂剂 A 处理后的试片在经高温处理后,胶接强度反而出现了下降,甚至比无底涂剂高温处理前的强度还略低,这可能是因为底涂剂 A 在高温下发生分解^[20],反而造成胶接界面出现了恶化,这从另一方面说明了底涂剂 A 的耐温能力不足。

3 结论

本文针对硅橡胶胶黏剂胶接石英陶瓷和碳纤维增强复合材料,研究了胶接面打磨前湿热状态、打磨程度、胶层厚度、操作等待时间和底涂剂处理对胶接性能的影响。研究表明:在正常烘干、打磨的情况下,当胶层厚度为 0.4 mm、操作等待时间小于 0.5 h 时,胶接效果最优,石英陶瓷-硅橡胶-碳纤维增强复合材料胶接试片在常温下的压缩剪切强度达到 3.06 MPa。使用底涂剂 A 对胶接面进行处理后,常温下的胶接强度提高了 13.7%,达到 3.48 MPa。当温度为 100 ℃时,强度提升率最高,达到 37.7%。随着测试温度继续升高,强度提升率开始快速下降,并在 270 ℃以上时变成负值。使用底涂剂 B 对胶接面进行处理后,常温下的胶接强度提升了 10.1%,达到 3.37 MPa,300 ℃时的强度提升了 44.0%,达到 1.57 MPa。当温度为 200 ℃时,强度提升率最高,为 49.0%。底涂剂 B 处理后的试片经高温处理后,压缩剪切强度再次小幅提升 11.9%,达到 3.77 MPa。因此,当使用温度不高于 100 ℃时,底涂剂 A 的效果较好,而在更高温度条件下,底涂剂 B 的效果更为显著。后续将进一步研究底涂剂施工工艺对硅橡胶胶黏剂胶接石英陶瓷和碳纤维增强复合材料的胶接强度和耐温性能的影响。

参考文献

[1] 张漠杰. 超音速导弹天线罩及其设计[J]. 制导与引信, 2000, 21(1): 1-6.
[2] 张漠杰. 导弹天线罩连接方式的设计[J]. 上海航天, 1999(3): 31-33.
[3] 彭金涛, 任天斌. 碳纤维增强树脂基复合材料的最新应用现状[J]. 中国胶黏剂, 2014, 23(8): 48-52.

- [4] 程时远, 陈正国. 胶粘剂生产与应用手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003: 23-28.
- [5] 杨玉昆, 廖增琨, 余云照, 等. 合成胶粘剂[M]. 北京: 科学出版社, 1980: 38-42.
- [6] 孙希路, 刘春霞, 许鑫江, 等. 耐高温硅橡胶的研究进展[J]. 有机硅材料, 2018, 32(1): 66-70.
- [7] 李智, 游敏, 丰平. 胶接接头界面理论及其表面处理技术研究进展[J]. 材料导报, 2006, 20(10): 48-51.
- [8] 陈硕琛, 李光耀, 崔俊佳. 表面处理对车身用 5182 铝合金接头胶粘性能的影响[J]. 汽车工程, 2018, 40(7): 865-870.
- [9] 袁辉, 刘鹏飞, 王景全, 等. 胶层厚度对胶连接接头承载力的影响机理与控制[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2013, 14(1): 53-57.
- [10] 王新良. 硅橡胶与聚丙烯材料粘接用底涂剂制备及性能研究[D]. 杭州: 杭州师范大学, 2015.
- [11] 王询, 林建平, 万海浪. 铝合金表面特性对其胶接性能影响的研究进展[J]. 材料工程, 2017, 45(8): 123-131.
- [12] 周科可, 黄燕滨, 姬鹏飞, 等. 铝合金表面粘接技术研究进展[J]. 电镀与涂饰, 2016, 35(8): 431-435.
- [13] 王树鑫, 尚新龙, 鞠苏, 等. 复合材料/金属胶接结构研究进展及发展趋势[J]. 玻璃钢/复合材料, 2017(11): 95-100.
- [14] 黄志超, 陈伟达, 程雯玉, 等. 复合材料连接技术进展[J]. 华东交通大学学报, 2013, 30(4): 1-6.
- [15] 童玲尔, 沈美玲, 张瑞珠. 胶粘剂压缩剪切强度试验方法: QJ 1634A[S]. 1996.
- [16] 蒋海峰, 周丽, 张万良. 大间隙高强度胶黏剂在粘接石英陶瓷与低膨胀合金钢中的应用[J]. 宇航材料工艺, 2004, 34(4): 48-62.
- [17] 和晨峰, 庞坤海, 柴明侠. 胶层厚度对有机硅密封胶拉伸剪切强度的影响[J]. 有机硅材料, 2016, 30(5): 403-404.
- [18] 王玉峰, 王梦沂, 闫普选, 等. 温度和共交联剂用量对四丙氟橡胶硫化的影响[J]. 化工新型材料, 2018, 46(1): 136-139.
- [19] 葛宇. 含端炔硅烷偶联剂处理石英纤维对透波用 QF/PSA 复合材料界面影响[D]. 上海: 华东理工大学, 2014.
- [20] 朱登攀, 刘志涛, 刘琼, 等. KH550 改善硝基胍发射药低温力学性能研究[J]. 火炸药学报, 2016, 39(6): 90-93.

(本文编辑: 李栋颢)

欢迎关注《上海航天》微信公众号

为了加强《上海航天》数字化、网络化建设以及信息化管理, 扩大刊物宣传力度, 本刊现已开通微信公众号。关注微信公众号后, 读者可查阅期刊发表论文, 进行文章检索; 作者可随时查询自己稿件的处理状态, 了解期刊最新发展动态; 编辑部能更便捷地加强编者、作者和读者之间的交流, 促进学术沟通, 创建学术共同体, 扩大《上海航天》期刊的学术影响力。

欢迎大家关注我刊微信公众号!

