第 48 卷第 3 期　　硅　酸　盐　学　报　　Vol. 48，No. 3
2020 年 3 月　　JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY　　March，2020
http://www.gxyb.cbpt.cnki.net　　**DOI**：10.14062/j.issn.0454-5648.20190367

锂霞石复合玻璃钎料连接碳化硅陶瓷接头的应力缓释机理

林盼盼[1]，于凯凯[1]，林铁松[1]，何　鹏[1]，刘守相[2]，徐李刚[2]，龙伟民[3]，鲍　丽[3]，马　佳[3]

(1. 哈尔滨工业大学，先进焊接与连接国家重点实验室，哈尔滨 150001；2. 北京无线电测量研究所，北京 100854；
3. 郑州机械研究所，新型钎焊材料与技术国家重点实验室，郑州 450001)

摘　要：设计了 β-锂霞石/BS 复合玻璃钎料(BSL)，探究了 β-锂霞石掺入量对复合玻璃钎料特征温度、热膨胀系数、润湿性及连接微观组织和力学性能的影响机制。随 β-锂霞石掺入量增加，BSL 复合玻璃钎料热膨胀系数逐渐降低且下降程度逐渐增大，其特征温度则逐渐升高且升高程度呈逐渐增大趋势，在相同温度下的表观接触角增大，同时其表观接触角随温度的变化变缓。当 T=850 ℃、t=10 min 时，复合玻璃钎料(BSL3)连接 RB–SiC 陶瓷的界面与相同工艺参数下的 RB–SiC/BS 界面组织相似，但在玻璃焊缝中，β-锂霞石转变为块状灰色 $KAlSiO_4$ (钾霞石)晶体。块状 $KAlSiO_4$ 负膨胀相可降低热膨胀系数、阻止裂纹扩展，连接接头因此取得了较好的强化效果，接头的压剪强度从未强化前的 5.2 MPa 提高到 10.9 MPa。

关键词：反应烧结碳化硅陶瓷；复合玻璃钎料；微观组织；剪切强度
中图分类号：TG425.2　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2020)03–0408–08
网络出版时间：2020–01–03



Mechanism of Stress Release in RB–SiC Ceramic Joints Bonded by Eucryptite/glass Composite Braze

LIN Panpan[1], *YU Kaikai*[1], *LIN Tiesong*[1], *HE Peng*[1], *LIU Shouxiang*[2], *XU Ligang*[2], *LONG Weimin*[3], *BAO Li*[3], *MA Jia*[3]
(1. State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;
2. Beijing Institute of Radio Measurement, Beijing 100845, China;
3. State Key Laboratory of Advanced Brazing Filler Metals and Technology, Zhengzhou Research Institute of Mechanical Engineering, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: To solve thermal mismatch problem in the bonding process of RB–SiC ceramic using borosilicate glass braze (BS), β-eucryptite/BS composite braze (BSL) was designed. The effect of β-eucryptite addition on a) the characteristic temperature, thermal expansion coefficient and wettability of composite glass braze, as well as b) the microstructure and mechanical properties of joints was investigated. The thermal expansion coefficient of BSL decreases and its rate increases with the increase of β-eucryptite amount. Also, the characteristic temperature of BSL and its rate both increase with the increase of β-eucryptite amount. The apparent contact angle of BSL increases at the same temperature, and the variation of apparent contact angle along with temperature becomes slow. The RB–SiC/composite glass solder (BSL3)/RB–SiC joint has the similar interface to the RB–SiC/BS/RB–SiC joint bonded at 850 ℃ for 10 min. However, in the glass seam, β-eucryptite turns into massive gray $KAlSiO_4$ crystals (*i.e.*, kaliophilite). The massive $KAlSiO_4$ crystals with a negative expansion characteristic can reduce the thermal expansion coefficient and prevent the crack propagation, thus strengthing the joint. The shear strength of the joint after reinforcement increases from 5.2 MPa to 10.9 MPa.

Keywords: reaction sintering silicon carbide ceramic; composite glass braze; microstructure; shear strength

收稿日期：2019–05–31。　修订日期：2019–07–01。
基金项目："战略性国际科技创新合作重点专项(2016YFE0201300)；国家自然科学基金青年科学基金项目(51805112)；哈尔滨工业大学科研创新基金项目(HIT.NSRIF.2020004)；装备预研领域基金项目(61409230512)"。
第一作者：林盼盼(1987—)，女，博士，讲师。
通信作者：林铁松(1978—)，男，博士，教授。
何　鹏(1972—)，男，博士，教授。

Received date: 2019–05–31.　**Revised date:** 2019–07–01.
First author: LIN Panpan (1987–), female, Ph.D., Lecturer.
E-mai: 13B309019@hit.edu.cn
Corresponding author: LIN Tiesong (1978–), male, Ph.D., Professor.
HE Peng (1972–), male, Ph.D., Professor.
E-mail: tiesonglin@hit.edu.cn
hepeng@hit.edu.cn

近年来，随着遥感技术和空间观测技术的发展越来越迅猛，高质量的空间光学系统在武器拦截、探灾、天文观测等领域的应用越来越广泛，已成为发达国家激烈竞争的关键领域[1–2]。这就要求空间光学系统中的空间反射镜具有更大的镜面尺寸和更小的重量，以具有更高的性能[3–4]。由于 SiC 陶瓷材料的弹性模量、导热率和比刚度均较高，且热膨胀系数较小、密度适中，是理想的空间反射镜制造材料[5–6]。因此，实现 SiC 陶瓷的高可靠连接对于增大空间反射镜尺寸具有重要意义。

近年来，国内外学者在 SiC 陶瓷连接方面进行的研究主要涉及钎焊[7]、反应烧结连接[8]、扩散焊[9]和氧化物玻璃连接[10]等方法。其中，氧化物玻璃连接法由于工艺简单、成本低廉，成为主要的连接方式之一。虽然玻璃钎料的热膨胀系数可通过调整其成分而改变，但是由于 SiC 陶瓷热膨胀系数较小，仅仅通过调整玻璃钎料成分很难实现良好匹配，加入负膨胀材料进行复合也是降低热膨胀系数的常用方法。*β*-锂霞石是目前发现的 30 余种负膨胀材料中较常用的一类[11]，常用来制造低膨胀或负膨胀陶瓷[12]、微晶玻璃[13]、陶瓷基复合材料[14]、金属基复合材料[15]等。

由于硼硅酸盐玻璃钎料(BS)连接 RB–SiC 时不可避免会出现热失配问题，设计了 *β*-锂霞石/BS 复合玻璃钎料，探究了不同 *β*-锂霞石掺入量对复合玻璃钎料特征温度、热膨胀系数和润湿性的影响，分析了连接接头的微观组织及力学性能，阐明连接机理及连接接头强化机制。

1　实验

1.1　样品制备

陶瓷母材为反应烧结碳化硅(RB–SiC)，由 Si/SiC 两相组织构成，如图 1 所示。复合钎料中 BS 玻璃钎料的组成如表 1 所示，通过熔融–水淬法制得。复合钎料中 β-锂霞石通过固相烧结制得，原料为石英石、碳酸锂和氧化铝，其配比如表 2 所示。*β*-锂霞石块体由混合均匀的原料经 1 300 ℃烧结 2 h 得到，而 *β*-锂霞石粉末则由块体经球磨干燥后得到，该粉末的 X 射线衍射分析结果及微观组织形貌分别如图 2 和图 3a 所示。可见，当烧结工艺为 1 300 ℃/2 h 时，原料已经全部转化为 *β*-锂霞石。BSL 复合玻璃钎料的具体配比如表 3 所示，由一定量的 BS 玻璃钎料和 *β*-锂霞石粉末经球磨 5 h 并干燥后得到。经混合球磨后，BSL3 样品的微观组织形貌如图 3b 所示，BSL3 复合玻璃钎料中两组分的颗粒分布均匀，无颗粒团聚现象。

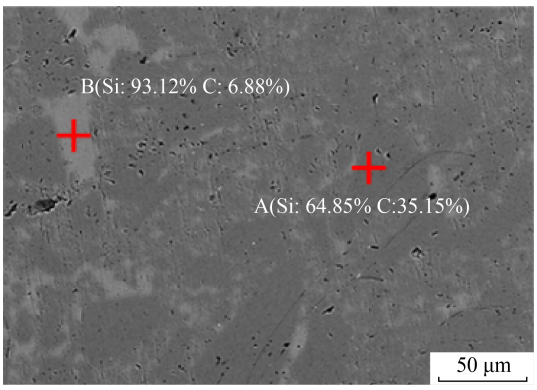


图 1　RB–SiC 材料的背散射照片

Fig. 1　BSE photo of RB–SiC material

表 1　玻璃钎料的化学组成

Table 1　Chemical compositions of glass braze　*x*/%

Na_2O	K_2O	CuO	TiO_2	Al_2O_3	B_2O_3	SiO_2
15.0	15.0	1.0	4.5	4.5	30.0	30.0

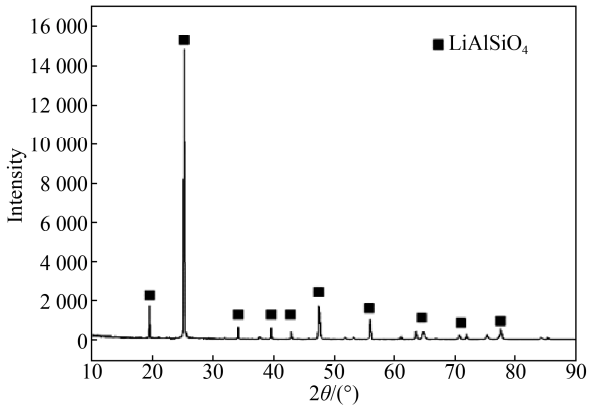
x—Mole fraction.

表 2　*β*-锂霞石的原料配比(wt.%)

Table 2　Raw material ratio of *β*-eucryptite　*w*/%

x(Li):*x*(Al):*x*(Si)	Li_2CO_3	Al_2O_3	SiO_2
1:1:1	24.69	34.44	40.60

w—Mass fraction.



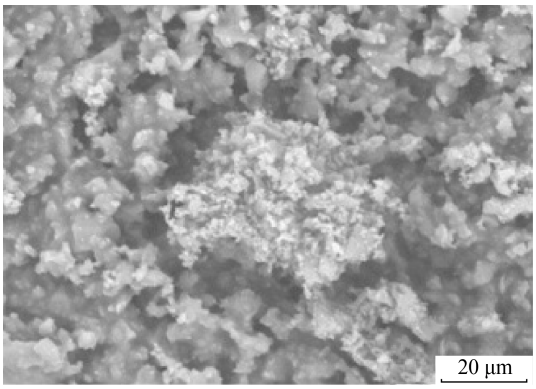
T=1 300 ℃, *t*=2 h.

图 2　烧结产物的 XRD 谱

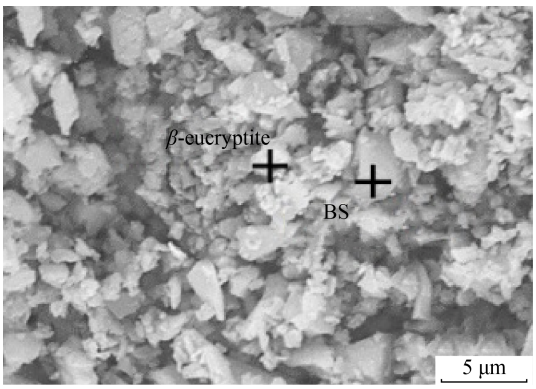
Fig. 2　XRD pattern of sintered product

首先将复合玻璃钎料和松油醇按照体积比 1:1 混合均匀，然后采用丝网印刷的方式将其均匀涂覆在打磨、清洗后的待连接表面上，最后按照三明治结构进行装配。将装配件放入马弗炉中进行连接实验，连接工艺如下：以 10 ℃/min 升至 300 ℃保温 60 min，以去除焊膏中的松油醇；以 10 ℃/min 升至

低于连接温度 50 ℃处；以 5 ℃/min 升至连接温度(750、800 和 850 ℃)保温 10 min；T >400 ℃时，降温速率为 10 ℃/min，再随炉冷却。



(a) Sintered product (T=1 300 ℃, t=2 h)



(b) Composite glass braze

图 3　烧结产物和复合玻璃钎料的 FE–SEM 照片

Fig. 3　FE–SEM micrographs of sintered product and composite glass braze

表 3　复合玻璃钎料的组成

Table 3　Compositions of composite glass braze　*w*/%

Number	β-lithium nepheline powder	BS glass braze
BSL1	5	95
BSL2	10	90
BSL3	15	85
BSL4	20	80

1.2　样品表征

采用 402C Expedis Supreme 型热膨胀仪测试复合玻璃钎料热膨胀系数。采用 VAF-30 型真空润湿角测量仪观察并实时记录复合玻璃钎料在母材上的润湿铺展行为。分别采用 Quanta200FEG 型扫描电子显微镜及能谱分析仪和 Philips X'pert 型 X 射线衍射分析仪表征界面形貌、元素组成和相组成。连接接头的剪切强度采用 Instron 5569 型电子万能材料试验机测得，控制压头的行进速率为 0.5 mm/min。

2　结果与讨论

2.1　复合玻璃钎料特征温度及与 RB–SiC 陶瓷热膨胀系数匹配性

BS 玻璃钎料 BSL 复合玻璃钎料热膨胀系数如图 4 所示。根据热膨胀系数曲线可确定玻璃钎料的软化点(T_f)和玻璃化转变温度(T_g)，见表 4。由图 4 可知，当 β-锂霞石掺入量从 5% (质量分数) (BSL1)增加到 10% (BSL2)，再由 15% (BSL3)增加到 20% (BSL4)时，复合玻璃钎料的热膨胀系数分别下降了 4%和 27%左右。可见，复合玻璃钎料热膨胀系数随着 β-锂霞石掺入量的增加而降低且下降程度逐渐增大。该现象并不符合热膨胀系数的加和公式。这主要是因为加和公式忽略了复合组元间界面作用的影响。若考虑组元间的界面作用(如压应力、张应力、剪应力等)，复合玻璃钎料的膨胀就是在约束条件下进行的。此时，需对加和公式进行修正，引入修正系数，如式(1)所示[16]：

$$\alpha_c = \alpha_0 + nV_F \tag{1}$$

式中：α_c 和 α_0 分别为复合玻璃钎料热膨胀系数的实测值和根据加和公式的计算值；V_F 为 β-锂霞石的体积分数；n 为与复合钎料组成相关的系数。当 V_F 发生变化时，β-锂霞石在玻璃基体中的分布状态及与玻璃基体之间的相互作用也会发生变化，相应地系数 n 也发生变化。因此，当 β-锂霞石的掺入量增加时，热膨胀系数并不会成比例的下降，而是随掺入量增加下降趋势越来越明显。由图 4 还可以看出，

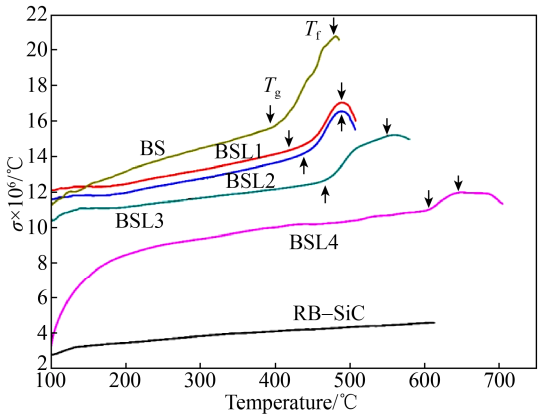


图 4　RB–SiC 陶瓷、BS 玻璃钎料和复合玻璃钎料的热膨胀系数曲线

Fig. 4　Thermal expansion coefficient of RB–SiC ceramic, BS glass braze and composite glass braze

表 4　BS 玻璃钎料和复合玻璃钎料特征温度

Table 4　Characteristic temperatures of BS glass braze and composite glass braze

Sample No.	T_g	T_f	ΔT_g	ΔT_f
BS glass braze	380	480	—	—
BSL1	420	490	40	10
BSL2	430	490	30	0
BSL3	470	550	40	60
BSL4	610	650	140	80

复合玻璃钎料与 RB–SiC 陶瓷母材间的热膨胀匹配性随 β-锂霞石掺入量增加而提高。

由图 4 和表 4 可知，β-锂霞石的掺入量还会影响玻璃钎料的 T_f 和 T_g，当 β-锂霞石的掺入量从 5% (BSL1)增加到 10% (BSL2)，玻璃化转变温度提高约 30 ℃，而玻璃软化点几乎无变化；当掺入量由 15% (BSL3)增加到 20% (BSL4)时，玻璃化转变温度和玻璃软化点分别提高约 140 和 80 ℃。可见，复合玻璃钎料的特征温度随 β-锂霞石掺入量的增加而升高且升高程度呈逐渐增大趋势。这主要是因为复合玻璃钎料相当于二相分散体系，其表观黏度不同于玻璃基体(复合牛顿型流变特性)，而由 Einstein 公式描述[17]：

$$\eta = \eta_0(1 + K_F V_F) \tag{2}$$

式中：η 和 η_0 分别为复合钎料表观黏度和玻璃基体黏度；K_F 和 V_F 分别为 β-锂霞石粉末的形状系数和体积分数。随 β-锂霞石掺入量增加，颗粒会发生团聚，K_F 因此增大，复合玻璃钎料黏度因此呈非线性增大。此外，由图 4 中反应 T_f 的变形软化峰规律地变宽和弥散，说明复合玻璃钎料的形变速率逐渐变慢，流变阻力增大。

2.2　玻璃钎料在 RB–SiC 陶瓷表面的润湿性

不同温度下，BS 玻璃钎料和 BSL 复合玻璃钎料在 RB–SiC 表面的润湿铺展行为分别如图 5 和图 6 所示。可见，BS 玻璃钎料在 RB–SiC 陶瓷母材上的表观接触角随温度变化较快，随着 β-锂霞石掺入量的增加，BSL 复合玻璃钎料在 RB–SiC 陶瓷母材上的表观接触角随温度的变化变缓。这主要是因为针对复合玻璃钎料的润湿性来说，需同时考虑液体黏度和重力对铺展的影响。如前所述，随 β-锂霞石掺入量增加，复合玻璃钎料的表观黏度增大，流变性降低，故在相同温度下的表观接触角较大。此外，与 BS 玻璃钎料的润湿铺展过程相似，BSL 复合玻璃钎料在润湿铺展过程中也出现了凸起，其对应温度区间随 β-锂霞石掺入量的增加而升高，推测该凸起均是由溶入高温玻璃熔体的气体逸出所造成的。

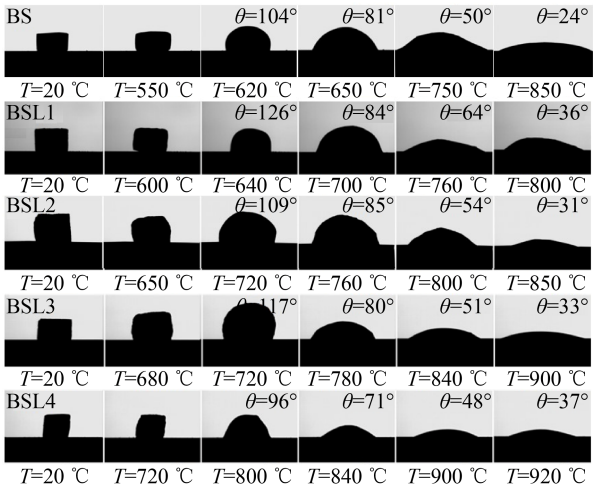


图 5　BS 玻璃钎料和复合玻璃钎料在 RB–SiC 陶瓷上的润湿性

Fig. 5　Wettiong behavior of BS glass braze and composite glass braze on the RB–SiC ceramic

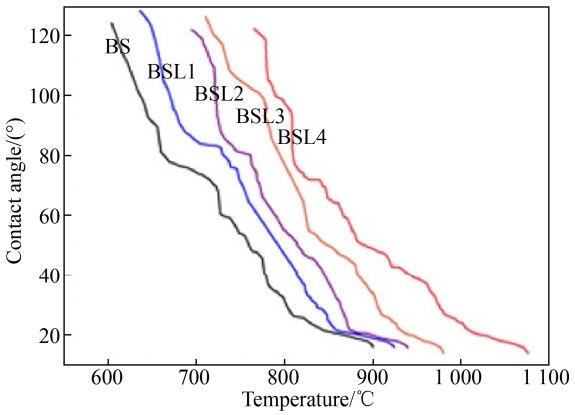


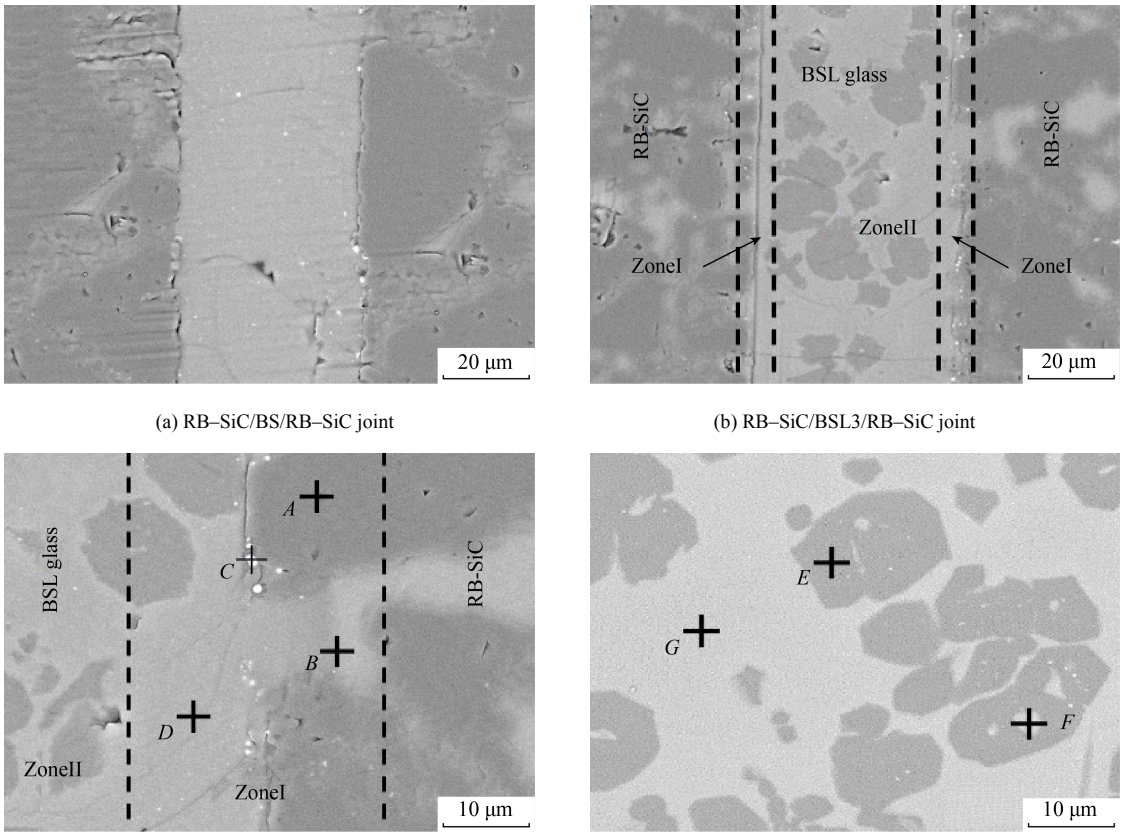
图 6　不同温度下 BS 玻璃钎料及复合玻璃钎料在 RB–SiC 陶瓷上的接触角

Fig. 6　Contact angle of BS glass braze and composite glass braze on the RB–SiC ceramic at different temperature

选择玻璃钎料进行连接时，除了要求其具有良好的铺展润湿能力之外，为了保证其与母材能够实现良好的热匹配，还要求其具有合适的热膨胀系数和软化点。由 BSL 复合玻璃钎料的上述性能分析结果可知，虽然 BSL4 复合玻璃钎料的热膨胀系数与 RB–SiC 陶瓷母材最接近，但是 BSL4 复合玻璃钎料的表观黏度较大，在较高的温度下(840 ℃)才能实现相对较好的润湿。因此，采用 BSL3 复合玻璃钎料对 RB–SiC 陶瓷进行连接。

2.3　玻璃钎料连接 RB–SiC 陶瓷接头的微观组织及相组成

根据前述研究结果，在 T=850 ℃、t=10 min 条件下，使用 BS 玻璃钎料和 BSL3 复合玻璃钎料连接 RB–SiC 陶瓷，接头形貌如图 7 所示。接头中虽存



(a) RB–SiC/BS/RB–SiC joint

(b) RB–SiC/BSL3/RB–SiC joint

(c) RB–SiC/BSL3 interface

(d) BSL3 glass seam

T=850 ℃, *t*=10 min.

图 7 RB–SiC/BS/RB–SiC 和 RB–SiC/BSL3/RB–SiC 连接接头的典型 FE–SEM 微观组织形貌

Fig. 7 FE–SEM micrographs showing the joints of RB–SiC/BS/RB–SiC and RB–SiC/BSL3/RB–SiC

表 5 图 9a 中各点的 EDS 能谱分析结果

Table 5 EDS results of points in Fig. 9a *x*/%

Point	Na	K	Cu	Ti	Al	Si	O	C
A						51.89		48.11
B						78.56		21.44
C	10.01		20.48	1.97	1.94	32.17	33.43	
D	9.35	5.60	0.14	6.56	3.93	39.07	35.35	
E		14.01			14.33	34.09	37.57	
F	9.60	6.89	0.49	4.72	4.05	33.22	41.03	
G	11.18	5.28	0.32	4.52	3.83	31.37	43.50	

在少量的裂纹缺陷，但界面结合紧密，焊缝中可见大尺寸灰色块状相。BSL3 所得连接接头的焊缝宽度明显高于 BS 钎料所得连接接头，连接质量明显改善，仅存在少量裂纹，玻璃焊缝中出现了块状灰色相。RB–SiC/BSL3 界面与 RB–SiC/BS 界面的形貌相似，存在液滴状白色相沿界面分布。

分别对图 7 中各点进行 EDS 能谱分析，结果见表 5。图 7 中 *A*、*B* 两相分别为陶瓷母材中的 SiC 和 Si；沿界面分布的小尺寸液滴相(*C* 处)为 Cu 元素聚集的富硼相，*D* 处为玻璃基相。玻璃焊缝中块状灰色相的元素组成中存在 K、Al 元素的富集，结合该工艺参数下玻璃焊缝的 XRD 分析结果(图 8)，可以确定该灰色相为 $KAlSiO_4$ (钾霞石)晶体。由于 $KAlSiO_4$ 晶体的理论热膨胀系数为 -7×10^{-6}/℃，即其负膨胀特性低于 *β*-锂霞石，玻璃钎料的热膨胀系数

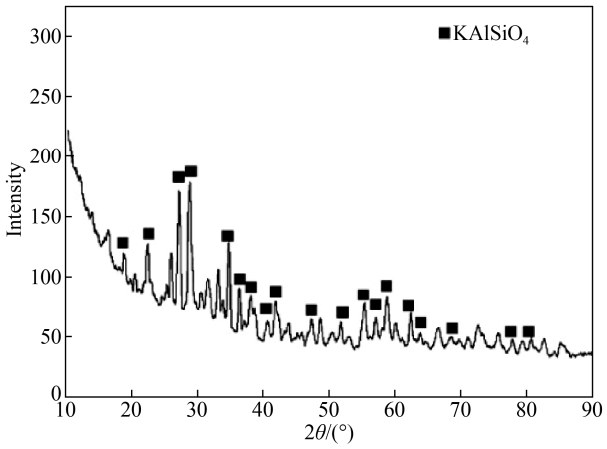


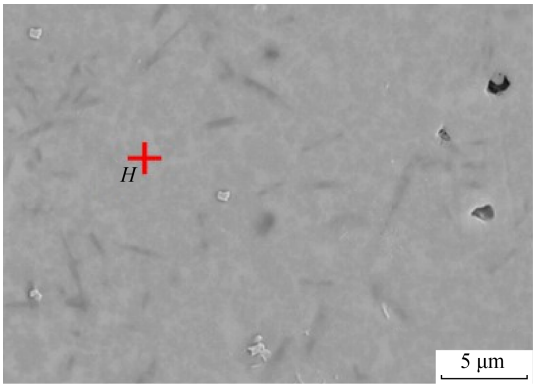
图 8 RB–SiC/BSL3/RB–SiC 玻璃焊缝的 XRD 谱

Fig. 8 XRD result of glass seam in the RB–SiC/BSL3/RB–SiC joint

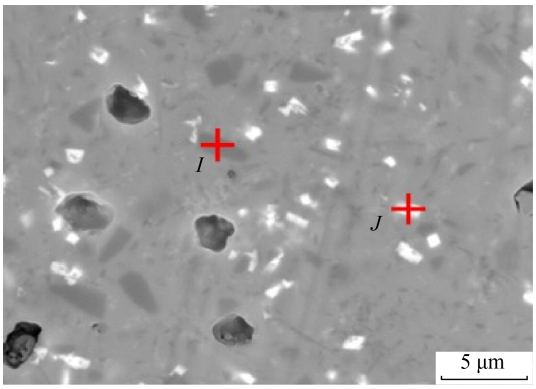
因此低于预期。由分析结果还可知，有少量白色玻璃基体相(F 处)存在于灰色 $KAlSiO_4$ 晶体内部。

2.4　BSL3 玻璃钎料微观组织随连接温度的变化

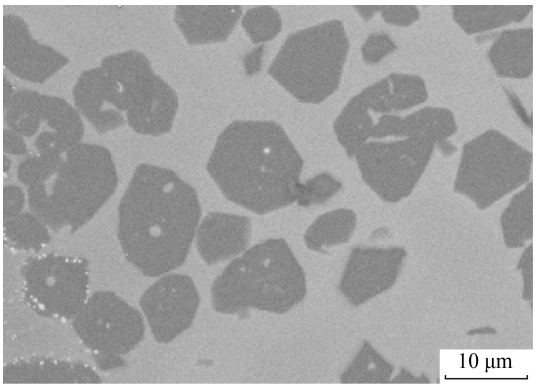
由于 BSL3 和 BS 与 RB–SiC 陶瓷的界面形貌相似，这里仅分析连接温度对 BSL3 复合玻璃焊缝组织的影响。当热处理温度为 600、700 和 800 ℃时，BSL3 复合玻璃钎料的背散射照片如图 9 所示，图 9 中各点的 EDS 能谱分析结果如表 6。结合前述分析结果，可以确定 H、I 和 J 处的相组成分别为 β-锂霞石、$KAlSiO_4$ 晶体和钛酸盐晶体。



(a) 600 ℃



(b) 700 ℃



(c) 800 ℃

图 9　经不同温度热处理后 BSL3 玻璃钎料的背散射照片 (t=10 min)

Fig. 9　BSE photo of BSL3 glass braze heat treated at different temperature for 10 min

由以上结果可知，当 T<600 ℃时，β-锂霞石可以在 BS 玻璃钎料中以“骨料”形式稳定存在并保持均匀分布；当 600 ℃<T<700 ℃时，BS 玻璃钎料开始溶解 β-锂霞石，且钎料中的 Li 原子夺取桥氧离子的能力小于 K 原子，β-锂霞石晶体结构中的部分 Li 原子被 K 原子取代，从而生成 $KAlSiO_4$。之后由于 BS 玻璃钎料达到析晶温度，开始析出钛酸盐晶体，此时 BSL3 玻璃钎料中同时存在钛酸盐晶体、$KAlSiO_4$ 和未溶解的 β-锂霞石。由于玻璃析晶占用了一定量的 K 原子，此时 $KAlSiO_4$ 晶体的尺寸有限，呈针状；当 T≥800 ℃时，析出的钛酸盐晶体开始溶解进入 BS 玻璃钎料，焊缝中 K 元素含量由此提高，于是玻璃钎料中 $KAlSiO_4$ 晶体的量由于具备了生长条件而呈现明显增加的趋势，且呈尺寸较大的块状，在该过程中可能将玻璃基体包围在大块 $KAlSiO_4$ 晶体内部。

2.5　RB–SiC/BSL3/RB–SiC 连接接头力学性能

当保温时间 t=10 min 时，连接温度对 RB–SiC/BSL3/RB–SiC 接头抗剪强度的影响如图 10 所示。不同连接温度下的断口形貌如图 11 所示。由图 10 可见，随连接温度升高，接头抗剪强度逐渐增大。由于 BSL3 玻璃在 750 和 800 ℃的黏度相对较大，使得该温度下连接接头中的气孔不能完全逸出，仍残留在接头中，如图 11a 和图 11b 所示，接头的有

表 6　图 9 中各点的 EDS 能谱分析结果

Table 6　EDS results of points in Fig. 9　　x/%

Point	Na	K	Cu	Ti	Al	Si	O
H					21.15	25.34	53.51
I	0.52	16.10	0.21	0.34	15.18	34.04	33.61
J	3.85	5.10	0.64	16.16	1.14	29.57	43.54

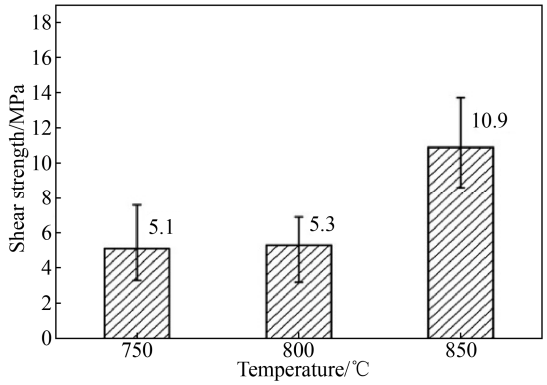
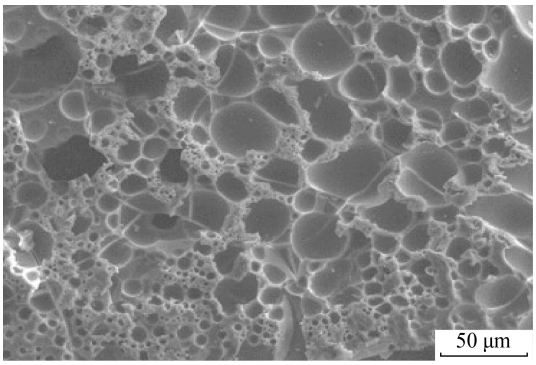
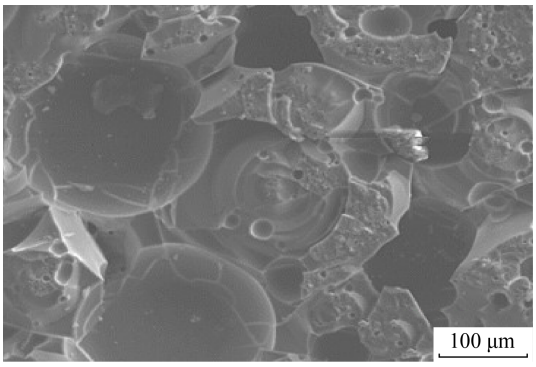


图 10　不同连接温度下 RB–SiC/BSL3/RB–SiC 接头的抗剪强度

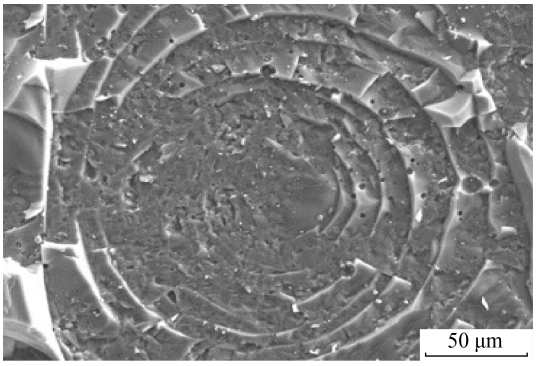
Fig. 10　Shear strength of RB–SiC/BSL3/RB–SiC joints bonded at different temperature



(a) 750 ℃



(b) 800 ℃



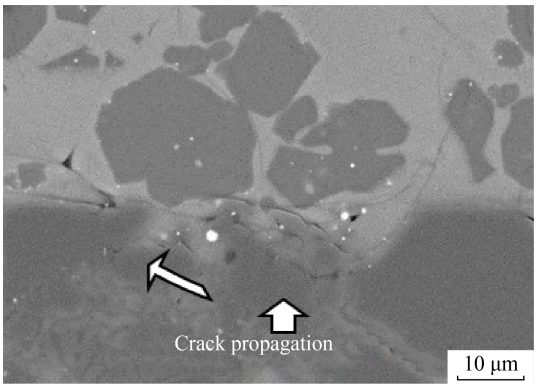
(c) 850 ℃

图 11 不同连接温度下 RB–SiC/BSL3/RB–SiC 接头的断口形貌

Fig. 11 Fracture microstructure of RB–SiC/BSL3/RB–SiC joints bonded at different temperature

效连接面积因此减小，接头抗剪强度相应较低；当连接温度为 850 ℃时，接头焊缝中具有负膨胀特性的块状 $KAlSiO_4$ 晶体可以降低热错配应力，同时阻止裂纹扩展，使得接头抗剪强度较高，断裂发生在玻璃焊缝中，断口呈螺旋层状结构，见图 11c。

与 RB–SiC/BS/RB–SiC 接头抗剪强度相比，玻璃钎料经优化设计后在高温段(T=850 ℃)的连接强度明显提高，从未强化前的 5.2 MPa 提高到 10.9 MPa，该结果与两者连接接头的微观组织形貌一致(图 7a 和图 7b)。RB–SiC/BSL3/RB–SiC 接头中界面裂纹的扩展路径如图 12 所示。由图 12 可知，由于 BSL3 玻璃焊缝中存在 $KAlSiO_4$ 晶体，使其具有类似复合材料的结构，从而可以很好地阻挡裂纹扩展，改变扩展方向，增加扩展路径，进而达到强化接头的作用。同时，由于 $KAlSiO_4$ 晶体具有负膨胀特性，玻璃焊缝的热膨胀系数因此降低，钎料与母材热膨胀系数匹配性得到改善，界面处的热错配应力由此减小。这也是钎料优化设计可显著提高接头力学性能的主要原因。



T=850 ℃, t=10 min.

图 12 $KAlSiO_4$ 晶体对接头裂纹的阻挡作用

Fig. 12 Crack resistance of $KAlSiO_4$ crystal in the joint

3 结论

1) 由于复合材料组元间的界面相互作用，BSL 复合玻璃钎料热膨胀系数随 β-锂霞石掺入量的增加而降低且下降程度逐渐增大，使得复合玻璃钎料与 RB–SiC 陶瓷的热膨胀匹配性提高。BSL 复合玻璃钎料的特征温度随 β-锂霞石掺入量的增加而升高且升高程度呈逐渐增大趋势。

2) 随着 β-锂霞石掺入量的增加，BSL 复合玻璃钎料的表观黏度增大，流变性降低，在相同温度下的表观接触角增大，同时其表观接触角随温度的变化变缓。综合考虑热膨胀系数匹配性和适宜的软化温度，选定 BSL3 钎料进行连接试验。

3) 在 T=850 ℃、t=10 min 条件下采用 BSL3 连接 RB–SiC 陶瓷，获得 RB–SiC/BSL3 连接界面与相同工艺参数下的 RB–SiC/BS/RB–SiC 接头界面组织相似，但在玻璃焊缝中形成了块状灰色 $KAlSiO_4$(钾霞石)晶体。连接过程中 β-锂霞石向 $KAlSiO_4$ 晶体的转变经历了(i)BS 玻璃钎料熔化、β-锂霞石溶解、(ii)BS 玻璃钎料析晶、析晶溶解及(iii)$KAlSiO_4$ 晶体融合 3 个阶段。

4) 当连接温度低于 850 ℃时，β-锂霞石的加入增大了玻璃钎料的粘度，使得连接接头中存在气孔

缺陷，同时使得钎料热膨胀系数的下降低于预期、热错配应力的作用温度区间扩大，对接头的力学性能产生不利影响。但是，在 T=850 ℃、t=10 min 下，接头中块状负膨胀相 $KAlSiO_4$ 可降低热膨胀系数、阻止裂纹扩展，从而达到较好的强化连接接头的效果，接头压剪强度从 5.2 MPa 提高到 10.9 MPa。

参考文献:

[1] 韩杰才, 张宇民, 赫晓东. 大尺寸轻型 SiC 光学反射镜研究进展[J]. 宇航学报, 2001, 22(6): 124–132.
HAN Jiecai, ZHANG Yumin, HE Xiaodong. J Astron (in Chinese), 2001, 22(6): 124–132.

[2] 李旭鹏, 石进峰, 王炜, 等. 大口径空间主反射镜拼接化结构技术综述[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(3): 030002
LI Xupeng, SHI Jinfeng, WANG Wei, et al. Las Optoelect Prog (in Chinese), 2018, 55(3): 030002

[3] 张玉娣, 张长瑞, 周新贵, 等. SiC 基陶瓷卫星反射镜研究进展[J]. 材料导报, 2002, 16(9): 37–39.
ZHANG Yudi, ZHANG Changrui, ZHOU Xingui, et al. Mater Rev (in Chinese), 2002, 16(9): 37–39.

[4] 高明星. 空间大口径光学主镜展开机构设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
GAO Mingxing. The design of deplioyable mechanisms of space large aperture optical primary mirror (in Chinese, dissertation). Harbin: Harbin Institute of technology, 2016.

[5] 范镝, 张忠玉, 牛海燕, 等. SiC 光学镜面加工[J]. 硅酸盐学报, 2003, 31(11): 1096–1100.
FAN Di, ZHANG Zhongyu, NIU Haiyan, et al. J Chin Ceramic Soc, 2003, 31(11): 1096–1100.

[6] BENAVENTE R, SALVADOR M D, PENARANDA–FOIX F L, et al. High thermal stability of microwave sintered low–εr β-eucryptite materials[J]. Ceram Int, 2015, 41: 13817–13822.

[7] 张建军, 刘文安. 用铁粉坯连接碳化硅陶瓷界面的微观结构[J]. 机械工程材料, 2007, 31(4): 9–10.
ZHANG Jianjun, LIU Wenan. Mater Mech Eng (in Chinese), 2007, 31(4): 9–10.

[8] 刘洪丽, 李树杰. 用有机聚合物连接碳化硅陶瓷及陶瓷基复合材料[J]. 硅酸盐学报, 2004, 32(10): 1246–1251.
LIU Hongli, LI Shujie. J Chin Ceram Soc, 2004, 32(10): 1246–1251.

[9] 深井卓, 刘玉莉, 奈贺正明. 用 Fe–Ti 合金扩散连接 SiC 陶瓷[J]. 焊接学报, 1998(2): 93–97.
SHEN Jingzhuo, LIU Yuli, NAI Hezhengming. T China Weld I (in Chinese), 1998(2): 93–97.

[10] FERRARIS M, MONTORSI M, SALVO M. Glass coating for SiC f/SiC composites for high–temperature application[J]. Acta Mater, 2000, 48(18/19): 4721–4724.

[11] 殷海荣, 吕承珍, 李慧, 等. 先进负热膨胀材料的最新研究进展. 中国陶瓷, 2008, 44(9): 14–17.
YIN Hairong, LV Chengzhen, LI Hui, et al. China Ceram (in Chinese), 2008, 44(9): 14–17.

[12] BENAVENTE R, BORRELL A, SALVADOR M D, et al. Fabrication of near–zero thermal expansion of fully dense β-eucryptite ceramics by microwave sintering [J]. Ceram Int, 2014, 40: 935–941.

[13] 童磊, 江伟辉, 梁健, 等. 烧结法制备负膨胀 β-锂霞石微晶玻璃[J]. 中国陶瓷, 2016, 52(11): 6–11.
TONG Lei, JIANG Weihui, LIANG Jian. China Ceram (in Chinese), 2016, 52(11): 6–11.

[14] PELLETANT A, REVERON H, CHEVALIER J, et al. Thermal expansion of β-eucryptite in oxide–based ceramic composites[J]. J Eur Ceram Soc, 2013, 33: 531–538.

[15] 王黎东, 郑馥, 费维栋. 含锂霞石颗粒和硼酸铝晶须的铝基复合材料[J]. 材料科学与工艺, 2003, 11(4): 372–374.
WANG Lidong, ZHENG Fu, FEI Weidong. Mater Sci Tech, 2003, 11(4): 372–374.

[16] 王民权, 樊先平, 张园园, 等. PbO–ZnO–B_2O_3 玻璃和合成 β-锂霞石的复合焊料玻璃性质[J]. 硅酸盐通报, 1992, 1: 4–9.
WANG Minquan, FAN Xianping, ZHANG Yuanyuan, et al. Bull Chin Ceram Soc (in Chinese), 1992, 1: 4–9.

[17] KATZ H S, MILEWSKI I V. 塑料用填料及增强剂手册(中译本). 化学工业出版社, 1985: 30–34.