

X 射线望远镜超薄镜片装配结构的粘结强度探究

沈正祥^{1,2}, 张 璟^{1,2}, 余 俊^{1,2}, 王晓强^{1,2}, 卫俊杰³, 龙华保³

- (1. 同济大学 先进微结构材料教育部重点实验室, 上海 200092;
2. 同济大学 物理科学与工程学院 精密光学工程技术研究所, 上海 200092;
3. 上海航天控制技术研究所, 上海 201109)

摘要: 基于超薄玻璃的嵌套式圆锥近似 Wolter-I 型聚焦望远镜采用环氧树脂胶作为镜片装配的关键粘结材料, 其微米级厚度的胶层粘结强度决定了望远镜的力学性能。文中研究了“超薄镜片-F131 环氧树脂胶-石墨”组成的粘结结构在不同固化环境湿度、不同石墨表面粗糙度下的粘结强度。结果表明, 粘结强度随着环氧树脂固化湿度的增加而减小, 随着石墨表面粗糙度的增加而增加。进一步, 通过比较石墨表面层剥离面积比, 确定石墨表面层剥落是造成粘结结构失效的主要形式。最后, 引入 B 基准值作为粘结强度评价指标, 提高粘结性能评价的准确性和可靠性, 为望远镜装配提供了参考。

关键词: 嵌套式望远镜; 粘结结构; 拉伸强度; B 基准值

中图分类号: O439 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0218001

Research on bonding strength of ultra-thin glass in assembly of X-ray telescope

Shen Zhengxiang^{1,2}, Zhang Jing^{1,2}, Yu Jun^{1,2}, Wang Xiaoqiang^{1,2}, Wei Junjie³, Long Huabao³

- (1. MOE Key Laboratory of Advanced Micro-Structured Materials, Tongji University, Shanghai 200092, China;
2. Institute of Precision Optical Engineering, School of Physics Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;
3. Shanghai Institute of Space Control Technology, Shanghai 201109, China)

Abstract: Epoxy is a key bond material in the mirror assembly of nested conical approximation Wolter-I type focusing telescope which is based on ultra-thin glass. The mechanical properties of the telescope is determined by the bonding strength of the adhesive layer with micron-scale thickness. The bonding strength of "ultra-thin glasses-F131 epoxy-graphite" bonding structure under different curing environments and surface roughness of graphite was studied. The results show that the bonding strength decreases with the increase of the curing humidity of epoxy and increases with the increase of the surface roughness of the graphite. The peel of the graphite was found to be the main type of failure in bonding structure by comparing the surface peeling area ratio of graphite. Finally, the B basis was introduced as an evaluation of bonding strength to improve the accuracy and reliability of the bonding properties for telescope assembly.

Key words: nested telescope; bonding structure; tensile strength; B basis

收稿日期: 2018-09-10; 修订日期: 2018-10-20

基金项目: 国家自然科学基金重大科研仪器研制项目(11427804); 中央高校基本科研业务费专项资金

作者简介: 沈正祥(1980-), 男, 副教授, 博士生导师, 博士, 主要从事先进光学制造技术、光学仪器研制等方面的研究。

Email: shenzx@tongji.edu.cn

0 引言

国际空间高能天文从 1970 年发射的第一个 X 射线天文卫星 Uhuru^[1]开始,经过了半个多世纪的长足发展,在技术上经历了准直望远镜到聚焦成像望远镜的飞跃,X 射线聚焦光学技术是 X 射线天文学最重要的技术之一,具有直接成像能力和高灵敏度的特点,推动 X 射线天文学成为了观测宇宙的新窗口^[2-3]。自 Hans Wolter^[4]提出 Wolter 型结构以来,国外已发射 Chandra^[5-6]、XMM-Newton^[7-8]、Suzaku^[9-10]以及 Nustar^[11-12]等多台 X 射线聚焦望远镜。我国已提出下一代大型 X 射线天文卫星项目—增强型 X 射线时变与偏振卫星 (eXTP),eXTP 将以聚焦载荷为主,利用嵌套式聚焦光学望远镜阵列汇聚并探测 X 射线光子,其中包括 9 台角分辨率 HPD 为 1' 的圆锥近似 Wolter-I 型 X 射线聚焦望远镜阵列^[13-14]。

基于超薄热弯玻璃的 X 射线聚焦技术具有聚焦性能好、成本低的特点,国际上关于这方面的研究方兴未艾,目前,国内多家单位已经开展了相关技术研究。同济大学于 2016 年研制了基于超薄玻璃的嵌套式圆锥近似 Wolter-I 型 X 射线聚焦望远镜原理样机,角分辨率达到 3' 左右^[15],其采用超薄玻璃热成形法制作柱面镜片,石墨通过环氧树脂胶粘结在望远镜芯轴上,固化完成后,再通过环氧树脂胶将超薄镜片粘结在石墨上,往复循环构成“超薄镜片-环氧树脂胶-石墨”的三明治式粘结结构,实现多层镜片装配^[16]。

在“超薄镜片-环氧树脂胶-石墨”粘结结构中,环氧树脂胶层同时影响着望远镜系统的光学性能和力学性能。过厚的环氧树脂胶层虽然可以提高粘结结构的粘结强度,但会增大环氧树脂胶的蠕变,增大胶层厚度的不均匀性,从而影响镜片的面形、位置,降低望远镜的聚焦性能。因此,根据设计要求,环氧树脂胶层厚度一般仅为 1~4 μm 厚,但如此超薄胶层,其环氧树脂粘结固化工艺、粘结结构强度,直接决定了望远镜系统的力学性能。但望远镜超薄环氧树脂胶层粘结结构的研究文献少,因此开展粘结结构强度研究对提高我国望远镜装配工艺和力学性能至关重要。

因此,文中针对“超薄玻璃-F131 环氧树脂-石墨”组成的粘结结构,主要研究环氧树脂固化环境和石墨表面形貌两方面对粘结结构拉伸强度的影响,并引入 B 基准值作为评价指标,提高评价的可靠性,为优化基于超薄玻璃的嵌套式 X 射线聚焦望远镜集成装配提供指导。

1 实验设计

1.1 试件设计

粘结结构的强度主要取决于以下两方面:第一,超薄玻璃、环氧树脂胶、石墨本体材料的强度;第二,石墨-F131 环氧树脂胶-D263 组成的粘结结构的界面强度。

望远镜样机研究过程中使用的粘结材料是 Schott D263 超薄玻璃、F131 环氧树脂胶和 Carbon DS-4 石墨。Schott D263 是肖特公司生产的厚度为 0.3 mm 的超薄玻璃,超薄玻璃作为一种体材料,其强度不受其他因素的影响。胶粘剂为 F131 环氧树脂胶,作为一种双组份环氧树脂胶,由固化剂和树脂两部分组成,理想条件下固化后的强度是 34.48 MPa,但是实际强度受混合工艺与固化环境的影响,因此,固化环境是影响粘结结构粘结强度的一个重要影响因素。石墨 Carbon DS-4 是一种多孔性石墨,材料的拉伸强度是 47 MPa,但是装配过程中需要通过研磨石墨表面实现高精度装配^[15],因此石墨经研磨后表面粗糙度、界面是影响粘结结构强度的另一个主要因素。

由于装配时选用的单根石墨条的粘结面积为 100 mm^2 ,因此根据望远镜装配粘结结构的实际情况,设计了拉伸强度实验样品,如图 1 所示,两个石墨中间利用环氧树脂粘结 D263 超薄玻璃,粘结面积为 100 mm^2 。

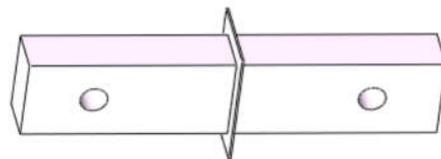


图 1 石墨-F131-超薄玻璃拉伸样品

Fig.1 Tensile sample of graphite-F131 ultra-thin glass

1.2 样品制作

试件粘结过程在超净室中进行以避免污染,温

度恒定在 21 ± 1 °C 之间。采用混合除气装置实现环氧树脂胶充分的混合和除气。在石墨条上均匀涂覆环氧树脂胶，并在室温下加压固化 3 天使其完全固化，最后采用拉力试验机测试粘结结构的拉伸强度。根据望远镜装配要求，环氧树脂胶层厚度控制在 2 ± 1 μm。

2 实验结果与分析

2.1 固化环境湿度对粘结强度的影响

首先研究了固化环境湿度对拉伸强度的影响，整个实验过程，只改变湿度，其它因素均保持一致。

在拉伸测试过程中，不同湿度环境下样品的力-位移关系见图 2，湿度值以百分比形式表示。从图中可以看出随着位移的增加，加载力逐渐增大，当加载力到达最大载荷后，样品瞬间发生脆性破坏，呈典型的线弹性行为。随着固化湿度的增加，样品的最大拉伸力逐渐减小。从图 3 可知，粘结结构的拉伸强度随着湿度的增加而大幅度减小。

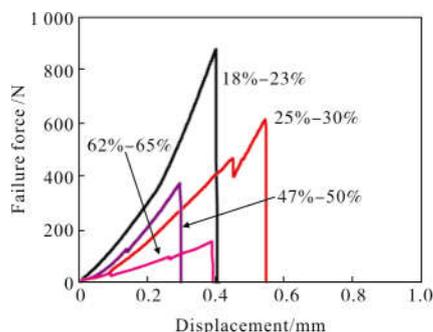


图 2 不同湿度环境下样品失效力与位移关系

Fig.2 Relationship between failure force and displacement of samples under different humidity environments

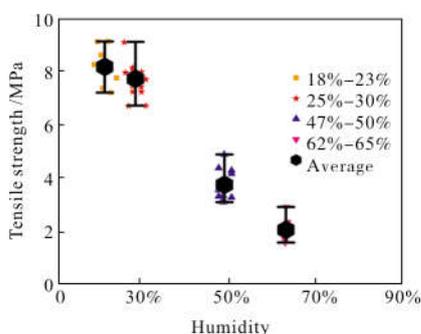


图 3 不同湿度环境下样品湿度与拉伸强度关系

Fig.3 Relationship between humidity and tensile strength of samples under different humidity conditions

为进一步确定其下降幅度，计算了不同湿度环境下拉伸强度变化的百分比，见表 1。以湿度介于 18%~23% 的拉伸强度作为参照，随着湿度的增加，在 25%~30%、47%~50%、62%~65% 湿度环境下下降的比例分别是 0.05、0.54、0.75。可以看到，当固化环境湿度大于 30% 时，粘结强度明显下降。这是因为环氧树脂胶中含有一些官能团，这些官能团在湿度较大的环境下，易发生水解，进而导致拉伸强度的下降。为此，为获得较好的粘结强度，固化湿度应介于 18%~23%。

表 1 不同湿度环境下拉伸强度变化

Tab.1 Change of tensile strength under different humidity conditions

Humidity conditions	Tensile strength/MPa	Change of tensile strength
18%~23%	8.147	Reference
25%~30%	7.68	-0.05
47%~50%	3.721	-0.54
62%~65%	2.03	-0.75

2.2 石墨表面不同处理工艺对粘结强度的影响

其次研究不同石墨形貌对粘结结构拉伸强度的影响，采用金刚石线切割、W10、W20、W40 碳化硼微粉研磨石墨表面。石墨表面经不同方式处理后，采用 Leica 微分干涉显微镜观察表面形貌，采用 ContourGT-X3 光学轮廓仪测量石墨表面粗糙度，物镜采用 10 倍镜头，扫描范围为 $0.62 \text{ mm} \times 0.47 \text{ mm}$ 。粘结结构经拉伸测试破坏后的失效形貌在 Leica 微分干涉显微镜下观测。

2.2.1 石墨表面形貌测量

经不同方式处理后的石墨表面形貌如图 4 所示。

图 4(a1)、(b1)、(c1)、(d1) 是石墨表面经切割、W10、W20、W40 研磨后的表面形貌图；相应地，图 4(a2)、(b2)、(c2)、(d2) 为上述不同处理方式下在轮廓仪下测得的表面形貌。金刚石线切割后石墨表面存在明显的切割线纹路；经研磨后，切割痕迹已经消失，表面整体相对平整。随着研磨粒大小的不同，石墨表面凹凸、高低起伏程度也不同，石墨经切割处理后表面高低起伏最小，W10、W20、W40 研磨后起伏逐渐增大。

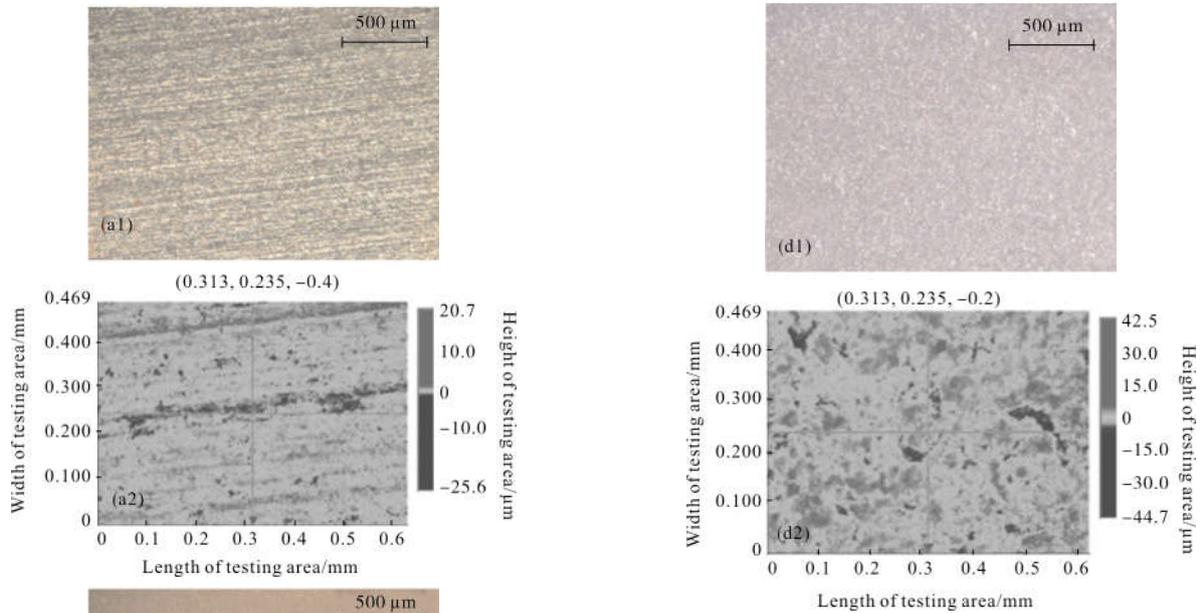


图 4 不同表面处理方式下石墨表面形貌

Fig.4 Surface topography of graphite under different surface treatments

2.2.2 不同处理工艺下的石墨表面粗糙度

从图 5 和表 2 可知，石墨表面粗糙度随着碳化硼磨料粒径的增加而增加。经 W40 研磨后石墨表面

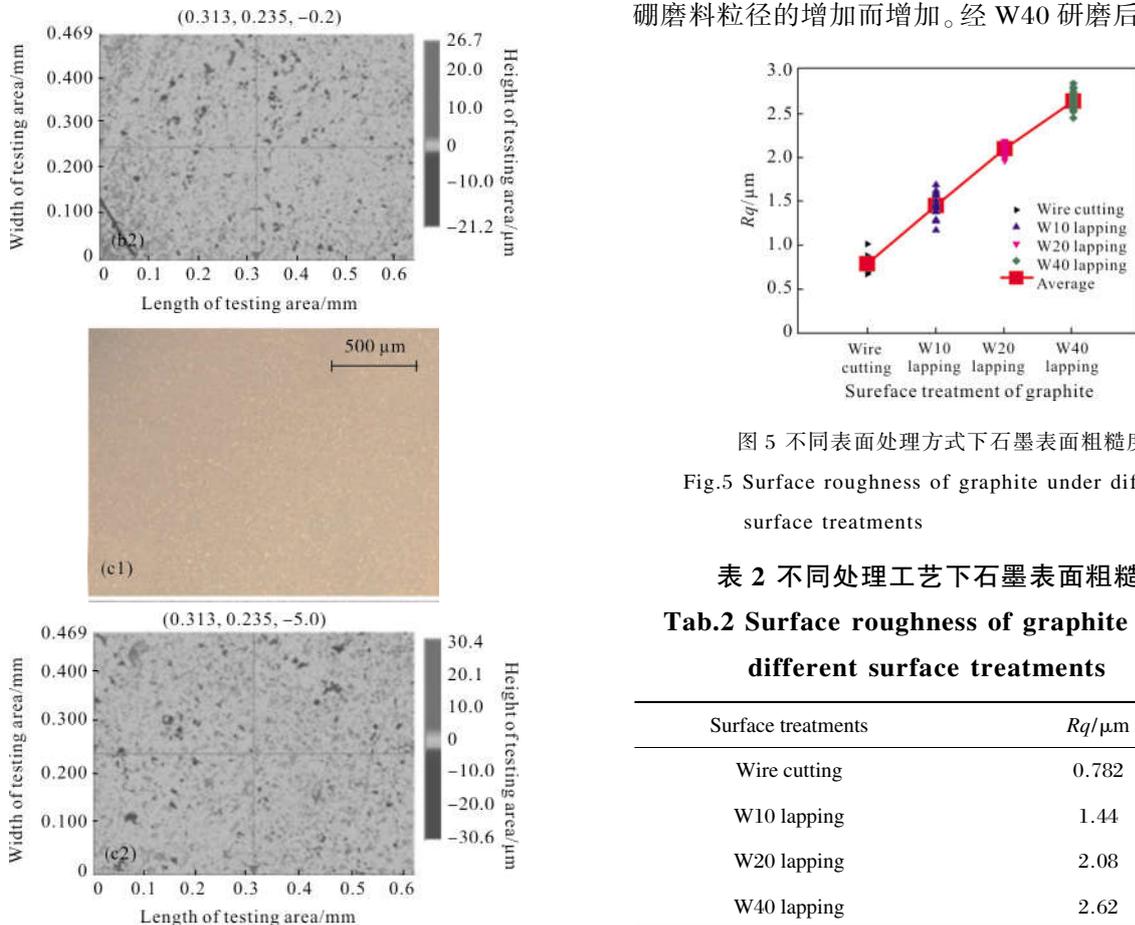


图 5 不同表面处理方式下石墨表面粗糙度

Fig.5 Surface roughness of graphite under different surface treatments

表 2 不同处理工艺下石墨表面粗糙度

Tab.2 Surface roughness of graphite under different surface treatments

Surface treatments	$R_q/\mu\text{m}$
Wire cutting	0.782
W10 lapping	1.44
W20 lapping	2.08
W40 lapping	2.62

粗糙度最大,均值是 2.62 μm ;经 W20 研磨后表面粗糙度次之,均值是 2.08 μm ;经 W10 研磨后表面粗糙度第三,均值是 1.44 μm ;经切割后表面粗糙度最小,均值是 0.782 μm 。

2.2.3 石墨不同表面处理下拉伸强度测试

不同类型样品拉伸测试的力-位移关系图见图 6,可见 4 种粘结样品在拉力加载过程中也呈典型的线弹性行为。

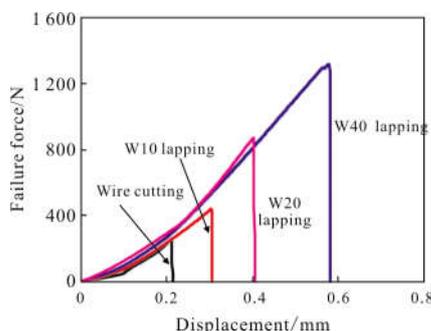


图 6 石墨不同表面处理方式下失效力与位移关系

Fig.6 Relationship between failure force and displacement under different surface treatments of graphite

图 7 所示为粘结结构的拉伸强度与石墨表面粗糙度的关系,拉伸强度变化的百分比见表 3。粘结结构拉伸强度随着石墨表面粗糙度的增加而逐渐增大。以石墨经切割处理后的拉伸强度作为参照,经 W10、W20、W40 研磨后拉伸强度的增加比例分别是 0.637、1.70、2.52。这是因为随着石墨表面粗糙度的增大,比表面积增大,胶粘剂渗入石墨表面的凹坑而增加了胶粘剂和石墨的接触面积,增强了石墨与胶粘剂的机械嵌合,进而提高了拉伸强度。

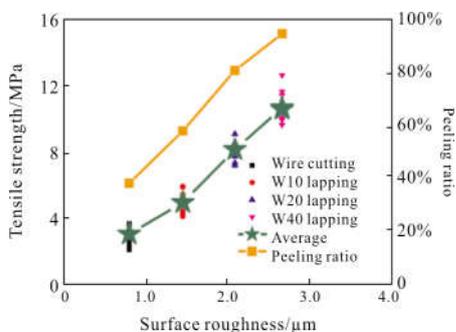


图 7 石墨不同表面粗糙度与拉伸强度、剥离比关系

Fig.7 Relationship between different surface roughness and tensile strength, peeling ratio of graphite

表 3 不同表面粗糙度下拉伸强度变化

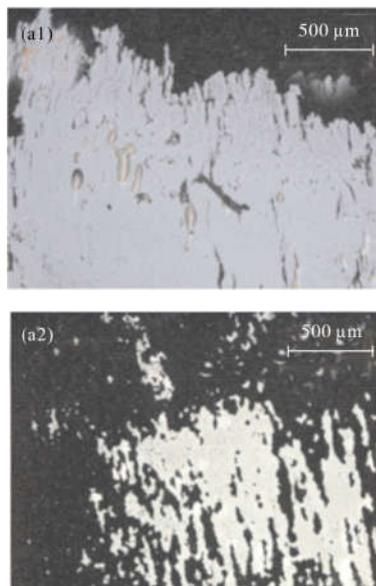
Tab.3 Change of tensile strength under different surface roughness

Parameters	Surface treatments			
	Wire cutting	W10 lapping	W20 lapping	W40 lapping
Surface roughness/ μm	0.78	1.44	2.08	2.66
Tensile strength/MPa	3.007	4.925	8.147	10.591
Change of tensile strength	Reference	63.7%	170%	252%

2.2.4 拉伸强度失效形式分析

“超薄镜片-环氧树脂胶-石墨”粘结结构的失效存在 F131 环氧树脂胶与石墨或玻璃界面的脱离、石墨层剥落等多种形式。将破坏后的样品置于 Leica 微分干涉显微镜下观测胶层与石墨表层的分离情况,获得的失效形貌如图 8 所示。

图 8(a1)、(a2)、(b1)、(b2)、(c)、(d)分别是石墨经切割、W10、W20、W40 研磨处理后,粘结结构经拉伸测试失效后的失效形貌。经切割处理后的样品破坏后,胶层与石墨表层出现大面积分离(见图 8(a1)、(a2)中白色部分),同时出现一定的石墨层剥离(见图 8(a1)、(a2)中黑色部分,下同),但是比例很小;经 W10 研磨处理后的样品破坏后,可以看到比较疏松的石墨剥离层,石墨剥离层下的玻璃清晰可见,石墨



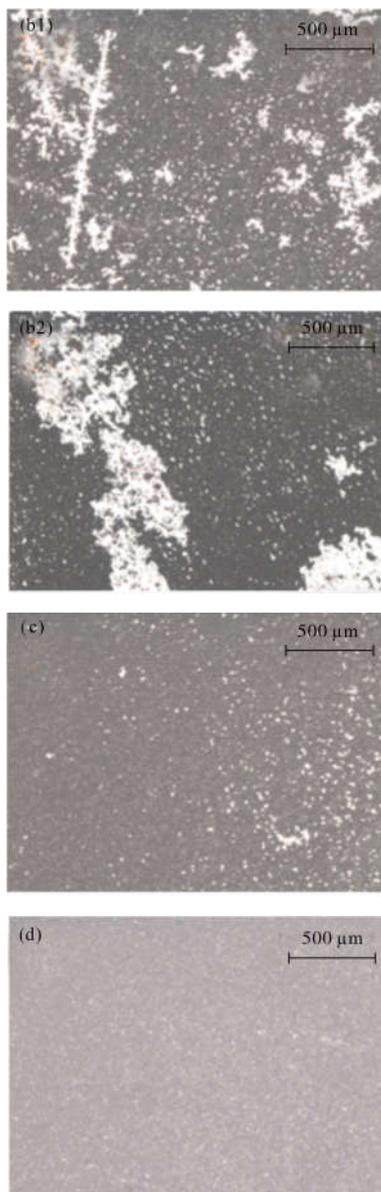


图 8 石墨不同表面处理方式下拉伸失效形貌
Fig.8 Tensile failure morphology under different surface treatments of graphite

层剥离比例大于切割样品;经 W20 处理后的样品破坏后,石墨层剥离明显,且剥离层比较致密;经 W40 处理后的样品破坏后,胶层与石墨粘结良好,石墨表层从石墨体上完全剥离。

定义石墨表层剥离区域占石墨总面积的百分比为石墨表层剥离比,统计结果如图 7 所示。随着石墨表面粗糙度的增大,胶粘剂和石墨表面嵌合越牢固,石墨表层剥离比逐渐增加,石墨表层剥落成为粘结结构失效的主要形式。

3 基于 B 基准值的强度评价

对于粘结结构复合材料而言,由于其材料的各向异性、非均匀性等因素会造成其性能数据在不同环境下分散性很大,因此,不能简单地选取性能数据的平均值作为复合材料的性能数据。为了保证材料的结构安全,只能取一个远低于材料实际性能平均值的的设计许用值。引入 B 基准值进行粘结强度分析,提高粘结性能评价的准确性和可靠性。

B 基准值作为评价材料静力性能设计许用值的指标之一,是指在 95%的置信度下,母体数据中 90%的性能数值群的最小值^[17]。针对不同表面粗糙度石墨的强度数据,采用最大赋范残差(MNR)筛选异常数据,拟合优度检验(OSL),确定双参数 Weibull 分布作为其数据分布形式,并估计其形状和尺度参数^[18]。设 $F(x)$ 为双参数 Weibull 分布下其累积分布概率,见公式(1);B 基准值计算见公式(2)、(3)。

$$F(x) = 1 - e^{-(x/\hat{\alpha})^{\hat{\beta}}} \quad (1)$$

$$B = \hat{q} e^{\left[\frac{-v}{\hat{\beta}\sqrt{n}} \right]} \quad (2)$$

$$\hat{q} = \hat{\alpha} (0.10536)^{\frac{1}{\hat{\beta}}} \quad (3)$$

式中: v 为 Weibull 分布单侧 B 基准值容限系数; $\hat{\beta}$ 为形状参数; $\hat{\alpha}$ 为尺度参数。

由公式(1)获得不同粘结结构拉伸强度的双参数 Weibull 分布累积分布概率,见图 9。由公式(2)、(3)求得结构粘结强度 B 基准值随石墨表面粗糙度的增大而逐渐增大,石墨经切割、W10、W20、W40 研磨处理的粘结结构强度 B 基准值分别是 1.767 4、3.068 6、6.22、7.5 MPa

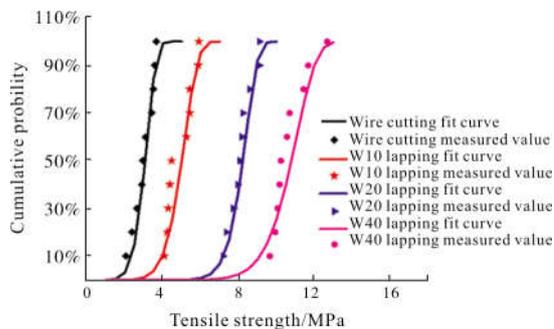


图 9 石墨不同表面处理方式下拉伸强度累积分布概率
Fig.9 Probability of tensile strength cumulative distribution under different surface treatments of graphite

4 结论

文中研究了“超薄镜片-F131 环氧树脂胶-石墨”粘结结构的强度,获得了环氧树脂固化环境湿度、石墨表面粗糙度对粘结结构拉伸强度的影响规律。石墨表面粗糙度越大,固化环境湿度越小,粘结结构粘结强度越大,且石墨表面层剥落是造成强度失效的主要形式。当石墨表面粗糙度为 2.62 μm ,湿度环境介于 18%~23%,获得的粘结结构拉伸强度 B 基准值是 7.5 MPa,为优化 X 射线嵌套式望远镜的装配提供参考。

参考文献:

- [1] Cominsky L, Forman W, Jones C, et al. UHURU observations of the globular cluster X-ray source NGC 6712 [J]. *The Astrophysical Journal*, 1977, 211: L9-L11.
- [2] 张双南. 空间时代的天文学研究 [J]. 中国科学院院刊, 2014, 29(5): 590-602.
- [3] Huang Chen, Wang Jianjun, Xue Li, et al. Next generation of astronomical telescope and survey mission (I)[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(2): 0217006. (in Chinese)
- [4] Wolter H. Generalized Schwarzschild system of mirrors with glancing reflection as optical system for X-ray[J]. *Annals of Physics*, 1952, 10: 286-295.
- [5] Weisskopf M C, Tananbaum H D, Van Speybroeck L P, et al. Chandra X-ray observatory (CXO): Overview[C]// SPIE, 2000, 4012: 2-17.
- [6] Rajiva S. Chandra X-ray observatory (AXAF)-NASA's most powerful X-ray space telescope [J]. *Bulletin of the Astronomical Society of India*, 1999: 227-231.
- [7] Lumb D H, Jansen F A, Schartel N. X-ray Multi-mirror Mission (XMM -Newton) observatory [J]. *Optical Engineering*, 2012, 51(1): 011009.
- [8] Citterio O, Conconi P, Ghigo M, et al. Results of X-ray measurements on electroformed mirror shells for the XMM project[C]//SPIE, 1993, 1742: 256-264.
- [9] Misaki K, Kunieda H, Maeda Y, et al. Ground-based X-ray calibration of the telescopes onboard Astro-E2 satellite[C]//SPIE, 2004, 5168: 294-306.
- [10] Serlemitsos P J, Soong Y. Foil X-ray mirrors [J]. *Astrophysics and Space Science*, 1996, 239(2): 177-196.
- [11] Koglin J E, Christensen F E, Craig W W, et al. NuSTAR hard X-ray optics [C]//SPIE, 2005, 5900: 59000X.
- [12] Craig W W, An H J, Blaedel K L, et al. Fabrication of the NuSTAR flight optics [C]//SPIE, 2011, 8147: 81470H.
- [13] Zhang S N, Feroci M, Santangelo A, et al. eXTP: Enhanced X-ray timing and polarization mission[C]// SPIE, 2017, 9905: 99051Q.
- [14] Ling Xin. China catches up in X-ray astronomy [J]. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, 2017, 31(2): 74-79. (in Chinese)
- [15] Shen Z X, Wang X Q, Wang K, et al. Development of X-ray multilayer telescope optics for XTP mission[C]// SPIE, 2016, 9905: 990520.
- [16] Xie Wenliang, Shen Zhengxiang, Yu Jun, et al. Support structure design and mechanical experiment analysis of X-ray focusing telescope [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(4): 0418002. (in Chinese)
- [17] Ma Guoyu. Research on statistical methods of allowed values for material mechanics design and software development [D]. Shenyang: Northeastern University, 2010. (in Chinese)
- [18] Wang Hai, Shen Zhen. Composite Material Manual[M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 2014. (in Chinese)