表面强化及功能化

# AA5083 铝合金表面处理对 AA5083/低温胶胶接性能的影响

张爱爱[1]，潘蕾[1]，张帅[2]，王一凡[1]，吕云飞[1]

（1.南京航空航天大学 材料科学与技术学院,南京 211100；2.清华大学 机械工程学院，北京 100084）

**摘 要：目的** 为适应 LNG 船运输液化天然气时的低温工作环境，选择 AA5083 铝合金和外围保温材料，通过低温胶胶接的方式进行液货维护系统内部结构的搭建，保证满足基本强度要求的同时，降低生产成本。**方法** 对 AA5083 铝合金进行喷砂和阳极氧化处理，对其表面形貌、表面粗糙度、表面能以及与低温胶的接触角进行表面性能表征，同时进行 25、0、−60、−120 ℃四种不同温度下的单搭剪切力学性能测试，研究揭示不同表面处理方法对 AA5083/低温胶胶接强度的影响。**结果** 与 AA5083 铝合金原始试样对比，表面处理后的铝合金表面粗糙度变大，表面能升高，与低温胶的接触角变小，胶接接头强度显著提升，其中，阳极氧化后试样的胶接强度在 0 ℃达到最大，为 29.80 MPa，比原始试样提升了 128.18%，比喷砂试样提升了 29.90%。**结论** 结合表面性能表征以及低温下的单搭剪切试验结果，喷砂和阳极氧化均能提高 AA5083 铝合金与低温胶的粘结强度，而且阳极氧化后的 AA5083 铝合金具有较好的综合性能。

**关键词：**AA5083 铝合金；喷砂；阳极氧化；胶接；表面性能；低温粘结强度

**中图分类号：**TG174.4 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-3660(2017)10-0179-06

**DOI：**10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.10.026

# Effects of AA5083 Surface Treatment on Bonding Performance of AA5083/Cryogenic Adhesive

*ZHANG Ai-ai*[1], *PAN Lei* [1], *ZHANG Shuai*[2], *WANG Yi-fan*[1], *LYU Yun-fei*[1]

(1.Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211100, China; 2.Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**ABSTRACT:** Due to cryogenic working environment of transportation for liquefied natural gas (LNG) by LNG ship, AA5083 alloy and outer thermal insulation material were selected. The work aims to build internal structure for liquid cargo maintenance system by means of cryogenic adhesive bonding, which not only guarantees basic strength requirement but also reduces production cost. Sand blasting and anodizing treatment were applied to the AA5083 alloy, surface properties including morphology, surface roughness, surface energy and contact angle with cryogenic adhesive were characterized. Meanwhile, single lap shear mechanical properties were tested at 25, 0, −60 and −120 ℃, respectively to reveal effects of different surface treatment methods

收稿日期：2017-05-28；修订日期：2017-07-26

**Received**：2017-05-28；**Revised**：2017-07-26

基金项目：国家自然科学基金（51503099）；国家船舶项目（新型液化天然气船液货维护系统预先研究）

**Fund**：Supported by the National Natural Science Foundation of China (51503099), the National Shipbuilding Project (New Type of Liquefied Natural Gas (LNG) Ship Cargo Containment System Research in Advance)

作者简介：张爱爱（1989—），女，硕士，主要研究方向为先进复合材料。

**Biography**：ZHANG Ai-ai(1989—), Female, Master, Research foucus: advanced composite materials.

通讯作者：潘蕾（1975—），女，博士，副教授，主要研究方向为先进复合材料。

**Corresponding author**：PAN Lei(1975—), Female, Ph. D., Associate professor, Research foucus: advanced composite materials.

on bonding strength of AA5083/cryogenic adhesive. Compared with the original AA5083 alloy specimen, surface roughness of the aluminum alloy subject to surface treatment increased, surface energy increased, contact angle with cryogenic adhesive reduced and bonding strength improved significantly. Bonding strength of the anodized specimen reached to the maximum, 29.80 MPa at 0 ℃, 128.18% higher than that of the original specimen, 29.90% higher than that of specimen subject to sand blasting. Combined with results of surface properties characterization and single lap shear test at low temperature, both sand blasting and anodizing can improve bonding strength between AA5083 alloy and cryogenic adhesive. Moreover, the anodized AA5083 alloy exhibits better overall performance.

**KEY WORDS:** AA5083 aluminum alloy; sand blasting; anodizing; bonding; surface properties; low temperature bonding strength

现代社会的飞速发展导致人们对天然气的需求量逐年增加。根据相关报道，2035 年对天然气的需求量有望超过 5 亿立方米[1,2]，天然气将代替煤炭成为世界第二大能源[3,4]。天然气的运输和储存问题日益受到人们的重视[5]，长距离运输天然气时，采用船运能获得很高的经济效益，因此可以预测未来天然气产业对 LNG 船的需求量将会很大。

制造 LNG 船的关键技术是解决液货维护系统的设计与制造，而如何实现保温绝热材料与储罐用金属材料的连接则是其中的一个关键环节。AA5083 铝合金属于典型的 Al-Mg 系合金，其淬火感系数低，成形加工性良好，被广泛应用在车辆用材、致冷装置、船舶、舰艇等设备上[6]。同时，它还是一种很重要的结构材料，并具有很高的强度以及良好的塑性和耐蚀性，被大量应用在 LNG 船液货维护系统上，是该系统制造中广泛使用的一种低温金属材料[7]。

AA5083 铝合金与保温材料连接技术的选择至关重要。如使用铆接和螺栓连接，连接结构比较笨重，而且会产生严重的应力集中。如使用焊接连接技术，难度比较大，原因是铝合金本身的焊接性能较差，而保温绝热材料与铝合金又属于异种材料。相比之下，胶接具有明显优势，其工艺简单，成本低，应力集中小，很适合用于液货维护系统中金属基体与保温绝热材料的连接。

金属表面状态对胶接后接头的性能会产生很大影响，尤其是对接头强度，因而研究不同表面处理方法对胶接接头性能的影响具有很高的应用价值[8]。基于此，本文研究阳极氧化和喷砂两种表面处理技术对 AA5083 铝合金/低温胶胶接性能的影响，从而为液货维护系统制造中金属基体与保温绝热材料的胶接工艺提供一定的可靠实验数据。

## 1 实验材料

采用的金属材料为无锡五创金属材料有限公司生产的 AA5083 铝合金，材料状态为退火态（O 态），其力学性能见表 1。所用环氧树脂类超低温胶为深圳市郎博万精细化有限公司生产的 No.1-6131 系列低温胶，其特性见表 2。阳极氧化用化学试剂如表 3 所示。

**表 1 AA5083 铝合金的力学性能**
**Tab.1 Mechanical properties of AA5083 alloy**

| 屈服强度 /MPa | 抗拉强度 /MPa | 抗弯强度 /MPa | 延伸率 /% | 冲击韧性 /(J·cm$^{-2}$) | 冲击功 /J |
|---|---|---|---|---|---|
| 158.53 | 300.91 | 461.51 | 25.71 | 48.34 | 38.64 |

**表 2 No.1-6131 系列低温胶的特性**
**Tab.2 Characteristics of No. 1-6131 series low temperature glue**

| 硬度 /(Shore D) | 抗压强度 /MPa | 剪切强度 /MPa | 拉伸强度 /MPa | 耐温范围 /℃ |
|---|---|---|---|---|
| ≥65 | ≥50 | ≥14 | ≥22 | −200 ~ 150 |

**表 3 实验用化学试剂**
**Tab.3 Chemical reagents for experiment use**

| 试剂 | 规格 | 作用 |
|---|---|---|
| 异丙醇 | 分析纯 | 除油 |
| 磷酸钠 | 分析纯 | 化学清洗 |
| 碳酸钠 | 分析纯 | 化学清洗 |
| 氢氧化钠 | 分析纯 | 化学清洗、碱蚀 |
| 硫酸 | 分析纯 | 酸洗出光、电解液成分 |
| 磷酸 | 分析纯 | 电解液成分 |
| 草酸 | 分析纯 | 电解液成分 |
| 丙三醇 | 分析纯 | 电解液成分 |

## 2 实验方法

### 2.1 AA5083 表面喷砂

采用压缩空气将砂粒高速喷射到被处理工件的表面，以改变工件表面性能的过程称之为喷砂[9]。影响喷砂效果的因素有喷砂压力、喷砂时间、喷砂角度、砂粒直径（目数）和喷枪与被处理材料表面的距离等。本文选用的喷砂工艺参数见表 4。

表 4　喷砂工艺参数
Tab.4 Process parameters of sand blasting

| 喷砂压力/MPa | 喷砂角度/(°) | 喷砂距离/mm | 砂粒直径/目 |
|---|---|---|---|
| 0.4 | 15 | 60 | 150 |

## 2.2　AA5083 表面阳极氧化

预处理工序为异丙醇除油、化学清洗液清洗、氢氧化钠溶液碱蚀和硫酸溶液酸洗出光四个步骤。化学清洗溶液为 30 g/L 磷酸钠、5 g/L 氢氧化钠和 15 g/L 碳酸钠，碱蚀溶液为 30 g/L 氢氧化钠，酸洗出光溶液为 25%（体积分数）硫酸。实验所用电解液的成分为[10]：磷酸 70 g/L，硫酸 50 g/L，草酸 7 g/L，甘油 20 g/L。以往研究发现铝合金的型号[11]、电流密度[12]、阳极氧化时间、氧化电压和电解液温度[13]等都是影响阳极氧化效果，进而影响胶接性能的重要因素。根据已有的研究结果及同时进行的实验分析，最终选择阳极氧化的工艺参数为：电压 25 V、温度 40 ℃、时间 20 min。图 1 为 AA5083 阳极氧化的工艺流程。

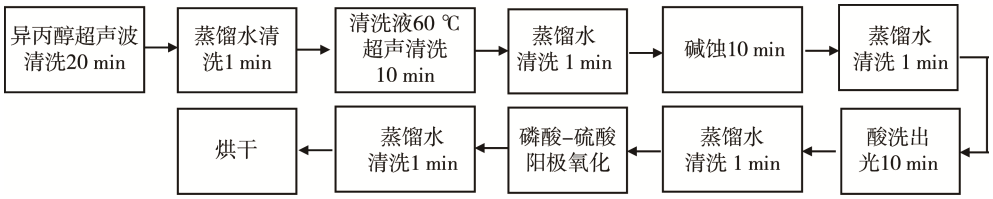



图 1　阳极氧化的工艺流程
Fig.1 Anodic oxidation process

## 2.3　AA5083 表面粗糙度测量

使用 SURFTEST SJ-210 系列粗糙度仪测量 AA5083 铝合金胶接部位的粗糙度 *Ra*，测量时在每个试样表面选取 5 个测量位置，结果取其平均值，并且要求测量针的移动轨迹与试样长轴方向平行。

## 2.4　AA5083/低温胶接触角测量

使用南京航空航天大学参与研制的 JC2000D7M 型接触角测量仪，分别测量环氧树脂低温胶与原始试样、经过喷砂处理和阳极氧化处理后 AA5083 铝合金试样的接触角。测试时，在每个待测试样表面取 3 个位置，结果取平均值。从胶粘剂滴落到试样表面时开始计时 1 min，待稳定后拍下液滴与试样接触照片，然后用系统软件分析接触角的大小。

## 2.5　AA5083 表面能的计算

使用南京航空航天大学参与研制的 JC2000D7M 型接触角测量仪分别测量乙二醇和水与经过不同表面处理方法处理过的 AA5083 铝合金试样胶接部位的接触角，利用水和乙二醇两种溶剂的表面能，计算 AA5083 的表面能。

假设固-液接触面积为单位面积，在恒温恒压下，引起体系自由能的变化如式（1）。

$$\Delta G=\gamma_{SL}-\gamma_{SV}-\gamma_{LV} \quad (1)$$

式（2）（3）分别为粘附功和 Young 方程，由式（2—3）可得到式（4）。

$$W_a=\gamma_{SV}+\gamma_{LV}-\gamma_{SL} \quad (2)$$

$$\gamma_{SV}=\gamma_{SL}+\gamma_{LV}\cos\theta \quad (3)$$

$$W_a=\gamma_{LV}(1+\cos\theta) \quad (4)$$

粘附功又可以用两相中各自的极性分量和色散分量来表示，表示式为式（5）。

$$W_a=2\sqrt{\gamma_{SV}^d\gamma_{LV}^d}+2\sqrt{\gamma_{SV}^p\gamma_{LV}^p} \quad (5)$$

由式（4）（5）得到式（6）。

$$\gamma_{LV}(1+\cos\theta)=2\sqrt{\gamma_{SV}^d\gamma_{LV}^d}+2\sqrt{\gamma_{SV}^p\gamma_{LV}^p} \quad (6)$$

固体表面自由能为式（7）。

$$\gamma_{SV}=\gamma_{SV}^p+\gamma_{SV}^d \quad (7)$$

以上公式中，$\gamma_{SL}$、$\gamma_{SV}$、$\gamma_{LV}$ 分别为单位面积固-液、固-气和液-气的界面自由能；$\gamma_{SV}^p$、$\gamma_{LV}^p$ 为固体和液体表面自由能的极性部分；$\gamma_{SV}^d$、$\gamma_{LV}^d$ 为固体和液体表面自由能的色散部分。为得到液体的表面能，需要计算出该液体的 $\gamma_{LV}^d$ 和 $\gamma_{LV}^p$，见表 5。

表 5　两种液体的表面能参数
Tab.5 Surface energy parameters of two kinds of liquid

mN/m

| 液体 | $\gamma_{LV}$ | $\gamma_{LV}^d$ | $\gamma_{LV}^p$ |
|---|---|---|---|
| 水 | 72.8 | 21.8 | 51.0 |
| 乙二醇 | 48.3 | 29.3 | 19.0 |

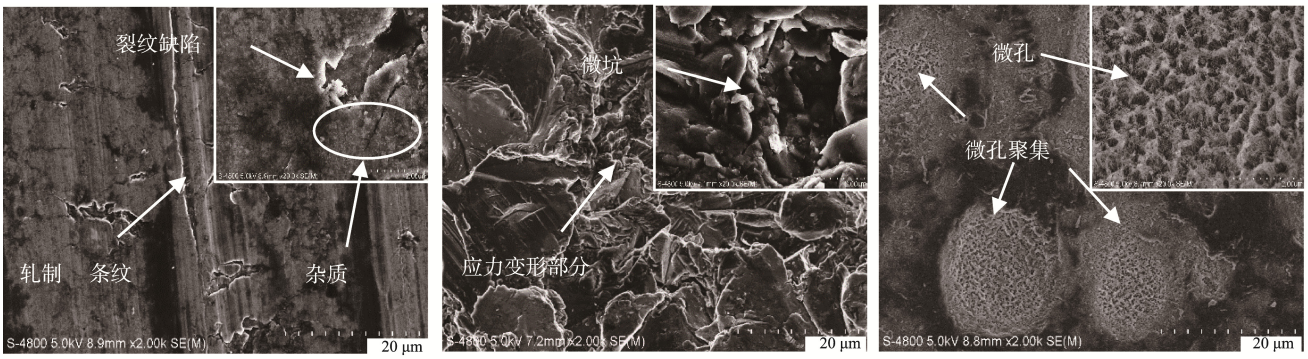
## 2.6　AA5083/低温胶接头剪切强度测试

分别在室温和低温条件下，测试 AA5083/低温胶的单搭剪切强度。室温下的试验参考标准为 GB/T 7124—2008《胶粘剂拉伸剪切强度的测定》，低温下的试验参考标准为 GJB1709—1993《胶粘剂低温拉伸剪切强度试验方法》。低温测试温度分为−120、−60、0 ℃。

# 3　结果与讨论

## 3.1　不同表面处理后 AA5083 铝合金的表面形貌

图 2 为不同表面处理后 AA5083 铝合金的表面形




a 原始试样　　b 喷砂试样　　c 阳极氧化试样

图 2　不同表面处理后 AA5083 铝合金的表面形貌

Fig.2 Morphology of AA5083 alloy after different surface treatment: a) original specimen, b) sand blasting specimen, c) anodized specimen

貌。由图可见，仅经过异丙醇超声除油清洗的原始试样表面较为光滑平整，能够看到轧制产生的条纹和裂纹。此外，还可以看到一些嵌入其表面的白色小颗粒，这些白色小颗粒是铝合金表面的杂质。喷砂处理样品的表面凹凸不平，存在一些微坑。涂胶时，低温胶会浸到这些微坑中，提高胶接强度。同时，微坑的存在还可以增大铝合金表面积。一般阳极氧化后的铝合金表面氧化膜上会产生均匀分布的小孔[14]，当电解液的成分一定时，氧化膜上小孔的直径和孔隙率随着氧化电压、电解液温度和氧化时间的变化而变化。由图 2c 可知，本实验得到的铝合金表面氧化膜上的小孔已经相互接触，形成了相互贯通的孔洞体系，这种孔洞体系有利于胶粘剂分子渗入其中，增强了低温胶与 AA5083 表面的粘结力，从而提高了胶接强度。

## 3.2　不同表面处理后 AA5083 铝合金的表面粗糙度

图 3 为不同表面处理后 AA5083 铝合金的表面轮廓曲线。由图可见，未经表面处理试样的波峰、波谷数量少，但波域宽，波的起伏不规整，波动比较大。这些波动应该是由生产过程中的缺陷引起的，但是由于数量少，所以试样表面整体仍比较光滑、平整，粗糙度比较小，仅为 0.267 μm。而经喷砂和阳极氧化处理后试样的波峰、波谷细密，并且轮廓曲线在一个相对稳定的区域内比较平稳，波动较小。喷砂处理时，砂粒对铝合金有切削和清洗的作用，铝合金表面氧化膜和杂质被清理，表面变得凹凸不平，粗糙度也变大，为 1.472 μm。阳极氧化也使铝合金表面由平整变为凹凸不平，粗糙度为 1.040 μm。

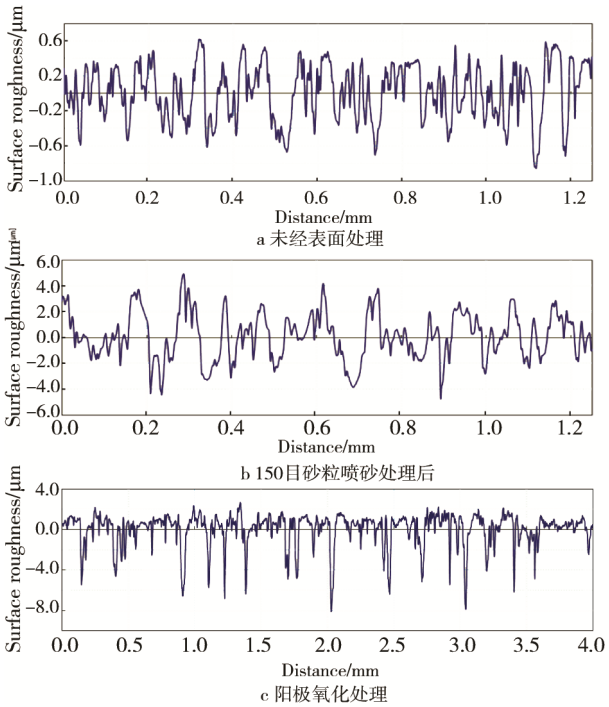
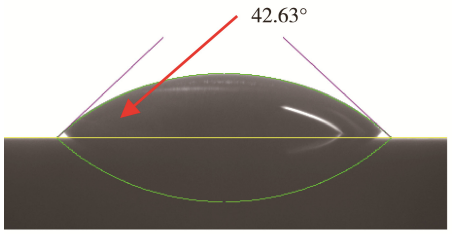



图 3　不同表面处理后 AA5083 铝合金的表面轮廓曲线

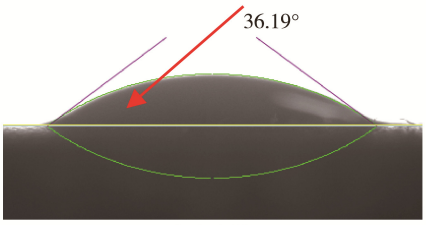
Fig.3 Surface contour curve of AA5083 alloy after different surface treatment: a) without surface treatment, b) 150 mesh sand blasting, c) anodizing treatment

### 3.3　不同表面处理后 AA5083 铝合金/低温胶的接触角

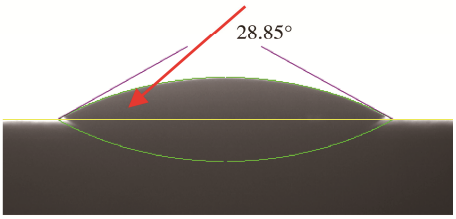
根据杨氏方程 $\gamma_{SV}-\gamma_{SL}=\gamma_{LV}\cos\theta$ 知，为获得较高的表面能，应使 AA5083 表面具有较小的接触角。图 4 为低温胶与不同表面处理后铝合金表面的接触角。由图可见，未经表面处理的 AA5083 铝合金表面平整光滑，其与低温胶的接触角 $\theta$ 为 42.63°，喷砂后铝合金与低温胶的接触角为 36.19°，阳极氧化后铝合金与低温胶的接触角达到 28.85°。因此，环氧树脂超低温胶对未经处理铝合金的润湿性较差，而对喷砂和阳极氧化后铝合金的润湿性比较好。



a 原始试样



b 喷砂试样



c 阳极氧化试样

图 4　低温胶与不同表面处理后铝合金表面的接触角

Fig.4 Contact angle of cryogenic adhesive to surface of aluminum alloy after different surface treatment: a) original specimen, b) sand blasting specimen, c) anodized specimen

### 3.4　不同表面处理后 AA5083 铝合金的表面能

表 6 为不同表面处理后 AA5083 铝合金的表面能。由表可知，基材与液体的润湿性越好，材料表面能越大。经计算，未经表面处理铝合金试样的表面能为 28.00 mN/m，喷砂后试样的表面能达到 29.13 mN/m，阳极氧化后试样的表面能最高，为 80.34 mN/m。说明阳极氧化后铝合金与液体的润湿性比较好。

表 6　不同表面处理后 AA5083 铝合金的表面能

**Tab.6 Surface energy of AA5083 specimen after different surface treatment**

| 试样 | 接触角/(°) | | 表面能 /(mN·m$^{-1}$) |
|---|---|---|---|
| | 水 | 乙二醇 | |
| 原始试样 | 76.17 | 64.76 | 28.00 |
| 喷砂试样 | 74.64 | 61.83 | 29.13 |
| 阳极氧化试样 | 19.07 | 13.97 | 80.34 |

### 3.5　不同表面处理后 AA5083/低温胶胶接强度对比

表 7 为不同温度下，不同表面处理后 AA5083/低温胶的单搭剪切强度。由表可知，在相同温度下，试样的单搭剪切强度高低顺序为：阳极氧化试样＞喷砂试样＞原始试样。喷砂之所以能提高胶接强度是因为砂粒在喷射过程中与铝合金表面相互作用，对铝合金表面进行切削和清洗，使铝合金表面的氧化膜和杂质被清理干净，并形成许多凹坑结构。凹坑增大了铝合金的表面积，即在涂胶过程中增大了低温胶与铝合金表面的接触面积，从而使胶接界面的粘结性增强。另外，在凹坑中固化的低温胶与铝合金表面形成一定程度的机械啮合力，对提高界面的粘结性也起到了辅助作用。与喷砂类似，阳极氧化前处理（化学清洗、酸洗、碱洗）将铝合金表面的污染物和自然氧化膜清理干净，再通过阳极氧化在铝合金表面构建微孔结构。微孔可以增加铝合金的表面积，而且固化在微孔中的低温胶可与基体形成机械啮合力。另外，阳极氧化后的试样表面形成了一种极性氧化物，使胶接界面的范德华力增加[15]。以上因素的综合作用，增强了胶接界面的粘结强度。阳极氧化试样的单搭强度大于喷砂试样的单搭强度，是因为微孔形成的机械啮合力大于微坑形成的机械啮合力。另外，喷砂形成的微坑尺寸较大，而低温胶又比较黏稠，在喷砂后的胶接界面易形成气泡，且不容易逸出或弥合，使界面强度减小。

表 7　不同温度下 AA5083 胶接试样的单搭剪切强度

**Tab.7 Single lap shear strength of AA5083 bonding specimens at different temperature**　MPa

| 试样 | 25 ℃ | 0 ℃ | −60 ℃ | −120 ℃ |
|---|---|---|---|---|
| 原始试样 | 7.23 | 13.06 | 10.07 | 8.93 |
| 喷砂试样 | 18.18 | 22.94 | 20.42 | 16.77 |
| 阳极氧化试样 | 21.31 | 29.80 | 24.24 | 19.67 |

如图 5 所示，随着温度的降低，原始试样、喷砂试样和阳极氧化试样的单搭剪切强度都表现为先升高后降低的趋势，并且均在 0 ℃时达到最大，分别为 13.06、22.94、29.8 MPa。这主要是因为随温度的降低，胶层物质结构发生了变化，从而影响了其粘结性能。

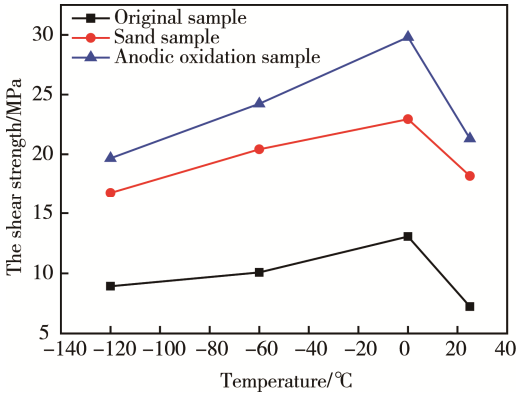



图 5　不同表面处理后 AA5083/低温胶剪切强度与温度关系曲线

Fig.5 Relation curve for shear strength of AA5083/cryogenic adhesive and temperature after different surface treatment

金属表面性能表征结果显示：接触角大小顺序为原始试样＞阳极氧化试样＞喷砂试样，表面能大小顺序为阳极氧化试样＞喷砂试样＞原始试样。说明低温胶对经阳极氧化处理和喷砂处理后试样的润湿性能比较好[16]，即低温胶在阳极氧化试样和喷砂试样表面能较好地铺展开，从而提高单搭试样的胶接强度。

## 4　结论

1）对比原始 AA5083，喷砂后和阳极氧化后试样与低温胶接头的单搭剪切强度在不同温度下均有所提高，且均在室温条件下，接头强度的提高程度最大。其中，喷砂试样比原始试样的接头强度提高了 151.45%，阳极氧化试样比原始试样的接头强度提高了 194.74%。此外，两种表面处理试样的接头强度均随拉伸温度的降低先升高再降低，且均在 0 ℃时，接头强度达到最高。

2）喷砂和阳极氧化均能有效提高 AA5083/低温胶的接头强度，而且，阳极氧化的效果更好。

**参考文献：**

[1] 张庆. 我国天然气市场发展趋势与战略对策[J]. 当代石油石化, 2010, 18(11): 16-20.
ZHANG Qing. China's Natural Gas Market Development Trend and Strategic Countermeasures[J]. Modern Petroleum and Petrochemical, 2010, 18(11): 16-20.

[2] PLANAS E, PASTOR E, CASAL J, et al. Analysis of the Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion (BLEVE) of a Liquefied Natural Gas Road Tanker: The Zarzalico Accident[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2015, 34: 127-138.

[3] 陈柳钦. 天然气是能源低碳化利用的重要方向[J]. 低碳世界, 2011(9): 34-37.
CHEN Liu-qin. Natural Gas is One of the Important Direction of Low Carbon Energy Use[J]. A Low-carbon World, 2011(9): 34-37.

[4] 周波，詹淑慧. 我国天然气大发展中若干问题的思考[J]. 城市建设理论研究：电子版, 2014(8): 67-74
ZHOU Bo, ZHAN Shu-hui. Thinking about Some Issues of Natural Gas Development in China[J]. Urban Construction Theory Research: The Electronic, 2014 (8): 67-74

[5] 孙亚南. 天然气安全的建议与对策[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2014(1): 251.
SUN Ya-nan. Gas Safety Advice and Countermeasures[J]. Journal of China Petroleum and Chemical Industry Standard and Quality, 2014(1): 251.

[6] 李仲华. 搅拌摩擦焊接 5083 铝合金焊缝组织与性能研究[D]. 广州：广东工业大学, 2011.
LI Zhong-hua. Friction Stir Welding of 5083 Aluminum Alloy Weld Microstructure and Properties Research[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2011.

[7] MALOPHEYEV S, KAIBYSHEV R. Strengthening Mechanisms in a Zr-modified 5083 Alloy Deformed to High Strains[J]. Materials Science and Engineering: A, 2015, 620: 246-252.

[8] 李洪江，白雪峰. 结构胶胶接接头耐久性的研究进展[J]. 化学与粘合, 2014(1): 50-54.
LI Hong-jiang, BAI Xue-feng. The Research Progress of Structural Adhesive Glue Joint Durability [J]. Chemical and Glue, 2014(1): 50-54.

[9] 宋斌，陈铭，陈利修. 喷砂预处理工艺对涂层结合强度的影响[J]. 机械设计与研究, 2013(3): 70-72.
SONG Bin, CHEN Ming, CHEN Li-xiu. Sand Blasting Pretreatment Process on the Influence of Coating Bonding Strength[J]. Journal of Mechanical Design and Research, 2013(3): 70-72.

[10] 黄燕滨，仲流石. 磷酸-硫酸阳极氧化对铝合金表面粘接性能的影响[J]. 电镀与涂饰, 2013, 32(1): 32-36.
HUANG Yan-bin, ZHONG Liu-shi. The Influence of Phosphoric Acid-sulfuric Acid Anodic Oxidation of Aluminum Alloy to Surface Adhesive Performance[J]. Journal of Electroplating and Coating, 2013, 32(1): 32- 36.

[11] TSANGARAKI-KAPLANOGLOU I, THEOHARI S, DIMOGERONTAKIS T, et al. Effect of Alloy Types on the Anodizing Process of Aluminum[J]. Surface and Coatings Technology, 2006, 200(8): 2634-2641.

[12] BOZZA A, GIOVANARDI R, MANFREDINI T, et al. Pulsed Current Effect on Hard Anodizing Process of 7075-T6 Aluminium Alloy[J]. Surface and Coatings Technology, 2015, 270: 139-144.

[13] WEI X W, CHEN C Y. Influence of Oxidation Heat on Hard Anodic Film of Aluminum Alloy-TNMSC[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 22(11): 2707-2712.

[14] PAN L, DUAN L, ZHENG Z, et al. Surface Characteristics and Adhesive Strength to Polyetheretherketone of Titanium Electrografted with Aryl Diazonium Salt[J]. Materials & Design, 2016, 95: 555-562.

[15] 刘晓静. 5083 铝合金胶接工艺及接头性能研究[D]. 大连：大连交通大学, 2013.
LIU Xiao-jing. 5083 Aluminum Alloy Cementing Technology and Joint Performance Study[D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2013.

[16] XU Y, LI H, SHEN Y, et al. Improvement of Adhesion Performance between Aluminum Alloy Sheet and Epoxy Based on Anodizing Technique[J]. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2016, 70: 74-80.