

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20181019001

铝熔体与镀铬氧化铝的润湿行为

徐前刚, 徐雪源

(沈阳航空航天大学 材料科学与工程学院, 沈阳 110136)

摘要: 为了探究镀层对金属熔体与陶瓷基底润湿行为的作用机理, 采用座滴法测试了 700~800 °C 高真空条件下铝熔体与氧化铝、镀铬氧化铝基底及铬块的润湿性, 研究了镀铬层厚度及润湿温度对润湿行为的影响。结果表明, 铬镀层能够明显改善铝熔体与氧化铝基底的润湿性, 随着镀层厚度的增加 (260~1200 nm), 终态接触角逐渐减小, 铺展速率明显增大, 且铝熔体在 1200 nm 镀铬层上比在铬块上具有更好的润湿性。800 °C 下铝熔体在镀铬氧化铝基底上会形成明显的前驱膜。铝熔体与镀铬层在界面反应形成了非连续反应产物颗粒, 700 °C 时为 Al_7Cr , 800 °C 时为 $\text{Al}_{11}\text{Cr}_2$, 而铝熔体与铬块在界面形成了连续的反应层。结合润湿界面反应及铺展前沿组态变化对上述结果进行了分析。

关键词: 氧化铝; 镀铬层; 润湿性; 铝熔体

中图分类号: TG174.44

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2019)02-0079-09

Wetting Behavior of Molten Aluminum on Cr-coated Alumina

XU Qiangang, XU Xueyuan

(School of Materials Science and Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

Abstract: To investigate the mechanism of the coating on the wetting behavior of metal melt on ceramic substrate, sessile drop method was used to measure the wettability of molten aluminum on alumina, Cr-coated aluminum and chromium substrates between 700 and 800 °C in high vacuum condition. The effect of chrome coatings thickness and wetting temperature on the wetting behavior was investigated. The experimental results show that the chromium film deposited on alumina improved the wettability of aluminum with alumina. With the increase of chromium film thickness from 260 to 1200 nm, the terminal contact angle decreased gradually and the spreading rate increases. The wettability of Cr-coated alumina with Cr film thickness of 1200 nm by molten aluminum was better than that of the chromium substrate. Precursor films formed at the wetting front in the wetting of Cr-coated alumina and Cr substrate by molten aluminum at 800 °C. Discontinuous reaction product particles (Al_7Cr at 700 °C and $\text{Al}_{11}\text{Cr}_2$ at 800 °C) form at the interface between the aluminium melts and the Cr-coated alumina. However, continuous reaction layers form at the interface between the aluminium melts and the chromium substrate. The experimental results were analyzed on the basis of the wetting interface reaction and configuration changes of the spread front.

Keywords: alumina; chromium coatings; wettability; aluminum melts

收稿日期: 2018-10-19; 修回日期: 2019-03-06

通信作者: 徐前刚 (1972—), 男 (汉), 教授, 博士; 研究方向: 材料润湿性及表面与界面研究; E-mail: xu-qiangang@163.com

基金项目: 国家自然科学基金 (50704001)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (50704001)

引用格式: 徐前刚, 徐雪源. 铝熔体与镀铬氧化铝的润湿行为[J]. 中国表面工程, 2019, 32(2): 79-87.

XU Q G, XU X Y. Wetting behavior of molten aluminum on Cr-coated alumina[J]. China Surface Engineering, 2019, 32(2): 79-87.

0 引言

金属熔体与陶瓷的润湿行为是材料制备和加工中一种常见的物理化学现象,如金属基复合材料的制备以及陶瓷材料的连接等,其在很大程度上决定了材料制备与加工的可能性和材料的使用性能^[1-2]。有效改善和调控金属熔体与陶瓷的润湿行为是许多研究者一直追求的目标,陶瓷表面金属化是改善其与金属熔体润湿性的一种常用而有效的方法。Mo-Mn 陶瓷表面金属化、化学镀、化学气相沉积、金属热蒸发镀及磁控溅射镀等方法均可有效地使陶瓷表面金属化^[3-8]。与这些大量的工艺研究相比,金属镀层对金属熔体与陶瓷润湿行为的影响及作用机理的相关研究却较少。Ip^[5]、Mori^[6]及 Leon 等^[9]分别研究了铝熔体与镀 Ni 石墨及氧化铝基体的润湿性, Xu^[10]研究了铝熔体与镀 Zr 氧化铝的润湿行为,这些研究表明镀层成分、厚度及状态的变化均会对润湿行为产生较大影响,会使润湿过程更加复杂化。在工程应用中,往往认为熔体与金属镀层的润湿性与同种块体金属的润湿性一致,而 Ip 等的研究表明铝熔体与 Ni、Zr 镀层的润湿性与相应块体的润湿性存在较大差异^[5,10]。因此,研究金属镀层对金属熔体与陶瓷润湿行为是必要和有意义的。

Ni、Cu 和 Cr 等金属镀层常镀覆于陶瓷及石墨表面以改善其与金属熔体的润湿性。为了便于研究金属镀层对铝熔体润湿性的影响,文中选择了与铝熔体及 Al-Cr 合金熔体均不反应的氧化铝作为基底,采用磁控溅射法在氧化铝表面沉积铬镀层,研究铝熔体与镀铬氧化铝及纯铬基底的润湿行为,探究镀层厚度及润湿温度对铝熔体与镀铬氧化铝润湿行为及界面反应的影响,以及铝熔体与 Cr 镀层及 Cr 基底润湿性的差异。

1 试验

润湿性试验所用基片为 25 mm×25 mm×1.5 mm 的氧化铝基片(纯度为 99.5%)、镀铬的氧化铝基片以及 Φ 50 mm×1.5 mm 的纯铬片(纯度为 99.5%)。以 Φ 50 mm×1.5 mm 的纯铬片(纯度为 99.5%)为靶材,采用射频磁控溅射的方法在氧化铝基片表面室温沉积不同厚度的铬膜(厚度约为 260~1200 nm)。溅射沉积时工艺室背底压力为 5×10^{-4} Pa,沉积压力为 0.5 Pa,氩气流量为 15 mL/min,

溅射功率为 100 W,通过调节沉积时间来控制镀层厚度,用台阶仪来测试镀层厚度。

润湿性试验采用改进的座滴法(如图 1 所示)。试验前将纯铝粒(99.9%)装入下端中心孔 Φ 0.8 mm 的石墨管中,石墨管位于基片正上方,石墨管下端距基片 10 mm。润湿试验在 1.5×10^{-3} Pa 的真空下进行,当达到润湿温度后,在真空室外通过磁力驱动石墨活塞将石墨管中的铝液从小孔挤出,落在下方的水平基片上,摄像机通过观察窗记录铝滴在基片上的铺展过程。试验每次挤出的铝滴质量约为 100 mg,该改进方案可减轻铝液的表面氧化。润湿角通过 Digimizer 软件对润湿图像直接测量得到。

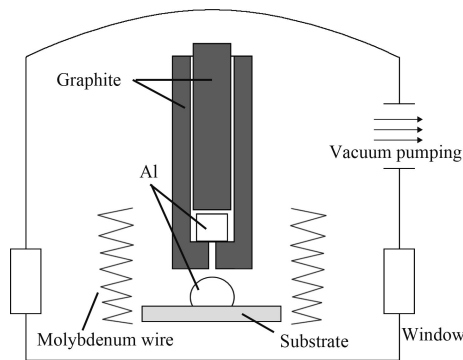


图 1 改进的座滴法示意图

Fig.1 Schematic diagram of improved sessile drop method

润湿试验后,用金刚石线切割机将润湿试样沿中心剖面切开,镶样后研磨抛光,对润湿试样表面及剖面在 ZEISS ULTRA 扫描电子显微镜下进行微观形貌观察及 EDS 能谱分析。

2 结果与讨论

2.1 润湿接触角变化特征

氧化铝表面镀铬膜的表面和剖面形貌如图 2 所示,铬膜晶粒较细小,表面有少量微孔隙。

图 3 为 700 ℃ 铝熔体在 Al_2O_3 、纯 Cr 片及不同镀 Cr 厚度 Al_2O_3 基底上的润湿接触角变化。铝熔体与 Al_2O_3 基底的终态接触角最大,约为 140° ,随着 Al_2O_3 表面镀 Cr 层厚度由 260 nm 增加到 1200 nm,终态接触角逐渐由 131° 减小到 18° ,450 nm 镀 Cr 层时已由不润湿转变为润湿(终态接触角为 85°),且达到稳态接触角的时间也随着镀 Cr 层的增厚而逐渐减小,这表明 700 ℃ 下在 Al_2O_3 表面镀 Cr 能够大幅提高铝熔体的润湿

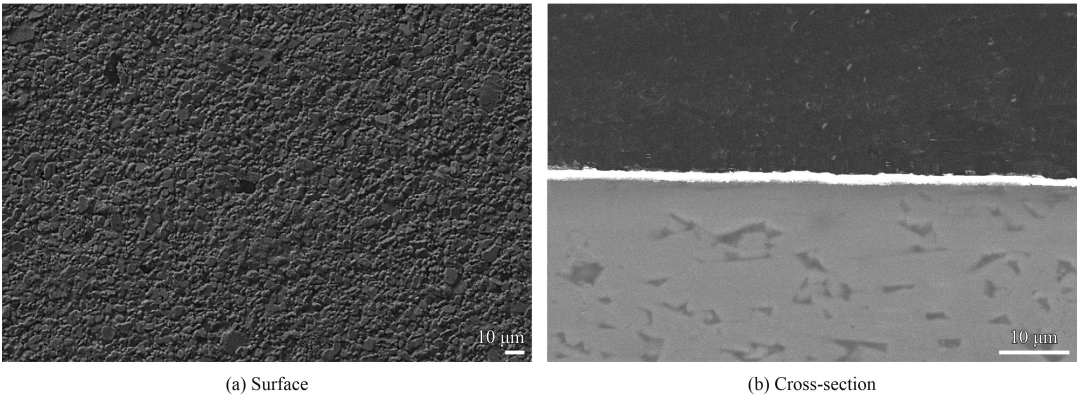


图 2 氧化铝基片沉积铬膜的微观形貌

Fig.2 Surface and cross section morphologies of Cr thin film deposited on alumina by RF magnetron sputtering

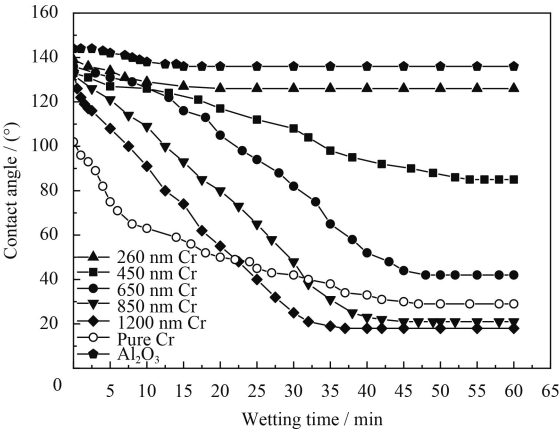


图 3 700 °C 下铝熔体在 Al₂O₃、纯 Cr 片及不同镀 Cr 厚度 Al₂O₃ 基底上的润湿接触角变化

Fig.3 Variation of macroscopic contact angle with time during the isothermal wetting of molten aluminum on alumina, bulk chromium and chromium coated alumina substrates at 700 °C

性和铺展速率，从而显著改善其润湿性。另外一个值得关注的现象是，铝熔体在纯 Cr 基底上的终态润湿角约为 29°，介于 650 nm 和 850 nm 镀 Cr 层的终态润湿角之间，明显大于 1200 nm 镀 Cr 层的终态润湿角，这显示终态接触角并不随 Cr 镀层的增厚而单调减小，铝熔体在 Cr 镀层和 Cr 片上的润湿行为是不同的。

800 °C 铝熔体在 Al₂O₃、纯 Cr 片及不同镀 Cr 厚度 Al₂O₃ 基底上的润湿接触角变化曲线如图 4 所示。铝熔体与 Al₂O₃ 基底仍表现为不润湿。与 700 °C 相比，800 °C 时镀 Cr 层对铝熔体与 Al₂O₃ 基底润湿性的改善更为显著，镀 Cr 层厚度为 260 nm 时其终态接触角约为 15°，1200 nm 镀 Cr 层时铝熔体在 Al₂O₃ 基底上趋于完全润湿，铝熔体与纯 Cr 基底也表现出优良的润湿性 (终态接触角约为

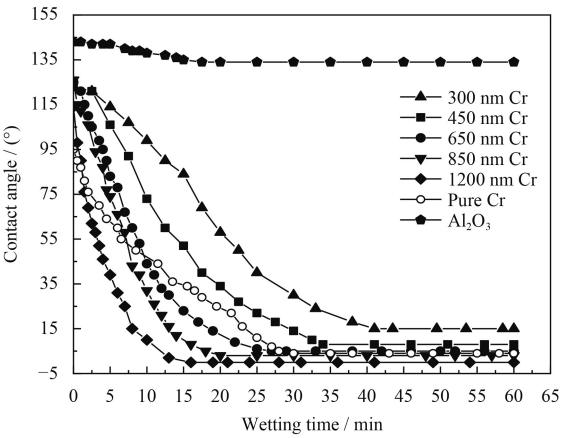


图 4 800 °C 下铝熔体在 Al₂O₃、纯 Cr 片及不同镀 Cr 厚度 Al₂O₃ 基底上的润湿接触角变化

Fig.4 Variation of macroscopic contact angle with time during the isothermal wetting of molten aluminum on alumina, bulk chromium and chromium coated alumina substrates at 800 °C

3°)。随着镀 Cr 层厚度由 260 nm 增加到 1200 nm，铝熔体的铺展速率明显逐渐增大，达到稳态接触角所需时间由约 40 min 减少到约 15 min，而铝熔体在纯 Cr 基底上达到稳态接触角所需时间约为 27 min。这同样表明镀 Cr 层厚度会显著影响铝熔体在上的铺展行为，且铝熔体在 Cr 镀层上的润湿行为不同于 Cr 片。

2.2 润湿结果宏观微观特征

图 5 为铝熔体与不同基底润湿试验后凝固试样表面宏观形貌。800 °C 时，镀铬 260 nm Al₂O₃ 基底铺展前沿形成了一圈光亮的晕圈，即前驱膜，随着镀 Cr 厚度增加形成前驱膜的宽度逐渐增大，同时，铺展面积也逐渐增大。尽管铝熔体在镀铬 1200 nm Al₂O₃ 基底和铬片上均趋于完全润湿，

但在镀铬 1200 nm Al_2O_3 基底上的铺展面积明显更大。700 $^{\circ}\text{C}$ 时几种基底铺展前沿均未形成前驱膜。

800 $^{\circ}\text{C}$ 铝熔体与 Cr 片及 650 nm 镀铬 Al_2O_3 基底铺展前沿表面形貌及 EDS 能谱线分析结果如

图 6 所示。图 6(a) 表明在铝熔体与 Cr 片的铺展前沿表面形成了宽度约 700 μm Al 与 Cr 的化合物，其间有少量高铝含量相，该区域 EDS 定量分析结果(质量分数)为 72.6%Al 和 27.4%Cr，与 $\text{Al}_{11}\text{Cr}_2$

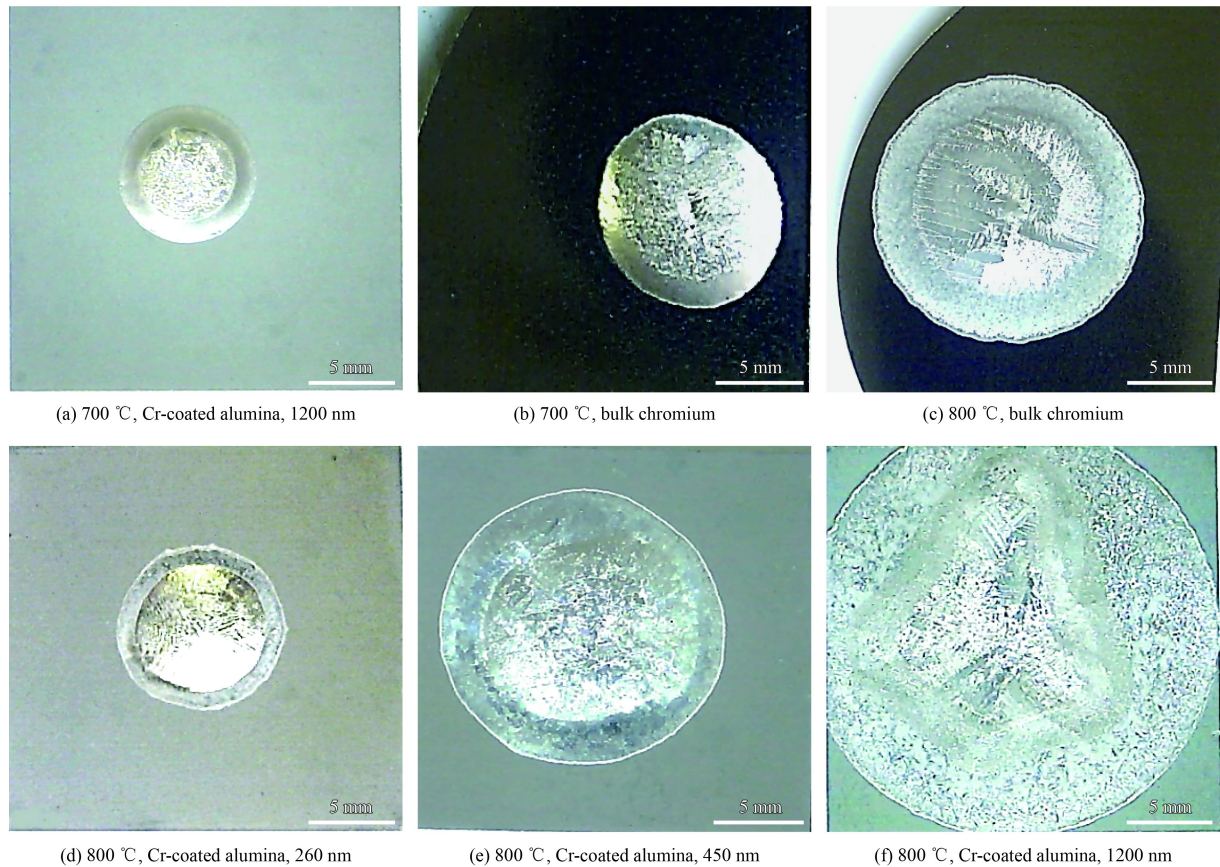


图 5 不同温度下铝熔体与不同基底润湿试验后凝固试样表面宏观形貌

Fig.5 Top-view macrographs of aluminum on Cr-coated alumina and bulk chromium substrate at different experimental temperatures after wetting

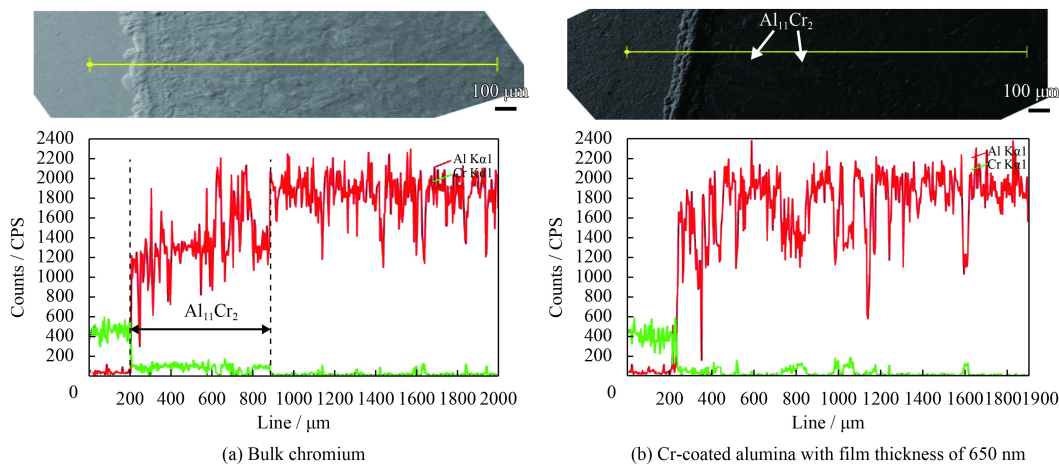


图 6 800 $^{\circ}\text{C}$ 下铝熔体与 Cr 片及 650 nm 镀铬 Al_2O_3 基底铺展前沿的表面形貌及 EDS 能谱线分析结果

Fig.6 EDS analysis of the surface on solidified wetting sample at 800 $^{\circ}\text{C}$, aluminum on bulk chromium and Cr-coated alumina with a film thickness of 650 nm

化合物的成分一致。铝熔体与 650 nm 镀铬 Al_2O_3 基底铺展前沿的表面则没有形成连续的 $\text{Al}_{11}\text{Cr}_2$ 化合物, 只是在铝基体上形成了少量 $\text{Al}_{11}\text{Cr}_2$ 化合物。

图 7 为铝熔体与 Cr 基片润湿试样的界面形貌。700 °C 时, 在 Al/Cr 之间形成了两个连续致密的反应层, 结合 EDS 能谱定量分析, 靠近 Cr 侧的薄反应层成分与 $\text{Al}_{11}\text{Cr}_2$ 一致, 靠近 Al 侧

的厚反应层为 Al_7Cr , 在铺展前沿界面反应层已明显高于 Cr 基底表面, 已完全包覆了铝。800 °C 时, 在 Al/Cr 润湿试样的界面反应层/Cr 基底之间以及铺展前沿形成的化合物中存在明显的裂纹, 试样中部界面反应层由靠近 Cr 侧的薄 Al_4Cr 层和靠近 Al 侧的厚 $\text{Al}_{11}\text{Cr}_2$ 组成; 润湿前沿主要为 $\text{Al}_{11}\text{Cr}_2$, 在其表面有少量 Al 相, 这与其表面分析结果一致。

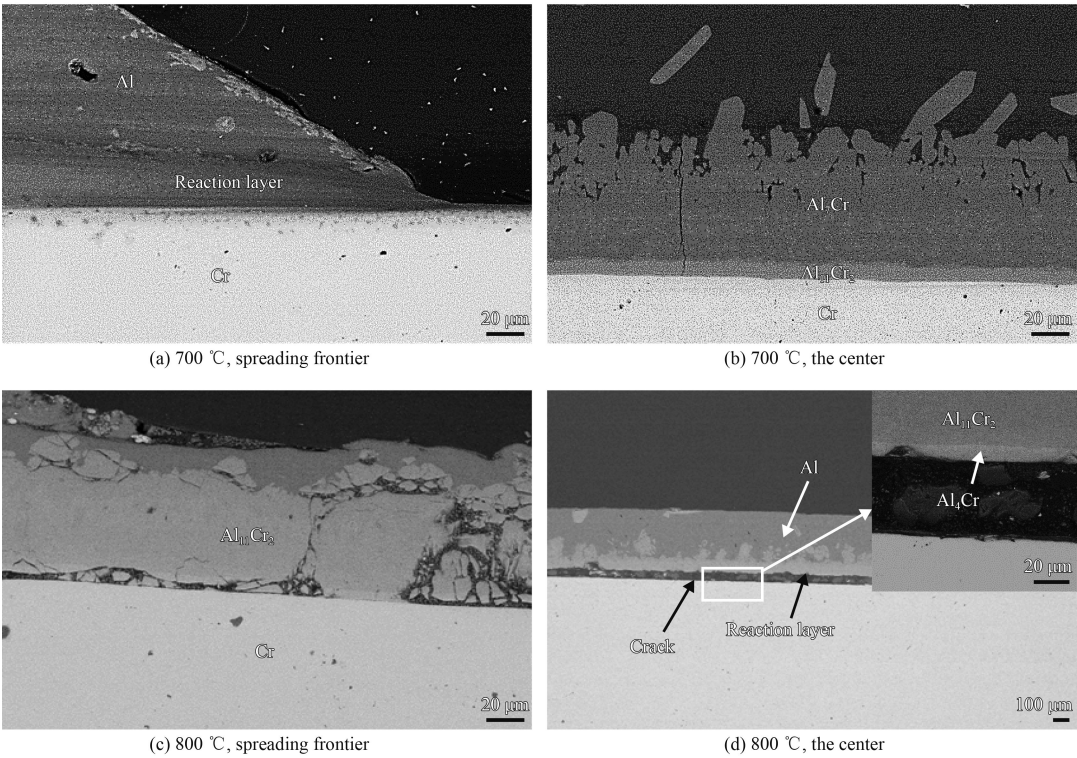


图 7 铝熔体与 Cr 片润湿前沿及中部截面界面形貌

Fig.7 Morphologies at the cross-sectional interface of spreading frontier and the center of bulk chromium for the solidified wetting sample

高温金属表面反应化合物层的生长导致试样中裂纹形成的应力有两种可能来源, 一种是由于形成化合物的摩尔体积与金属的原子体积存在差异, 这样会在化合物层内形成较大的应力, 且随层厚的增加而增大; 另一种是由于冷却过程中表层与基体热膨胀系数的差异而形成的应力。对于 800 °C 的 Al/Cr 润湿试样, 这两种因素均会在试样中形成较大的应力。从图 7(c) 可知, 在润湿前沿较薄的反应层即已在反应层/Cr 界面形成裂纹, 如果是在等温润湿过程中形成裂纹, 那么反应层的生长将缺乏 Cr 的供应, 中间部位裂纹上方的第二反应层 Al_4Cr 层 (图 7(d)) 将不会形成, 即使形成, 由于 Al 的扩散其厚度也会不断减小。因此,

Al/Cr 润湿试样反应层/Cr 界面的裂纹应该形成于试样冷却过程中。

图 8 为 Al 熔体在镀 Cr 氧化铝基底上润湿前沿的剖面形貌。在 700 °C 和 800 °C 时, 当 Cr 膜较薄时, 在铺展前沿的 Al/ Al_2O_3 界面及铝基体里几乎没有形成明显的 Al-Cr 化合物。随着镀膜厚度的增加, 铺展前沿的 Al/ Al_2O_3 界面及铝基体 Al-Cr 化合物的数量明显增多, 但和 Al/Cr 基片润湿不一样, 界面 Al-Cr 化合物为分散的颗粒, 没有形成连续致密的反应层。结合 EDS 能谱分析结果, 铝熔体与镀铬层的反应产物 700 °C 时为 Al_7Cr , 800 °C 时为 $\text{Al}_{11}\text{Cr}_2$, 这也与上述 Al/Cr 基片在两个温度下均形成了两个化合物相不一样。

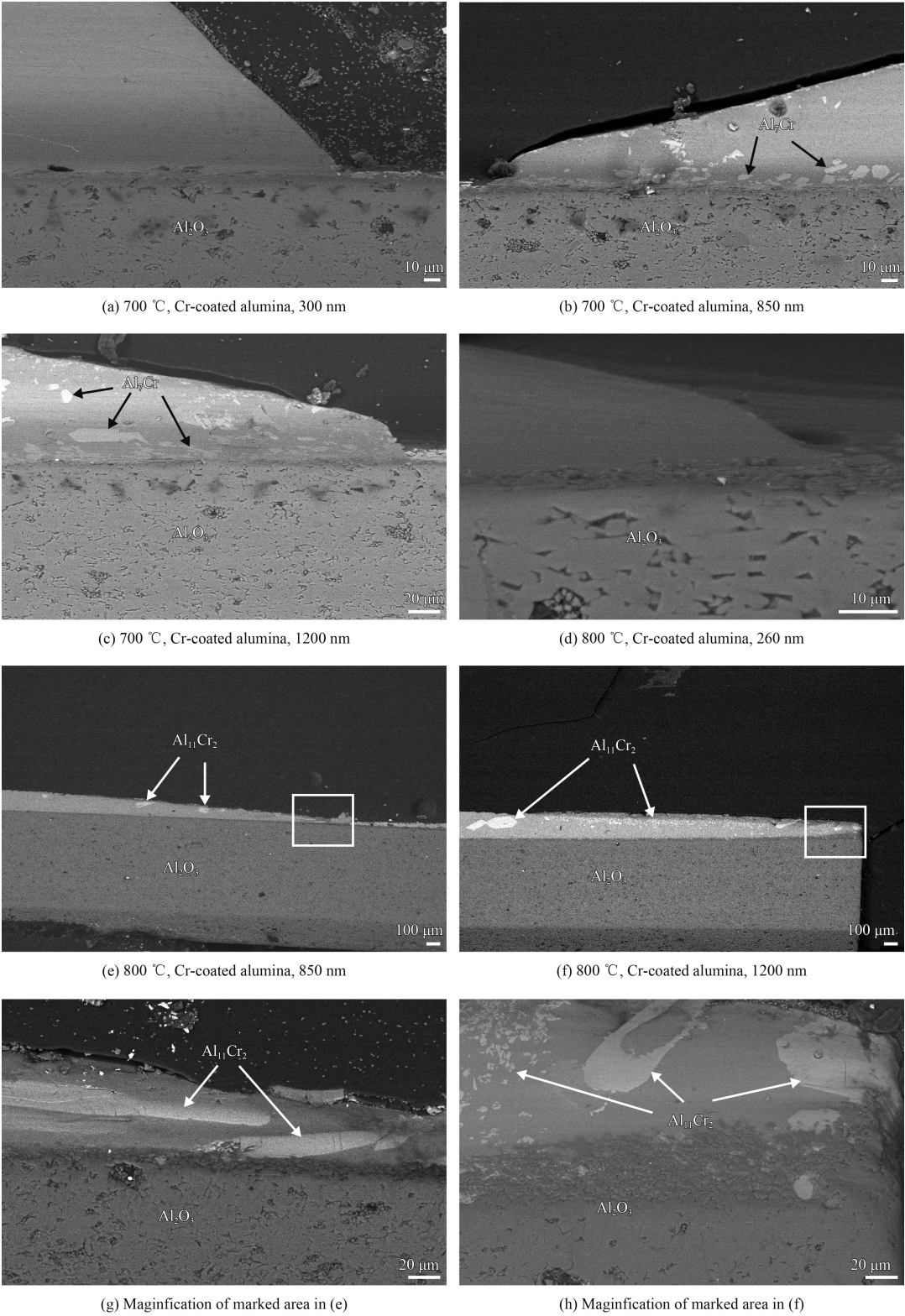


图 8 Al 熔体在镀 Cr 氧化铝基底上润湿前沿的截面形貌

Fig.8 Morphologies at the cross-sectional interface of spreading frontier of Cr-coated alumina

2.3 机理分析

上述试验结果表明, 在氧化铝表面镀 Cr 能够显著改善铝熔体的润湿性, 镀 Cr 层的厚度会明显

影响铝熔体的润湿行为 (终态接触角及铺展速率), 而且铝熔体在镀 Cr 氧化铝上的润湿行为及界面反应也与其在纯铬块体上的润湿行为及界面

反应表现出较大差异。

2.3.1 界面反应

铝熔体与 Cr 的润湿为典型的反应性润湿。对于 Al-Cr 二元体系, 700 °C 时, Cr 在 Al 液中的最大溶解度 (原子数分数) 约为 0.5%, 存在 Al₇Cr、Al₁₁Cr₂、Al₄Cr、Al₉Cr₄、Al₈Cr₅ 及 AlCr₂ 6 个金属间化合物相; 800 °C 时, Cr 在 Al 液中具有更大的溶解度 (最大溶解度 (原子数分数) 约为 2.2%), 存在 Al₁₁Cr₂、Al₄Cr、Al₉Cr₄、Al₈Cr₅ 及 AlCr₂ 等金属间化合物相^[11]。由 d'Heurle 提出的有序 Cu₃Au 经验相律规则可知, 界面反应首先形成的化合物相为低熔点组元含量最高的化合物相^[12], 因此, Al₇Cr 和 Al₁₁Cr₂ 分别为 Al-Cr 界面反应 700 °C 和 800 °C 最先形成的化合物相。Chamberlain 等关于 Al、Cr 薄膜在 659~726 K 的互扩散研究也证实了 Al₇Cr 为界面先形成的化合物相^[13]。对于 Cr 块, 界面反应形成了靠近 Al 侧的 Al₇Cr (700 °C) 和 Al₁₁Cr₂ (800 °C) 连续致密的反应层, 其生长受 Al 原子和 Cr 原子在反应层中扩散速率的控制。根据 Dybkov 反应偶界面反应层的生长机理^[14], 当先形成的化合物相层厚达到临界厚度后, 由于通过化合物层扩散到达 Al₇Cr/Cr (700 °C) 界面或 Al₁₁Cr₂/Cr (800 °C) 界面的 Al 原子数不足以维持先形成化合物相的继续长大, 这时第二个金属间化合物相将在该界面形成并长大。因此不难理解 Al/Cr 基片的润湿试验中 (700 °C 和 800 °C) 在界面均形成了两层连续致密的界面反应层, 由于试验时间较短, 其它金属间化合物相还来不及形成长

大。而对于 Al/镀 Cr 氧化铝润湿体系, 由于镀 Cr 层非常薄 (260~1200 nm), 界面反应难以形成连续致密的反应层, 因此界面反应只形成了低熔点组元含量最高的一个化合物相 Al₇Cr (700 °C) 或 Al₁₁Cr₂ (800 °C), 这与 Dybkov 关于 Fe-Cr 合金和铝熔体 700 °C 反应研究中 Al-Cr 只形成 Al₇Cr 相一致^[15]。

为了便于分析镀 Cr 对 Al 熔体在氧化铝基底润湿行为的影响, 有必要确定 Al-Cr 熔体与氧化铝基底间是否会发生反应。根据氧化物的氧势图^[16], 在文中试验温度下, Al₂O₃ 比 Cr₂O₃ 的氧势更小而更稳定, 因此 Cr 不会和氧化铝反应。

2.3.2 润湿行为

熔体与固态基底的润湿除了受固 (s)、液 (l)、气 (g) 三相界面张力 (σ_{lv} 、 σ_{sl} 、 σ_{sv}) 及熔体粘度影响外, 对于反应性润湿还需要关注润湿前沿三相线组态的变化。结合上述结果及图 9 来分析铝熔体在镀铬氧化铝基底的润湿行为及不同基底间润湿行为的差异。

由于铝熔体具有较大的表面张力 ($\sigma=890-0.182(t-660)$ mN·m⁻¹, t 为摄氏温度)^[17], 其与氧化铝基底在 700~900 °C 均具有较大的润湿角。对于镀 Cr 氧化铝, 当铝熔体与 Cr 膜接触后, Cr 将部分溶解并参与 Al 熔体反应。700 °C 下, 当镀层较薄时 (文中试验 260 nm), 与铝熔体接触的 Cr 膜将全部溶入铝熔体, 这时润湿前沿将漏出氧化铝基底 (如图 9(a)), 由于 Cr 不与氧化铝反应, 此时润湿前沿三相线组态与 Al/氧化铝体系一致, 但液相由

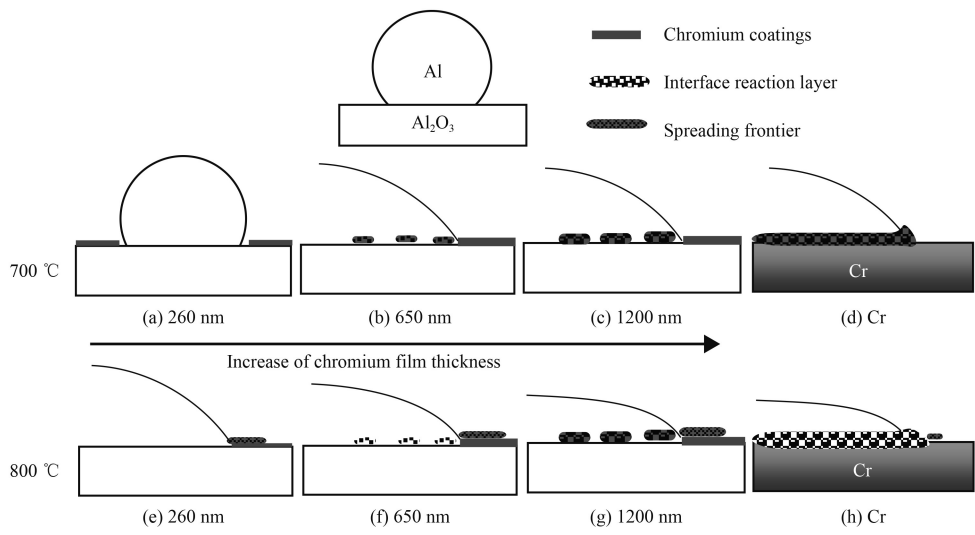


图 9 Al 熔体在镀 Cr 氧化铝基底及 Cr 基底上的润湿机理示意图

Fig.9 Schematic of wetting mechanism for the spreading of molten aluminum on Cr-coated alumina and Cr substrate

纯 Al 变为 Al-Cr 合金熔体。Bainbridge 的研究表明 Cr 溶入铝熔体会明显降低熔体表面张力 ($700\text{ }^{\circ}\text{C}$ Al-0.4% Cr 表面张力约为 $700\text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$)^[18], 因此, 由于接触部分较薄镀层的全部溶解及熔体表面张力的降低, 镀层较薄时会一定程度改善铝熔体在氧化铝上的润湿性, 由于熔体表面张力仍很大故仍为不润湿。随着镀层厚度的增加, 润湿前沿液/固界面会有更多的 Cr 溶入铝熔体, 界面反应形成更多的金属间化合物 (图 9(b)、9(c))。这一方面会降低熔体的表面张力; 同时会改变润湿前沿三相线组态, 液-固组态逐渐变为 Al-Cr 熔体-Al₁₇Cr (如图 8(c)、8(g)), 润湿前沿固相则为 Cr 层; 而且由于 Al 与 Cr 反应形成化合物为高放热反应, 这会升高润湿前沿熔体的温度, 降低熔体粘度和表面张力。因此, 随着镀层厚度的增加, 这些因素会明显促进铝熔体的铺展速率和润湿性的明显改善。但是, 如果镀层厚度足够厚, 如 Cr 块, 由于有足够的 Cr 原子供应, 连续致密的反应层在界面很快形成并沿熔体侧快速生长, 这些有利于铝熔体前期的快速铺展; 可是当润湿前沿界面反应层高于基底表面时, 反应层的继续生长会逐渐隔绝铝熔体与 Cr 基底的接触, 这时润湿前沿固相反应层的包覆会抑制铝熔体的进一步铺展 (图 7(a)、9(d)), 而润湿前沿铝液将消耗于反应层的生长。因此, 不难理解铝熔体在 1200 nm 镀 Cr 氧化铝上比在 Cr 块上具有更好的润湿性。

800 $^{\circ}\text{C}$ 下, 铝熔体在镀铬氧化铝 (260~1200 nm 镀层) 及 Cr 块润湿前沿均形成了前驱膜。前驱膜现象存在于一些特殊的润湿体系中, 通常认为其形成与液相原子的表面快速扩散、表面张力梯度诱导的 Marangoni 流动等有关^[19-21]。相比于 700 $^{\circ}\text{C}$, 800 $^{\circ}\text{C}$ 下铝原子在 Cr 表面具有更大的表面扩散速率, 这有利于前驱膜的形成; 而相比于 Cr 块, Cr 镀层具有更多的晶界及微孔, 这会促进铝原子的扩散, 从而有利于前驱膜的形成, 因此不难理解铝熔体在镀铬氧化铝上形成的前驱膜明显宽于其在 Cr 块形成的前驱膜。通常前驱膜的形成会明显改善熔体的润湿性, 这与润湿前沿三相组态的变化有关。Al 在 Cr 镀层表面形成的前驱膜为少量 Al₁₁Cr₂ 分布于 Al 熔体中 (见图 6(b))。尽管镀层较薄 (260 nm Cr), 接触 Cr 层可以全部溶入 Al 熔体, 但由于润湿前沿前驱膜的形成改变了

润湿前沿的铺展组态 (图 9(e)), 因此使得 800 $^{\circ}\text{C}$ 时其润湿性显著好于 700 $^{\circ}\text{C}$ 时。随着镀层厚度的增加, 润湿前沿的液/固界面会形成更多的化合物相 (Al₁₁Cr₂) (图 9(f)、9(g)), 会有更多的 Cr 溶入熔体, 以及放热反应导致铺展前沿熔体温度的升高, 这会进一步促进形成更宽的前驱膜, 这些会促进铝熔体的快速铺展和接触角的减小, 甚至完全润湿。对于 Cr 块, 与 700 $^{\circ}\text{C}$ 一样, 尽管润湿前期具有较好的润湿性, 但当界面反应层对润湿前沿形成包覆时, 将会抑制熔体的进一步铺展 (图 9(h)), 因此其铺展面积也明显小于铝熔体在 1200 nm 镀铬氧化铝上的铺展面积。温度升高对铝熔体在 Cr 块上润湿性的明显改善, 除了与熔体表面张力降低有关外, 也与熔体粘度降低导致的快的铺展速率以及不同的液/固组态 (700 $^{\circ}\text{C}$ 为 Al(l)/Al₁₇Cr(s), 800 $^{\circ}\text{C}$ 为 Al(l)/Al₁₁Cr₂(s)) 有关。

综上所述, 氧化铝表面镀铬可以明显改善其与铝熔体的润湿性, 这主要与熔体表面张力的变化以及润湿前沿三相线组态的改变有关。为了获得好的润湿性, 应该选择合适的镀层厚度。如果镀层过厚, 在润湿过程中界面反应层形成对润湿前沿的包覆, 将会抑制熔体的继续铺展。在以后的研究中, 将进一步扩大镀层厚度的研究范围, 以期找到润湿性转变的临界镀层厚度范围, 这有助于更合理的设计润湿性改善性镀层, 为实际应用提供更有价值的指导。

3 结 论

(1) 700~800 $^{\circ}\text{C}$ 高真空条件下铝熔体与氧化铝、镀铬氧化铝基底及铬块的润湿行为表明: 表面镀铬能够有效改善铝熔体与氧化铝的润湿性, 这与镀层与熔体相互作用导致的熔体表面张力及润湿前沿三相界面组态的变化有关。

(2) 在一定范围内, 随着镀铬层厚度的增加, 铝熔体与氧化铝的润湿性逐渐增强。

(3) 铝熔体与 1200 nm 镀铬氧化铝的润湿性好于其与 Cr 基底的润湿性, 这与 Cr 基底界面的固相反应层对润湿前沿液相的包覆有关, 这会抑制熔体的进一步铺展。

参考文献

- [1] Eustathopoulos N, Nicholas M G, Dreve B. Wettability at high temperature[M]. Elsevier Science Ltd., Oxford, UK,

- 1999: 360–368.
- [2] NAIDICH Y V, ZHURAVLEV V S, GAB I I, et al. Liquid metal wettability and advanced ceramic brazing[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2008, 28(4): 717-728.
- [3] BAUMLI P, SYTCHEV J, KAPTAY G. Perfect wettability of carbon by liquid aluminum achieved by a multifunctional flux[J]. *Journal of Materials Science*, 2010, 45(19): 5177-5190.
- [4] CALDERON N R, VOYTOVYCH R, NARCISO J, et al. Pressureless infiltration versus wetting in AlSi/graphite system[J]. *Journal of Materials Science*, 2010, 45(16): 4345-4350.
- [5] IP S W, SRIDHAR R, TOGURI J M, et al. Wettability of nickel coated graphite by aluminium[J]. *Materials Science & Engineering A*, 1998, 244(1): 31-38.
- [6] MORI N, MATSUO S, OGI K, et al. Effect of Ni coating on wetting behavior of molten al to graphite[J]. *Journal of the Japan Institute of Metals*, 1987, 51(3): 240-247.
- [7] OGAWA F, MASUDA C, FUJII H. In situ chemical vapor deposition of metals on vapor-grown carbon fibers and fabrication of aluminum-matrix composites reinforced by coated fibers[J]. *Journal of Materials Science*, 2018, 53(7): 5036-2050.
- [8] KAMBUROV V, DIMITROVA R, KANDEVA M. Introduction of nickel coated silicon carbide particles in aluminum metal matrix hardfaced by MIG/TIG processes on pre-coated flux layer[J]. *Tribology in Industry*, 2018, 40(1): 73-80.
- [9] LEON C A, DREW R. The influence of nickel coating on the wettability of aluminum on ceramics[J]. *Composites Part A Applied Science & Manufacturing*, 2002, 33(10): 1429-1432.
- [10] XU Q G, GUO L W, ZHANG L, et al. Wettability of zirconium-coated alumina by molten aluminium[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2016, 302: 150-157.
- [11] AUDIER M, DURAND-CHARRE M, KLEIN H. Phase equilibria in the Al-Cr system[J]. *Journal of Alloys & Compounds*, 1995, 220(1-2): 225-230.
- [12] HEURLE F, OIS M. Interface Reactions with formation of a solid phase on a solid substrate: A short overview[J]. *Materials Science Forum*, 1994, 155-156: 1-14.
- [13] CHAMBERLAIN M B. Interdiffusion of Al and Cr thin films[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology*, 1979, 16(2): 339-341.
- [14] Dybkov V I. Reaction diffusion and solid state chemical kinetics[M]. The IPMS Publications, Kyiv, Ukraine, 2002, 142.
- [15] BARMAK K, DYBKOV V I. Interaction of iron-chromium alloys containing 10 and 25 mass% chromium with liquid aluminium part II formation of intermetallic compounds[J]. *Journal of Materials Science*, 2004, 39(13): 4219-4230.
- [16] 韩明荣, 张生芹, 陈建斌, 等. 冶金原理[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2008, 140.
- HAN M R, ZHANG S Q, CHEN J B. Metallurgy Principles[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2008, 140 (in Chinese)
- [17] KEENE B J. Review of data for the surface tension of pure metals[J]. *International Materials Reviews*, 1993, 38(4): 157-192.
- [18] BAINBRIDGE I F, TAYLOR J A. The surface tension of pure aluminum and aluminum alloys[J]. *Metallurgical & Materials Transactions A Physical Metallurgy & Materials Science*, 2013, 44(8): 3901-3909.
- [19] SINGLER T J, CLUM J A, PRACK E R. Wetting dynamics of molten solder alloys on metal substrates[J]. *Journal of Electronic Packaging*, 1992, 114(2): 128.
- [20] SAIZ E, TOMSIA A P. Atomic dynamics and marangoni films during liquid-metal spreading[J]. *Nature Materials*, 2004, 3(12): 903.
- [21] Gennes P G D. Wetting: statics and dynamics[J]. *Reviews of Modern physics*, 1985, 57(3): 827-863.