

钢/铝复合板热轧复合变形规律

李民权, 蒋福林, 张 辉, 李落星

(湖南大学 材料科学与工程学院, 长沙 410082)

摘 要: 采用弯曲实验、金相和扫描电子显微镜, 研究轧制温度、变形量对钢/铝复合板热轧复合的结合强度、界面和厚比分配的影响。结果表明: 在轧制温度低于 400 °C 时, 弯曲次数随着预热温度的升高而增加, 之后又逐渐减少; 轧制温度在 400 °C 时钢/铝复合板结合界面的结合强度最大; 随着轧制温度的升高, 铝层的压下量增加, 钢层的压下量减小, 致使两者压下量的差值增加; 总的压下量越大, 弯曲次数越多, 结合界面和结合强度越好; 当总压下量为 20%~30% 时, 弯曲次数随压下量的增加而缓慢增加; 当总压下量 > 30% 时, 弯曲次数随压下量的增加而快速增加; 随着总压下量的增加, 钢和铝的压下量成正比关系增加, 变化趋势相同, 组元压下量的差值随总压下量的增加而减小, 变形量趋于一致。

关键词: 钢/铝复合板; 热轧复合; 结合强度

中图分类号: TG 115.9

文献标识码: A

Deformation rule of steel/aluminum metal-laminate material during hot roll bonding

LI Min-quan, JIANG Fu-lin, ZHANG Hui, LI Luo-xing

(College of Materials Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: The effects of rolling temperature and reductions on the bonding strength, interface and distribution of thickness ratio of the steel/aluminum metal-laminate materials, which were prepared by hot-rolling process, were studied by using bending tests and metallographic microscopy and scanning electron microscopy. The results indicate that the number of bending increases with increasing rolling temperatures below 400 °C, whereas decreases after that. The maximum bond strength is obtained at 400 °C. With increasing the rolling temperature, the rolling reduction of the aluminum layer increases while the steel layer decreases. At a given total rolling reduction, this leads the difference of reduction between aluminum and steel layer increasing. The number of bending and the bond strength increase with increasing the total rolling reduction. The increment of the number of bending is quite small when the total rolling reduction is ranged from 20% to 30%, but extremely large when the total rolling reduction exceeds 30%. The rolling reductions of both layers increase in direct proportion with the total rolling reduction, and the difference between them gradually diminishes and even towards a leveling.

Key words: steel/aluminum metal-laminate material; hot roll bonding; bond strength

金属层状复合材料是利用复合技术使两种或两种以上物理、化学、力学性能不同的金属在界面上实现牢固结合而制备的一种新型材料。尽管各层金属仍保持各自原有特性, 但层状金属复合材料的物理、化学、力学性能比单一金属优越得多。钢/铝复合板结合了钢

的高强度、易清洗和铝的质轻、价廉、优良的导电、导热性等优点, 在航空、航天、机械、化工、医疗、食品、民用等多方面领域得到了广泛应用^[1-4]。

轧制方法以其成本低, 效率高, 设备少等优点, 是一种极具潜力的大规模生产钢/铝复合板的制备加

工方法, 而热轧复合可以减小轧制压力。在热复合轧制时, 轧制温度、压下量是影响热轧钢/铝复合板的结合强度界面和厚比分配的关键工艺因素。在满足复合板一定的结合强度下, 当参与复合轧制的各组元金属入口厚度和相对压下量一定时, 复合轧制后的总厚度与组元材料间的厚度比是一定的。因而, 要生产出用户所需要的结合强度、厚度和厚度比的复合材料, 对各组元金属在复合轧制时的轧制温度和压下量及入口厚度和厚比分配要求十分严格。LEE 等^[5]研究了钢/铝/铜三层轧制复合板的结合性能及其界面结合情况; DANESH MANESH 和 KARIMI TAHERI^[6-8]通过理论分析和实际研究讨论了在冷轧时的不同轧制工艺和不同退火工艺对钢铝复合板的结合强度和界面的影响; 韦家弘等^[9]通过建立数学模型对生产中金属复合轧制包覆率和长度配比进行控制。

本文作者采用热轧复合工艺方法, 研究轧制温度和变形量对钢/铝复合板热轧的结合强度界面和厚比分配的影响, 通过弯曲实验测试、金相和扫描电子显微镜观察, 探索 SS400 钢和 1050 铝双金属轧制复合的最佳热轧工艺参数和厚比分配, 这对进一步研究和大规模的生产制备钢/铝复合板有理论和实际意义。

1 实验

实验试样采用规格为 180 mm×50 mm×1.5 mm 的 SS400 钢板与 180 mm×50 mm×0.5 mm 的 1050 纯铝板。热轧复合前, 钢板表面采用 10% H_2SO_4 溶液酸洗, 铝板采用 10% NaOH 溶液碱洗, 除去表面的氧化层, 然后用钢刷将试样的结合面打毛, 用丙酮溶液浸泡以除去表面的油污等, 然后用无水乙醇擦洗表面, 随后将铝和钢试样对合并固定, 同时放入箱式电阻炉内加热。轧制复合时, 试样的轧制温度分别为 300、400、450 和 500 $^{\circ}\text{C}$; 压下量分别为 20%、30%、35%和 40%。钢/铝复合板的界面结合强度根据 GB2073—93 双金属弯曲性能的测试标准进行弯曲试验, 在 MM-6 金相显微镜和 JSM-6700F 扫描电子显微镜下对钢/铝复合板组元的厚比测量和结合界面观察。

2 结果与讨论

2.1 不同轧制温度对变形规律的影响

2.1.1 不同轧制温度对结合强度和界面的影响

在本实验中钢铝板材在压下量都为 30%, 轧制温

度为 300、400、450 和 500 $^{\circ}\text{C}$ 进行轧制复合, 图 1 所示为不同轧制温度下轧制的钢铝复合板的弯曲强度。从图 1 可以看出, 在 400 $^{\circ}\text{C}$ 下轧制的钢铝复合板材弯曲次数最多, 而在其他温度下如 300 和 500 $^{\circ}\text{C}$ 下轧制的钢铝复合板材弯曲次数则较少。因此, 根据 GB2073—93 双金属弯曲性能的测试标准可知, 在 400 $^{\circ}\text{C}$ 左右的轧制温度下轧制的钢铝复合板材的结合强度最好。图 2 所示为不同轧制温度下轧制的钢铝复合板界面的 SEM 像。由图可见, 在 300 $^{\circ}\text{C}$ 轧制的钢铝复合板材的界面结合良好, 在 400 $^{\circ}\text{C}$ 轧制的钢铝复合板材的界面结合紧密, 在 500 $^{\circ}\text{C}$ 轧制的钢铝复合板材的界面由于轧制温度较高, 有氧化物出现, 并产生了裂纹。

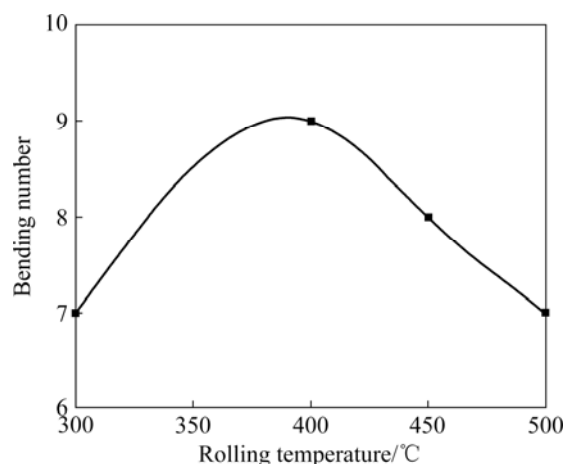


图 1 不同温度下轧制的钢铝复合板的弯曲强度

Fig.1 Bending strength of metal laminates at different rolling temperatures

随着轧制温度的提高, 首先钢层和铝层都发生软化, 尤其对铝层来说, 通过加热, 铝层软化速度更快, 从而减小铝层弹性恢复对复合界面的分层破坏作用; 同时, 轧制温度的提高激活了铝层表面, 增强了铝表面对钢表面的粘接作用, 这就相应地增强了金属复合板的结合强度。从这个角度来讲, 随着轧制温度的提高, 复合板的结合强度也相应地提高。但是同时, 随着轧制温度的提高, 钢和铝的表面都将发生非常严重的氧化。在 400 $^{\circ}\text{C}$ 时, Al 与 Fe 在标准状态下均可被氧化, 而 Al 比 Fe 的氧化倾向更大。Al 在 400 $^{\circ}\text{C}$ 氧化生成的氧化物厚度为 100~200 $\text{\AA}$; Fe 在 570 $^{\circ}\text{C}$ 以下氧化, 氧化膜由 Fe_3O_4 和 Fe_2O_3 组成。Fe 形成的氧化层中, 由于 Fe_2O_3 需要的氧气最多, 出现在最外层, 内层是 FeO, 需要的氧气最少, Fe_3O_4 则在两者之间。在 400 $^{\circ}\text{C}$ 时, 随着氧化时间的延长, Al 氧化膜增厚的动力学遵循抛物线规律, Fe 氧化膜增厚的动力学也遵

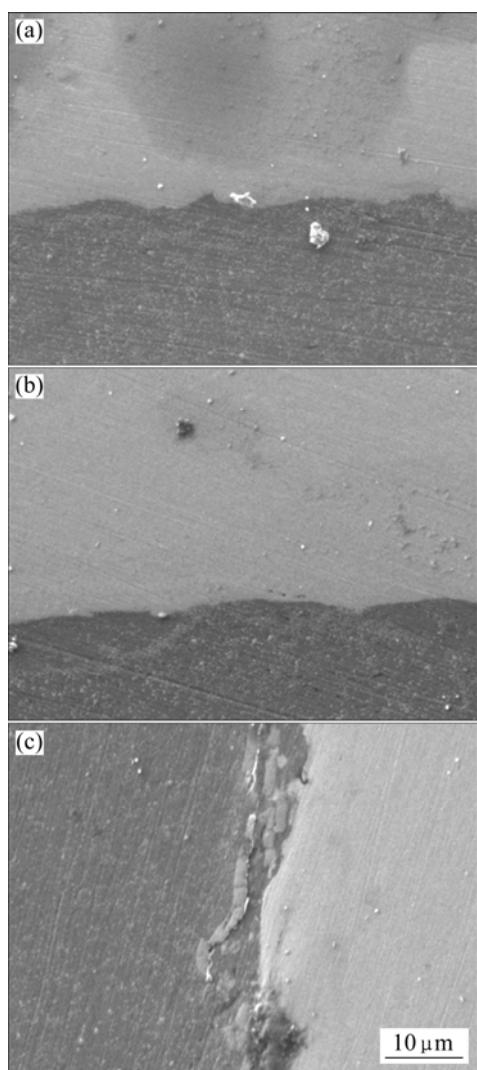


图 2 不同温度下轧制的钢铝复合板的界面 SEM 像

Fig.2 SEM images of interface of metal laminates at different rolling temperatures: (a) 300 °C; (b) 400 °C; (c) 500 °C

循抛物线规律。但这两条抛物线的形状是不一样的, 因为 Al 的氧化膜 Al_2O_3 坚硬而致密, 一旦形成就会阻碍 Al 的进一步氧化, 其抛物线随着时间的延长而变得平直; 而钢的氧化膜由 Fe_3O_4 、 Fe_2O_3 组成, 软而疏松, 无法阻碍钢的基体继续被氧化, 氧化会继续深入下去, 其抛物线规律就必然和铝的不一样^[10-12]。另外, 由于 Al 的氧化膜 Al_2O_3 坚硬而致密, 在轧制复合的过程中, 随着 Al 基体的延伸变形, 其氧化膜就会被破坏, 在 Al 的表面形成大裂纹, 从而露出新鲜的 Al 基体, 因而铝的氧化对复合板的结合强度并没有太大的影响; 钢的氧化膜 Fe_3O_4 和 Fe_2O_3 相对于铝的氧化膜而言软而韧, 在变形的过程中不易发生破裂, 且加热时间越长, 氧化膜越厚, 这将阻碍钢与铝的复合^[13-14]。在两个相反方面的作用下, 轧后的钢/铝复合板在轧制温度

为 400 °C 时结合强度达到最大值。

2.1.2 不同预热温度对厚比分配的影响

图 3 所示为不同轧制温度下轧后各组元的压下量分配曲线。从图 3 可以看出, 轧制温度越高复合板材热轧后的相对压下量差就越大; 随着轧制温度的升高, 钢层的变形率下降, 而铝层的变形率上升。这是因为加热后金属铝发生了软化, 轧制时更容易发生变形; 而且轧制温度越高, 铝的软化程度越大, 铝的变形分配也就越大, 钢的变形分配相应就会减小。在轧制复合过程中, 铝层的变形抗力远小于钢层的变形抗力。因此, 铝层的变形占总变形的大部分。在共同加热轧制复合情况下, 轧制温度越高, 钢的相对变形量越小。

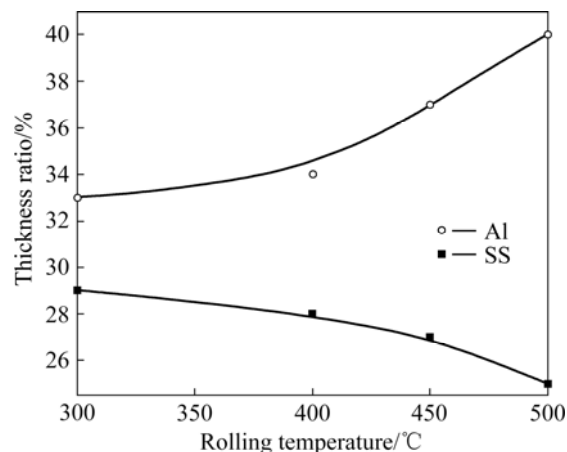


图 3 不同轧制温度下轧后组元的压下量分配曲线

Fig.3 Distribution curves of thickness ratio of components at different rolling temperatures

随着轧制温度的提高, 钢的变形率明显减小, 这说明提高轧制温度对降低钢的变形程度有一定效果, 因此适当提高轧制温度有利于复合板的再加工性能。

2.2 不同压下量对变形规律的影响

2.2.1 不同压下量对结合强度和界面的影响

本实验中钢铝板材在轧制温度为 400 °C, 压下量分别为 20%、30%、35%和 40%的条件下进行轧制复合。图 4 所示为不同压下量轧后钢铝复合板的弯曲试验强度。图 5 所示为不同压下量下热轧后钢铝复合板界面的 SEM 像。

从图 4 可知, 随着压下量的增大, 钢铝复合板材的弯曲次数增多, 其界面结合也紧密。钢铝复合板的结合强度随着压下量的增加而增大。当压下量为 20%~30%时, 结合强度随压下量的增加缓慢增大; 当压下量大于 30%时, 结合强度随压下量的增加而快速

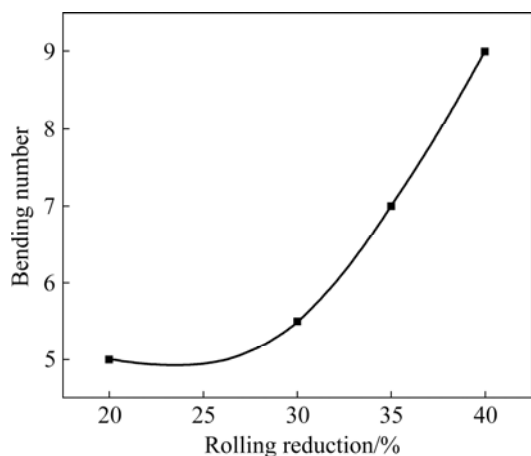


图 4 不同压下量轧制时钢铝复合板的弯曲试验强度

Fig.4 Bending strength of metal laminates with different rolling reductions

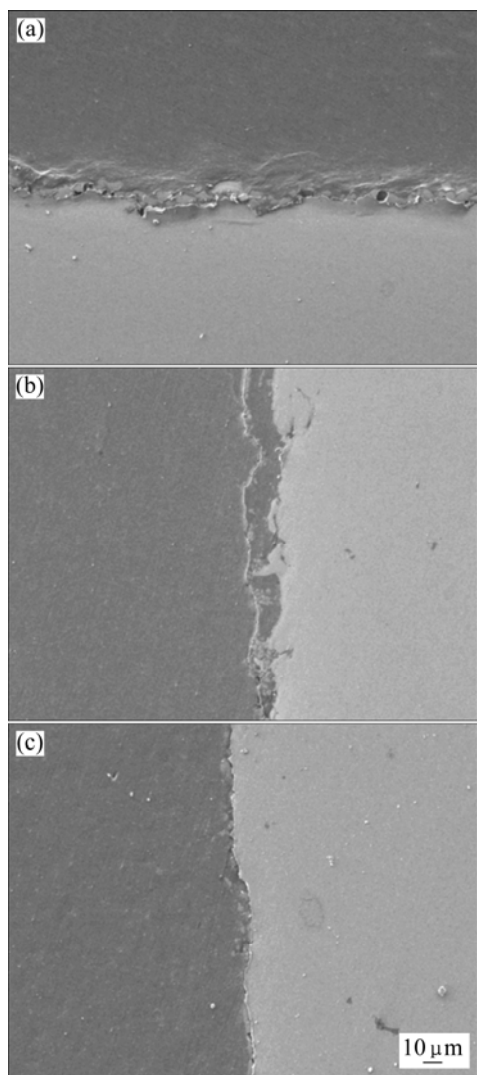


图 5 不同压下量下热轧后钢铝复合板界面 SEM 像

Fig.5 SEM images of interface of metal laminates with different rolling reductions: (a) 20%; (b) 30%; (c) 40%

增大。当压下量为 20% 时, 其结合界面上有一定的裂纹和小的空洞, 而当压下量为 30% 和 40% 时, 其结合界面光滑平整, 结合紧密。在轧制复合过程中, 金属材料之间的反应分为 3 个阶段^[13, 15]: 1) 物理接触的形成; 2) 接触表面的激活; 3) 待复合金属间的作用。牢固的机械啮合在轧后复合材料的高强度结合中占主要的地位。金属间原子的引力是与它们的间距的倒数成比例的, 因此, 为了获得高强度的机械结合, 使两金属表面实现其接触达到原子间引力的作用范围内的物理接触而建立一个牢固的机械结合是非常有必要的。当压下量增加, 平均单位压力增大, 压力增大有利于减小金属原子之间的距离, 增大原子之间的引力。同时压下量增大, 钢、铝表面的扩展率增加, 新鲜金属自裂缝中挤出几率增加, 即暴露的新鲜金属面积增多, 两组元新鲜金属相遇的几率增大, 从而使两新鲜金属牢固结合增加复合板的结合强度。

2.2.2 不同压下量对厚比分配的影响

图 6 所示为总压下量与组元压下量的关系。从图 6 可知, 各组元的压下量和组元的压下量之间成正比关系, 随着压下量的增大, 各组元压下量也增大。由于铝较钢的变形抗力低, 所以铝的压下量总是大于钢的压下量。但是随着压下量的增加, 大的压下量和快的变形速率导致钢和铝的加工硬化都增加, 继续变形的越来越困难, 由于铝的压下量大于钢的压下量, 所以铝先于钢达到高的加工硬化, 同时由于铝层厚度仅为 0.5 mm 与钢层厚度(1.5 mm)相比很小, 因此, 随着压下量的增加, 铝层的变形也比钢层更加困难。总之, 随着总压下量的增大, 二者压下量的差值减小, 使得铝和钢的变形趋于一致, 这也有利于共同变形, 达到良好的复合效果。

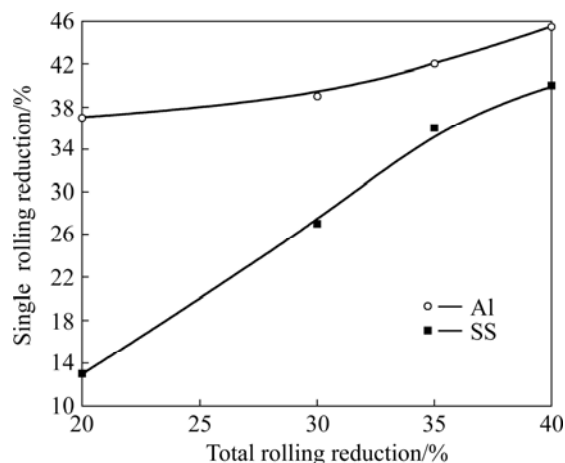


图 6 总压下量与组元压下量的关系

Fig.6 Relationship between total and single rolling reductions

3 结论

1) 轧制温度低于 400 °C 时, 弯曲次数随着轧制温度的升高而增加, 之后又逐渐减少, 轧制温度在 400 °C 时钢铝复合板的界面结合强度最大。

2) 随着轧制温度的增加, 铝层的压下量增加, 钢层的压下量减小, 致使两者的压下量差值增加, 提高轧制温度可以减小钢层的变形程度, 有利于提高复合板的再加工性能。

3) 弯曲次数随着轧制压下量的增大而增加, 结合界面和结合强度更好; 当压下量为 20%~30% 时, 弯曲次数随压下量的增加而缓慢增大; 当压下量大于 30% 时, 弯曲次数随压下量的增加而快速增大。

4) 随着总压下量的增加, 钢、铝层的压下量都成正比关系增加, 但组元压下量的差值随总压下量的增大而减小, 变形趋于一致, 有利于复合变形。

REFERENCES

- [1] 谭树松. 有色金属材料学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1993: 1-3.
- TAN Shu-song. Non-ferrous metal materials[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1993: 1-3.
- [2] 朱旭霞. 不锈钢/铝(合金)/不锈钢多层材料热轧复合及性能研究[D]. 长沙: 中南大学, 2000: 1-5.
- Zhu Xu-xia. Hot roll bonding and properties of stainless steel/aluminum alloy/stainless steel multi-layer composites[D]. Changsha: Central South University, 2000: 1-5.
- [3] 孙德勤, 谢建新, 吴春京. 复合板的成形技术与发展趋势[J]. 金属成型工艺, 2003(2): 19-22.
- SUN De-qin, XIE Jian-xin, WU Chun-jing. The forming technology and developing trend of clad plate[J]. Metal Forming Technology, 2003(2): 19-22.
- [4] 于九明, 于长生, 朱 泉. 轧制温度对复合板初结合强度的影响[J]. 东北大学学报, 1995, 16(5): 491-494.
- YU Jiu-ming, YU Chang sheng, ZHU Quan. Effect of rolling temperature on bonding strength of clad plates[J]. Journal of Northeastern University, 1995, 16(5): 491-494.
- [5] LEE J E, BAE D H, CHUNG W S, KIM K H, LEE J H, CHO Y R. Effects of annealing on the mechanical and interface properties of stainless steel/aluminum/copper clad-metal sheets[J]. Materials Processing Technology, 2007, 188: 546-549.
- [6] DANESH MANESH H, KARIMI TAHERI A. Bond strength and formability of an aluminum-clad steel sheet[J]. Alloys and Compounds, 2003, 361: 138-143.
- [7] DANESH MANESH H, KARIMI TAHERI A. The effect of annealing treatment on mechanical properties of aluminum-clad steel sheet[J]. Materials and Design, 2003, 24: 617-622.
- [8] DANESH MANESH H, KARIMI TAHERI A. Theoretical and experimental investigation of cold rolling of tri-layer strip[J]. Materials Processing Technology, 2005, 166: 163-172.
- [9] 韦家弘, 王慧敏, 甘为平. 金属复合轧制包覆率和长度配比的研究[J]. 中南工业大学学报: 自然科学版, 2002, 31(3): 264-266.
- WEI Jia-hong, WANG Hui-min, GAN Wei-ping. Study on the clad ratio and length ratio of metal roll bonding[J]. Journal of Central South University Technology: Natural Science Edition, 2002, 31(3): 264-266.
- [10] JINDAL V, SRIVASTAVA V C. Growth of intermetallic layer at roll bonded IF-steel/aluminum interface[J]. Materials Processing Technology, 2007, 10: 118-122.
- [11] DANIELEWSKI M, WIERZBA B. Mechano-chemistry diffusion in multi-component compressible mixtures[J]. Physica A, 2008, 387: 745-756.
- [12] YU H C, YEON D H, VANDER V A, THORNTON K. Substitutional diffusion and Kirkendall effect in binary crystalline solids containing discrete vacancy sources and sinks[J]. Acta Materialia, 2007, 55: 6690-6704.
- [13] PENG X K, HENESS G, YEUNG W Y. Effect of rolling temperature on interface and bond strength development of roll bonded metal laminates[J]. Materials Science, 1999, 34(2): 277-281.
- [14] DYBKOV V I. Interaction of 18-Cr-10Ni stainless steel with liquid aluminium[J]. Materials Science, 1990, 25: 3615-3621.
- [15] WANG De-qing, SHI Zi-yuan, QI Ruo-bin. Cladding of stainless steel on aluminum and carbon steel by interlayer diffusion bonding[J]. Scripta Materialia, 2007, 56: 369-372.

(编辑 何学锋)