

轧制和退火对爆炸焊接 Ag/Ti 复合板组织和力学性能的影响

范文杰, 朱绍珍*, 周龙海, 王 航
(西安诺博尔稀贵金属材料股份有限公司, 西安 710201)

摘要: 采用爆炸-轧制复合法制备了 Ag/Ti 复合板材, 研究了轧制和退火对复合板材力学性能和结合界面的显微组织的影响。结果表明, 爆炸焊接 Ag/Ti 复合材界面出现典型的周期性波状组织, 波峰高约 80 μm , 相邻波峰间距约为 300 μm 。爆炸焊接复合板经轧制后, 波状复合界面由于发生较大的塑性变形转变为平直界面, 且界面上形成不连续的 AgTi 扩散层。经后续的退火处理后, 界面上形成厚度约为 20 μm 的连续均匀的扩散层。轧制态的 Ag/Ti 复合板经退火处理后, 板材的强度明显降低, 但是其塑性却有明显的增加, 其屈服强度、抗拉强度和伸长率分别为 358 MPa、464 MPa 和 50.5%。断口分析表明, 轧制态和退火态复合板材断口中均表现出明显的韧性断裂特征, 但退火态复合板断口中韧窝尺寸更大更深, 表明其具有更好的塑性。

关键词: Ag/Ti 复合板; 爆炸焊接; 轧制; 退火

中图分类号: TG337.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-0676(2023)04-0069-05

Effects of rolling and annealing on microstructures and mechanical properties of explosion welded Ag/Ti composite plate

FAN Wenjie, ZHU Shaozhen*, ZHOU Longhai, WANG Hang
(Xi'an Noble Rare Metal Materials Co. Ltd., Xi'an 710201, China)

Abstract: Ag/Ti composite plate was fabricated by explosion-rolling technology in this work. The effects of rolling and annealing on the properties of the composite plate and the microstructure of the bonding interface were studied. The results show that the bonding interface of explosion welded Ag/Ti composite plate has typical wavy structure with an average wavelength of 300 μm and a height of 80 μm . The wavy interface changed into straight interface basically after rolling, due to the large plastic deformation. In addition, a discontinuous AgTi interfacial diffusion layer was developed. After a subsequent annealing treatment, a continuous and uniform diffusion layer with a thickness of about 20 μm was formed at the interface. The strength of the rolled Ag/Ti composite plate was significantly reduced after the annealing treatment, but its plasticity increased significantly, with the yield strength, ultimate tensile strength and elongation being 358 MPa, 464 MPa and 50.5%, respectively. Fracture analysis shows that both the rolled and annealed composite plates exhibited significant ductile failure characteristics, but the latter had a larger and deeper dimples in the fracture, indicating better plasticity.

Key words: Ag/Ti composite plate; explosive welding; rolling; annealing

随着科技的进步和人们生活水平的不断提高, 人们对涉及身体健康的卫生防菌意识逐渐提高, 市场对于抗菌材料的需求不断增长, 特别是日常饮食

用抗菌材料得到广泛关注。银及银合金具有抗菌广谱、杀菌效率高和不易产生抗药性等优点, 是一种高效且持久的无机抗菌剂^[1]。银质器具造型优美、

收稿日期: 2023-02-10

基金项目: 陕西省重点研发计划工业领域项目(2022GY-393)

第一作者: 范文杰, 男, 工程师; 研究方向: 稀贵金属材料加工; E-mail: china1571@163.com

*通信作者: 朱绍珍, 男, 博士, 工程师; 研究方向: 稀贵金属材料加工; E-mail: szzhu12s@alum.imr.ac.cn

工艺精良,不仅可以作为高雅的工艺品,也可以作为实用的餐具,具有悠久的历史。但是,银质器具成本较高,难以大规模推广使用。

以廉价金属(如钛、不锈钢等)为基体,通过适当的工艺在其表面生成银复合层,从而制备出复合材料,该材料不仅可保持银的抗菌性能,而且还具有基体材料的强度和刚度。目前,银复合层的制备多采用电镀、磁控溅射和等离子喷涂及等方法。Arash等^[2]采用电镀法在不锈钢表面制备出具有良好抗菌性能的纯银镀层。刘永红等^[3]先用磁控溅射法在不锈钢表面生成镀银薄膜,再用强流脉冲电子束辐照,在基体表面形成银抗菌涂层,该涂层对变形链球菌具有较强的抗菌效果。胡宇等^[4]采用大气等离子热喷涂方法在不锈钢基体上制备了致密的银基涂层,该涂层与基体结合强度达 50 MPa 以上。现有方法制备的银复合层较薄,且与基体结合性差,使用中易被磨损和消耗,不仅影响器具美观性,还会降低其表面的抗菌功效。因此,针对银质餐具的使用环境,增强银复合层与基体的结合力,并获得良好的抗菌性和长效性是需解决的关键问题。

爆炸焊接是利用炸药爆轰能量驱动金属板间发生高速碰撞而实现金属板之间冶金结合的焊接方法。Yang等^[5]采用爆炸焊接方法在 20 mm 厚的 Q235 钢板上制备出 0.2 mm 厚高质量的银复合层。爆炸焊接制备的复合板较厚,再将其进行轧制得到所需厚度板材的方法称为爆炸-轧制法,该方法结合了爆炸复合和轧制复合的优点,适于基复层较薄的大面

积复合板的生产^[6]。赵峰等^[7]采用爆炸-轧制法制备了 4 mm 厚的钛/钢复合板材,并研究了其界面结合性能。Chen等^[8]研究了多道次轧制和退火对爆炸焊接 AZ31/6061 板材微观组织和力学性能的影响。

本文首先采用爆炸焊接方法制备了 Ag/Ti 复合板材,对复合界面的微观组织进行分析,并研究后续的轧制和退火对板材微观组织和力学性能的影响,为实际生产应用提供理论和技术依据。

1 实验

实验加工流程如图 1 所示,爆炸焊接实验基板选用厚度为 9 mm 的退火态纯钛板,退火温度为 650 °C,退火时间为 1 h,复板选用厚度为 1 mm 的退火态纯银板,退火温度为 400 °C,退火时间为 1 h。爆炸复合之前,采用 1000 目砂纸对板材待焊接面进行打磨,并用无水乙醇将表面清洗干净。复板与基板呈平行放置状态,复板上铺设 30 mm 厚氨油炸药,在复板一端的炸药上方放置引爆装置,之后进行爆炸焊接。之后采用轧机将爆炸焊接板坯沿爆轰传播方向进行冷轧,冷轧过程需进行中间退火,退火温度为 650 °C,退火时间为 1 h,最终得到厚度为 0.5 mm 的 Ag/Ti 复合板材,其中 Ag 层厚度为 0.05 mm, Ti 层厚度为 0.45 mm。最后将复合板材进行成品退火处理,退火温度为 650 °C,退火时间为 1 h。此外,为了进行对比分析,采用相同轧制和退火工艺将纯钛板从 10 mm 加工到 0.5 mm。

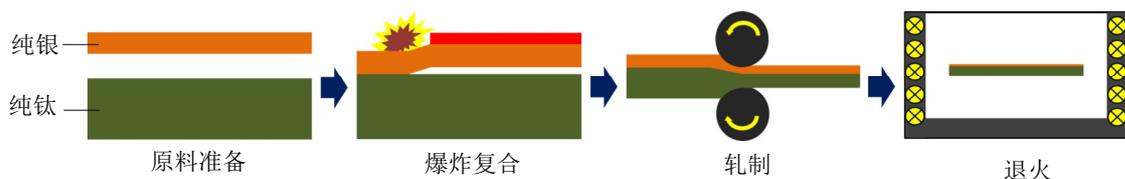


图 1 实验加工流程图

Fig.1 Schematic illustration of the process of experiment

沿爆炸或轧制方向在复合板上取金相试样,采用腐蚀剂对研磨和抛光后的样品进行侵蚀,先用腐蚀剂对 Ti 层进行侵蚀,腐蚀剂配比为 1 mL 氢氟酸、4 mL 硝酸和 5 mL 水,之后再对 Ag 层进行侵蚀,腐蚀剂配比为 10 mL 氨水和 10 mL 双氧水,采用 LEICA DMi8 显微分析系统观察其金相组织。采用 JSM6460 和 SU5000 扫描电镜及其配置的能谱分析仪对微观组织及微区成分进行观察和分析。采用 AG-100kNG 材料试验机进行拉伸性能测试。

2 结果与讨论

图 2 为爆炸焊接 Ag/Ti 复合板显微组织扫描电镜图片。从图 2 中可以看出,Ag/Ti 结合界面出现周期性的波纹,波峰高约 80 μm,相邻波峰间距约为 300 μm,具有典型的爆炸焊接界面特征,这种复合界面能够增加复合层之间的结合面积,有效提高界面结合强度。在爆炸焊接过程中,基板和复板发

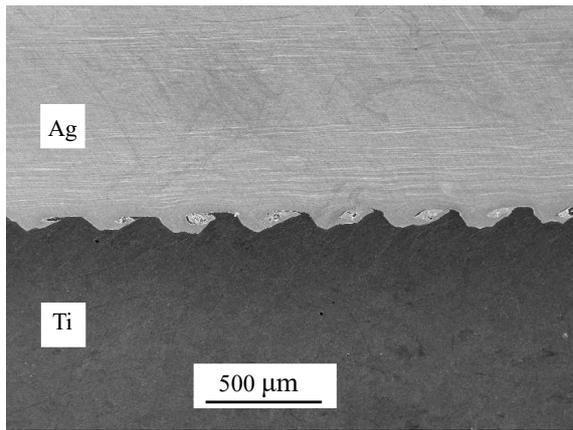


图 2 爆炸焊接 Ag/Ti 复合板的微观组织

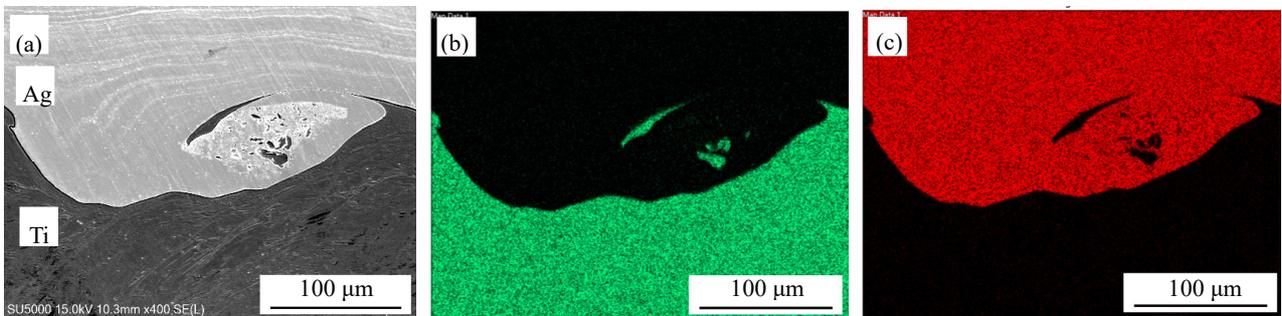
Fig.2 The Ag/Ti composite plate prepared by explosive welding

生高速的斜碰撞，驻点附近形成了高温高压区，温度和压力急剧的上升使得界面金属出现了熔化并形成了金属射流，反复扰动的射流将侵彻基板与复板，最终形成波状界面^[9]。

图 3 为爆炸焊接 Ag/Ti 复合板的界面微观组织及面扫描分析结果。从图 3 中可以发现，其界面具有漩涡组织特征，结合图 3(b)和图 3(c)的面扫描分析结果，少量 Ti 包裹在 Ag 基体的漩涡中，这是由

于在爆炸瞬间，碰撞区域的表层射流被基板和复板捕获，形成了漩涡区。此外，从图 3 中可以发现，Ag 和 Ti 复合层界面清晰，根据面扫描结果，Ag 和 Ti 元素分布均具有明显的边界，表明复合界面处未观测到明显的元素扩散，这可能是由于爆炸焊接过程虽然会产生瞬时高温高压，但是该过程较短(约 10^{-6} s)^[10]，原子扩散时间短，扩散层厚度较小。

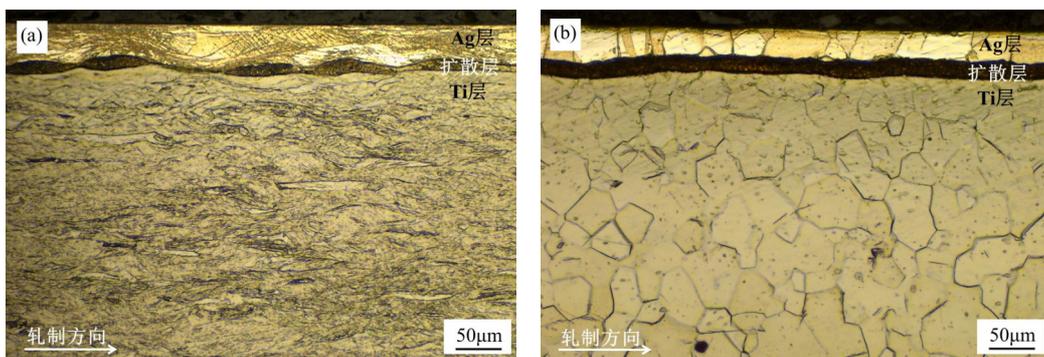
不同状态 Ag/Ti 复合板的微观组织金相照片如图 4 所示，图中上层为 Ag 层，下层为 Ti 层，二者之间为扩散层，由于金相侵蚀的原因，扩散层呈现黑色条纹状。从图 4 中可以发现，经退火处理后，组织均发生了明显的再结晶，Ag 层形成晶界相互平行的大晶粒，Ti 层形成晶粒尺寸约为 $50\ \mu\text{m}$ 的等轴晶组织。此外，爆炸焊接板材经轧制后，复合界面形态发生了明显变化，波状复合界面发生塑性变形转变为平直型界面。此外，板材经轧制变形后，其界面形成不连续的扩散层，这是由于板材轧制过程中进行了退火处理，在退火过程中，由于元素间的扩散在界面上形成扩散层，在之后的轧制过程中，扩散层被压扁并拉长，形成不连续的扩散层。经后续的退火处理后，形成厚度约为 $20\ \mu\text{m}$ 的连续均匀的扩散层。



(a). 微观组织(Microstructure); (b). Ti 元素分布(Ti distribution); (c). Ag 元素分布(Ag distribution)

图 3 爆炸焊接 Ag/Ti 复合板界面的组织及面扫描分析结果

Fig.3 The bonding interface of Ag/Ti composite plate and corresponding EDS maps



(a). 轧制态板材(As-rolled plate); (b). 退火态板材(As-annealed plate)

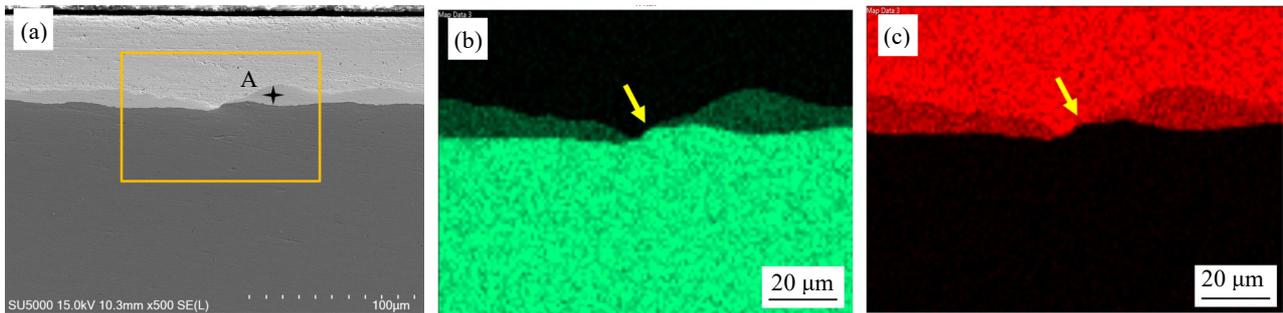
图 4 不同状态 Ag/Ti 复合板材的微观组织照片

Fig.4 Optical images of Ag-Ti composite plate under different conditions

图 5 和图 6 为不同状态 Ag/Ti 复合板材界面的面扫描分析结果, 表 1 为图 5 和图 6 中标记点的 EDS 分析结果。从图表中可以看出, 轧制态和退火态中扩散层中的金属间化合物均由 Ag 和 Ti 两种元素组成, 并且二者的原子比接近 1:1。结合 Ag-Ti 二元合金相图, Ag 和 Ti 之间可能形成 AgTi_2 和 AgTi 两种金属间化合物, 根据 EDS 分析结果可以确定扩散层由 AgTi 金属间化合物组成。此外, 从图中还可以看出, 轧制态复合板材的界面扩散层为不连续状态, 如图中箭头所示区域明显可见 Ag 层和 Ti 层直

接结合, 而经退火处理后, 扩散层变得更加连续和均匀, 这有不仅利于提高 Ag 层和 Ti 层的结合强度, 而且还使复合板材的微观组织更加均匀。

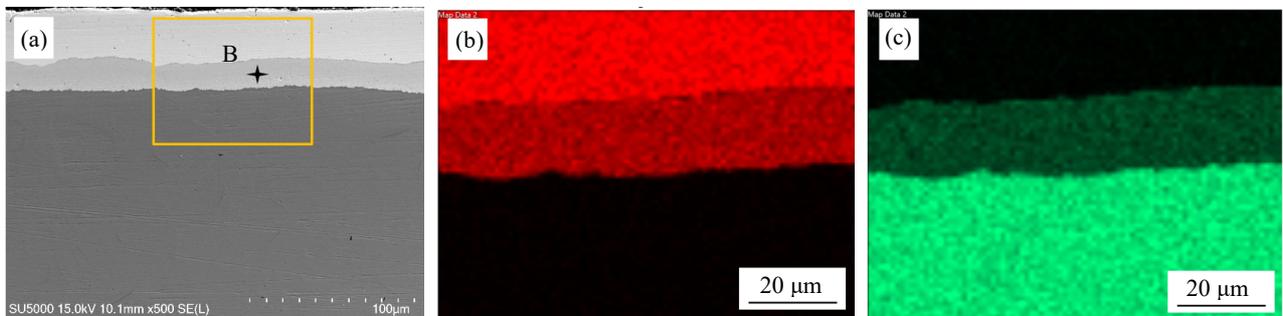
表 2 为不同状态 Ag/Ti 复合板材和纯钛板的拉伸力学性能。从表 2 中可以看出, 由于板材在加工过程中产生加工硬化, 导致轧制态的复合板具有较高的强度, 但是其塑性较差, 而经退火处理后, 板材组织发生了完全的再结晶, 降低了位错密度, 其强度明显降低, 但是塑性却有明显的增加, 其屈服强度、抗拉强度和伸长率分别为 358 MPa、464 MPa



(a). 界面微观组织(Microstructure of the bonding interface); (b). Ti 元素分布(Ti distribution); (c). Ag 元素分布(Ag distribution)

图 5 轧制态 Ag/Ti 复合板材界面的组织及面扫描分析结果

Fig.5 The bonding interface of as-rolled Ag/Ti composite plate and corresponding EDS maps



(a). 界面微观组织(Microstructure of the bonding interface); (b). Ti 元素分布(Ti distribution); (c). Ag 元素分布(Ag distribution)

图 6 退火态 Ag/Ti 复合板材界面的组织及面扫描分析结果

Fig.5 The bonding interface of as-annealed Ag/Ti composite plate and corresponding EDS maps

表 1 图 5 和图 6 中标定位置的 EDS 分析结果

Tab.1 EDS results of the calibrated regions in Fig.5 and Fig.6

位置	元素	质量分数(w)/%	摩尔分数(x)/%
A 点	Ag	29.28	48.25
	Ti	70.72	51.75
B 点	Ag	29.44	48.45
	Ti	70.56	51.55

表 2 不同状态 Ag/Ti 复合板材和纯钛板材的拉伸力学性能

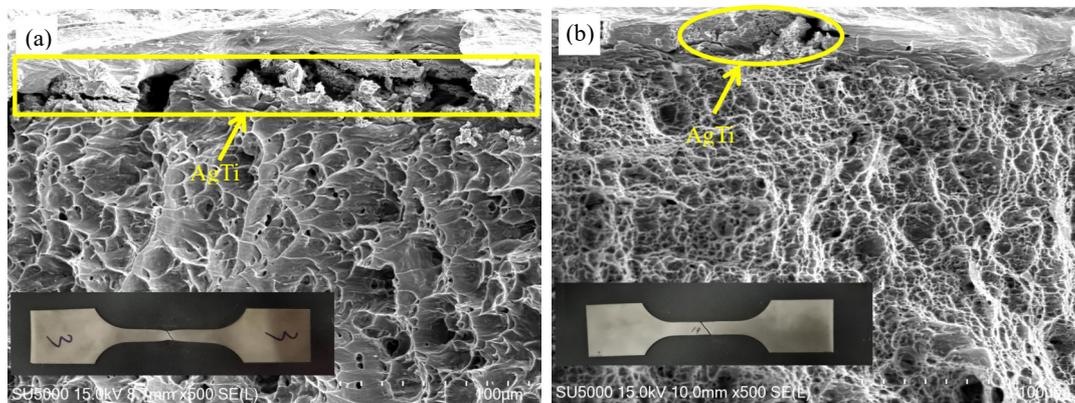
Tab.2 Tensile properties of the Ag/Ti composite plate and pure Ti plate under different conditions

材料	状态	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%
Ag/Ti 复合板材	轧制态	708	813	12.5
	退火态	358	464	50.5
纯 Ti 板	轧制态	711	819	13
	退火态	362	467	49

和 50.5%。此外, 通过与纯钛板拉伸力学性能进行对比可以发现, 两种材料在相同状态下的力学性能没有明显差异。这是由于纯 Ag 层较薄, 且强度较低(轧制态抗拉强度约为 300 MPa), 复合板材强度最终由 Ti 层决定。

图 7 为不同状态 Ag/Ti 复合板拉伸断口扫描电镜照片。从图 7 可见, 两种状态的试样拉伸断口均呈 45° 切断断口, 两种状态下板材 Ti 层的断口均存在大面积韧窝, 表现出明显的韧性断裂特征。但是, 轧制态试样断口中为等轴韧窝, 韧窝尺寸较小, 大部分韧窝宽度为 1~5 μm ; 而退火态试样断口具有拉长形韧窝特征, 韧窝尺寸较大且深, 大部分韧窝宽

度为 5~20 μm 之间。轧制态复合板变形硬化指数较大, 拉伸过程中难以发生颈缩, 因此生成更多的显微空洞或通过剪切断裂而连接, 导致韧窝变小、变浅; 而退火态试样断口中为拉长韧窝, 且韧窝尺寸较大, 韧窝的尺寸反映了材料断裂前塑性变形的大小, 韧窝尺寸越大, 材料的塑性就越好^[12]。此外, 由于 Ag-Ti 层塑性较差, 在拉伸过程中均发生了明显的破碎。由于退火态复合板 Ag-Ti 层更厚, 且在拉伸过程中经历更大的塑性变形, 因此破碎现象更加明显。结合表 2 的测试结果, Ag-Ti 层的产生对于材料的拉伸力学性能影响不大, 这可能是由于其厚度远小于于纯钛基体, 不能起到显著的强化效果。



(a). 轧制态板材(As-rolled plate); (b). 退火态板材(As-annealed plate)

图 7 不同状态 Ag/Ti 复合板拉伸断口组织照片

Fig.7 The tensile fracture of Ag/Ti composite plate under different conditions

根据以上分析, Ag/Ti 复合板材经退火处理后具有均匀的三层结构, 其中基体层为纯钛层, 保证板材具有较高的强度, 复合层为纯银层, 使板材具有抗菌性能, 中间层为均匀的 Ag-Ti 层, 可以促进界面形成冶金结合, 增加了基体层和复合层的结合强度。

3 结论

1) 爆炸复合 Ag/Ti 板结合界面出现周期性的波纹, 波峰高约 80 μm , 相邻波峰间距约为 300 μm , 具有典型的爆炸焊接界面特征, 其界面具有漩涡组织, 少量 Ti 包裹在 Ag 基体的漩涡中。

2) 爆炸焊接 Ag/Ti 复合板经轧制后, 波状复合界面发生塑性变形转变为平直型界面。此外, 经轧制变形后, 其界面形成不连续的 AgTi 扩散层, 经后续的退火处理后, 形成厚度约为 20 μm 的连续均匀的扩散层。

3) 轧制态的 Ag/Ti 复合板经退火处理后, 板材的强度明显降低, 但是其塑性却有明显的增加, 伸长率高达 50.5%。两种状态下板材 Ti 层的断口均存在大面积韧窝, 表现出明显的韧性断裂特征, 但轧制态试样断口韧窝尺寸较小, 而退火态试样断口中韧窝尺寸较大且深。

参考文献:

- [1] 墙蔷, 倪红卫, 幸伟, 等. 银的抗菌作用机理[J]. 武汉科技大学学报, 2007, 30(2): 121-124.
QIANG Q, NI H W, XING W, et al. Antibacterial mechanism of silver[J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology, 2007, 30(2): 121-124.
- [2] ARASH V, KEIKHAAEE F, RABIEE S M, et al. Evaluation of antibacterial effects of silver-coated stainless steel orthodontic brackets[J]. Journal of Dentistry, 2016, 13(1): 49-54.