

由此可见复合板具有良好的焊接界面,且界面处的晶粒细小。因为爆炸焊的基本原理是利用爆炸产生的高压冲击波使待焊金属发生高速碰撞,在接触面上产生塑性变形并紧密接触,与此同时伴随着强烈的热效应,使相互接触的界面产生两股运动方向相反的射流,冲刷待焊表面的氧化膜、污物及表面吸附层,使待焊材料露出有活性的清洁表面,在温度和瞬时高压的综合作用下形成牢固的冶金结合。因此,爆炸焊后的 NiTi/NiTi 复合板具有良好的界面结合力。

图 3 为焊前焊后两块 NiTi 板加热过程中的 DSC 曲线对比,图 3 (b) 为焊后 NiTi/NiTi 复合板预应变前后的 DSC 曲线。由图 3 (b) 中试样 0% 的 DSC 曲线可看出焊后复合板具有良好的可逆相变,并在大约 70℃ 的范围内发生相变,大大拓宽了其应用范围,具有很好的工程应用价值。

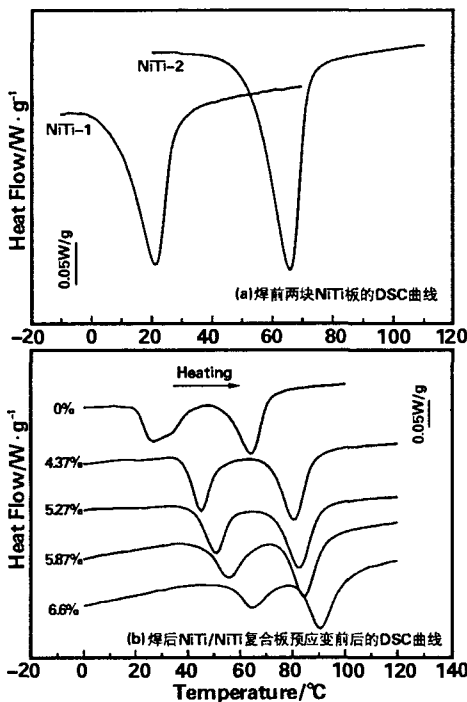


图 3 升温过程中的 DSC 曲线

Fig 3 The DSC curves of the two NiTi alloys before and after explosive welding

由图 3 (a) 中可以看出在加热过程中有两独立的相变峰由马氏体相转变为母相。显然,图 3 (b) 中所示变形后样品的两吸热峰分别对应于 NiTi-1 和 NiTi-2 的马氏体逆相变, NiTi-1 的逆相变发生在低温区,而 NiTi-2 的逆相变发生在高温区。众所周知,变形使 NiTi 形状记忆合金由自适应马氏体 (SAM) 转变为取向马氏体 (POM),在加热过程中取向马氏体转变为母相^[3]。变形对复合板相变行为的影响见图 3 (b) 所示,其中两吸热峰对应于复合板取向马氏体的逆相变,且随着预应变量的增大其相变峰向高温移动,这种现象在过去的十几年中已被广泛的研究,普遍认为的原因是变形产生的缺陷(包括位错和空位)通过阻碍相界面的移动而使马

氏体稳定化^[4],或变形释放了储存在 NiTi 合金马氏体中的弹性性能而使马氏体稳定化^[5]。

另外,从图 3 中还可以看出 NiTi/NiTi 合金的相变温度范围随着预应变量的增大而加宽,其原因有两个方面:(1)材料成分的不均匀,其导致在材料内部不同区域的相变温度不同以及热动态平衡条件的改变^[6]。(2) NiTi-1 与 NiTi-2 发生相变时的相互约束。在加热过程中当 NiTi-1 开始发生相变时有体积收缩的趋势,而此时 NiTi-2 仍然保持马氏体状态。这样 NiTi-1 相变时就会受到 NiTi-2 的约束。相似的,当温度达到 NiTi-2 的相变温度时其相变也会受到 NiTi-1 的约束。而且, NiTi-1 与 NiTi-2 之间的相互约束随着预应变量的增大而变强, NiTi/NiTi 合金的相变温度范围也随之变宽。这种现象对 NiTi/NiTi 合金用作智能材料具有潜在的应用价值。

图 4 所示为预应变后 NiTi/NiTi 合金自由加热过程中回复应变曲线与 DSC 曲线的对比。从图中回复应变曲线可以看出对小变形的样品,如预应变 4.37% 样品,在低温处回复应变急剧下降,而在高温处为轻微下降,并在这两段下降过程中有一平台。两段回复应变表明在样品回复过程中有两独立的相变发生。与小变形样品结果相比,大变形样品具有相反的结果,如预应变 5.87% 样品,在低温处回复应变表现为轻微下降,在高温处表现为急剧下降。而且大变形样品的回复应变曲线为连续下降的曲线,没有明显的平台段。

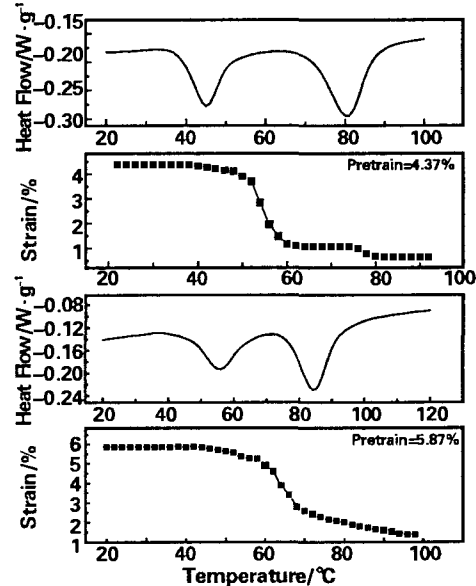


图 4 变形后 NiTi/NiTi 合金在自由加热过程中的回复应变曲线与 DSC 曲线对比

Fig 4 Comparison between the DSC curves and the recovery strain curves of different prestrained specimens after explosive welding and hot rolling

从图 4 中 DSC 曲线与应变回复曲线的对比中可以看出,两步回复应变与 DSC 结果是相对应的。很明显回复应变的产生是由于样品发生 B19'→B2 转变。对小变形样品,如预应变 4.37% 样品,在 DSC 曲线上有两独

立的相变峰由马氏体相转变为母相, 相对应地, 样品的回复应变为两段且其中间有一平台。NiTi-1 的相变发生在低温区, NiTi-2 的相变发生在高温区。然而, 预应变量为 5.87% 的样品具有不同的现象: NiTi-1 的相变未结束时 NiTi-2 已开始相变 (见图 4)。换句话说, NiTi-1 和 NiTi-2 的相变部分重合了, 这也就是大变形样品回复应变曲线为连续下降曲线且无平台的原因。

4 结 论

(1) 采用爆炸焊成功地成分和相变温度不同的两 NiTi 合金板连接在一起。

(2) 在低温冷变形后, NiTi/NiTi 合金的相变温度随变形量的增大而升高。并且 NiTi/NiTi 合金的相变温度范围由于 NiTi-1 和 NiTi-2 的相互约束而加宽。

(3) 在加热过程中较宽的温度范围可以得到两步回复应变。在低温处第一阶段的回复应变对应于 NiTi-1 的马氏体逆相变, 高温处第二阶段的回复应变对应于

NiTi-2 的马氏体逆相变。

(4) 实验结果表明爆炸焊是制备大块成分不均匀形状记忆材料的有效方法, 所得材料在较宽的温度范围内具有可逆马氏体相变。

参考文献:

- [1] Wei Z G, Sandstrom R, Miyazaki S. [J]. *J Mater Sci*, 1998A, 33: 3743-3762.
- [2] Wei Z G, Sandstrom R, Miyazaki S. [J]. *J Mater Sci*, 1998B, 33: 3763-3783.
- [3] Saburi T. *TiNi Shape Memory Alloys*[M]. New York: The Press Syndicate of the University of Cambridge, 1998, 49-96.
- [4] Lin H C, Wu S K, Chou T S, et al. [J]. *Acta Metal Mater*, 1991, 39: 2069-2680.
- [5] Piao M, Otsuka K, Miyazaki S, et al. [J]. *Mater Trans JIM*, 1993, 34: 919-929.
- [6] Liu Y N, Favier D. [J]. *Acta Mater*, 2000, 48: 3489-3499.

Transformation behaviors of NiTi/NiTi alloys synthesized by explosive welding

YAN Zhu, CUI Li-shan, ZHENG Yan-jun

(Department of Materials Science and Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: The aim of this study was an initial attempt to prepare bulk NiTi/NiTi shape memory alloys with macroscopic heterogeneity in composition by explosive welding and investigate the transformation behavior and strain recovery characteristics of the resulting laminates. After explosive welding, a perfect interfacial bonding between the two components and a reversible martensitic transformation were obtained in the tandem. The DSC results showed that the reverse transformation temperatures and the temperature range of NiTi-NiTi alloys increased with increasing prestrain level. Meanwhile, a two-stage strain recovery in a wide temperature range was obtained.

Key words: NiTi; explosive welding; martensitic transformation; recovery strain