

[文章编号] 1004- 0609(2001)S1- 0154- 04

退火对钛-钢爆炸复合板中飞线组织的影响^①

郑远谋

(鹤山市新技术应用研究所, 鹤山 529721)

[摘 要] 进行了退火对钛-钢爆炸复合板中飞线(绝热剪切线)组织影响的试验。发现在一定工艺下退火后这种飞线会自行消失, 而由飞线发展成的裂纹则不会。由此论证了飞线是一种塑性变形组织和裂纹源。这种飞线可能还是爆炸载荷下金属中出现的一种新的和特殊的塑性变形机制。

[关键词] 爆炸焊接; 钛-钢复合板; 飞线(绝热剪切线); 退火; 塑性变形机制

[中图分类号] TG 456. 6; TG 301

[文献标识码] A

文献[1]讨论了爆炸复合材料中飞线产生的原因、条件、性质和影响。指出, 一定工艺下的退火能够消除这种飞线组织, 从而可以改善和恢复这类材料的力学性能, 为它们的后续加工和使用创造良好的内部条件。本文在介绍钛-钢爆炸复合板钛侧的飞线之后, 研究了退火工艺对该组织的影响, 为论证它的性质和实质, 以及为制订消除这种组织的退火工艺提供参考。

1 实验

1.1 实验材料

本次试验材料的化学成分及其力学性能如表 1 所列。

表 1 试验材料的化学成分及其力学性能

Table 1 Chemical composition and mechanical properties of material (mass fraction, %)

Material	C	Si	Mn	P	S	Fe	Ti	N
Ti-TA2	-	-	-	-	-	≤0. 15	Bal.	≤0. 05
Steel A ₃	0. 18	0. 31	0. 57	0. 21	0. 12	Bal.		

Material	H	O	σ_b / MPa	σ_s / MPa	δ / %	a_k /(J•cm ⁻²)
Ti-TA2	≤0. 05	≤0. 05	441~ 588	294~ 441	25	19. 6
Steel A ₃			372~ 461	216~ 235	21~ 27	147. 0

1.2 试验方法

用角度法爆炸焊接尺寸为(3+ 20) mm×500 mm×1 000 mm 的钛-钢复合板。工艺参数中最小间隙 5 mm, 最大间隙 15 mm, 使用硝铵炸药药量偏

大。

然后将所得复合板进行解剖, 即在其长向中心线的前半部和前端两个位置上切取金相样品坯料。再将这些坯料的一部分进行退火试验(工艺参数如表 2 所列)。

表 2 钛-钢爆炸复合板退火工艺

Table 2 Technological parameters of annealing of titanium-steel explosive composite sheet

Temperature/℃	350	450	550	600	650	700	800	900
Time/h	0. 5 1. 0	0. 5 1. 0	0. 5 1. 0	0. 5 1. 0	0. 5 1. 0	0. 5 1. 0	0. 5 1. 0	0. 5 1. 0

由上述试验将得到爆炸态和退火态两种状态的金相样品坯料。其中, 退火态又分为保温 0. 5 h 和 1. 0 h 两组。并且这两组样品中还分为钛侧飞线尚未和已经发展成裂纹的两种结果。

将上述样品坯料按照爆炸焊接金相样品的制作程序和方法制成金相样品, 然后在金相显微镜下观察该复合板在不同状态下的显微组织、特别是飞线组织的变化情况。

2 实验结果与分析

2.1 爆炸态结合区和飞线的组织形态

图 1 为爆炸态下该复合板结合区的微观组织。其中, 图 1(a) 和图 1(b) 的样品取自复合板的前半部, 图 1(c) 和图 1(d) 取自前端。由图 1(a) 可见, 其结合界面为波状。波形界面钢侧的金属晶粒沿波形发生了拉伸式和纤维状的塑性变形。在高倍放大的

① [收稿日期] 2000- 09- 18; [修订日期] 2000- 12- 20 [作者简介] 郑远谋(1942-), 男, 高级工程师。

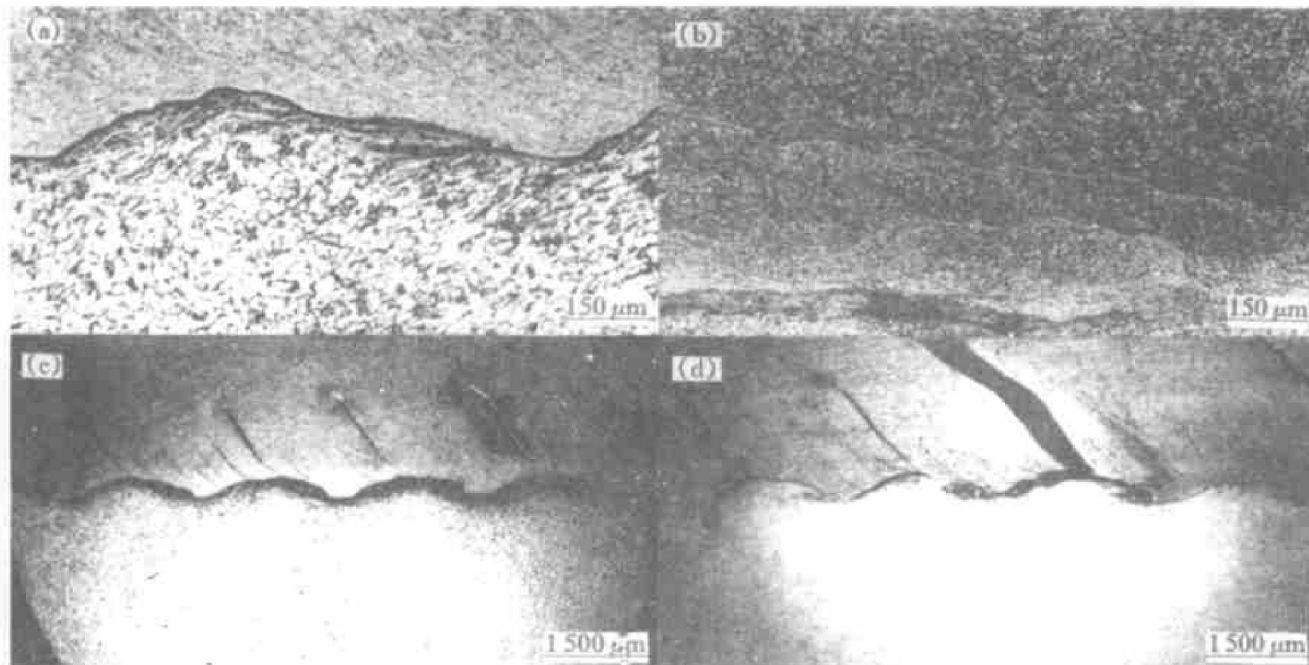


图 1 爆炸态钛-钢复合板结合区钛侧的飞线组织

Fig. 1 Microstructures of fly line of titanium-steel composite sheet on side of titanium in bonding zone of explosive welding

(a), (c), (d) —Direction parallel to explosion; (b) —Direction vertical to explosion

情况下,可观察到这种塑性变形有如下规律:离界面越近,塑性变形程度越严重;随着与界面距离的增加和深入钢基体的内部,那种变形的程度减弱;当离开波形区后,便逐渐呈现钢的原始组织。

在钛侧,则不见类似钢侧的晶粒拉伸式和纤维状塑性变形的组织形态,而是从结合界面向钛侧“飞”出许多纤细的线条状组织——“飞线”(绝热剪切线)。这种飞线与界面的交角近似于 45° ,且呈弧形,其向上飞出的方向与爆轰波传播的方向相反。

图 1(b) 为垂直爆轰方向上复合板结合区和飞线的形貌。其钢侧的组织形态与图 1(a) 相同,而钛侧的飞线则有所不同:飞线的位置和方向几乎与界面平行。

图 1(c) 和图 1(d) 为低倍下该复合板结合区和飞线的形态。此时,不仅界面的波形和钛侧飞线清晰可见,而且可以清楚地观察到许多已发展成裂纹的飞线。由此不难推论,这种飞线就是一种裂纹源——在更大的爆炸载荷下飞线就开裂了。实际上,这两图对应样品的位置(前端)处于边界效应作用区。此时作用在这个位置上的爆炸载荷比复合板的前半部和其他地方大得多。飞线聚集区又称绝热剪切带,其内飞线的长度、宽度和密度与工艺参数有关^[2~4]。

2.2 退火态结合区和飞线的组织形态

金相观察发现,保温 0.5 h 后该复合板结合区和尚未裂开的飞线的组织形态一直到 550 °C 时基层钢的变化下仍不大。600 °C 下,钢侧发生再结晶和晶粒长大,温度越高晶粒越大,700 °C 时最明显。而在钛侧,350 °C 下基体的组织与原始态(图 1(a)) 相比就发生了变化;450 °C 时飞线及其附近的基体便开始了再结晶;此后直到 650 °C 下再结晶过程继续进行;700 °C 时不仅钛的晶粒长得更大了,而且其中的飞线组织完全消失。

图 2 为包含尚未和已经开裂的飞线的该复合板在不同工艺上退火的情况。由图 2 可见,在直到 700 °C 的温度下,钢侧的组织还没有发生明显的变化。而钛侧,350 °C 时的组织与原始态差不多;450 °C 下,钛基体和飞线内均开始了再结晶,飞线内的更明显。它们的再结晶过程直到 700 °C 还在进行。700 °C 时,那种未裂开的飞线完全消失了,但已经裂开的飞线依然存在。由此可以得出结论,飞线是一种塑性变形线。它们就象钢侧纤维状塑性变形流线在一定的温度下退火后会自行消失一样。但是高温下的退火不能使已经发展成裂纹的飞线愈合(图 2(f))。

由 500 °C, 1 h 退火后钛-钢复合板结合区的形貌可见,随着保温时间延长,使钛侧飞线消失的温度降低了,保温 0.5 h,飞线消失的温度为 650~700 °C;而保温 1 h 时,500 °C 就够了。这种规律与

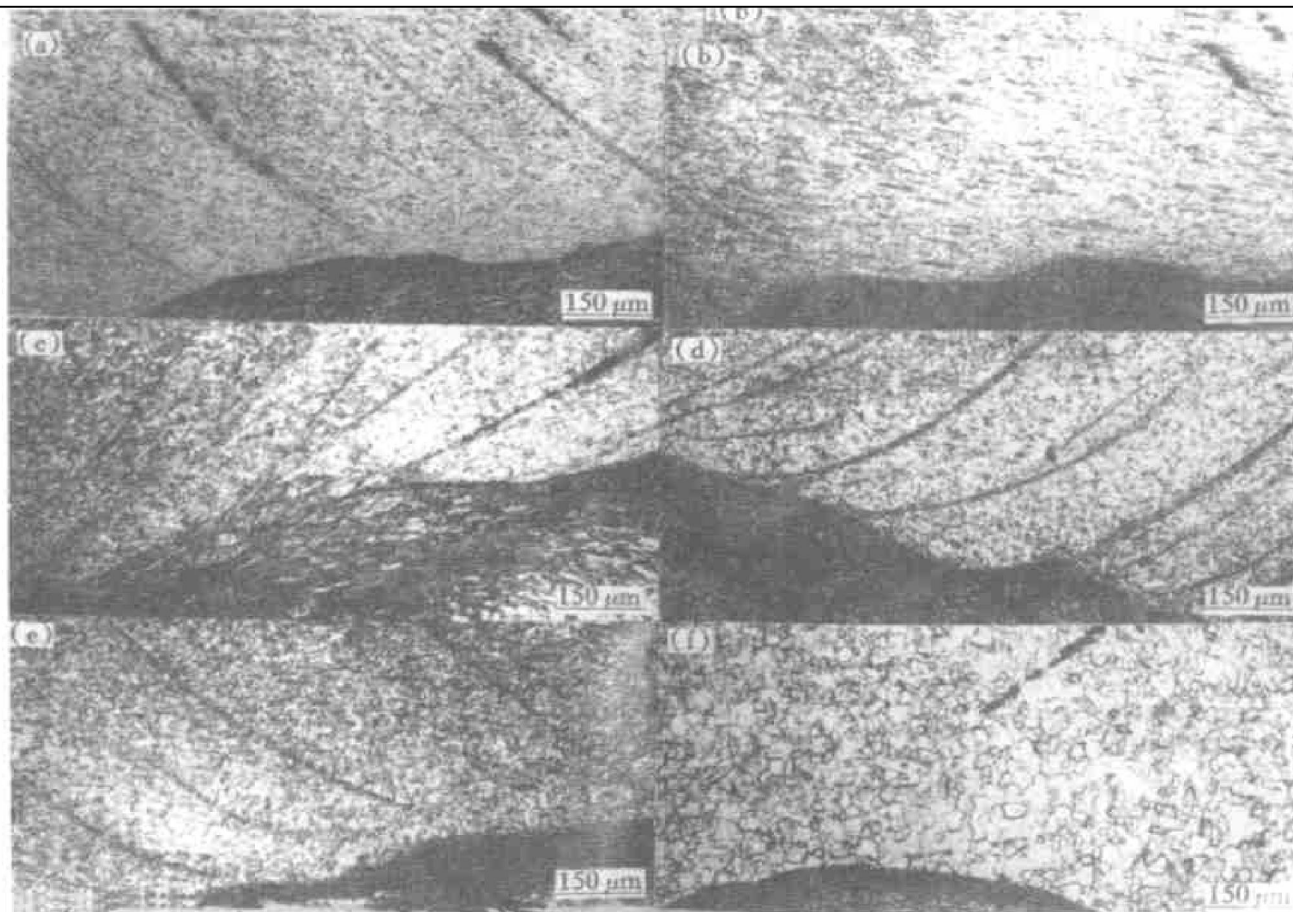


图 2 不同温度退火后钛-钢复合板结合区钛侧已发展成裂纹的飞线组织形貌

Fig. 2 Microstructures of fly lines developed into cracks on Ti side of titanium-steel composite sheet bonding zone after annealed at different temperatures (kept for 0.5 h)

(a) $-350\text{ }^{\circ}\text{C}$; (b) $-450\text{ }^{\circ}\text{C}$; (c) $-550\text{ }^{\circ}\text{C}$; (d) $-600\text{ }^{\circ}\text{C}$; (e) $-650\text{ }^{\circ}\text{C}$; (f) $-700\text{ }^{\circ}\text{C}$

其他金属变形组织在退火过程中的行为一致。

3 讨论

3.1 飞线是一种塑性变形线和裂纹源

由上述试验结果和分析可见,对于某些爆炸复合材料,如钛-钢复合板,其中钛侧飞线的出现很难避免。但是,这种飞线能够在一定的热处理工艺下消失。例如,经 $700\text{ }^{\circ}\text{C}$, 0.5 h 或 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$, 1 h 退火后钛中的飞线就消失了。由此能够证明,此类飞线就是一种塑性变形线。试验还表明,钛中的飞线在更强的爆炸载荷下会发展成裂纹,这种裂纹不会因退火而消失。因此不难看出,飞线就是一种裂纹源。

文献[5]指出,金属间的爆炸焊接主要依靠界面金属在波形成中发生拉伸式和纤维状的塑性变形,由此塑性变形造成界面金属适量熔化和原子间的相互扩散而形成。那种塑性变形是爆炸焊接过程中能量转换和金属间实现冶金结合的前提及基础。也就是说,没有爆炸复合材料结合区金属的塑性变形,也就没有金属间的爆炸焊接。

爆炸复合材料结合界面两侧金属的纤维状塑性

变形能够从不锈钢-钢、铜-钢和铝-钢等爆炸焊接双金属的结合区内一目了然。然而,对于钛-钢爆炸复合板来说(见图 1(a)),在其结合区内只见到钢侧金属纤维状的塑性变形组织,在钛侧出现的则是“飞线”。而此时钛和钢仍牢牢地结合在一起。由此也能够推断,在爆炸焊接情况下出现的这种飞线就是一种塑性变形线,或者说是一种特殊形式的塑性变形。借助这种变形也能进行能量的转换和造成金属间的结合。

3.2 飞线可能是一种特殊的塑性变形机制

在爆炸焊接过程中,结合区金属处在高压、高速和瞬时(10^{-6} s 数量级)的冲击载荷作用下。可以推测,象钛这种低冲击韧性的金属在接触界面及其附近主要以飞线的形式进行塑性变形。当载荷更强时,其中许多还会裂开。对于冲击韧性更小的金属材料来说,例如钼及其合金(它们常温下 $a_k < 10\text{ J/cm}^2$),在爆炸载荷作用下只有开裂和脆断^[6]。

因此,可以推测,飞线是金属材料、特别是 a_k 值较小的金属材料在爆炸载荷下的一种特殊的塑性变形的机制。

对此推测, 文献[7]有类似的观点: 飞线(绝热剪切线)“可以认为是位错运动和孪生变形不能协调由爆炸复合产生的大应变, 材料达到失稳状态时的一种变形机制。”文献[8]也认为: “绝热剪切线是变形材料在高应变率下发生的变形和破坏的机制, 是引起材料破坏的强烈的局部塑性应变表面。”于是, 根据本试验能够获得这样一种看法: 在常规载荷(包括常规冲击下载荷)下, 金属材料塑性变形的机制为滑移和双晶, 而在爆炸载荷下可能主要就是本文叙述的飞线, 即绝热剪切线了。这个观点不仅适用于 a_k 值较小的金属材料(如钛及其合金), 而且适用于 a_k 值较大的金属材料(如 A₃ 钢和 1Cr18Ni9Ti 不锈钢)。因为后者在更强和特强的爆炸载荷下也会发生飞线状的塑性变形^[9~11]。外加载荷的强度和特性不同, 金属材料塑性变形的机制无疑会发生某种变化。“量变”必然引起“质变”。本试验和本文所引用的有关文献中的所有工作, 为这个“质变”的深入研究和讨论提出了问题及指明了方向。

[REFERENCES]

- [1] ZHENG Yuan-mou(郑远谋), HUANG Rong-guang(黄荣光), CHEN Shi-hong(陈世红). 爆炸焊接条件下金属中的一种特殊的塑性变形方式[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals (中国有色金属学报), 1998, 8(Suppl. 1): 239-243.
- [2] LI Guo-hao(李国豪). Chinese Mechanics Society(中国

力学学会). Paper Collection of 4th the Whole Country Explosive Process Research Conference(第四届全国爆炸加工学术会议论文集)[C]. Beijing: Mechanics Institute, Chinese Academy of Science, 1982.

- [3] ZHANG Deng-xia(张登霞). Chinese Mechanics Society(中国力学学会). Paper Collection of 4th the Whole Country Explosive Process Research Conference(第四届全国爆炸加工学术会议论文集)[C]. Beijing: Mechanics Institute, Chinese Academy of Science, 1982.
- [4] DUAN Wen-shen(段文森). Rare Metals Materials and Engineering(稀有金属材料与工程), 1990, 19(3): 63-69.
- [5] ZHENG Yuan-mou(郑远谋). Journal of Guangdong Nonferrous Metals(广东有色金属学报), 1993, 3(2): 133-138.
- [6] ZHENG Yuan-mou(郑远谋). Journal of Natural Science of Jilin University(吉林大学自然科学学报), 1989, (3): 59-63.
- [7] YANG Yang(杨扬). PhD dissertation. Changsha: Central South University of Technology, 1994. 45.
- [8] ZHANG Zhen-kui(张振逵), CHEN Huo-jing(陈火金). Chinese Mechanics Society(中国力学学会). Paper Collection of 4th the Whole Country Explosive Process Research Conference(第四届全国爆炸加工学术会议论文集)[C]. Beijing: Mechanics Institute, Chinese Academy of Science, 1982.
- [9] ZHENG Yuan-mou(郑远谋). Research on Iron and Steel(钢铁研究), 1999, (1): 25-29, 59.
- [10] ZHENG Yuan-mou(郑远谋). Journal of Iron and Steel Research, International(钢铁研究学报, 国际版), 1999, 6(2): 39-43.

Effect of annealing on fly line structure and properties of titanium-steel explosive composite sheet

ZHENG Yuan-mou

(New Technology Application Research Institute of Heshan City,
Heshan 529721, P. R. China)

[Abstract] The effect of annealing on fly line structure and properties in titanium-steel explosive composite sheet was investigated. The results show that the fly line will disappear after annealing, which demonstrates that the fly line is a kind of plastic deformation structure and crack source. This kind of fly line may also be a sort of new deformation form at explosive load in metal.

[Key words] explosive welding; titanium-steel composite sheet; fly line (adiabatic shear line); annealing

(编辑 黄劲松)