



钛合金应力波铆接中绝热剪切的显微分析

卢维娴 陆在庆

(1984年2月7日收到)

对钛合金在应力波铆接变形后的显微组织,用光学和电子显微镜进行了观察研究。发现钛合金铆钉在应力波铆接过程中,主要是以绝热剪切变形的方式实现冷加工塑性变形的。分析表明,高应变率对这一过程起决定性作用。观察到,如有裂纹,通常由试样表面沿绝热剪切带向内部扩展,从而导致绝热剪切破坏。

一、引言

钛及钛合金由于具有优良的综合力学性能和耐蚀性能,现已成为航空、航天等工业的重要结构材料。但其冷加工塑性变形工艺不易掌握,特别是难以用常规的铆接方法和工具进行冷铆。为此,发展了应力波铆接新工艺^[1]。这是利用应力波原理使铆钉在高应变率下发生瞬态塑性变形的一种新技术。铆接过程的应变率高达 $10^3 s^{-1}$ 量级,比常规材料试验中的应变率高五、六个量级。

对于铆接用的国产 β 型钛合金TB-2,在高达 $3 \times 10^3 s^{-1}$ 应变率下的动态力学性能试验研究表明^[2],TB-2是一种对应变率高度敏感的弹-粘塑性材料,动态流动应力 σ_0 可比准静态流动应力 σ ,增高约 $2000 \sim 4000 kg/cm^2$ 。在这样高的应变率下,变形过程是一个同时包含应变硬化和热软化的热-力学耦合过程,但为了更深入地掌握钛合金应力波铆接的基本规律,除这些宏观力学特性外,还应同时研究其显微组织的变化特征。然而有关 β 型钛合金的或针对应力波铆接时高速变形过程的有关微观研究,不论在国内还是在外国,至今尚未见到有关报导。

本文对国产钛合金TB-2经应力波铆接后的显微组织,用光学显微镜和电子显微镜技术进行了研究。

二、试验方法

试验用铆钉是由国产 β 型钛合金TB-2棒材经冷拔加工制成。交验的化学成份为含Al: 2.76~2.99%, Cr: 8.02~8.55%, Mo: 4.8~5.4%, V: 5.26~5.28%,符合我国YB 766-70规定。铆钉直径为4mm。

铆钉在试验性应力波铆接装置上进行高应变率下的轴向塑性变形。该装置及铆接工艺细节将由另文报导。铆钉头部的平均轴向应变 ε 按下式计算:

$$\varepsilon = (h_0 - h) / h_0$$

式中 h_0 —铆接前铆钉头部的初始高度, h —铆钉头部微粗后的高度。试验中, 按所施加的应力脉冲的强弱不同, ε 变化在 0.30~0.60 范围内。再根据应力脉冲的历时 ($10^2 \mu s$ 量级), 可估算试验中的平均应变率 $\dot{\varepsilon}$ 约为 $(2 \sim 3) \times 10^3 s^{-1}$ 。

对铆接变形后的铆钉头部, 逐个进行了金相显微组织观察。对于有代表性的试样, 则进一步作扫描电镜和透射电镜的观察和分析, 作为对比, 也观察了试样在准静态压缩试验后的金相组织。准静态压缩试验的应变率控制为 $\dot{\varepsilon} = 2 \times 10^{-4} s^{-1}$ 。

三、试验结果与讨论

1. 微观组织上的主要特征

TB-2 钛合金铆钉在铆接变形前的金相组织如图 1 所示, 为单相的 β 相组织。

经应力波铆接变形后, 所有试件毫无例外地都观察到局部应变集中的细带, 带宽约 $10 \sim 10^2 \mu$ 量级。根据以下几点特征, 可判定这是所谓的绝热剪切带, 即: 在接近绝热过程的高速变形条件下所形成的伴有绝热温升和相应的热软化的局部应变集中带^[1-3]。

(1) 从铆钉头部的纵剖面来看, 细带以铆钉轴线为对称轴呈 V 形分布 如图 2 所示, 表明细带是剪切变形带。这也与 Winter^[4] 在钛试样

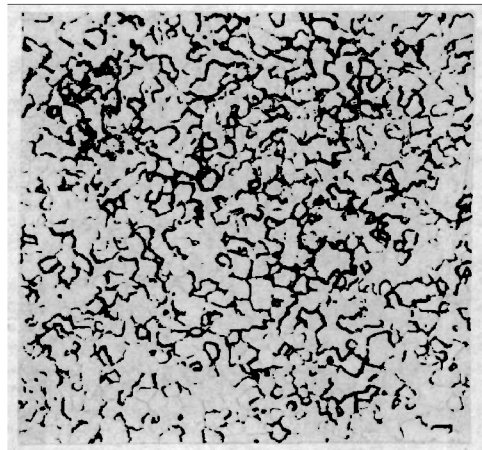
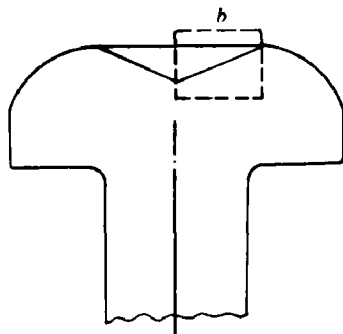


图 1 200×



(a)

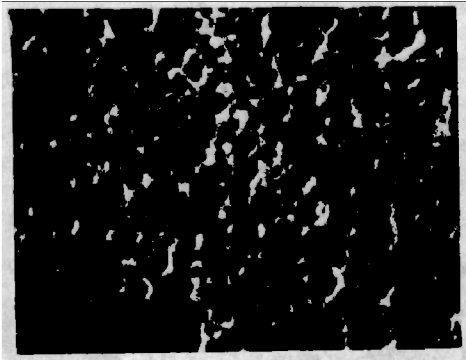
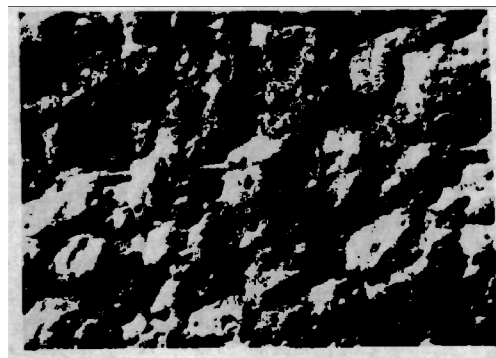


(b) 90×

图 2

受钢制平头短杆高速撞击时所观察到的V形绝热剪切带,以及 Boulger^[5]在8640钢制螺栓用高速冷镦法镦粗头部时所观察到的V形绝热剪切带极其相类似。

(2) 在高倍下观察细带区的光学金相组织时,可看到带区的变形量比非带区大得多。表明细带是局部的应变集中带。图3是图2所示同一试样(编号№9)的细带区放大到1000倍时的显微组织。可以清楚地看到,带区是一个应变高度集中的区域,而带外区域晶粒的变形量则小得多。该试样的平均应变值为30%,如果按变形集中在宽度为50 μ m的锥形迴转体的薄层内,则带内实际变形量将高达1000%量级。这正是绝热剪切带的一个主要特征。这种类型的绝热剪切带主要以形变集中为特点,晶粒沿着带的方向被拉长、碎化,但还没有发生相变或再结晶等显微组织的变化,通常将这种类型的绝热剪切带称为“形变绝热剪切带”。

图3 1000 \times 图4 2100 \times 图5 10000 \times

(3) 对于形变量更大的试样,带内形成一种细小得难以用光学金相显微镜分辨的显微组织,这与钢中所谓相变绝热剪切带相类似^[5]。用扫描电镜观察,放大倍数为2100倍时,其显微组织如图4所示。试样经复型后,用透射电镜观察,放大倍数为10000倍时,其显微组织如图5所示,它们与图3具有拉长晶粒结构的“形变绝热剪切带”不同,以等轴微晶结构为特征,表明在这样的高速大变形条件下,由塑性功转化的热量所造成的绝热温升已高得足以引起组织的转变。这正是绝热剪切带的另一个主要特征。通常将这种类型的绝热剪切带称为“转变绝热剪切带”。

(4) 作为对比,图6给出试样在经历准静态压缩变形10%之后的金相组织。可以清楚地看到滑移线相当均匀地分布在各个晶粒内,而在应力波铆接试验中,即使试件的变形量更大,在绝热剪切带外部的晶粒内,也见不到这类滑移线。

根据以上的实验观察和分析,显然可知,钛合金TB-2在应力波铆接下的高速变形,与

准静态压缩时主要以均匀滑移方式实现塑性变形不同, 主要是以绝热剪切的变形方式实现塑性变形。这是钛合金应力波铆接新技术得以实现的微观机理上的基础。

2. 影响钛合金绝热剪切变形的主要因素

既然钛合金的应力波铆接是以绝热剪切变形形式实现的, 为了更好地掌握应力波铆接技术, 就应该分析一下哪些因素是影响钛合金绝热剪切变形发展的。当考虑到钛合金流动应力的应变率依赖性和温度依赖性时, 流动应力 σ 应是应变 ε 、应变率 $\dot{\varepsilon}$ 和温度 T 的函数^[4,5], 即 $\sigma = \sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T)$, 其全微分为:

$$d\sigma = \frac{\partial\sigma}{\partial\varepsilon}d\varepsilon + \frac{\partial\sigma}{\partial\dot{\varepsilon}}d\dot{\varepsilon} + \frac{\partial\sigma}{\partial T}dT$$

其中分别表征材料应变硬化特性的 $\partial\sigma/\partial\varepsilon$ 和应变率硬化特性的 $\partial\sigma/\partial\dot{\varepsilon}$ 一般大于零; 而表征材料“热软化”特性的 $\partial\sigma/\partial T$ 一般小于零。Zener 和 Hollomon^[7] 最先指出, 当绝热温升引起的热软化效应足以抵消应变硬化效应时, 将在钢中引起绝热剪切带, 或即所谓“热塑失稳”; 并指出绝热温升 dT 可根据塑性功的绝大部分转化为热量的假定来近似地估算, 即:

$$\Delta T \sim \frac{1}{\rho C_v} \int \sigma d\varepsilon'$$

式中 ρ 为材料密度, C_v 为定容比热, J 为热功当量, 而积分 $\int \sigma d\varepsilon'$ 代表塑性功。对于钛合金来说 $\rho (= 4.5 \text{ g/cm}^3)$ 和 $C_v (= 0.126 \text{ cal/g} \cdot ^\circ\text{C})$ 的乘积比较低, 而 $\partial\sigma/\partial\varepsilon$ 值比较小。由以上各式可知, 这些都是有利于绝热剪切带的形成和发展的。但是否以绝热剪切的方式发生塑性变形, 关键还在于是否有足够高的应变率和高塑性功。因为, 只有当应变率足够高时, 变形过程才接近于绝热过程, 同时, 由于 TB-2 的流动应力随应变率明显增大^[2], 从而对给定的应变值, 塑性功也随应变率明显增大, 所以也只有当应变率足够高时, 才会有足够高的塑性功和对应地有足够高的绝热温升。当然, 在具有足够高的应变率的同时, 也必须同时具有足够大的塑性变形。由此可以理解为什么以高应变率为特征的应力波铆接工艺能够实现钛合金的冷铆, 而常规铆接法则难以实现合格的冷铆。

3. 绝热剪切破坏

试验中还观察到, 绝热剪切变形发展到一定程度后, 会导致绝热剪切破坏。对有裂纹的试样进行了金相观察, 发现裂纹均沿绝热剪切带扩展。裂纹处及其周围的显微组织如图 7 所示。同时用扫描电镜对裂纹进行了观察, 可看到在裂纹尖端的前方有细小的裂纹和空洞, 如图 8 所示。

值得注意的是, 所观察到的裂纹都是由试样表面沿着绝热剪切带向内部扩展的, 因此铆钉的表面质量和加工工具的表面光洁度等看来会对裂纹的形成有一定的影响, 今后应予进一步研究。



图 8 440 ×

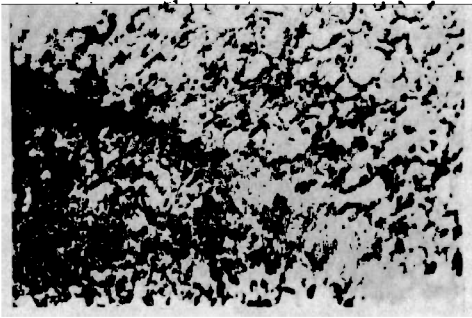


图7 200

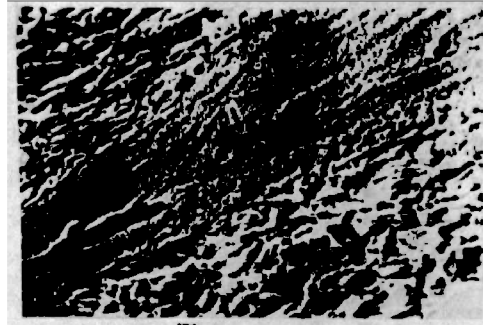


图8 700

四、结 论

1. 钛合金 TB-2 的应力波铆接是以绝热剪切变形的的方式实现冷加工塑性变形的。这是区别于常规铆接法的主要特点,也是应力波铆接法得以成功的微观组织上的基础。

2. 如何有利于钛合金在应力波铆接中的绝热剪切变形的发展,同时又不致于发展到绝热剪切破坏,是应力波铆接工艺研究中的关键问题,应从材质、表面质量、加工工具以及直接影响铆钉应变率和变形量的应力波波形的控制等各方面进行综合分析。

本文虽然是以 β 型钛合金的应力波铆接新技术为中心展开讨论的,但上述研究对于钛合金在涉及爆炸和冲击等具有高应变率特点的各种工程中的应用研究,也提供了有意义的结果。对于钛合金在高应变率下的绝热剪切变形的基础性研究,也有一定参考价值。

参 考 文 献

- (1) Leftheris, B. P., *U. S. Patent 3731370* (1973).
- (2) 王礼立, 胡时胜, *爆炸与冲击*, 5(1)(1985), 9.
- (3) 王礼立, *力学与实践*, 10(1982), 9.
- (4) 寇绍全, *力学进展*, 3(1979), 52.
- (5) Boulger, H. C., *Ann. Rev. Mater. Sci.*, 9(1979), 283.
- (6) Winter, R. E., *Phil. Mag.*, 31(1975), 765.
- (7) Zener, C. and Hollomon, J. H., *J. Appl. Phys.*, 15(1944), 22.

THE MICROSCOPIC ANALYSIS OF ADIABATIC SHEAR FOR A TITANIUM-ALLOY IN THE STRESS-WAVE-RIVETING

Lu Weixian Lu Zaiqing

Abstract

Microstructures of a β -titanium alloy TB-2 (Ti-5Mo-5v-8Cr-3Al) deformed by the so-called stress-wave-riveting are observed and studied by means of me-

talloscope and electron-microscope. It is shown that the cold-worked plastic deformation of TB-2 in the process of stress-wave-riveting is achieved in the form of adiabatic shear substantially. The high strain rate plays a determinate role in this process. Cracks, if present, propagate along adiabatic shear bands from the outside surface of rivet in general, and will lead to the adiabatic shear failure.

压碴爆破方法与经济效果

张生善 徐金汉

(1982年7月7日收到)

本文主要介绍了目前露天矿山开采使用的“压碴爆破”方法。文中较系统的对碴体在爆破过程中的作用、合理碴厚的确定，爆破质量与经济效果等问题作了讨论，并与自由面爆破法作了对比。实践证明，压碴爆破法是一种行之有效，经济效果显著的爆破技术。

七十年代初期，我国一些露天矿山开始采用了“压碴爆破”技术，给矿山生产带来较大的效益。经多年的生产实践证明，“压碴爆破”这一新技术具有科学性，方法简便可行，经济效果显著。

海州露天煤矿自推广“压碴爆破”技术以来，硬岩爆破质量得到改善，提高了设备利用率，每年可获取综合经济效果几十万元。然而，这一技术在理论和方法上，尚有不足和未被人们普遍接受。本文将这一技术的大量工业性试验作概略整理，以便交流并使其进一步推广应用。

一、压碴爆破方法

压碴爆破技术是在原有“自由面”齐发爆破基础上发展而来的，因此，施工方法基本与“自由面”爆破方法相类似。不同的是按设计预留了“碴体”，采用继爆管进行排间毫秒爆破，并相应地调整了孔网参数。

所谓“碴体”即是将上一炮的爆堆留下一部分，作为下次炮控制爆破应力发展的约束体，以此改变原“自由面”爆破过程中应力在岩体内的作用条件。压碴爆破条件下爆堆规格与采掘关系如图1所示。预留的“碴体”顶部的厚度一般为4~6米。

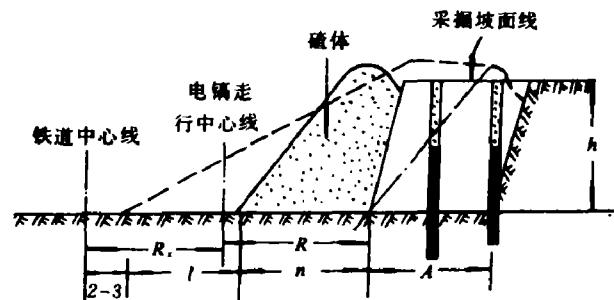


图1 压碴爆破条件下爆堆规格与采掘关系图