钛合金冲击性能与动态压缩性能间的定量关系

崔 丹 张振刚 吴国清 黄 正

(北京航空航天大学 材料科学与工程学院，北京 100083)

摘 要：为认识钛合金的冲击性能与冷镦成品率的关系，运用组织定量统计分析的方法研究了 Ti-3Al-5Mo-4.5V 钛合金显微组织参数对冲击性能的影响规律，结合动态压缩后的剪切带宽度变化规律，探讨了裂纹形成功、裂纹扩展功以及冲击功与剪切带宽度之间的关系.结果表明：随着退火温度的上升，α 片长宽比先增加后减小，裂纹形成功也是先上升后下降，而裂纹扩展功却是先减小后增加，冲击总功持续上升；冲击功指标与材料的动态压缩性能未发现必然联系，裂纹形成功与动态压缩后的剪切带宽度成反比例关系，而裂纹扩展功与剪切带宽度线性正相关.

关 键 词：钛合金；统计；显微组织；冲击性能；剪切带

中图分类号：TG 146.23

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2007)06-0723-04

Quantitative relationship between impact property and dynamic compressive performance of Ti alloy

Cui Dan Zhang Zhengang Wu Guoqing Huang Zheng

(School of Materials Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: To explore the relationship between impact property and cold upsetting finished product ratio of Ti alloy, the effect of microstructure parameter on impact property of Ti-3Al-5Mo-4.5V alloy was investigated systemically with quantitative statistical analysis method. The relationship among crack initiation energy, crack propagation energy, total impact energy and the width of shear band was analyzed combined with the variety of the width of shear band after dynamic compressive deformation. The result shows as follows. First, as anneal temperature rises, α platelet ratio(length/width) increases first and then decreases, crack initiation energy ascends first and then descends, while crack propagation energy diminishes first and then increases, and total impact energy ascends persistently. Second, there is no certain relationship between total impact energy and dynamic compressive performance; crack initiation energy is in inverse proportion to the width of shear band, while there is a positive correlation between the crack propagation energy and the width of shear band linearly.

Key words: Ti alloy; statistical; microstructure; impact property; shear band

Ti-3Al-5Mo-4.5V 钛合金属于 $\alpha+\beta$ 型高强合金，在冷轧状态下表现出良好的成型性，采用其冷镦加工的螺钉、螺栓、铆钉等紧固件具有强度高，对缺口、扭转等应力集中敏感性小，以及良好的弹性、耐蚀性和无磁性等优点，广泛应用于航空航天领域[1-3].航空航天中的恶劣环境对冷镦紧固件提出了非常苛刻的要求，如何判定丝材质量，保证冷镦加工的高成品率成为目前冷镦加工面临的关键问题之一.

目前衡量钛合金冷镦性能的指标[3]主要有抗拉强度(σ_b)、延伸率(δ)、断面收缩率(Ψ)和剪切强度(τ)等静态指标，而合金的冷镦是在较高的变形速率下完成的，材料在动态下的力学行为与其在静态和准静态下的行为存在较大的差异[4]，因

收稿日期：2006-08-31

作者简介：崔 丹(1983—)，男，湖北仙桃人，硕士生，cuidan@mse.buaa.edu.cn.

此不可以仅仅采用静态的塑性指标来评价钛合金的冷镦性能，必须对变形速率加以考虑. 为了更客观地评价钛合金的冷镦性能，开展钛合金的动态力学性能，如冲击条件下的裂纹形成功、裂纹扩展功以及冲击功与冷镦性能间的相关性研究，有着重要的意义. 目前有关钛合金的冲击方面的研究主要集中在冲击与局部变形[5]和疲劳[6]的关系以及热处理制度[7]对冲击性能的影响上. 有关钛合金的冲击性能与冷镦性能间的关系却未见诸报道. 文献[8]对钛合金显微组织与动态压缩变形行为间的关系进行了系列研究，结果表明缓解钛合金在动态压缩变形过程中的形变局部化程度，控制动态压缩后的剪切带宽度是提高该合金紧固件冷镦成品率的关键.

本文从统计学的角度出发，在定量分析显微组织参数与冲击性能之间关系的基础上，结合动态压缩后的剪切带变化规律，深入分析冲击性能与冷镦性能间的关系，找出适合冷镦的宏观力学性能参数，为钛合金冷镦性能的评价指标的选取提供理论指导.

1 实验材料及方法

本文选用俄产冷镦用 Ti-3Al-5Mo-4.5V 钛合金为实验材料，规格为 Φ8 mm 棒材，其化学成分见表 1. 棒材在 550 ℃，600 ℃，700 ℃，760 ℃，780 ℃等不同温度下退火 2 h 以及 780 ℃退火 4 h 后以 2～4 ℃/min 的冷却速率冷却到 550 ℃后空冷. 热处理后将棒材加工成 5 mm×5 mm×40 mm 的室温 V 型缺口冲击试样，加工后的试样在 JCSJ300-Ⅰ仪器化冲击试验机上进行冲击实验，摆重 3.548 kg，冲击速率为 3.8 m/s. 利用示波冲击试验法将冲击功分解成裂纹形成功和裂纹扩展功 2 个部分.

表 1 Ti-3Al-5Mo-4.5V 钛合金的化学成分(质量分数) %

Ti	Al	Mo	V	C	Fe	Si	Zr	O	N	H	其它
基体	3	5	4.5	≤0.10	≤0.25	≤0.15	≤0.30	≤0.15	≤0.05	≤0.015	≤0.30

在 XJP-3C 光学显微镜和 S-530 扫描电镜上进行显微组织形貌观察，腐蚀剂成分：1 mL HF＋3 mL HNO_3＋10 mL H_2O. Ti-3Al-5Mo-4.5V 钛合金中 α 片的显微组织参数(长度、宽度以及长宽比)的测量方法按照定量金相学中的周长法进行[9]. 动态压缩变形后试样中形变剪切带宽度的测量方法以及热处理和动态压缩方面的数据见文献[8].

2 结果与讨论

Ti-3Al-5Mo-4.5V 钛合金经过热处理工艺后的典型显微组织如图 1 所示. 可以看到合金为片状的两相组织，其中颜色较亮呈片状的为 α 相，其余颜色较暗的为 β 相. 定量统计分析表明 Ti-3Al-5Mo-4.5V 钛合金中 α 片的形态会随着退火温度和退火时间的变化发生规律性的演变. 随着退火温度的升高和退火时间的延长，合金 α 片的长度和宽度均持续上升，α 片的长宽比却是先上升后减小(见表 2).

不同退火温度下 α 片长宽比和冲击性能的关系如图 2 所示. 随着退火温度的上升，α 片长宽比先上升后减小，裂纹形成功也是先上升后下降(图 2a)，而裂纹扩展功却是先减小后上升(图 2b)，冲击总功先缓慢上升到一定值后再急剧上升(图 2c). 可以看到 α 片长宽比和裂纹形成功正相关，和裂纹扩展功反相关，而和冲击总功关系不太明确.

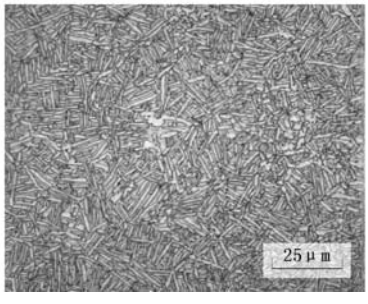
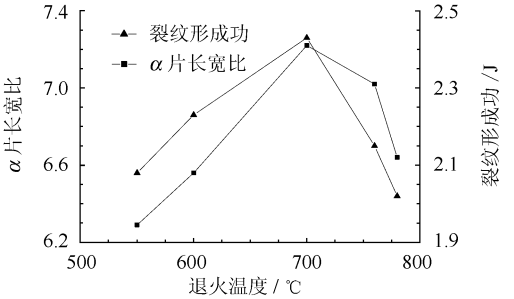


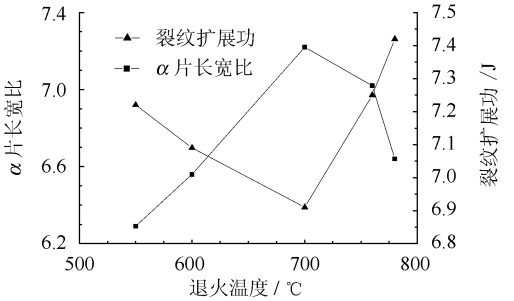
图 1 热处理工艺下的典型显微组织

表 2 不同热处理制度下的统计数据

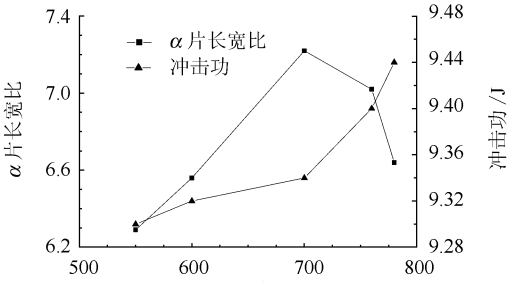
热处理	α 片长度/μm	α 片宽度/μm	α 片长宽比	剪切带宽度/μm	裂纹形成功/J	裂纹扩展功/J	冲击功/J
550 ℃×2 h	5.06	0.97	6.29	128	2.08	7.22	9.30
600 ℃×2 h	5.65	1.03	6.56	123	2.23	7.09	9.32
700 ℃×2 h	6.34	1.07	7.22	118	2.43	6.91	9.34
760 ℃×2 h	6.64	1.16	7.02	132	2.15	7.25	9.40
780 ℃×2 h	7.09	1.36	6.64	141	2.02	7.42	9.44
780 ℃×4 h	7.60	1.75	5.11	155	1.84	8.06	9.90



a　α 片长宽比和裂纹形成功的关系



b　α 片长宽比和裂纹扩展功的关系



c　α 片长宽比和冲击功的关系

图 2　α 片长宽比和冲击性能的关系

文献[8]表明动态压缩变形后试样中形变剪切带宽度随着变形前退火温度的增加呈现先减小后增加的趋势,同时随着退火温度的上升,α 片的长宽比的变化趋势与变形后试样中心形变剪切带的宽度之间也呈现明显的反相关(图 3).结合上述动态压缩后的形变剪切带宽度的变化规律可以得到冲击总功、裂纹形成功和裂纹扩展功与剪切带宽度之间的关系(图 4).随着冲击总功的上升,动态压缩后的剪切带宽度先减小后快速上升到一定值后再缓慢上升(图 4a).而随着裂纹形成功的上升剪切带宽度直线下降,两者呈现出明显的线性反相关(图 4b).动态压缩后的剪切带宽度随着裂纹扩展功的上升近乎直线上升,两者成正比例关系(图 4c).

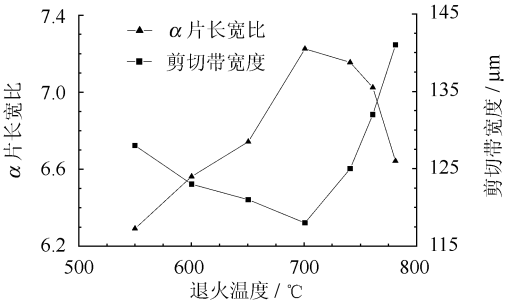
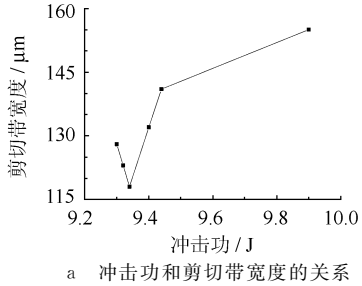
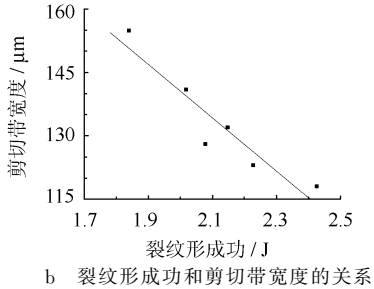


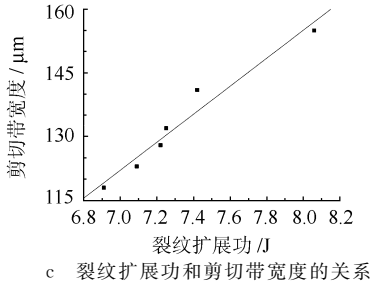
图 3　α 片长宽比和剪切带宽度的关系



a　冲击功和剪切带宽度的关系



b　裂纹形成功和剪切带宽度的关系



c　裂纹扩展功和剪切带宽度的关系

图 4　冲击性能和剪切带宽度的关系

文献[10]表明冲击功只是特定试样尺寸及缺口条件下的表征值,由于各阶段能量比例不同,韧脆程度完全不同的材料可能具有相同的冲击功,因此冲击功并不能精确反映材料的韧脆特性,本文的研究也表明冲击总功与动态压缩后的剪切带宽度之间没有必然联系(图 4a).裂纹形成功主要消耗于试样的弹性、塑性变形以及裂纹形成,裂纹扩展功主要消耗于裂纹前沿微观塑性变形及裂纹扩展,因而裂纹形成功和扩展功才是表征材料抵抗冲击载荷作用的重要力学性能指标[10].裂纹形成功与缺口根部附近的纤维区即塑性变形区尺寸相对应,其大小与冲断过程中最大正应力距缺口处的距离正相关.随着缺口附近的局部塑变程度增加,应力峰距缺口处的距离就越大,反映的裂纹形成功也越大[11].而剪切带是变形局部化的结果,其宽度是局部化程度的标志.局部化程度越

大,说明试样内部不同区域的应力和变形量的分布越不均匀,动态压缩后产生的剪切带宽度就越窄.这说明局部化程度越大,裂纹形成功就大,对应的剪切带宽度就越窄,因而动态压缩后的剪切带宽度与裂纹形成功成反比例关系(图 4b).同时,裂纹扩展功越小,表明材料抵抗裂纹扩展的能力就小,即无需消耗太多的能量,裂纹就能扩展到整个断面造成断裂.而剪切带宽度越窄,剪切带内部单个晶粒以及单位晶界所分担的变形能量就越大,动态变形时就容易产生显微孔洞和裂纹等缺陷造成材料断裂,因而裂纹扩展功和剪切带宽度也有很好的对应(图 4c).

文献[8]表明经过 700 ℃×2 h 退火处理后的试样动态压缩后的剪切带宽度最窄,同时在剪切带中发现了正在形成中的白色剪切带和显微孔洞,因此经该制度处理的试样就不适合进行冷镦处理;而经过 780 ℃×2 h 退火处理的试样对应的剪切带较宽,同时得到最佳的综合力学性能,因此能承受冷变形而不产生裂纹,非常适合进行冷镦处理.因而动态压缩后的剪切带宽度可以作为衡量钛合金冷镦性能的指标之一.随着退火温度的提高,虽然冲击功持续上升,但冲击功与动态压缩后的剪切带宽度之间没有必然联系,因而冲击功不适合用来衡量钛合金的冷镦性能.裂纹形成功和扩展功与动态压缩后的剪切带宽度成线性关系,因此有可能作为评价钛合金冷镦性能的指标,结合衡量钛合金冷镦性能的其它力学性能指标,可以得到一个更为完备的评价指标体系,为钛合金冷镦的高合格率提供保障,有效地指导工业生产.

3 结 论

1) 在一定的退火温度范围内,随着退火温度的上升,裂纹形成功先上升后减小,裂纹扩展功先减小后上升,而冲击功持续上升;同时,α 片的长宽比跟裂纹形成功正相关跟裂纹扩展功反相关,与冲击功没有必然联系;

2) 随着 α 片长宽比的下降,冲击总功与动态压缩后的剪切带宽度关系不太明确,裂纹形成功与剪切带宽度线性反相关,而裂纹扩展功与剪切带宽度成线性正相关,裂纹形成功和扩展功有可能作为衡量钛合金冷镦性能的重要指标.

参考文献 (References)

[1] 刘风雷.我国航空钛合金紧固件的发展[J]. 航空制造技术,2000(6):39-41
Liu Fenglei. Development of aeronautical titanium alloy fastener in China [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2000(6): 39-41(in Chinese)

[2] Popov N N, Ivanov A G, Morozov S A. Effect of the deformation rate on resistance of the titanium alloy VT16 to plastic deformation[J]. Problemy Prochnosti, 1986(8): 45-48

[3] Moiseev V N. High-strength titanium alloy VT16 for cold-worked fastener part production [J]. Metallovedenie i Termicheskaya Obrabotka Metallov, 2001(2): 28-32

[4] 史巨元.钢的动态力学性能及应用[M].北京:冶金工业出版社,1993:9-11
Shi Juyuan. Dynamical mechanical properties and apply of steel[M]. Beijing: Metallurgy Industry Press, 1993: 9-11 (in Chinese)

[5] Li G A, Zhen L, Lin C, et al. Deformation localization and recrystallization in TC4 alloy under impact condition[J]. Materials Science and Engineering, 2005(A395): 98-101

[6] Sekkal A C, Langlade C, Vannes A B. Tribologically transformed structure of titanium alloy(Ti6Al4V) in surface fatigue induced by repeated impact[J]. Materials Science and Engineering, 2005(A393): 140-146

[7] Mohandas T, Banerjee D, Kutumba V V Rao, et al. Microstructure and mechanical properties of friction welds of an $\alpha+\beta$ titanium alloy[J]. Materials Science and Engineering, 2000(A289): 70-82

[8] 宋昊. BT16 钛合金显微组织与动态压缩变形行为间的关系研究[D].北京:北京航空航天大学材料科学与工程学院,2006
Song Hao. Effects of microstructure variations on dynamic compressive deformation behavior of BT16 titanium alloy [D]. Beijing: School of Materials Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006(in Chinese)

[9] 秦国友. 定量金相[M]. 四川:四川科学技术出版社,1987:216-217
Qin Guoyou. Quantitative metallography[M]. Sichuan: Sichuan Science and Technology Press, 1987: 216-217(in Chinese)

[10] 肖纪美.金属的韧性与韧化[M].上海:科学技术出版社,1980:81
Xiao Jimei. Toughness and temper of metal [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1980: 81(in Chinese)

[11] 梁益龙,雷泯. 35SiMnMoV 钢多相复合组织的冲击性能[J].钢铁,1994,29(1):37-41
Liang Yilong, Lei Min. The impact property of multiphase complex structure in 35SiMnMoV steel[J]. Iron and Steel, 1994, 29(1): 37-41(in Chinese)

(责任编辑:文丽芳)