

TC17 钛合金铣削刀具磨损对残余应力影响研究^{*}

Effect of Tool Wear on Residual Stress in Milling of Titanium Alloy TC17

西北工业大学现代设计与集成制造技术教育部重点实验室 田荣鑫 史耀耀 杨振朝 梁永收 石 凯

[摘要] 为了获得高性能航空发动机用 TC17 钛合金材料铣削过程中刀具磨损对残余应力的影响规律,通过对不同刀具后刀面磨损量下铣削工件表层残余应力的测试,建立了刀具磨损对残余应力的影响关系,并对影响机理进行了分析。结果表明,硬质合金刀具低速铣削钛合金时,刀具对已加工表面的挤光效应引起的残余压应力占主导地位;不同刀具后刀面磨损量下,残余压应力沿深度方向先增大达到一个最大压应力值后,然后减小趋向于零应力;表面残余应力、最大残余压应力以及残余应力的影响深度都随刀具后刀面磨损量的增大呈增大趋势。

关键词: 残余应力 刀具磨损 TC17 钛合金 铣削 切削力

[ABSTRACT] In order to obtain the tool wear influence law on residual stress in milling titanium alloy TC17, residual stress data of finished workpiece is measured after milling experiment under different tool wear conditions. The relationship between tool wear and residual stress is established, and the influence mechanism is analyzed. Results show that residual stress caused by burnishing effect on the machined surface plays the leading role. Under different tool wear conditions, compressive residual stress increases with the depth increasing in the beginning, and then tends to zero gradually after reaching the maximum. The residual stress on machined surface, maximum compressive residual stress and influencing depth of residual stress all tend to increase with the tool wear increasing

Keywords: Residual stress Tool wear Titanium alloy TC17 Milling Cutting force

钛合金以其比强度高、耐腐蚀性好、耐高温和低温性能好等特点被广泛应用于航空航天、石油、船舶、医疗、体育及化工等领域。但是由于钛合金具有导热性差、弹性模量小、化学活性大等特点,使其切削加工性较差,刀具磨损严重^[1]。磨损后的刀具后角变成零度,使工件

与刀具的摩擦加大,导致切削力和切削温度增加,甚至产生振动,这些势必对零件已加工表面的残余应力产生影响^[2],而残余应力对零件的疲劳性能又具有重要影响^[3-5]。因此,研究钛合金切削加工过程中刀具磨损与残余应力之间的关系,对提高钛合金零件加工表面完整性以及疲劳性能具有重要意义。

Jawaid 等^[6-7]研究了硬质合金刀具车削钛合金过程的刀具磨损特性,结果表明磨粒磨损和扩散磨损是刀具磨损的主要机制,另外还发现涂层硬质合金刀具面铣钛合金过程的刀具磨损机制是粘结、扩散、塑性变形和热裂纹。Nouar 等^[8]分别对无涂层和带多层 CVD 涂层硬质合金刀具端铣钛合金过程中刀具的磨损性能进行了研究,结果表明刀具磨损的主要机制为粘结和扩散磨损。Wang 等^[9]研究了 CBN 刀具高速铣削钛合金过程的刀具磨损特性,结果表明磨粒和扩散磨损是刀具磨损的主要机制。Deng 等^[10]研究了硬质合金刀具干车削钛合金过程的刀具的扩散磨损,结果表明钛合金中的元素扩散到刀具中加速了刀具的磨损。陆丰玮等^[11]对车削 TC4 钛合金的刀具磨损进行了研究,结果表明刀具的磨损形式主要是粘结与扩散磨损、氧化磨损以及剥落与崩刃。李友生等^[12]研究了高速车削钛合金过程的刀具磨损机理,结果表明刀具的磨损机理主要为粘结磨损、氧化磨损和扩散磨损。王晓琴等^[13]研究了硬质合金刀具铣削钛合金的刀具磨损,结果表明刀具的磨损机制为粘结和扩散。裴浩等^[14]发现氮气介质下铣削钛合金时的刀具磨损形式主要为:机械磨损、粘结磨损、氧化磨损和扩散磨损。

从文献来看,国内外目前的研究主要集中在对钛合金切削加工中的刀具磨损形式及磨损机制上,而关于刀具磨损对残余应力的影响研究极少。本研究对硬质合金刀具铣削钛合金过程中,刀具后刀面磨损对已加工表面残余应力的影响进行了研究,为 TC17 钛合金铣削过程中切削参数优选以及残余应力控制提供了试验依据。

1 试验条件及测试方法

1.1 试件材料

试件材料为 TC17 钛合金,其组成为 Ti-5Al-2Sn-

^{*} 国家科技重大专项项目(2009ZX04014-053),国家自然科学基金项目(50975237)资助。

2Zr-4Mo-4Cr, 属于一种富 β 稳定元素的 $\alpha + \beta$ 钛合金。化学成分组成如表 1 所示。该合金强度高、断裂韧性好、淬透性高、锻造温度范围宽, 主要用于制造高性能发动机风扇、压气机盘和大截面锻件。

表1 TC17钛合金的化学成分 w/%

Al	Sn	Zr	Mo	Cr	C
5.23	1.97	1.80	4.06	4.04	0.008
H	N	O	Fe	Ti	
0.01	0.019	0.14	0.037	余量	

试件形状为楔形块, 高 65mm, 宽 63mm, 夹角 30° , 试件在试验前首先全部进行尺寸标准化处理, 然后进行时效处理去除残余应力。在试验过程中, 将试件加工面等分为 5 个区域, 如图 1 所示 A, B, C, D, E 区域, 分区之间有 2mm 深度隔离带, 其中 n 为主轴转速, v_f 为刀具切削进给速度, σ_x 为切削进给方向残余应力, σ_y 为垂直切削进给方向残余应力。

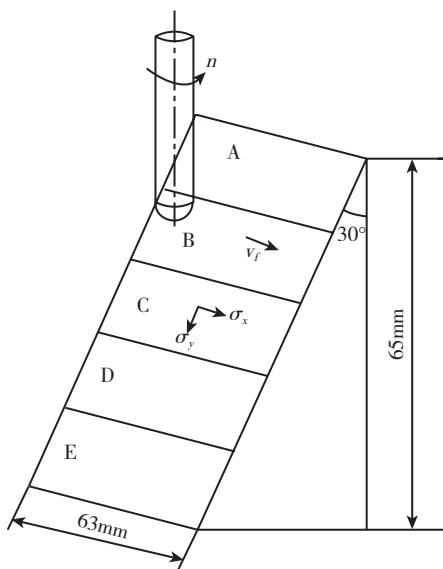


图1 试验方案
Fig.1 Experiment scheme

1.2 试验条件

所有试验都在 JOHNFORD VMC-850 型三坐标立式数控机床上进行, 刀具为 $\phi 8\text{mm}$ K55 整体硬质合金 4 齿球头铣刀, 前角 10° , 后角 12° , 螺旋角 35° 。铣削方式为顺铣, 采用乳化液冷却, 试验现场如图 2 所示。切削参数选择如下: 主轴转速 $n=3000\text{r}/\text{min}$, 每齿进给量 $f_z=0.04\text{mm}/z$, 切削深度 $a_p=0.5\text{mm}$; 切削宽度 $a_e=0.25\text{mm}$ 。

1.3 测试设备

切削力测量系统由 Kistler 9255B 三向动态压电式测力仪(图 2 中测力平台)、Kistler 5017A 电荷放大器

和 DEWE3010 数据采集与处理系统组成见图 3。切削力的大小通过连续 50 个峰值取平均值所得, 切削力的方向如图 2 所示。

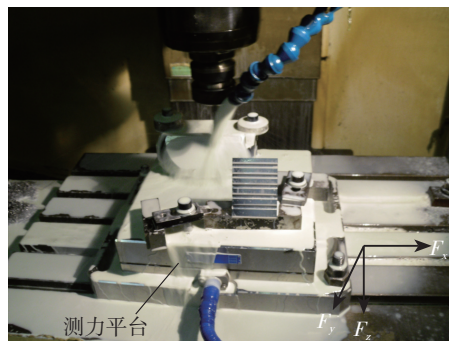


图2 加工试验现场
Fig.2 Experiment site

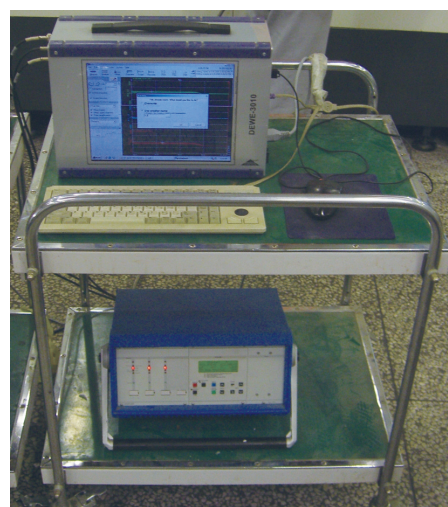


图3 切削力测试系统
Fig.3 Measurement system of cutting force

残余应力的测试采用日本理学 XStress3000 X 射线应力分析仪, 测量方法采用同倾角固定 $\Psi 0$ 法; 测试条件为 Cu 靶 $k\alpha$ 、电压 40kV、电流 40mA。残余应力的测试点分布在楔形块表面上 A, B, C, D, E 5 个区内。测试点的位置均位于每个区的中心位置。每个位置分别测试切削进给方向残余应力 σ_x 与垂直切削进给方向残余应力 σ_y 。在每个测试位置采用电化学腐蚀剥层, 测量每个位置沿深度方向残余应力的分布, 由于精加工残余应力影响层浅, 整个深度层方向测量不超过 $200\mu\text{m}$, 腐蚀深度控制在 $(50 \pm 5)\mu\text{m}$, 测量点共为 20 个。

刀具后刀面磨损量 VB 采用读数显微镜获得, 刀具磨损的照片采用三维体式显微镜获得。

2 刀具磨损方案及测试结果

刀具的磨损形态主要有前刀面磨损、后刀面磨损和

边界磨损。国际标准 ISO 统一规定以后刀面上测定的磨损带宽度 VB 作为刀具磨钝标准。由于钛合金的弹性模量小,回弹量大,在较低的切削速度下切削钛合金时,已加工表面与后刀面之间的摩擦比较严重,刀具发生的主要是后刀面磨损,因此本试验主要测量刀具后刀面的最大磨损宽度 VB_{max} 。

本试验采用 2 个试块,包括如图 4 所示的 GH4169 高温合金试块 A 和 TC17 钛合金试块 B。试块 A 和试块 B 上的加工面倾斜角度一致,以保证加工试块 A 时刀具后刀面的磨损区域刚好是加工试块 B 的主要切削区域。采用预切 GH4169 主要是为了加速刀具磨损,以

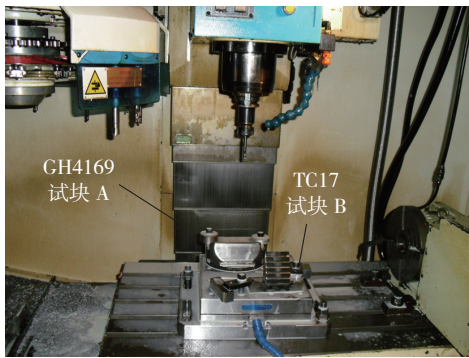


图4 刀具磨损方案
Fig.4 Scheme of tool wear

提高刀具的磨损速度,在一定时间间隔后对刀具后刀面磨损量 VB_{max} 进行测试,并进行拍照,获得的刀具磨损照片如图 5 所示,当 VB_{max} 分别为 0mm、0.1mm、0.2mm、0.3mm、0.4mm 时,用其铣削 TC17 钛合金试件上相应的区域。最后分别测量加工后的 TC17 钛合金试件上 A, B, C, D, E 区的残余应力。

3 刀具磨损对残余应力影响规律的分析

切削加工完成后,即对已加工试件进行残余应力测试,测试结果如表 2 所示。从表中可以看出测量获得的所有残余应力值均为负值,即压应力。

在不同刀具后刀面磨损量 VB_{max} 条件下,沿进给方向和垂直进给方向的残余应力 σ_x 和 σ_y 随深度方向的分布规律,如图 6 所示,5 个测试区域的残余应力 σ_x 和 σ_y 随深度的变化趋势一致,都是随着深度的增加,先增大达到一个最大压应力值,随后又降低,最后逐渐趋向于零应力。2 个方向残余应力随刀具后刀面磨损量 VB_{max} 的变化趋势基本一致,表面残余压应力值和最大残余压应力都随着 VB_{max} 的增大呈现增大趋势。从曲线的趋势来看,残余应力的分布深度随 VB_{max} 增大而增加。

4 影响机理分析

在切削加工中,已加工工件表层产生残余应力的原

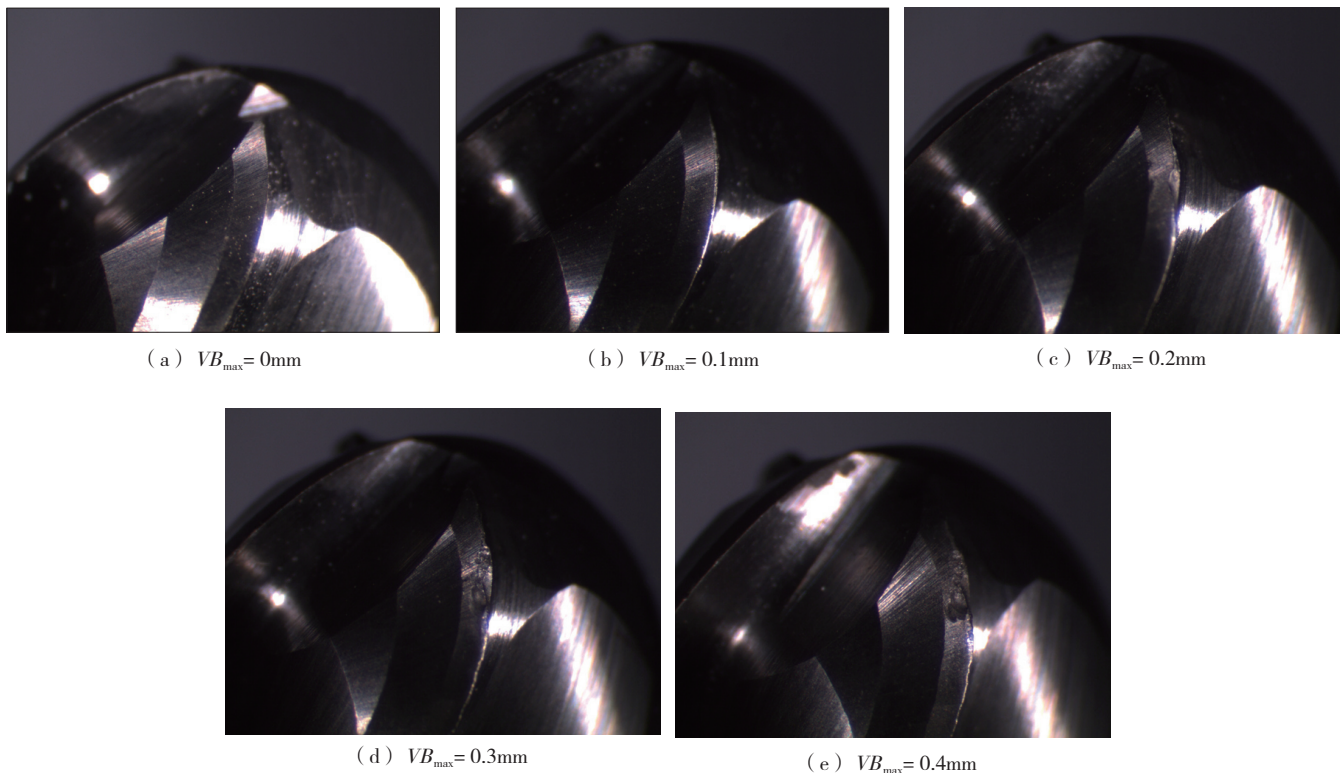


图5 不同磨损量下的刀具磨损
Fig.5 Tool wear under diferent VB_{max}

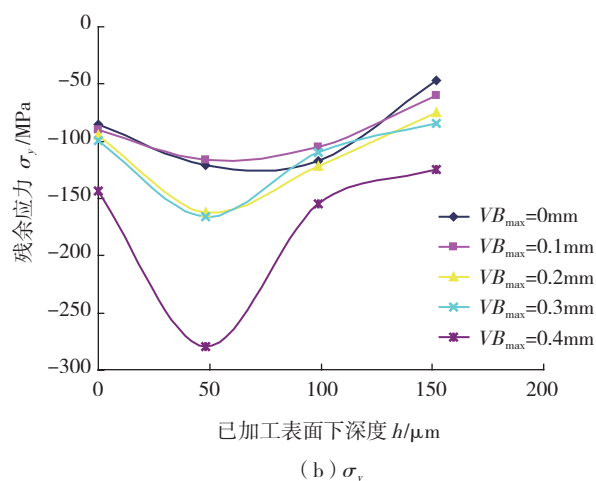
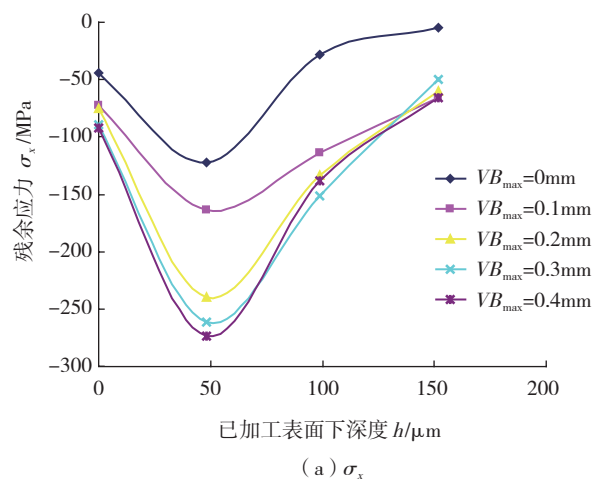
表2 残余应力测试结果

测点位置	VB/mm	距表面距离/ μm	σ_x/MPa	σ_y/MPa
A	0	0	-44	-85
		48	-122	-121
		99	-28	-117
		152	-5	-47
B	0.1	0	-72	-90
		48	-164	-116
		99	-114	-105
		152	-66	-60
C	0.2	0	-75	-95
		48	-240	-162
		99	-134	-122
		152	-60	-75
D	0.3	0	-89	-99
		48	-261	-166
		99	-151	-110
		152	-50	-84
E	0.4	0	-92	-143
		48	-274	-279
		99	-138	-155
		152	-66	-125

因主要有4点:(1)刀具接触点前方区域的塑性凸出效应;(2)刀具接触点下方区域的挤光效应;(3)热应力的影响;(4)相变。塑性凸出效应在已加工工件表层产生残余拉应力,而后刀面对加工表面的挤光效应往往在表层产生残余压应力。热应力在表层产生的残余应力取决于里层弹性变形是拉伸还是压缩,相变在表层产生的残余应力取决于表层体积是膨胀还是收缩^[2,15]。实际切削加工后表面层上的残余应力形成的原因是复杂的,是由上述4方面原因综合作用的结果。在一定条件下,其中某一种或两种原因可能起到主导作用。

低速切削钛合金时切削力较大,产生明显的挤光效应,而且当刀具处于磨损状态时,挤光效应更加明显;同时,由于工件表面温度较低,不足以使表层材料发生相变,因此,挤光效应引起的残余压应力大于塑性凸出以及热应力所引起的残余拉应力,在已加工工件表层形成的残余应力都是压应力。

铣削时,由于较大程度的塑性变形,残余应力趋向于压应力状态,但由于热对应力达到的深度比机械作用

图6 不同 VB_{\max} 下残余应力随深度分布曲线Fig.6 Residual stress distribution curves with depth under different VB_{\max}

的影响要小,故在工件最表面压应力较小。

随着刀具后刀面磨损量的不断增大,刀具与工件之间的接触面积增大,导致切削力增大,如图7所示($n=3000\text{r/min}$, $f_z=0.04\text{mm/z}$, $a_p=0.5\text{mm}$, $a_e=0.25\text{mm}$);另

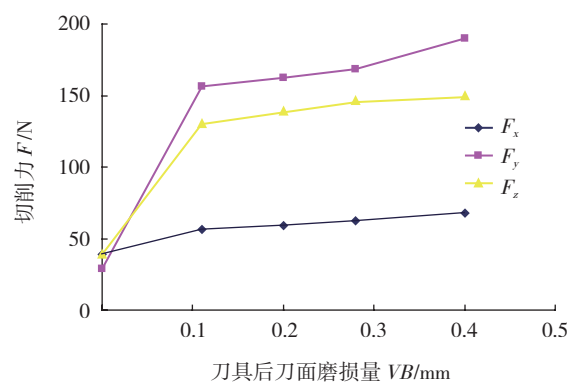


图7 刀具磨损对切削力的影响曲线

Fig.7 Influence curve of tool wear on cutting forces

一方面,刀具后刀面与工件表面摩擦加剧,切削温度升高,虽然有热影响的存在,但残余应力的主要来源还是机械方面作用;另外,铣削加工时,由于较大程度的塑性变形,热对应力达到的深度比机械作用的影响要小^[16],因此,造成的结果就是随着刀具后刀面磨损量的不断增大表面残余应力、最大残余压应力以及残余应力影响层都增大。

5 结论

通过对硬质合金刀具铣削 TC17 钛合金时,残余应力与刀具磨损之间关系的试验研究,得出以下 3 点主要结论:

(1) 低速铣削钛合金时,在已加工表层挤光效应引起的残余压应力占主导地位。

(2) 在不同刀具后刀面磨损量下,残余压应力沿深度分布的规律是随着深度的增加,先增大达到一个最大压应力值后,再逐渐减小趋向于零应力。

(3) 表面残余应力、最大残余压应力和残余应力的影响深度都随刀具后刀面磨损量的增大呈增大趋势。

参考文献

- [1] 杨振朝,张定华,姚倡锋,等. TC4 钛合金高速铣削参数对表面完整性影响研究. 西北工业大学学报,2009,27(4): 538-543.
- [2] 米谷茂. 残余应力的产生和对策(中译本). 北京: 机械工业出版社,1983.
- [3] Smith S, Melkote S N, Lara-Curzio E, et al. Effect of surface integrity of hard turned AISI 52100 steel on fatigue performance. *Materials Science and Engineering A*, 2007,459: 337-346.
- [4] Sharman A R C, Aspinwall D K, Dewes R C, et al. The effects of machined workpiece surface integrity on the fatigue life of γ -titanium aluminide. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2001,41: 1681-1685.
- [5] Javidi A, Rieger U, Eichseder W. The effect of machining on the surface integrity and fatigue life. *International Journal of Fatigue*, 2008, 30(10-11):2050-2055.
- [6] Jawaida A, Che-Haron C H, Abdullah A. Tool wear characteristics in turning of titanium alloy Ti-6246. *Journal of Materials Processing Technology*, 1999, (92-93): 329-334.
- [7] Jawaid A, Sharif S, Koksai S. Evaluation of wear mechanisms of coated carbide tools when face milling titanium alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, 2000 (99): 266-274.
- [8] Wang Z G, Rahman M, Wong Y S. Tool wear characteristics of binderless CBN tools used in high-speed milling of titanium alloys. *Wear*, 2005(258): 752-758.
- [9] Nouari M, Ginting A. Wear characteristics and performance of multi-layer CVD-coated alloyed carbide tool in dry end milling of titanium alloy. *Surface & Coatings Technology*, 2006(200): 5663-5676.
- [10] Deng J X, Li Y S, Song W L. Diffusion wear in dry cutting of Ti-6Al-4V with WC/Co carbide tools. *Wea*, 2008(265): 1776-1783.
- [11] 陆丰玮,李乐洲,朱平国,等. 车削 TC4 钛合金的刀具磨损

与切屑形态分析. 航天制造技术,2009,6(3):18-21.

- [12] 李友生,邓建新,张辉,等. 高速车削钛合金的硬质合金刀具磨损机理研究. *摩擦学学报*,2008,28(5):443-447.
- [13] 王晓琴,艾兴,赵军,等. 硬质合金刀具铣削 Ti6Al4V 时刀具磨损及切削力研究. *制造技术与机床*,2008, (2):102-105.
- [14] 裴浩,何宁,满忠雷. TC4 的铣削加工中切削力和刀具磨损研究. *航空精密制造技术*,2003,39(3): 30-33.
- [15] 唐志涛,刘战强,艾兴. 高速铣削加工铝合金表面残余应力研究. *中国机械工程*,2008,19(6):699-703.
- [16] 胡华南. 已加工表面残余应力的理论预测及控制[D]. 广州: 华南理工大学,1993.

(责编 小城)

(上接第 133 页)

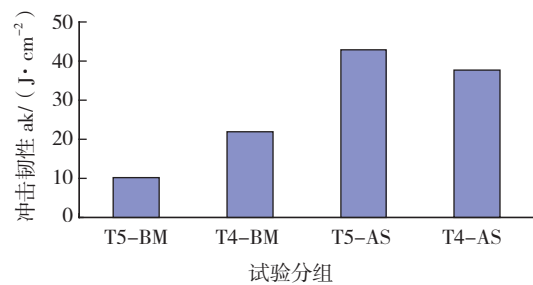


图4 7N01-T4与7N01-T5铝合金对接接头冲击韧性
Fig.4 Impact toughness of 7N01-T4 and 7N01-T5 aluminum alloy welding joint

更有利于提高焊缝冲击韧性,相对于将 T4-AS 可使接头冲击韧性进一步提高 51%。

3 结论

7N01-T4 与 7N01-T5 铝合金进行搅拌摩擦焊接时,焊接位置对于焊缝材料融合性和接头性能产生影响。

将 7N01-T5 置于前进侧,将使焊缝材料融合性提高,并使接头冲击韧性显著提高 51%。

参考文献

- [1] Kwon Y J, Shigematsu I, Saito N. Dissimilar friction stir welding between magnesium and aluminum alloys. *Materials Letters*, 2008,62: 3827-3829.
- [2] YASUI T, Tsubaki M, Fukumoto M. Butt welding between aluminum alloy and Al-based MMC by friction stirring. 6th international friction stir welding symposium canada. 10 October, 2006.
- [3] Larsson H, Karlsson L, Stoltz S. Joining of dissimilar Al-alloys by friction stir welding 2nd FSW symposium, sweden 26-28 June, 2000.
- [4] Tanaka S, Kumagai M. Joining dissimilar alloys between AA5083 and A6N01 by Friction stir welding 3rd international friction stir welding symposium. Japan, 27-28 September, 2001.

(责编 小城)