

[文章编号] 1004- 0609(2000)06- 0887- 04

塑性变形不均匀性对 Ti-15-3 冷强力旋压成形的影响^①

单德彬, 童文舟, 许沂, 吕炎

(哈尔滨工业大学 材料科学与工程学院, 哈尔滨 150001)

[摘要] 研究了塑性变形不均匀性对 Ti-15-3 合金冷强力旋压可旋性和成形质量的影响。结果表明强力旋压时由于局部加载引起金属塑性变形不均匀, 从而导致裂纹产生和内外表面晶粒尺寸的不均匀性。为避免冷强旋时产生裂纹, 第 1 道次的减薄率取 30%~ 40% 为宜; 为避免组织不均匀性, 总的减薄率要达到 60% 以上。

[关键词] 冷强力旋压; Ti-15-3; 塑性变形

[中图分类号] TG 302

[文献标识码] A

结构钛合金按退火组织可分为 α 钛合金、 α - β 钛合金和 β 钛合金 3 类。其中具有 bcc 晶格的 β 钛合金在加工、性能和潜在应用方面具有优势, 但由于生产工艺复杂和成本较高, 故 β 钛合金仅占美国市场钛总量的 1%, 独联体市场钛总量的 3%^[1~4]。近年来, 随着钛合金生产技术的发展, 先后开发出几种适合室温下进行塑性加工的高强 β 型钛合金, 其中近 β 型的 Ti-15-3(Ti-15V-3Al-3Cr-3Sn) 是最有应用前景的钛合金之一。由于可以采用冷成形方法进行加工, 并可以通过热处理方法进行强化(其强度可达 1 400~ 1 500 MPa), 使得 Ti-15-3 生产成本大为降低, 制件精度和性能大幅度提高, 从而有力地促进 Ti-15-3 在航空、航天等工业中的应用^[5~8]。然而, 目前关于 Ti-15-3 的成形工艺还处于研究阶段, 国内外仅进行了 Ti-15-3 的弯曲、简单拉伸和胀形等冷成形工艺研究, 而对复杂工艺的 Ti-15-3 冷成形研究则很少。这主要是由于 Ti-15-3 的塑性差、变形抗力大以及硬化指数小, 成形过程中坯料容易产生裂纹和组织不均匀等质量问题^[9~12]。为此, 作者以筒形件强力旋压为例研究塑性变形不均匀性对 Ti-15-3 冷成形质量的影响。

坯料表面很小的一部分, 变形区可分为旋轮与坯料的直接接触区(A 区)和塑性影响区(B, C, D 和 E 区)。A 区的变形是径向压缩、切向和轴向伸长, A 区金属在沿轴向和切向流动的同时, 由于受周围金属的限制, 使得 A 区金属在轴向和切向受压应力, 形成了三向受压的应力状态; 而 B, C, D 和 E 区的应力应变状态主要是 A 区金属的流动而引起的。

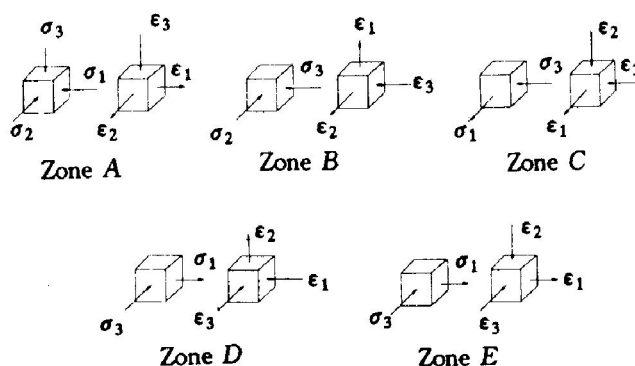
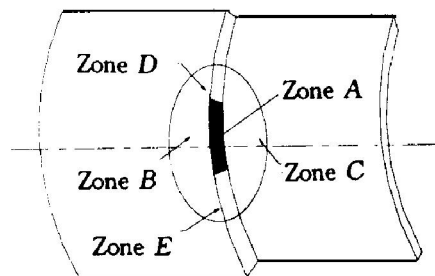


图 1 筒形件强力反旋时变形分区及应力应变简图

Fig. 1 Deformation zone and stress-strain state during cylindrical backward spinning

1 强力旋压时金属的变形规律

筒形件强力旋压成形技术是一种典型的局部加载、局部受力、局部变形的成形工艺, 但它又不同于拔长、轧制、翻边和摆辗等锻压工艺。

图 1 所示为筒形件反旋时的变形分区及应力应变简图。由图 1 可知, 强旋时金属的变形区集中在

图 1 仅描述了筒形件表面区域的应力应变分布情况, 实际上在筒形件壁厚方向上的应力应变分布也是不均匀的。这是由于在直接接触区(A 区)旋轮

① [收稿日期] 1999- 09- 20; [修订日期] 2000- 02- 15

[作者简介] 单德彬(1967-), 男, 副教授, 博士。

的径向力沿厚度方向对坯料的作用面积不断增大,其产生的压应力相应的沿厚度方向减小,这就是局部加载效应在旋压工艺中的体现。如图2所示,沿厚度方向,由外向内,作用面积从 $ABEF$ 面逐渐增大到 $CDGH$ 面。因此在厚度方向的变形存在着两种形式:当坯料原始壁厚较大和减薄率较小时,金属变形集中在与旋轮接触的外表面,而与芯轴接触的内表面变形很小,即沿厚度方向由外到内变形程度逐渐变小,外表面金属沿轴向流动使得内表面金属 (F 区) 沿轴向受附加拉应力,因此 F 区产生如图3所示的应力应变状态;而当坯料原始壁厚较小和减薄率较大时,厚度方向的局部加载效应减弱,整个壁厚方向变形趋于均匀, F 区趋于消失。

筒形件强旋中的这种局部加载效应导致了金属变形的不均匀性。金属变形集中在直接接触区周围的较小范围内,随着工件的旋转和旋轮的轴向进

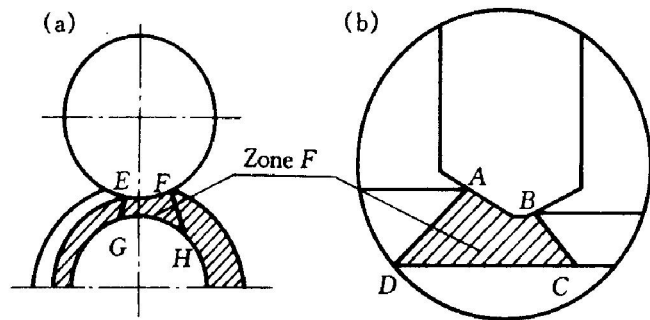


图2 筒形件强旋局部加载示意图

Fig. 2 Schematic diagram of local load during cylindrical power spinning
(a) —Circumferential section; (b) —Axial section

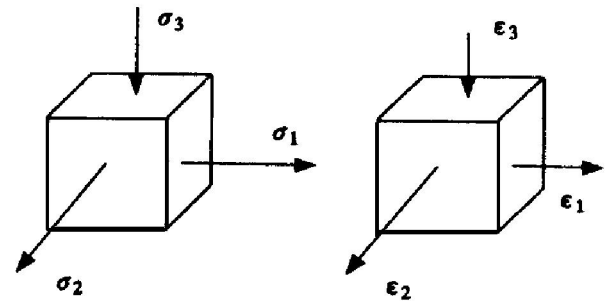


图3 F 区应力应变简图

Fig. 3 Stress-strain state in zone F

给,变形区不断地移动,不均匀变形的范围不断扩大,从而导致工件尺寸的波动和性能差异。

2 变形不均匀性对成形质量的影响

实验在三旋轮自动错距旋压机上进行。实验材料分别采用反复镦拔和挤压坯料。3个旋轮的成形角分别为 20° 、 25° 和 25° ; 错距量 $a_{12} = 3\text{ mm}$, $a_{23} = 3\text{ mm}$; 进给比为 0.4 mm/r 。共进行了3道次反旋实验。实验结果见表1。

2.1 变形不均匀对裂纹产生的影响

由表1可知,采用反复镦拔坯料,由于晶粒较粗,材料塑性较差,在附加拉应力作用下容易产生裂纹;而采用挤压坯料,由于晶粒细小,材料塑性较高,不易产生裂纹。并且经过第1道次冷旋压后,坯料组织得到改善,经固溶处理后,材料塑性较

表1 实验结果

Table 1 Experimental results

Sample	Billet wall thickness / mm	First spinning pass		Second spinning pass			Third spinning pass		
		Reduction rate/ %	Results	Billet state	Reduction rate/ %	Results	Billet state	Reduction rate/ %	Results
Upset billet	4.0	23.4	Cracks on inner surface	Solution heat treatment	30.1	Cracks do not develop			
Upset billet	4.0	31.3	Cracks on inner surface						
Upset billet	4.0	35.7	Cracks on inner surface						
Upset billet	2.5	42.3	Cracks						
Upset billet	2.5	32.7	Good	Solution heat treatment	30.7	Good	Solution heat treatment	28.5	Good
Extrusion billet	5.0	34.0	Good	Solution heat treatment	30.9	Good	Solution heat treatment	32.0	Good
Extrusion billet	5.0	31.0	Good	Solution heat treatment	33.3	Good	Solution heat treatment	43.4	Good
Extrusion billet	5.0	29.1	Good						

好, 不易产生裂纹, 即使原有裂纹也不易扩展。

Ti-15-3 冷强力旋压时开裂有 2 种情况: 1) 当减薄率较小时, 在内表面产生横向裂纹(垂直轴线); 2) 当减薄率较大时, 在直接变形区与塑性影响区交界处产生开裂。产生上述裂纹的外因是塑性变形的不均匀。

由图 1 和 2 可见, A 区为旋轮直接接触区, 该区呈三向压应力状态, 该区受到周围金属的约束, 因此, 当坯料较厚和减薄率较小时, 变形主要集中在坯料的外表面, 外表面金属沿轴向流动使得内表面金属沿轴向产生附加拉应力, 最终引起内表面开裂。图 4 为内表面裂纹形成照片, 裂纹在内表面或靠近内表面处产生, 并穿晶断裂; 当坯料较薄和减薄率较大时, 沿壁厚方向材料变形较均匀。但是当变形量过大时, 直接变形区金属的变形引起周围金属的变形, 使 D 和 E 区金属受较大的轴向附加拉应力, 在直接变形区与塑性影响区交界处产生开裂。

因此, 为避免冷强旋时产生裂纹, 第 1 道次的减薄率要选用适当, 根据实验和理论分析, 第 1 道次的减薄率取 30% ~ 40% 为宜。

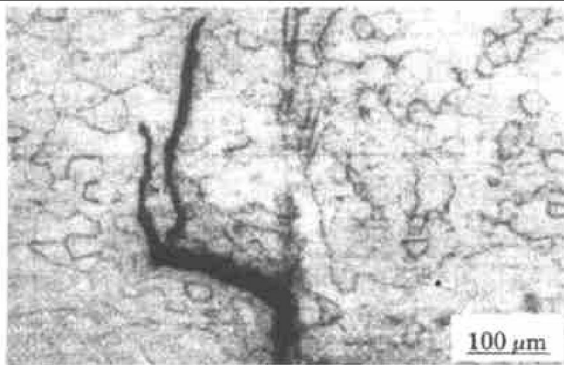


图 4 裂纹形貌照片(轴向截面)

Fig. 4 Morphology of crack on the inside surface

2.2 变形不均匀对晶粒尺寸的影响

对 Ti-15-3 冷强旋过程中不同道次的晶粒变化情况进行了观察, 如图 5, 6 和 7 所示。由于每道次内外表面变形不均匀程度的不同, 晶粒变化规律也不同。

1) 第 1 道次冷强旋时, 由于原始壁厚较大, 金属的变形主要集中在外表面, 内表面金属变形非常小。外表面的金属晶粒得到充分细化, 晶粒较小。内表面的金属晶粒细化程度较小, 晶粒尺寸变化不大, 如图 5 所示。

2) 第 3 道次冷强旋时, 由于坯料壁厚较薄, 材料变形在整个厚度方向上产生, 塑性变形的不均匀情况得到改善。由图 7 可见经 3 道次旋压后, 金属

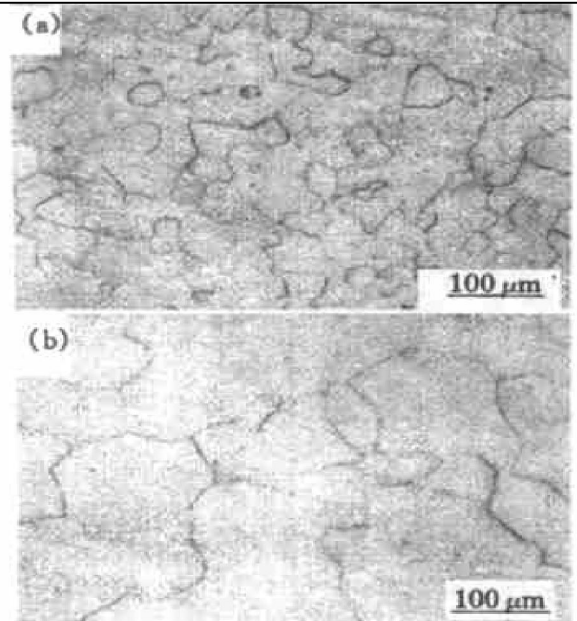


图 5 第 1 道次旋压(固溶处理)后的显微组织

Fig. 5 Microstructures after first spinning pass(after solution treatment)

(a) —Outer layer; (b) —Inner layer

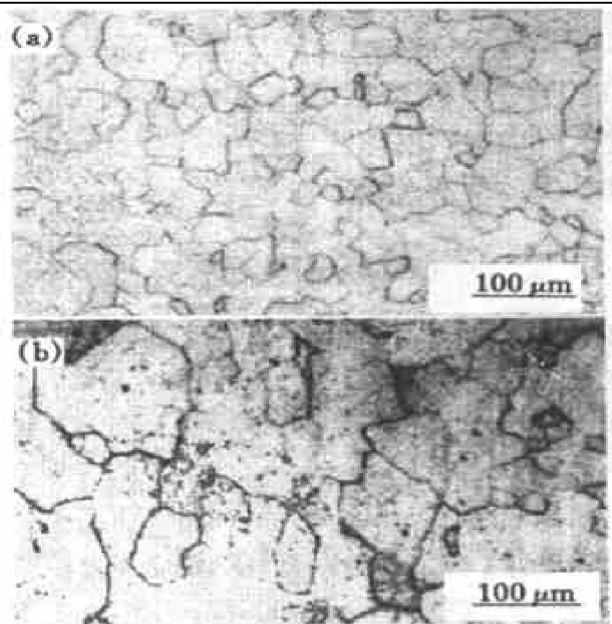


图 6 第 2 道次旋压(固溶处理)后的显微组织

Fig. 6 Microstructures after second spinning pass(after solution treatment)

(a) —Outer layer; (b) —Inner layer

变形已扩展到整个厚度方向, 内外表面金属的晶粒尺寸差别不大。

3) 随着旋压道次的增加, 变形程度加大, 晶粒得到进一步细化, 但晶粒细化的速度趋于缓慢, 最终内外表面晶粒尺寸逐渐相近。这表明晶粒尺寸在达到一定程度时, 其减小已很不明显。由于外表面变形程度大, 在第 1 道次就达到这一程度。上述

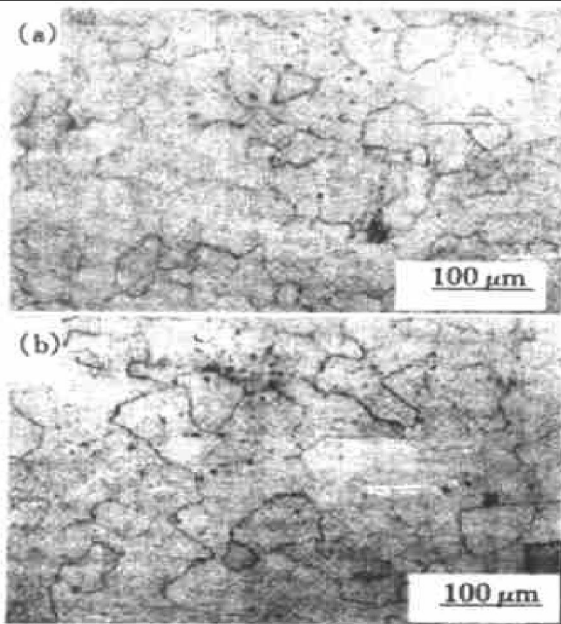


图7 第3道次旋压(固溶处理)后的显微组织

Fig. 7 Microstructures after third spinning pass(after solution treatment)

(a) —Outer layer; (b) —Inner layer

结果与每道次的减薄率有关。提高减薄率,还可以进一步细化晶粒,这样有利于提高最终成形件的性能,同时也可以提高后续道次的减薄率。因此,为避免旋压件内外表面组织的不均匀,总的减薄率要达到60%以上。

[REFERENCES]

- [1] Kroll W J. The development of titanium alloys [J]. JOM, 1990(1): 35- 38.
- [2] Bania P J. Beta titanium alloys and their role in the titanium industry [J]. JOM, 1994(6): 16- 18.
- [3] Seagle S R. The state of the USA titanium industry in 1995 [J]. Material Science and Engineering, 1996, A213: 1- 7.
- [4] Boyer R R. An overview on the use of titanium in the aerospace industry [J]. Material Science and Engineering, 1996, A213: 103- 114.
- [5] Breslauer E and Rosen A. Relationship between microstructure and mechanical properties in metastable beta titanium 15-3 alloy [J]. Material Science and Engineering, 1991, 7: 441- 446.
- [6] Rabech B M. Microplasticity and fracture in Ti 15V-3Cr-3Al-3Sn [J]. JOM, 1994(6): 14- 18.
- [7] HONG Quan(洪 权), LUO Guozhen(罗国珍) and WU Yiqin(吴以琴). Ti 15-3 合金管材的试制及组织性能研究 [J]. J Material Engineering(材料工程), 1995, 8: 38- 40.
- [8] GUO Jingjie, SU Yanqing, LIU Yuan, et al. Optimization of processing parameters during ISM process of Ti 15-3 [J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 1999, 9(1): 17- 21.
- [9] Prakash R and Singhal R P. Shear spinning technology for manufacture of long thin wall tubes of small bore [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1995, 54: 186- 192.
- [10] XUE Kemin, LU Yan and ZHAO Xianming. A study of the rational matching relationships among technical parameters in stagger spinning [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1997, 69: 167- 171.
- [11] Singhal R P. Estimation of power in the shear spinning of long tubes in hard work materials [J]. Journal of Material Processing Technology, 1990, 23: 29- 40.
- [12] Tomson H D. Product file of spinning [J]. Sheet Metal Industries, 1993, 70(4): 40- 41.

Effects of plastic deformation inhomogeneity on process of cold power spinning of Ti-15-3

SHAN Debin, TONG Weirzhou, XU Yi, LÜ Yan

(School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, P. R. China)

[Abstract] The effects of plastic deformation inhomogeneity on spinnability and forming quality of Ti-15-3 during the process of cold power spinning were studied. The results show that the inhomogeneity of plastic deformation is mainly caused by local load. The formation of cracks and the inhomogeneity of the crystal size on the inside and outside surface are brought out by the inhomogeneity of plastic deformation. In order to avoid the cracks in cold power spinning, the reduction rate of 30% ~ 40% in the first spinning pass is adopted, and total reduction rate of more than 60% is achieved to reduce the inhomogeneity of the microstructures.

[Key words] cold power spinning; Ti-15-3; plastic deformation

(编辑 杨 兵)