

7075 铝合金模锻件淬火残余内应力的消除^①

曾苏民 杨 扬[†] 曹金荣[†] 张新明[†] 王楠林[†] 曾宪付[†]

(西南铝加工厂, 重庆 401326) [†] (中南工业大学材料科学与工程系, 长沙 410083)

摘 要 为了消除 7075 铝合金模锻件淬火残余内应力, 采用模压冷变形方法并利用 X 射线衍射技术测试了淬火态及经过不同程度的模压冷变形后锻件的残余内应力。结果表明, 模压冷变形是消除 7075 模锻件淬火残余内应力的一种有效方法; 淬火态锻件表面为压应力, 模压冷变形后的表面为拉应力; 4.6% 的模压冷变形是模拟消除残余内应力研究的最佳值。

关键词 7075 合金模锻 模压冷变形 残余内应力

中图法分类号 TG115.5

7075 铝合金经模锻成形后, 尚需进一步切屑加工成高精度的部件。由于实际大锻件在淬火热处理后往往产生残余内应力, 致使后续加工后的部件尺寸不稳定, 造成巨大损失。本文通过模拟实验, 在模锻出 7075 锻件的基础上, 利用 X 射线衍射技术测算其淬火态及经过不同程度的模压冷变形后的残余内应力, 从而得出消除残余内应力的最佳冷变形程度, 为实际生产中用模压冷变形工艺消除大锻件的淬火残余内应力提供理论依据和实验方法。

1 残余内应力测试原理

X 射线衍射测试残余内应力是以测量衍射线位移作为原始数据, 所测得的结果实际上是残余应变, 而残余应力是通过弹性常数由残余应变计算得到的。

X 射线衍射方法主要是测试沿试样表面某一方向上的残余内应力 σ_ϕ 。为此, 需利用弹性力学理论求出 σ_ϕ 的表达式。由于 X 射线对试样的穿入能力有限, 只能探测试样的表层应力, 所以可将试样表层的应力分布视为二维应力状态, 即垂直试样表面的主应力 $\sigma_3 = 0$ (该方向的主应变 $\varepsilon_3 \neq 0$)。由此, 可求得与试样表

面法向成 Ψ 角的应变 ε_Ψ 的表达式为

$$\varepsilon_\Psi = \frac{1+\nu}{E} \sigma_\phi \sin^2 \Psi - \frac{\nu}{E} (\sigma_1 + \sigma_2) \quad (1)$$

式中 σ_1 和 σ_2 为沿试样表面的主应力。

将式(1)对 $\sin^2 \Psi$ 求偏导, 可得

$$\sigma_\phi = \frac{E}{1+\nu} \cdot \frac{\partial \varepsilon_\Psi}{\partial \sin^2 \Psi} \quad (2)$$

用晶面间距的相对变化 $(\Delta d/d)_\Psi$ 或 $2\theta_\Psi$ 角位移表达应变 ε_Ψ , 即 $\varepsilon_\Psi = (\Delta d/d)_\Psi = -\cot \theta_0 \cdot \Delta \theta_\Psi = -\cot \theta_0 (\theta_\Psi - \theta_0)$ 。 θ_0 和 θ_Ψ 分别为 $\Psi = 0$ 和各 Ψ 角下的布拉格角, 所以

$$\sigma_\phi = - \frac{E}{2(1+\nu)} \cot \theta_0 \cdot \frac{\partial (2\theta)_\Psi}{\partial \sin^2 \Psi} \cdot \frac{\pi}{180} \quad (3)$$

或写成

$$\frac{\partial (2\theta)_\Psi}{\partial \sin^2 \Psi} = \sigma_\phi / K = M \quad (4)$$

式中 $K = - \frac{E}{2(1+\nu)} \cot \theta_0 \cdot \frac{\pi}{180}$

式(4)表明, $(2\theta)_\Psi$ 与 $\sin^2 \Psi$ 呈线性关系, 其斜率 $M = \sigma_\phi / K$ 。如果在不同的 Ψ 角下精确测量 $(2\theta)_\Psi$ 值, 然后将 $(2\theta)_\Psi$ 对 $\sin^2 \Psi$ 作图, 称为 $(2\theta)_\Psi - \sin^2 \Psi$ 关系图, 便可从直线斜率 M 中求得 $\sigma_\phi = KM$ 。当 $M < 0$ 时, 为拉应力; $M > 0$ 时, 为压应力; $M = 0$ 时, 无应力存在。

① 收稿日期: 1997-09-22; 修回日期: 1998-01-07 曾苏民, 男, 65岁, 教授级高工

2 实验方法

2.1 工艺实验

本研究采用的实验工艺路线为: 熔铸 $\rightarrow$ 均匀化 $\rightarrow$ 热模锻成形 $\rightarrow$ 固溶、淬火内应力测定 $\rightarrow$ 模压冷变形 $\rightarrow$ 内应力测定

(1) 熔铸

7075 铝合金重熔, 浇注温度为 720 °C, 所用覆盖剂为 39% NaCl + 6.6% Na₃AlF₆ + 4.4CaF₆^[1, 2]。

(2) 均匀化退火

460 °C, 6h, 随炉冷却以消除枝晶偏析及溶解非平衡相^[1, 2]。均匀化后进行机加工除去铸锭表层并加工成一定形状以利于热模锻时的凸凹对中。

(3) 热模锻

装模 $\rightarrow$ 调试对中 $\rightarrow$ 加热凹模及锭坯(420 °C, 0.5 h) $\rightarrow$ 装模 $\rightarrow$ 润滑凸凹模(润滑剂为机油+石墨) $\rightarrow$ 将坯料放入凹模内 $\rightarrow$ 热模锻成形。

(4) 固溶淬火热处理

465 °C, 3h 水淬。

(5) 模压冷变形

为保证模压冷变形过程中模压具及套材(垫片)不变形而仅使锻件变形, 套材的 $\sigma_{0.2}$ 应满足下列条件:

$$\sigma_{0.2}(\text{锻件}) < \sigma_{0.2}(\text{套材}) < \sigma_{0.2}(\text{模子})$$

本研究选用 40 碳钢板及不锈钢板作为套材, 其厚度分别为 0.11, 0.16, 0.25, 0.33 (不锈钢), 0.48 (不锈钢) mm。将上述套材钣金加工裁剪成一定形状, 放入凹模内, 然后进行模压冷变形(润滑剂为机油), 对应上述不同厚度, 锻件的冷变形量分别为 1.4%, 2.0%, 3.1%, 4.6%, 6.0%。

另取 2 个锻件进行“热模冷料”的模压变形实验。凹模在 320 °C 加热 40 min, 凹模(3Cr2W8V)的线膨胀系数为 $\alpha = 16.3 \times 10^{-6}$ mm/(mm·°C) ($\alpha = (L_2 - L_1) / [L_1(t_2 - t_1)]$),

由此可得锻件的变形程度 $\varepsilon = \Delta L / L_0 \approx 0.4\%$ 。

2.2 残余内应力测试步骤和方法

2.2.1 试样处理

为了进行比较, 在每个锻件的相同部位, 切取相同大小的样品; 用水砂纸磨平待测表面; 各样品均在 25% NaOH 溶液中浸蚀 6 min, 然后用清水冲净。由于机械研磨层都会使表层变形, 产生残余内应力, 腐蚀掉表层 0.2 mm 以上则可消除研磨所产生的残余应力。

2.2.2 残余内应力测试的参数选取^[3-5]

(1) θ 角的选择

由布拉格方程可知, θ 角越大则其测量误差引起 $\frac{\Delta d}{d}$ 的误差越小。所以, 实际测定时应选择 θ 角尽量大的衍射面。

(2) 消除织构影响的方法

一般采用“ H 晶面法”即选取 (hhh) 或 ($h00$) 两类晶面族作衍射面。本实验是在 D-500X 射线织构测角仪上实现的。衍射角范围小(在 $0^\circ \sim 100^\circ$), 由 $\sin \theta = \lambda(h^2 + k^2 + l^2)^{1/2} / 2a$, $a \approx 4.05 \times 10^{-10}$ m (Al), $\lambda \approx 1.54 \times 10^{-10}$ m (Cu 靶) 可知, 取 (400) 或 (222) 为宜, 这样不但 θ 角尽可能大, 且能消除织构的影响, 但 (400) 在实验中发现衍射峰强度不够, 故选 (222) 面作衍射面。

(3) 修正的问题

由于试样的切取以及磨削等, 都会使应力部分释放、形成再分布, 按理应该修正测试结果。但本研究的目的是比较在经过不同程度的冷变形后残余内应力的相对大小, 从而得出最佳的冷变形程度, 而不是精确测量每种变形程度下残余应力的绝对值。在同一实验条件下, 对各个试样的测试结果进行比较是有意义的, 故本文没有进行修正处理。

(4) 弹性常数的引用

对无择优取向的多晶体, 虽然宏观上各向同性, 但对每个晶粒而言它们却是各向异性的。而 X 射线衍射方法测量的应变是通过晶面间距的变化得到的, 它是衍射面法线方向的应变。因此, X 射线测量中的弹性常数 E 和 ν 与

宏观力学的弹性常数是有差别的。从理论上讲,在X射线衍射的应力测定中不能直接引用宏观力学的弹性常数值,在实际操作中常用①Voigt模型,②Reub模型,③Kroner模型来处理。本文中直接采用了宏观弹性模量。

2.2.3 测试方法

用 $\sin^2 \Psi$ 法,在织构测角仪上用测倾法测量 $2\theta_\Psi$ 值,按倾角 Ψ 取 0° , 15° , 30° , 45° 四个测量点(Ψ 是正应力 σ_Ψ 方向与试样表面法向之间的夹角)。

2.2.4 数据处理

用ADR数据处理程序对 $2\theta_\Psi$ 的原始测量数据进行扣除背底、数值平滑、确定峰位等处理后给出 $2\theta_\Psi$ 值,并绘制 $2\theta_\Psi - \sin^2 \Psi$ 关系曲线。再利用最小二乘法将各数据点回归成直线方程:

$$2\theta_\Psi = b + M \sin^2 \Psi$$

其中

$$M = \frac{\sum_{i=1}^n 2\theta_{\Psi_i} \sum_{i=1}^n \sin^2 \Psi_i - n \sum_{i=1}^n 2\theta_{\Psi_i} \sin^2 \Psi_i}{\left(\sum_{i=1}^n \sin^2 \Psi_i \right)^2 - n \sum_{i=1}^n \sin^4 \Psi_i}$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n 2\theta_{\Psi_i} \sin^2 \Psi_i \sum_{i=1}^n \sin^2 \Psi_i - \sum_{i=1}^n 2\theta_{\Psi_i} \sum_{i=1}^n \sin^4 \Psi_i}{\left(\sum_{i=1}^n \sin^2 \Psi_i \right)^2 - n \sum_{i=1}^n \sin^4 \Psi_i}$$

(n 为测量数据点的数目)

利用7075铝合金的宏观力学弹性常数 $E = 27 \text{ GPa}$ 和 $\nu = 0.28$,计算 $K = -\cot \theta_0 \cdot \frac{E}{2(1+\nu)} \frac{\pi}{180}$,由此可得残余内应力 $\sigma_\Phi = KM$ 。

3 实验结果与讨论

淬火态的 $2\theta_\Psi - \sin^2 \Psi$ 关系见图1。其 $M = 0.25$, $K = -539.4 \text{ MPa}$, $\sigma_\Phi = KM \approx -135 \text{ MPa}$ 。

施加2%的冷变形后,锻件残余内应力的 $2\theta_\Psi - \sin^2 \Psi$ 关系见图2。其 $M = -0.32$, $K = -536.1 \text{ MPa}$, $\sigma_\Phi = KM \approx 170 \text{ MPa}$ 。

同理,施加0.4%,1.4%,3.1%,4.6%,6.0%的模压冷变形后锻件的残余内应力分别

为133.73,70.99,106.83,12.14和165.30 MPa。

锻件的淬火态及经模压不同冷变形后的残余内应力测试结果如图3所示。

由图3可知,用模压冷变形能消除残余内应力,并在一定限度内,锻件的冷变形量越大,残余内应力消除得越多;当冷变形程度超过某一限度后,残余应力不但不会减少,反而会增加。在本研究中,施加4.6%的模压冷变

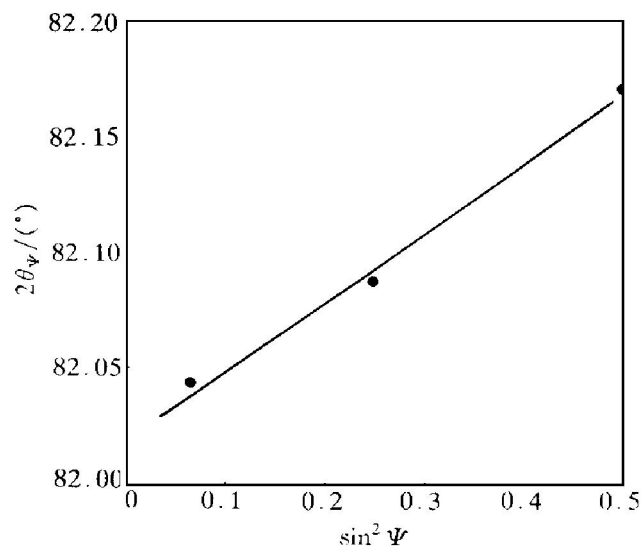


图1 $2\theta_\Psi - \sin^2 \Psi$ 关系曲线(淬火态)

Fig. 1 Curve of $2\theta_\Psi$ with $\sin^2 \Psi$ (quenched)

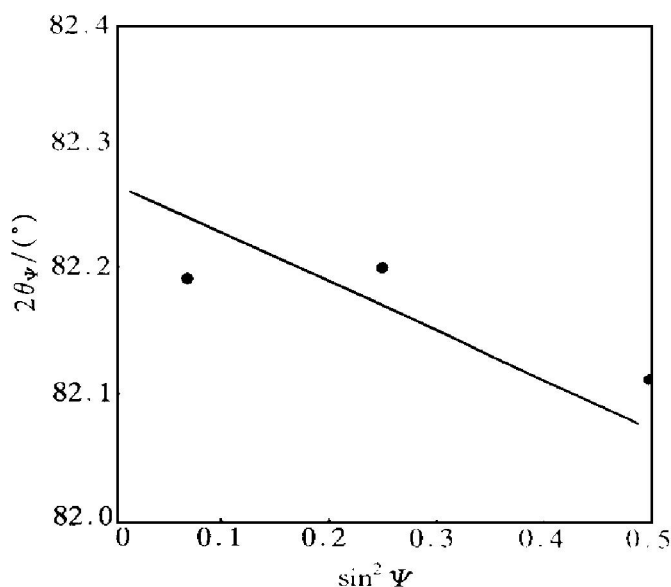
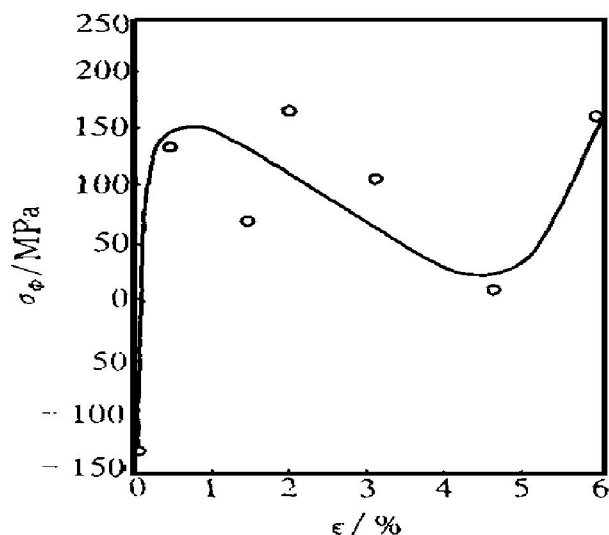


图2 $2\theta_\Psi - \sin^2 \Psi$ 关系曲线(2%冷变形)

Fig. 2 Curve of $2\theta_\Psi$ with $\sin^2 \Psi$ (2% cold deformation)

图3 ε - σ_{ϕ} 关系曲线Fig. 3 Curve of ε with σ_{ϕ}

形是消除锻件淬火残余内应力的最佳变形程度。

此外,由图3可见,未施加冷变形的淬火态锻件表面是压应力状态,而被施加模压冷变形的锻件表面是拉应力状态。由于锻件在淬火过程中,表面温度开始下降快,收缩程度大,而锻件心部温度高,形成表面受拉,内部受压的应力状态;但锻件淬火后期,外部阻碍内部

的冷却收缩变形,于是形成了表面受压、心部受拉的应力状态。施加冷变形后,锻件壁厚减小,沿母线方向伸长;因为锻件内表面与凸模接触、外表面与套材接触,此间产生的摩擦力阻碍表面的变形,两表面之间的材料塑性流动快,于是成形后形成了表面的拉应力状态。两种应力状态相抵消的结果表明,4.6%模压冷变形是消除模锻件淬火残余内应力的最佳值。

REFERENCES

- 1 Chen Da(陈达), Shui Xiaoping(水晓平) and Li Pengxing(李鹏兴). Journal of Mechanical Engineering(机械工程学报), 1990, 6(8): 77.
- 2 Takahashi W. Aluminium Fabrication(铝加工), 1996, 19(6): 18-22.
- 3 Li Shutang(李树棠). Experiment Methods of X-ray Diffraction(X射线衍射实验方法). Beijing: Metallurgical Industry Press, 1993, 83.
- 4 Xu Kewei(徐可为). Journal of Xi'an Jiaotong University(西安交通大学学报), 1985, 85-98.
- 5 Klug H P and Alexander L E. X-ray Diffraction Techniques(X射线衍射技术). Beijing: Metallurgical Industry Press, 1986.

ELIMINATION OF RESIDUAL STRESS OF 7075 AL ALLOY DIE-FORGING PRODUCT

Zeng Sumin, Yang Yang[†], Cao Jinrong[†], Zhang Xinming[†], Wang Nanlin[†] and Zeng Xianfu[†]

Southwestern Aluminium Fabrication Plant, Chongqing 401326, P. R. China

[†] Department of Materials Science and Engineering,

Central South University of Technology, Changsha 410083, P. R. China

ABSTRACT The residual stress of the quenched and die-forged products were investigated by X-ray diffraction technique. The results show that the cold deformation by die-forging is very effective for eliminating the residual stress of the 7075 quenched products, and the residual stress of the quenched products is compressive stress before die-forging and tensile one after die-forging; and the residual stress of the products after 4.6% cold deformation by die-forging is the minimum.

Key words die-forging cold deformation residual stress X-ray diffraction

(编辑 黄劲松)