

降低超厚铝合金锻件残余应力的试验^①

曾苏民

(西南铝加工厂, 重庆 631326)

摘要 为了满足 LD2 超厚铝合金锻件 ($d1\ 800\text{ mm} \times 460\text{ mm}$) 的使用力学性能特殊要求, 对降低超厚铝合金锻件残余应力的新技术进行了系统的研究, 合适的热处理工艺为: 固溶温度 $480\text{ }^{\circ}\text{C}$, 淬火水温 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$, 淬火出水温度 $120\text{ }^{\circ}\text{C}$, 淬火后与变形间隔不大于 3h, 淬火后冷变形量为 3%~5%, $165^{+5}\text{ }^{\circ}\text{C}$ 人工时 15 h。强度指标 (σ_b , $\sigma_{0.2}$, HB) 比未经热处理的状态提高 60%~70%, 塑性指标和导电率提高 50%。采用有限元法分析了锻件淬火残余应力, 试验结果与有限元计算结果一致。

关键词 固溶处理 冷变形 残余应力 有限元法

变形铝合金产品通过固溶淬火热处理和沉淀热处理后, 可大幅度提高产品的力学性能。但在淬火过程中, 由于产品急剧冷却, 产生很大的淬火残余应力, 且随着产品厚度的增加而急剧增大。这种淬火残余应力可能会引起三个不良的后果: 1) 使产品在淬火过程中产生变形, 必须在淬火后进行矫直; 2) 产品在使用前进行机械加工过程中或者在使用后还会产生较大变形, 所以世界各国都在研究各种减少淬火残余应力的方法, 如美国有拉伸冷变形法、压缩冷变形法、拉压冷变形法等; 3) 当产品过厚时, 在淬火过程中或者淬火后, 由于淬火内应力过大而使产品产生淬火裂纹, 且大部分淬火裂纹产生在产品的内部, 非常有害。前苏联变形铝合金半成品及零件的热处理说明书(No. 747-59)中淬火加热保温时间明确规定, 所有制品最大厚度为 150 mm; 美国 MIL-H-6088G 热处理说明书(1992 年 4 月版)中铝合金产品固溶淬火热处理最大厚度为 203 mm, 且在 ASTM B247M-90 技术标准铝合金力学性能中, 只有产品厚度小于 200 mm 时才有力学性能指标的规定。

LD2 超厚铝合金锻件 ($d1\ 800\text{ mm} \times$

460 mm) 已远远超出淬火允许厚度的 2~3 倍, 在淬火中将会引起严重的淬火变形和淬火裂纹, 因而不能通过热处理办法来提高力学性能。但是不经过热处理的锻件力学性能又远远不能满足使用要求, 这样在技术上形成了一个很大的难题。为了一方面减少铝合金 LD2 超厚锻件在淬火中内应力的产生; 另一方面在淬火后想办法降低大部分淬火残余应力, 同时可以使产品力学性能得到较大幅度的提高, 以满足超厚锻件的使用要求, 本文特对超厚锻件进行了降低淬火残余应力的试验研究。

1 新工艺试验及其结果分析

本文工艺试验从热处理开始, 减少铝合金 LD2 超厚锻件在淬火中的内应力, 然后采用冷变形方法降低锻件在淬火中的残余应力。

1.1 提高固溶处理温度

固溶处理温度越高, 则力学性能越高, 但与此同时, 由于淬火时激冷温差大, 淬火的残余应力也越大。所以, 为了满足使用力学性能要求, 并获得最小的淬火残余应力, 特对固溶处理温度进行了一系列试验, 其试验结果如表

^① 收稿日期: 1996-01-03; 修回日期: 1996-04-05 曾苏民, 男, 60 岁, 教授级高工

1 所示。

表 1 铝合金 LD2 在不同固溶处理温度下的力学性能和导电率

序 号	固溶处理 温度 / °C	σ_b / MPa	$\sigma_{0.2}$ / MPa	δ / %	HB	γ (IACS) / %
1	520	362.6	313.6	10	117	45.1~44.6
2	500	333.2	278.3	11	112	46.9~46.7
3	480	313.6	257.7	12	107	48.9~48.7
4	460	274.4	207.8	13	87	49.3~49.7
5	440	196	122.5	14	59	49.9~50.1
6	420	166.6	89.2	17	53	50.3
7	R 状态	154.8	78.4	18.3	45	53.3~52.8

固溶处理保温时间：60 min；淬火水温：20 °C；时效工艺：160^{±5} °C，6h。

从表 1 可以看出，固溶处理温度由 420 °C 提高到 520 °C 后，其抗张强度与硬度提高了 1 倍，屈服点提高了 2.5 倍，延伸率下降了 40%，导电率下降了 10%。超厚锻件使用要求抗张强度屈服点和硬度比热状态提高 50%，又考虑到小试样与大段件性能数据的差异，以及采取降低淬火残余应力的措施后，强度指标还可能有所下降。因此，将超厚段件的固溶温度由常规固溶处理温度 520 °C 降为 480 °C，其强度指标仅下降 15%，完全可以大幅度超出使用性能要求。

1.2 提高淬火水温

提高淬火水温将减少超厚锻件在淬火中激冷的温差和冷却速度，特别对减少超厚锻件在淬火中内部和外部的温度，对降低淬火残余应力，都会起着有效的作用。因此美国 MIL-H-6088G 热处理说明书上规定铝合金 LD2 淬火水温可到 60~ 80 °C。当然提高淬火水温对力学性能有一定影响。从表 2 可以看出，提高淬火水温对力学性能有所影响，但对强度指标降低很小，仅 3%~ 5%。因此，对超厚锻件宜采用高水温 80 °C 淬火，再在水中加上压缩空气搅拌，使锻件冷却均匀，更可以降低淬火残余应力。

表 2 铝合金 LD2 在不同淬火水温下的力学性能和导电率

序 号	淬火 水温 / °C	σ_b / MPa	$\sigma_{0.2}$ / MPa	δ / %	HB	γ (IACS) / %
1	20	313.6	264.6	10.8	107	48.9~48.7
2	60	306.7	255.8	11.4	104	49.0
3	80	298.9	247.0	12	101	49.2

固溶工艺：480 °C，60 min；时效工艺：160^{±5} °C，6h。

1.3 提高淬火后的出水温度

提高淬火后锻件的出水温度是降低淬火残余应力的有效方法。常规工艺是将产品在淬火水中冷却到接近室温后取出，当然可以起到完全淬火的效果。提高锻件淬火的出水温度，锻件本身可起着不同程度的回火作用，自行降低淬火残余应力，尤其是超厚锻件内部温度比外部温度高，提高淬火出水温度后，外部温度下降大幅度减慢，内外温度差逐渐减少，淬火残余应力小。淬火出水温度对力学性能的影响见表 3。从表 3 可以看出，提高淬火出水温度对力学性能是有影响的，但在 120 °C 以下时，其影响比较小。因此对超厚锻件淬火时，其产品出水温度采用 120 °C 是适宜的。

表 3 铝合金 LD2 产品淬火时在不同出水温度下的力学性能和导电率

序 号	淬火出 水温度 / °C	σ_b / MPa	$\sigma_{0.2}$ / MPa	δ / %	HB	γ (IACS) / %
1	80	289.8	247.0	12	101	49.2
2	100	297.0	245	12.2	100	49.3
3	120	292.0	143.0	12.4	99	49.4
4	160	274.4	215.6	13	88	49.7

固溶工艺：480 °C，60 min；淬火水温：80 °C；人工时效工艺：165^{±5} °C，6h。

1.4 采用冷变形降低淬火残余应力

产品淬火后立即进行冷变形是降低淬火残余应力最有效的方法。美国铝业协会 1993 年出版的“铝标准和数据”上介绍了淬火后降低淬火残余应力的三种主要办法：1) 拉伸冷变形，即 T × 51，冷变形量为 1%~ 3%；2) 压缩冷变

形，即 T × 52，冷变形量为 1% ~ 5%；3) 拉压冷变形，即 T × 54，冷变形量为 1% ~ 5%，是在一种专制的模具内进行冷变形的。这里特别要注意两个问题，一是要严格控制冷变形量和变形均匀性，变形量过小则降低淬火残余应力效果不好，在以后的产品使用过程中发生变形。但冷变形量过大，则会产生冷作硬化、裂纹和断裂。

本文对铝合金 LD2 超厚锻件的冷变形问题进行了探讨。由于工件超厚的原因，淬火残余应力比常规产品要大得多；另一方面由于工件超厚导致冷变形不易充分，因此采取压缩冷变形，变形量宜为 3% ~ 5%，且尽量控制在 4% ~ 5%。根据前苏联 No. 747-59 变形铝合金半成品及零件的热处理说明书上的介绍，LD2 在淬火后 3 h 内能保持淬火合金的良好塑性。因此，LD2 超厚锻件的压缩冷变形必须在新淬火状态下进行，且在淬火后 3 h 内完毕。

1.5 采用高温长时人工时效降低残余应力

高温长时人工时效也是进一步地降低淬火残余应力的好方法。美国有 T73、T74 等高温过时效的办法，但不同程度地降低了强度指标。作者选择的人工时效温度比常规提高了 10 ℃，即由 155 ℃提高到 165 ℃，然后用 6 种不同的保温时间进行试验，保温时间对力学性能和导电率的影响见表 4。

从表 4 可以得出，在高温 165 ℃时效，延长时效保温时间对强度指标下降有较大影响，尤其在延长到 20 h 后，强度指标急剧下降，这主要是由于强化相 Mg₂Si 沉淀析出过多，产生了过时效现象。因此对 LD2 铝合金超厚锻件采用时效工艺 165^{±5} ℃保温 15 h 为宜。

2 超厚锻件淬火残余应力有限元法分析

对一个零部件进行淬火热处理，由于在冷却过程中物体内部温度分布不均匀往往会使零件发生永久变形，这不仅会改变零部件原有的

表 4 铝合金 LD2 在不同人工时效保温时间下的力学性能和导电率

序号	人工时效保温时间/h	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ /%	HB	γ (IACS) /%
1	6	303.8	254.8	12	101	49.2
2	8	292.0	243.0	12.4	98	49.4
3	10	280.3	229.3	12.6	94	49.6
4	12	267.5	214.6	12.9	88	49.9
5	15	253.8	198.9	13.2	81	50.3
6	20	207.8	149.0	14.1	63	50.9

固溶工艺：480 ℃，60 min；冷变形：4% ~ 5%；人工时效温度：165^{±5} ℃

几何形状，同时还会使物体内部产生残余应力，这是生产实际中所不允许的。通过控制淬火方法可以减小这种变形，除了极其简单的几何形状及小型部件外，迄今估计残余应力的方法都是采用破坏性实验。本课题采用有限元分析方法计算大型铝锻件淬火后的位移及残余应力，对大型铝件的生产工艺进行可行性分析。

本文采用 ADINAT 程序求出试件的温度分布，然后用 ADINA 程序求其热应力。在计算温度场时，温度分布与热传导系数和比热容有很大关系，这两个数据的准确性直接影响所计算温度场结果的精度，取热传导系数 $K = 0.4$ ，比热容 $C = 0.25$ （两个试件的温度场计算用此值）。铝的密度 $\gamma = 2.7 \text{ kg/dm}^3$ ，求出温度场后，利用已知温度场借助于 ADINA 程序计算热应力。

在求温度场时，由于试件始淬温度（480 ℃）比淬火介质温度（室温）高出许多，开始一段时间温度梯度较大，温度分布随时间变化较大，而淬火至一定时间后，淬件温度下降较多，同时淬火介质温度略有上升，此时两者温差显著减小，因此温度变化也变得缓和得多。因此开始淬火时时间步长要取小些，随反应温度的剧烈变化，此后时间步长要相应取大些，这样既可保证计算结果的精度，又不致于使计算量过大。在用 ADINAT 程序求解应力时，则根据程序的要求，只考虑了一个时间步

长不变的区段数,即整个淬火过程是按同一个时间步长来求解应力的。

图1和图2分别是是大锻件和标准试件淬火后应力分布曲线。在计算热应力时,淬件在初始时刻应力为零(因为这时其内外不存在温差),即 $t=0$ 时, $\sigma=0$,随着淬火过程的进行,其应力先是增加达到最大值,然后随着温度的降低,温差减小渐趋平衡。在计算过程中发现,大试件在淬火开始约1 min后,热应力达到最大值,且 $\sigma_{\max}=8.46\text{ MPa}$,此时该节点温

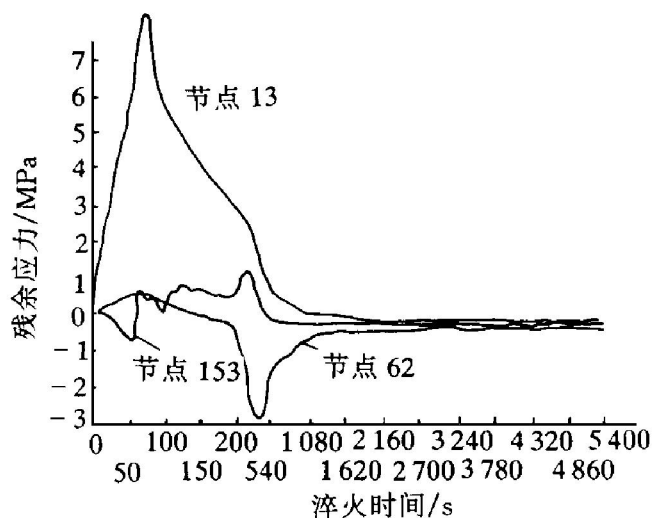


图1 大试件($d\ 1800\text{ mm} \times 460\text{ mm}$)淬火应力分布图

度为 $327\text{ }^{\circ}\text{C}$,根据 $\sigma_{0.2}$ 的实验曲线知,此时 $\sigma_{0.2}=60.0\text{ MPa}$, $\sigma_{\max}<\sigma_{0.2}$,因此在淬火过程中锻件不会发生破坏。同时,通过计算还发现,大锻件淬火后热应力平稳值要小于标准试件,这是因为标准试件淬火后内外温差要高于大锻件的缘故。

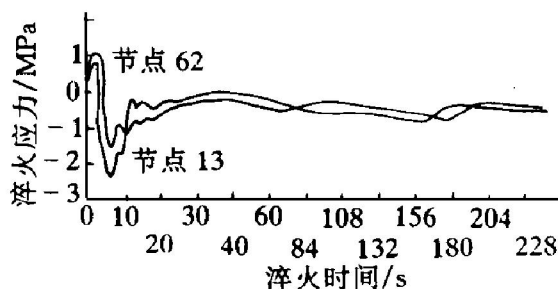


图2 标准试件($d\ 150\text{ mm} \times 150\text{ mm}$)淬火应力分布图

通过对淬火过程中热应力计算可知,只要降低始淬火温度,提高淬火水温,延长冷却时间(即降低冷却速度),提高淬火出水温度,则大型铝锻件(尺寸超过标准试件)也可以进行淬火处理。随之进行新淬火状态下较大的冷变形和高温长时人工时效,既可以适当提高产品性能,又可以使残余应力减少到最低值。

NEW TECHNIQUE OF ELIMINATING RESIDUAL STRESS IN EXTRA-THICK ALUMINIUM ALLOY FORGING

Zeng Suming

Southwest Aluminium Fabrication Plant, Chongqing 631326

ABSTRACT In order to satisfy the special needs of mechanical properties of extra-thick aluminium alloy forging LD2 ($d\ 1800\text{ mm} \times 460\text{ mm}$), the new technique to eliminate the residual stress of extra-thick aluminium alloy forging has been studied systematically and the forging quench residual stress has been analysed using finite element method. The experimental results are in accordance with those calculated by FEM.

Key words solid solution treatment cold deformation residual stress finite element method

(编辑 彭超群)