Aquatensid BW淬火剂在波音飞机铝合金薄壁件中的应用

于成功，卢刚，冯双芹，穆强
中航沈飞民用飞机有限责任公司　辽宁沈阳　110169

摘要：35℃条件下Aquatensid BW淬火剂的浓度越高，黏度也越大。从500℃开始测量不同浓度的淬火剂冷却速率，其冷速变化为$v_{水}>v_{5\%}>v_{10\%}>v_{15\%}>v_{22\%}$。规格为1mm的2024和7075铝合金板材及波音飞机典型零件在浓度为10%~15%的Aquatensid BW淬火剂中进行淬火时变形量较小。当Aquatensid BW淬火剂的浓度为10%及15%时，2024（T42）及7075（T62）铝合金的拉伸性能及硬度值最优，并且包铝层的扩散最少，所有的性能均满足波音规范要求。厚度为1mm的铝合金零件使用Aquatensid BW淬火剂进行淬火时，推荐使用的浓度为10%~15%。

关键词：Aquatensid BW淬火剂；铝合金薄壁件；变形量；力学性能

1　序言

水作为铝合金薄壁件常用淬火冷却介质之一，其弊端在于冷却速度大，会导致零件淬火后变形严重，后续校形困难，使零件尺寸超差而报废，进而造成巨大经济损失[1]。

Aquatensid BW淬火剂原液用水稀释后即可投入使用，根据不同的稀释比例，可获得介于油与水之间的任何冷却速度[2]。与水相比，聚合物淬火剂可均匀地打破蒸汽膜，避免形成气穴，降低最终的冷却速度，大大减少应力的产生，进而可以避免或减少工件铝固溶处理后出现的变形、翘曲，适用于各种铝合金件，如铸件、锻件、挤压件及轧制板件等的淬火[3]。Aquatensid BW 聚合物淬火剂与某些聚合物淬火剂相比，在同一浓度状态下，冷却速度略快，这样就可在较低浓度下使用而达到同样效果，更有利于节约成本，零件淬火时带出量也随之减少[4]。

目前，国外的飞机公司已经广泛采用聚合物淬火剂进行铝合金的淬火，国内的飞机公司基本还在使用水或油作为淬火冷却介质。波音公司使用聚合物淬火更加广泛，在波音公司的一个车间每年就可以节省60万美元的校正费用[5]；成飞公司已成功使用UCONA代替水，大大减少了铝合金热处理变形和钣金件校正工时（50%以上）；酒钢集团分公司使用PAG淬火冷却介质代替淬火油，每年降低成本87.98万元[6]；国产C919大飞机、ARJ支线飞机对铝合金采用聚合物淬火的应用均作出了工艺要求。

本文通过对波音飞机2024、7075铝合金薄壁件在不同浓度Aquatensid BW淬火剂中的淬火效果、性能等进行研究，揭示了Aquatensid BW淬火剂适用于铝合金薄壁件淬火的最优浓度范围，为铝合金薄壁件聚合物淬火时浓度的选取提供参考依据。

2　试验材料及内容

2.1　试验材料

本次试验选取2024、7075铝合金板材，尺寸为150mm×100mm×1.0mm。此外，选取波音项目厚度为1mm的2024、7075铝合金两种材料典型薄壁件在不同浓度淬火剂中进行淬火。

表1是Aquatensid BW淬火剂（原液）特性

基金项目：辽宁省科技重大专项（YKZW-QT-0126-20191207）：航空用大型高精度段环挤压结构件的研发及产业化。

数据。Aquatensid BW淬火剂由聚烷基撑乙二醇（Polyalkylen Glycols）、羧酸混合物、胺类（非肿胺）、杀菌剂、非铁重金属减活化剂及水组成。最佳使用温度为25~45℃。淬火剂温度最高不能超过60℃，如果淬火剂温度超过60℃，则应使其冷却至40℃以后，才能进行下一批工件的淬火。

表1　Aquatensid BW淬火剂（原液）特性数据

pH值（5%）	外观	逆溶点/℃	使用温度/℃
8.7~9.1	绿色	75	25~45

2.2　试验内容

（1）Aquatensid BW淬火剂槽液配置　为适用不同材料的热处理，依据波音规范BAC 5602，本试验将规定聚合物的体积浓度≤22%，选择水以及5%、10%、15%、22%浓度的聚合物进行试验。在试验过程中，从浓度最低（5%）的聚合物开始配制和试验，随后是10%、15%、22%浓度的聚合物。每次聚合物淬火槽淬火后重新测量聚合物的浓度，重新调制槽液，保证在整个试验过程中的聚合物浓度的变化都控制在0~－2%。

生产现场可使用便携式折光仪测定淬火剂浓度。测试方法：打开折光仪前部镜片上的盖板，取一滴溶液滴在镜片上后合上盖板，对着光亮处通过目镜观察，记录观察到的明暗处的刻度读数值，然后用该读数乘以系数2.0即可得到Aquatensid BW淬火剂的浓度百分数。

（2）Aquatensid BW淬火剂冷却速率测试　使用Ivf Quenchotest冷却速度测量仪对不同浓度的淬火剂进行冷却速率测量。

（3）热处理工艺及测试　试片的热处理工艺按表2进行。试片在水以及5%、10%、15%、22%Aquatensid BW淬火剂中进行淬火。淬火前，淬火剂温度35℃，试片的淬火转移时间≤10s。作为对比，另选取80℃的水温进行试验。所有试验件及工件的淬火方式均为立式淬火。为确保浓度均匀，在淬火和取样之前应搅拌淬火剂，必须持续不断地循环直到淬火结束。研究表明，通过控制淬火剂浓度、温度及搅拌速度可有效控制工件的变形[2, 7-9]。在淬火后，为去除黏附在试片和料架上的淬火剂薄膜，在被搅拌的冷水中浸洗至少10min，待试片干燥后进行时效处理。

表2　热处理工艺

材料	固溶处理	时效处理	最终状态
2024（包铝）	（493.3±5.5）℃×35min	室温≥96h	T42
7075（包铝）	（493.3±5.5）℃×35min	（121.1±5.5）℃×23h	T62

热处理后的工件需要进行硬度测试（按BAC 5650）、拉伸性能测试（按ASTM B557）和包铝层扩散试验（按BAC 5602）。

（4）热处理变形量检测　铝合金板材经过固溶处理后，按照图1所示从左到右进行变形量检测，可获得高度方向的变形量以及单一方向的变形量变化趋势。

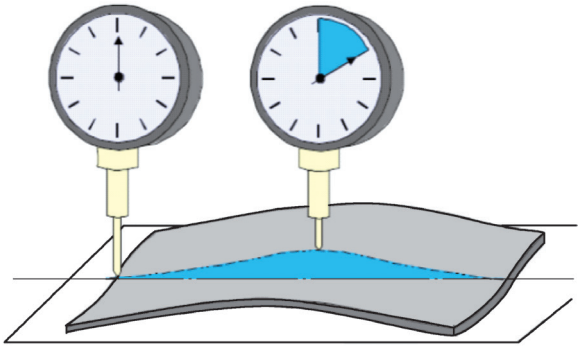


图1　变形量检测

3　试验结果与分析

3.1　不同浓度淬火剂黏度

按照ASTM D445测定稀释溶液的黏度，表3是35℃条件下Aquatensid BW淬火剂的浓度与折光仪读数、黏度的对照表。随着淬火剂浓度增加，黏度也增加。

表3　Aquatensid BW淬火剂的浓度与折光仪读数、黏度的对照

浓度（%）	折光仪读数	黏度（35℃）/$mm^2 \cdot s^{-1}$
5	3	1.9
10	5.7	3.0
15	8.5	4.6
22	12.2	8.1

3.2　冷却性能

图2是在35℃条件下，不同浓度Aquatensid BW淬火剂及水的冷却曲线。采用Ivf Quenchotest（冷却

特性测试仪）进行测定，探头的初始温度为500℃。第I阶段是膜态沸腾阶段，此时工件刚进入淬火剂中，瞬间在工件表面产生大量的蒸汽形成一层蒸汽膜附着在工件表面，工件本身的热量通过蒸汽膜进行传递，传热效率较低，因此工件的温度变化不大，Aquatensid BW淬火剂此蒸汽膜阶段持续时间不超过1s。有研究发现[2, 10]，在聚合物溶液中蒸汽膜阶段很短，有的甚至不出现蒸汽膜阶段，直接进入泡沸腾阶段；第II阶段是泡状沸腾阶段，此时工件表面逸出的气泡量较大，导致工件表面的蒸汽膜破裂，工件与淬火剂的热交换骤然变大，工件的冷却速度骤增，随着淬火剂浓度增加，工件冷却速度逐渐减小，泡状沸腾持续的时间增加，这是因为聚合物的浓度越大则其黏度也越大，那么富集在工件表面的聚合物膜层就越厚，相应地聚合物水溶液的冷却速度变小；第III阶段是对流阶段，此时工件表面的温度降至淬火冷却介质沸点以下，沸腾现象消失，此时的工件是以对流的方式继续冷却，并且此阶段的冷却速度变化最为平缓。因此，淬火冷却介质的冷却速度变化为$v_{水}>v_{5\%}>v_{10\%}>v_{15\%}>v_{22\%}$。

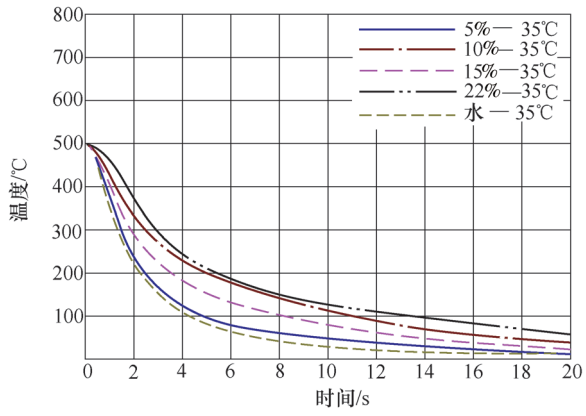
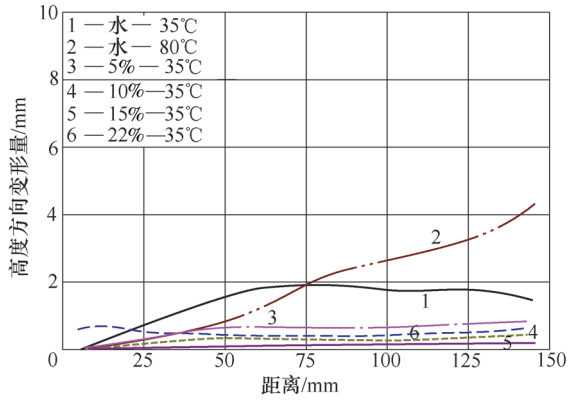


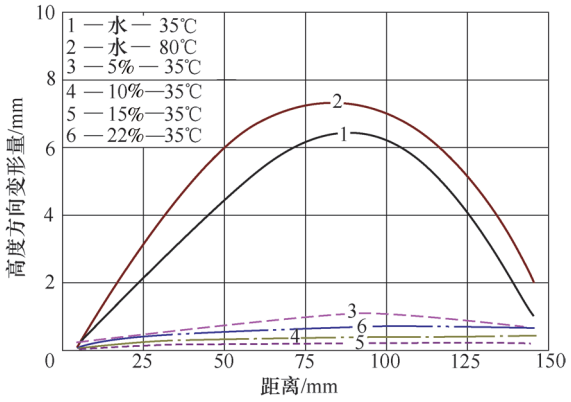
图2　35℃不同浓度Aquatensid BW淬火剂及水的冷却曲线

3.3　板材变形量分析

图3是1mm厚的2024和7075铝合金板材在35℃、80℃水中以及不同浓度Aquatensid BW淬火剂中淬火后，板材高度方向的变形量。由图3可以看出，2024铝合金板材的变形方式为单边翘曲，7075铝合金板材的变形方式为中间凸起。2024铝合金板材在水中淬火后的平均变形量约为2mm，7075铝合金板材在水中淬火后的平均变形量约为6.5mm，其中在80℃水中淬火后板材的变形量最大。板材在Aquatensid BW淬火剂中的变形量均小于1mm，在10%及15%浓度淬火剂中淬火后的变形量最小。黏附在工件表面的淬火剂可以有效破坏水的蒸汽膜，从而可以保证在固溶（淬火）冷却过程的开始阶段就能得到均匀冷却，均匀且快速的冷却能够有助于减小工件冷却过程产生的内应力，并能够有效保证工件得到良好的均匀固溶效果。



a）2024铝合金板材高度方向变形量



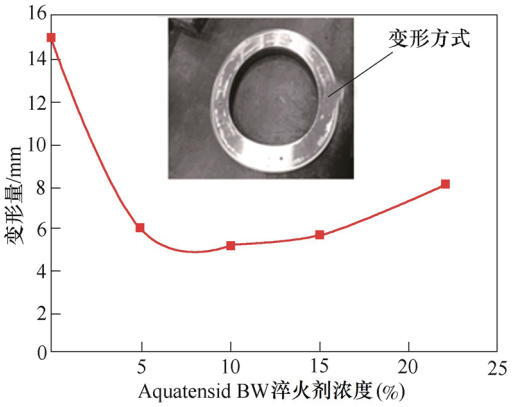
b）7075铝合金板材高度方向变形量

图3　2024、7075铝合金板材高度方向变形量

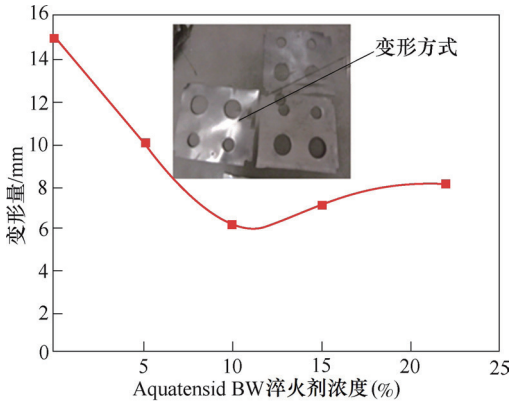
3.4　典型件变形量分析

图4是厚度为1mm典型的2024及7075铝合金钣金工件在不同浓度Aquatensid BW淬火剂中的变形量情况以及淬火后的变形形式。由图4可以看出，工件淬火后的变形方式为两端翘曲变形。2024铝合金工件在35℃的水以及5%、10%、15%、22%Aquatensid BW淬火剂中的平均变形量分别为15mm、5.8mm、5mm、5.6mm、8mm，工件在10%及15%浓度淬火剂中的变形量较小，其中在10%浓度淬火剂中的变形量相对于在水中的变形量减小66.7%。7075铝合金工件在水以及5%、10%、15%、22%Aquatensid

BW淬火剂中的平均变形量分别为15mm、10mm、6mm、7mm、8mm，工件在10%及15%浓度淬火剂中的变形量较小，其中在10%浓度淬火剂中的变形量相对于在水中的变形量减小60%。黏附在高温工件表面的聚合物膜，可以有效地降低在200~500℃的范围内从工件表面到流体冷却介质的热流量，从而降低了工件的内应力，实现减少和控制工件固溶（淬火）冷却变形的效果。



a）2024铝合金典型件

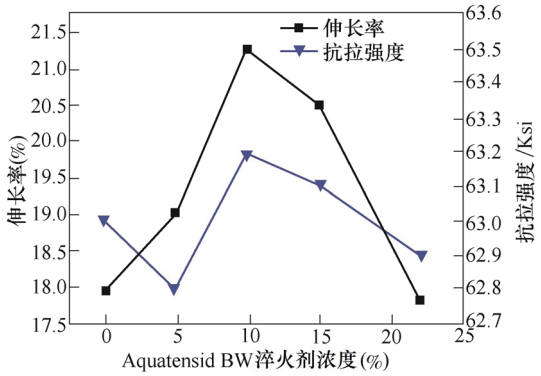


b）7075铝合金典型件

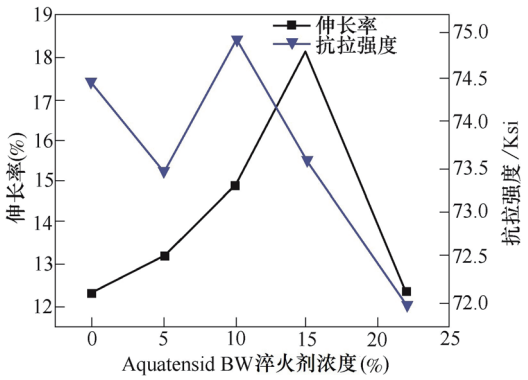
图4　典型工件变形量

3.5　力学性能

图5是2024、7075铝合金经不同浓度Aquatensid BW淬火+时效后的拉伸性能。板材经过固溶+时效处理后，在10%及15%浓度淬火剂淬火后材料的抗拉强度最优，但相对在其他浓度的淬火剂中淬火变化不大。2024铝合金经10%、15%Aquatensid BW淬火剂淬火后材料的伸长率较大，比经水淬的板材分别高18.3%、13.9%，比经15%Aquatensid BW淬火的板材分别高19.7%、15.2%。7075铝合金经10%、15%Aquatensid BW淬火剂淬火后材料的伸长率较大，比经水淬的板材分别高18.4%、46.4%，比经15%Aquatensid BW淬火的板材分别高20.3%、48.8%。在10%~15%浓度内淬火剂的淬火效果最好，材料的拉伸性能最优，其主要原因是当高温铝合金工件浸入Aquatensid BW淬火剂时，由于受热脱溶的聚合物具有良好的润湿性，会黏附在高温工件表面。10%~15%浓度的淬火剂黏附在1mm板材上的聚合物厚度是最适中的，此时板材与淬火剂的热交换最稳定，保证了工件冷却时过冷度的稳定性，这样材料的组织会更加均匀，因此材料的综合性能会更优异。



a）2024（T42）铝合金拉伸性能



b）7075（T62）铝合金拉伸性能

图5　经不同浓度Aquatensid BW淬火+时效后的拉伸性能

（注：1Ksi=6.84MPa）

图6是经不同浓度淬火剂淬火后，2024（T42）及7075（T62）铝合金板材的包铝层扩散值分布。由图6可以发现，经10%、15%Aquatensid BW淬火后材料的包铝层扩散最小，经水淬后材料的包铝层扩散最大。因此，适当的淬火剂浓度可以减少包铝层的扩散，材料的耐蚀性有所提高。

图7是经不同浓度淬火剂淬火后，2024（T42）及7075（T62）铝合金板材的硬度值统计。

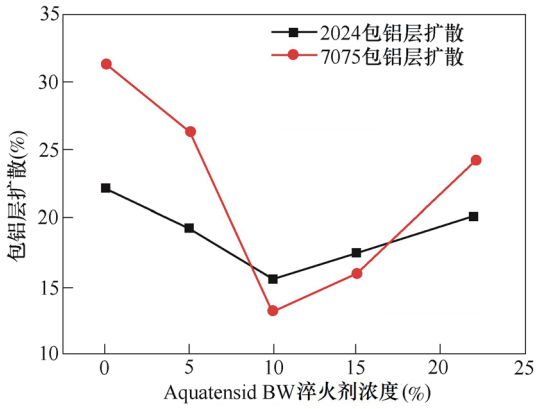


图6　2024（T42）及7075（T62）包铝层扩散值

BAC5946中对规格为1mm的2024（T42）及7075（T62）铝合金板材的硬度值要求分别为≥57HRB和≥76HRB，经过不同浓度淬火剂淬火后进行时效的材料硬度值均满足要求。

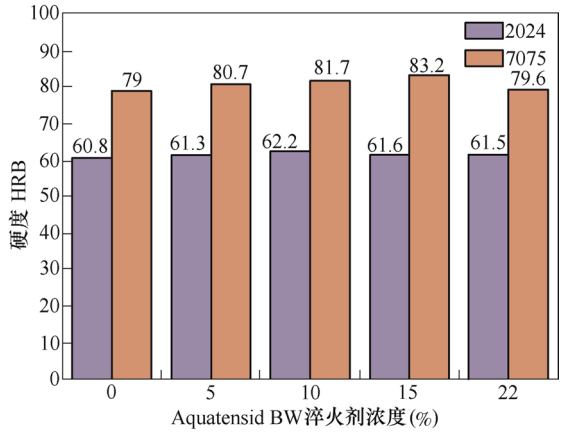


图7　2024（T42）及7075（T62）铝合金板材的硬度值

4　结束语

1）35℃条件下Aquatensid BW淬火剂的浓度越高，黏度也越大。从500℃开始测量不同浓度的Aquatensid BW淬火剂冷却速率，其冷速变化为$v_{水}>v_{5\%}>v_{10\%}>v_{15\%}>v_{22\%}$，即淬火剂浓度越高，冷却速度越慢。

2）规格为1mm的2024和7075铝合金板材在35℃、80℃水中以及不同浓度Aquatensid BW淬火剂中淬火后，2024铝合金板材的变形方式为单边翘曲，7075铝合金板材的变形方式为中间凸起，板材经过不同浓度淬火剂淬火后，板材高度方向的变形量均＜1mm，浓度在10%和15%时，板材在高度方向的变形量较小。

3）2024及7075铝合金典型工件在10%及15%浓度的Aquatensid BW淬火剂中的变形量较小，其中在10%淬火剂中淬火后工件的变形量相对于在水中的变形量分别减小66.7%、60%。

4）当Aquatensid BW淬火剂的浓度为10%及15%时，2024（T42）及7075（T62）铝合金的拉伸性能及硬度值最优，并且包铝层的扩散最少，所有的性能均满足波音规范要求。

5）厚度为1mm的铝合金工件使用Aquatensid BW淬火剂进行淬火，推荐使用的浓度范围为10%~15%。

参考文献：

[1] 绳小龙.BW水基淬火液在铝合金钣金件淬火中的应用[J].新技术新工艺，2012（1）：71-73.
[2] 陈春怀，张羽佳，朱祖昌.聚合物淬火剂及其应用[J].热处理，2011（26）：49-54.
[3] 史春玲，李海琴.铝合金淬火使用聚合物淬火剂的应用研究[J].材料工程，2010（1）：5-8.
[4] 李国庆，吴瑞豪.聚合物淬火剂Aquatensid BW 工艺试验及应用[J].航空制造技术，2008（21）：94-97.
[5] 吴瑞豪，冯敏.B-757 飞机铝合金零件聚合物淬火[J]. 金属热处理，2001（1）：48-50.
[6] 张晓文，齐卫东.PAG 介质替代淬火油技术的开发及应用[J].机械研究与应用，2017（5）：165-168.
[7] LALLY K S，TOTTEN G E.Proper agitation dictates quench success part 2[J].Heat Treating，1992（10）：28-31.
[8] TOLSTOUSOV A V，BANNYKH O A.New quenchants[J].Metal Science and Heat Treatment，1983（1）：104-106.
[9] FOREMAN R W，MESZAROS A. Polymer quenching update[J].Industry Heating，1984（1）：22-24.
[10] LISCIC B，TENSI H M，CANALE L C F，et al.Quenching Theory and Technology[M].2nd ed.CRC Press，Taylor Francis Group，2010：183.

MW 20210110