

[19] 中华人民共和国国家知识产权局



# [12] 发明专利申请公开说明书

[21] 申请号 200480030024.6

[51] Int. Cl.

C22F 1/04 (2006.01)

C22F 1/047 (2006.01)

C22F 1/053 (2006.01)

C22F 1/057 (2006.01)

[43] 公开日 2006年11月22日

[11] 公开号 CN 1867689A

[22] 申请日 2004.10.29

[21] 申请号 200480030024.6

[30] 优先权

[32] 2003.10.29 [33] EP [31] 03078410.2

[86] 国际申请 PCT/EP2004/012353 2004.10.29

[87] 国际公布 WO2005/049878 英 2005.6.2

[85] 进入国家阶段日期 2006.4.13

[71] 申请人 克里斯铝轧制品有限公司

地址 德国科布伦茨

[72] 发明人 R·本奈迪克特斯 C·J·凯德尔

A·L·海因茨

A·J·P·哈萨勒 G·韦伯

[74] 专利代理机构 中国国际贸易促进委员会专利商  
标事务所  
代理人 蔡胜有

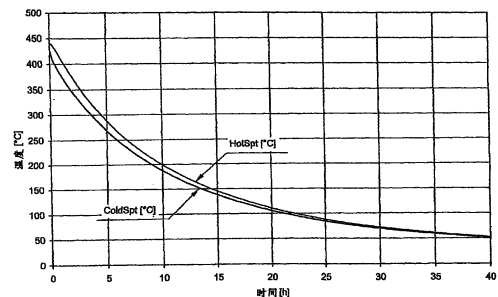
权利要求书 4 页 说明书 11 页 附图 1 页

## [54] 发明名称

用于生产高损伤容限铝合金的方法

## [57] 摘要

本发明涉及生产具有高韧性和提高的抗疲劳裂纹扩展性的高损伤容限铝合金轧制产品的方法，包括步骤 a) 铸造具有组成选自包括 AA2000, AA5000, AA6000 和 AA7000 - 系列合金的铸锭； b) 在铸造后，均质化和/或预加热铸锭； c) 热轧铸锭成为热轧产品，并可选地冷轧该热轧产品成为冷轧产品，特征在于该热轧产品以热轧机出口温度 ( $T_{exit}$ ) 离开热轧机并通过受控冷却循环将该热轧产品从所述  $T_{exit}$  冷却到  $150^{\circ}\text{C}$  或更低，冷却速率在由  $T(t) = 50 - (50 - T_{exit}) e^{-\alpha \cdot t}$  限定的范围内，其中  $T(t)$  是作为时间 (hrs) 的函数的温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )， $t$  是时间 (小时)，和  $\alpha$  在  $-0.09 \pm 0.05 (\text{hrs}^{-1})$  的范围。



1. 生产具有高韧性和提高的抗疲劳裂纹扩展性的高损伤容限铝合金轧制产品的方法，包括步骤

a) 铸造具有组成选自包括 AA2000, AA5000, AA6000 和 AA7000-系列合金的铸锭；

b) 在铸造后，均质化和/或预加热铸锭；

c) 热轧铸锭成为热轧产品，并可选地冷轧该热轧产品成为冷轧产品，特征在于该热轧产品以热轧机出口温度 ( $T_{exit}$ ) 离开热轧机并通过受控冷却循环将该热轧产品从所述  $T_{exit}$  冷却到  $150^{\circ}\text{C}$  或更低，冷却速率在由  $T(t) = 50 - (50 - T_{exit})e^{-\alpha t}$  限定的范围内，其中  $T(t)$  是作为时间 (hrs) 的函数的温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )， $t$  是时间 (小时)，和  $\alpha$  在  $-0.09 \pm 0.05$  ( $\text{hrs}^{-1}$ ) 的范围。

2. 根据权利要求 1 的方法，其中  $\alpha$  在  $-0.09 \pm 0.03$  ( $\text{hrs}^{-1}$ ) 的范围。

3. 根据权利要求 1 或 2 的方法，其中对该热轧产品进行受控的冷却循环，从而在升高的温度维持预定的时间。

4. 根据前述权利要求中任一项的方法，其中通过在热轧后卷取该热轧产品合金，对该热轧产品进行受控冷却循环。

5. 根据前述权利要求 1-3 中任一项的方法，其中通过在热轧后将该轧制产品连续移动通过炉，对该热轧产品进行受控冷却循环，其中所述炉是可调节的以在转到冷轧位置或卷取位置时向该轧制合金产品提供热量。

6. 根据前述权利要求中任一项的方法，其中通过在热轧后在炉中卷取该轧制合金产品，对该热轧产品进行受控冷却循环，其中所述炉是可调节的以在卷取时控制合金产品的冷却速率。

7. 根据前述权利要求中任一项的方法，其中当以热轧机出口温度离开热轧机时，该热轧产品具有小于 12mm 范围的规格。

8. 根据权利要求 7 的方法，其中该热轧产品具有 1-10mm 范围的规格，且优选的 4-8mm 范围。

9. 根据前述权利要求 1-8 中任一项的方法,其中该方法进一步包括一个或多个下面处理步骤:

d) 固溶热处理经受控冷却循环后的该热轧产品,或固溶热处理该冷轧产品;

e) 淬火固溶热处理的合金产品;

f) 可选地拉伸或压制淬火合金产品;

g) 可选地时效该淬火并可选拉伸或压制的合金产品以获得需要的状态。

10. 根据前述权利要求中任一项的方法,其中受控冷却循环中的平均冷却速率在 12-20°C/小时范围。

11. 根据前述权利要求中任一项的方法,其中铸造包括下面组成(重量百分比)的铸锭:

Si 0.6-1.3

Cu 0.04-1.1

Mn 0.1-0.9

Mg 0.4-1.3

Fe 0.01-0.3

Zr <0.25

Cr <0.25

Zn <0.6

Ti <0.15

V <0.25

Hf <0.25,

其它元素每种少于 0.05 和总量少于 0.20, 余量的铝。

12. 根据前述权利要求 1-10 中任一项的方法,其中铸造包括在 AA6013 或 AA6056 组成范围内的合金的铸锭。

13. 根据前述权利要求 1-10 中任一项的方法,其中铸造包括下面组成(重量百分比)的铸锭:

Cu 3.8-5.2

Mg	0.2-1.6
Cr	<0.25
Zr	<0.25 和优选 0.06-0.18
Mn	≤ 0.50 和 Mn: >0, 和优选 >0.15
Fe	≤ 0.15
Si	≤ 0.15

其它元素每种少于 0.05 和总量少于 0.15, 余量的铝。

14. 根据前述权利要求 1-10 中任一项的方法, 其中铸造包括下面组成 (重量百分比) 的铸锭:

Zn	5.0-9.5
Cu	1.0-3.0
Mg	1.0-3.0
Mn	<0.35
Zr	<0.25 和优选 0.06-0.16
Cr	<0.25
Fe	<0.25
Si	<0.25
Sc	<0.35
Ti	<0.10

Hf 和/或 V < 0.25

其它元素每种少于 0.05 和总量少于 0.15, 余量的铝。

15. 根据前述权利要求 1-10 中任一项的方法, 其中铸造包括选自 AA7040、AA7050 和 AA7x75 组成范围内的合金的铸锭。

16. 由根据前述权利要求中任一项方法生产的合金制成的具有高韧性和提高的抗疲劳裂纹扩展性的铝合金片材或板材产品。

17. 根据权利要求 16 的轧制合金片材产品, 其中所述产品是飞机或汽车的结构构件。

18. 根据权利要求 16 或 17 的轧制合金片材产品, 其中所述产品是飞机的机身蒙皮或车辆的组成零件。

---

19. 根据权利要求 16-18 中任一项的轧制合金产品, 其中所述轧制合金产品具有 2-7mm 范围的最终规格。

## 用于生产高损伤容限铝合金的方法

本发明公开了用以生产具有好的韧性和提高的抗疲劳裂纹扩展性、同时维持好的强度水平的高损伤容限铝轧制合金的方法，和具有这样高韧性和提高的抗疲劳裂纹扩展性的铝合金片材或板材产品。此外，发明涉及通过这个方法获得的合金产品的用途。

本领域已知，在许多涉及相对高强度的、例如飞机机身、车辆构件和其它应用的应用中使用可热处理的铝合金。铝合金 AA2024, AA2324 和 AA2524 是众所周知的可热处理铝合金，其在 T3、T39 和 T351 状态具有有用的强度和韧性性能。铝合金 AA6013 和 AA6056 也是众所周知的可热处理铝合金，其在 T4 和 T6 状态具有有用的强度和韧性性能，同时也具有好的抗疲劳裂纹扩展性。

已知，T4 状态条件指的是自然时效到基本上稳定的性能水平的固溶热处理和淬火的条件，而 T6 状态指的是通过人工时效产生的更为强烈的条件。

其它一些 AA2000 和 AA6000 系列的合金一般并不适用于商用飞机的设计，商用飞机对于不同结构类型需要不同性能。依赖于用以特定飞机部件的设计标准，即使在韧性和抗裂纹扩展性的小的提高，特别是对高  $\Delta K$ -值，会使得重量减轻，这会在飞机的寿命中节约燃料和/或有更高的安全水平。特别是对机身蒙皮或下机翼蒙皮，具有例如或是以断裂韧性的形式或是以抗疲劳裂纹扩展性形式的好的抗裂纹扩展性能是必要的。具有提高的损伤容限性能的以片材或是以板材使用的轧制合金产品将提高乘客的安全，将减少飞机的重量和将导致更长的飞行范围、更低的消耗和更低频率的维修间隔。

US-5, 213, 639 公开了使用铝基合金生产 AA2000 系列铝合金的方法，铝基合金进行热轧、加热和再次热轧，从而获得强度与高的断裂韧性和低的疲劳裂纹扩展率的好的组合。也公开了在 479-524℃ 之间

的温度热轧铸锭后，应用中间退火处理，和再次热轧中间退火的合金。据报道这种合金与传统的 AA2024-系列合金相比，在 T-L 断裂韧性上提高 5% 并在某种  $\Delta K$ -水平上具有提高的抗裂纹扩展性。

已经报道已知的 AA6056 合金在 T6 状态条件对晶间腐蚀是敏感的。为了克服这个问题 US-5, 858, 134 提供具有有限定化学组成的轧制或挤压产品的生产方法，由此，使产品达到过-时效状态条件，该方法在飞机部件厂商端需要费时费钱处理次数。这里，报道为了获得提高的抗晶间腐蚀性，在该方法中，合金中 Mg/Si 的比率小于 1 是必须的。

US-4, 589, 932 公开了用于例如汽车和航空结构的铝锻造合金产品，随后这种合金注册为 AA 命名 6013。在接近合金固相线温度的温度范围 449-582°C 已经固溶热处理这种铝合金。

EP-A-1143027 公开了生产具有有限定化学组成的 AA6000-系列的 Al-Mg-Si 合金的方法，且其中产品进行人工时效过程以改善合金和满足与优选用于航空应用的、但不是可焊的 AA2024-系列合金相类似的高损伤容限 (“HDT”) 特性。通过组成的各自作用来优化时效过程。

EP-1170394-A2 公开了具有提高的抗疲劳裂纹扩展性的铝合金片材产品，具有由平均长度与宽度之比大于约 4 的颗粒限定的各向异性的显微组织。通过各自片材产品与传统 AA2524-片材产品的比较，这种合金具有在抗压屈服强度性能的提高。通过高度的各向异性的颗粒结构，能提高抗疲劳裂纹扩展性。

WO-97/22724 公开了生产典型用于汽车应用的铝合金片材产品的方法和设备，通过在连续的卷取步骤前连续和快速的加热已进行固溶热处理和淬火的冷轧和热轧片材到预时效温度而具有提高的屈服强度。在快速加热后，环境冷却卷取形状的片材，快速加热和环境冷却提高了铝合金片材的涂料烘干 (paintbake) 响应。公开了优选快速加热卷取状片材到 65-121°C 之间，和选择环境冷却速率，优选为 1.1-3.3 °C/h。

本发明的目的在于提供生产铝合金产品的方法，该铝合金产品具有提高的韧性和提高的抗疲劳裂纹扩展性，由此保持传统 AA2000-

AA6000-, AA5000-或 AA7000-系列合金强度水平。更具体的, 本发明的目的在于提供对于抗疲劳裂纹扩展性、韧性、抗腐蚀性和强度具有平衡性能的高损伤容限 (“HDT”) 合金的改进的生产方法。HDT-性能应该优选的好于传统生产的 AA6013-T6、6056-T6 合金, 和优选的好于 AA2024-T3 或 AA2524-T3 合金。

更具体的, 当用于航空应用时, 对于优选在 AA6013 和 AA6056-系列的铝合金范围内的轧制 AA6000-系列铝合金存在一般的要求, 即疲劳裂纹扩展率 (“FCGR”) 应该不大于限定的最大值。满足高损伤容限 2024-系列合金产品要求的 FCGR 是例如在  $\Delta K=20\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$  时 FCGR 低于  $0.001\text{mm}/\text{循环}$ , 和在  $\Delta K=40\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$  时低于  $0.01\text{mm}/\text{循环}$ 。

本发明的另一个目的在于提供用于飞机工业中构造结构零件的轧制铝合金产品, 以及提供由这种合金生产的飞机蒙皮材料或提供汽车组成零件。

本发明通过独立权利要求的特征解决上述目的中一个或多个。

本发明的一个方面在于提供生产具有高韧性和提高的抗疲劳裂纹扩展性的高损伤容限铝合金的方法, 包括步骤

a) 铸造具有选自 AA2000, AA5000, AA6000 和 AA7000-系列合金的组成的铸锭;

b) 在铸造后, 均质化和/或预加热铸锭;

c) 热轧该铸锭成为热轧产品, 并可选的进一步冷轧该热轧产品成为冷轧产品, 特征在于该热轧产品以热轧机出口温度 ( $T_{\text{exit}}$ ) 离开热轧机并通过受控的冷却循环将该热轧产品从所述  $T_{\text{exit}}$  冷却到  $150^\circ\text{C}$ , 冷却速率在由  $T(t)=50-(50-T_{\text{exit}})e^{-\alpha t}$  定义的范围内, 其中  $T(t)$  是作为时间 (以小时表示) 函数的温度 ( $^\circ\text{C}$ ),  $t$  是时间 (以小时表示), 和  $\alpha$  (以  $\text{hrs}^{-1}$  表示) 是定义冷却速率的参数, 且  $\alpha$  在  $-0.09\pm 0.05$  ( $\text{hrs}^{-1}$ ) 范围, 和更优选的在  $-0.09\pm 0.03$  ( $\text{hrs}^{-1}$ ) 范围。

已经发现在  $150^\circ\text{C}$  温度以下, 冷却速率不再与获得根据本发明的优势中的一个或多个有关。

然而, 现有技术教导本领域技术人员铸造和热轧铸锭以获得板材



或片材产品，其中铸锭在热轧前可选的进行预处理或均质化，热轧产品非常快的失去其高温，因此损害了产品的性能。已经发现，根据本发明通过在升高的温度维持该热轧产品预定的时间并对其进行受控的冷却循环，能提高这种轧制产品的例如韧性和抗裂纹扩展性的损伤容限性能。

在工业规模实践中，典型的热轧机出口温度在 350-500℃ 的范围，并依赖于合金，例如对 AA6xxx 出口温度将是该范围的上端即大约 420-500℃，而对 AA2xxx 和 AA7xxx-系列合金出口温度将是该范围的下端即大约 350-425℃。

卷取形式的冷却的热轧产品的进一步冷轧是可选的。冷轧可以是等断面轧制或横轧。在冷轧前、过程中或之后的另外的中间退火步骤也是可选的。

此外，可能对热轧产品进行卷取以获得卷取形式，从而获得受控的冷却速率直到产品冷却到室温。然后，可能切割卷材到坯材，然后再进一步冷轧。通过这个发明的工艺路线生产的材料与没有进行卷取的在热轧中或热轧后切割成坯材(标准的板材路线)的那些热轧产品或在冷轧后进行卷取(标准的片材路线)的那些产品相比，展现出更好的性能平衡。

对热轧产品进行受控的冷却循环的第二可替换方式是将合金在热轧后连续移动通过炉的步骤，其中所述的炉是可调节的以在转到冷轧位置或卷取位置时为该合金提供热和/或冷。

在另外的可替换方式中，轧制产品被第一热轧到所需的规格，并然后使用常规冷却方法冷却到室温。之后，冷却的热轧产品再次加热到热轧机出口温度，并然后使用根据发明的受控的冷却循环冷却到低于 150℃，并随后进一步处理。

依赖于生产片材或板材，热轧产品或是在热轧后提供到所述的炉或是在热轧后卷取，其中在卷材上进行进一步处理(片材路线)。如果在热轧中或热轧后切割产品成板材，在由此生产的板材上进行进一步处理。

炉优选是可调节的，依赖于冷却速率、离开热轧位置的热轧产品的厚度和其它尺寸，在接近热轧位置提供各种量的热和在离热轧位置较远距离提供其他量的热。

当热轧产品通过卷取进行受控的冷却循环时，可能在热轧后在各自的炉中卷取合金，其中所述炉也优选是可调节的以提供热量以控制冷却循环。

在一个实施方式中，在以热轧机出口温度离开热轧机时，热轧产品具有最高到 12mm 范围的规格，优选 1-10mm 范围，更优选 4-8mm 范围。

在热轧产品进一步进行冷轧操作时，优选总的冷轧压下量是 40-70% 以进一步优化机械性能。轧制合金产品的最终规格优选是 2-7mm 范围。

根据本发明的方法可进一步包括一个或多个以下步骤：

d) 在足以将合金中的可溶组分置于固溶体中的温度和时间下，对经过受控冷却循环后的热轧产品或冷轧产品进行固溶热处理；

e) 通过喷洒淬火或在水中或其它淬火介质中的浸渍淬火来淬火固溶热处理的合金产品；

f) 可选的，拉伸或压制淬火的合金产品或另外的冷加工方法以释放应力，例如片材产品的矫平；

g) 可选的时效淬火并可选的拉伸或压制的合金产品以获得所需的状况，所需的状况依赖与合金的化学组成，但包括 T3、T351、T6、T4、T74、T76、T751、T7451、T7651、T77、T79 状态。

此外，可能在第一热轧操作后退火和/或再加热热轧铸锭，并然后根据本发明在冷却后再次热轧该产品到最终的热轧规格。此外，可能在冷轧前和/或冷轧过程中中间退火热轧的产品。这些已知的现有技术能有利的在根据本发明的方法中使用。

根据本发明，当使用受控冷却循环时平均冷却速率是 12-20℃/小时范围。

本发明的一个实施方式中，用于如这里公开的方法的处理路线中

的铸锭，包括下面组成（重量%）：Si 0.6-1.3、Cu 0.04-1.1、Mn 0.1-0.9、Mg 0.4-1.3、Fe 0.01-0.3、Zr<0.25、Cr<0.25、Zn<0.6、Ti<0.15、V<0.25、Hf<0.25，其它元素，特别是杂质，每种少于0.05和总量少于0.20，余量的铝。更优选的，合金在AA6013或AA6056的组成范围内。

本发明的另一个实施方式使用的铸锭包括下面组成（重量%）：Cu 3.8-5.2、Mg 0.2-1.6、Cr<0.25、Zr<0.25和优选0.06-0.18、Mn ≤ 0.50和Mn>0，和优选>0.15、Fe ≤ 0.15，Si ≤ 0.15，和含Mn弥散体，和附带的元素和杂质，每种少于0.05和总量少于0.15，和余量基本上，且优选的，其中含Zr弥散体至少部分替代含Mn弥散体。

根据本发明方法的另一个实施方式，使用的铸锭包括下面组成（重量%）：Zn 5.0-9.5、Cu 1.0-3.0、Mg 1.0-3.0、Mn<0.35、Zr<0.25且优选0.06-0.16、Cr<0.25、Fe<0.25、Si<0.25、Sc<0.35、Ti<0.10、Hf和/或V<0.25、其它元素，典型为杂质，每种少于0.05和总量少于0.15，余量的铝。典型的实施例是在AA7040、AA7050和AA7x75范围的合金。

根据本发明的另一个方面，公开了具有高韧性和提高的抗疲劳裂纹扩展性的、根据如上已经描述的和将在下面更为具体描述的方法生产的合金产品制成的铝合金片或板材产品。更具体的是，本发明最适合生产作为飞机或汽车的结构构件的轧制合金片材产品。这种轧制的片材产品能用于例如飞机的机身蒙皮或车辆的组成零件。

根据本发明的方法和合金产品的前述的和其它特征和优点将从下面的优选的实施方式和附图的详细描述变得显而易见，其中

图1是使用根据这个发明的方法在热轧后冷却的铝合金的典型冷却曲线。

实施例

实施例1

在本发明的第一优选实施方式中，铸造两种传统的合金（AA6013和AA6056）并加工成为片材产品。这里，使用两种处理的变体：

路线 1. 使用通过实验室铸造传统 AA6013 和 AA60156-合金组成铸锭的常规处理路线。80×80×100mm 的坯块被锯下、均质化、预加热和热轧到 4.5mm 片材。在热轧后，通过环境空气冷却到室温将热轧产品常规冷却到环境温度，提供到冷轧位置，冷轧到 2mm，并在 550℃ 热处理 20 分钟，然后淬火和时效到 T6-状态 190℃ 4 小时。

路线 2. 传统 AA6013 和 AA6056-合金组成的铸锭进行实验室铸造并锯为 80×80×100mm 尺寸。这些坯块进行均质化、预加热和热轧到 4.5mm。通过对热轧产品施加与全尺寸生产中的卷取相似温度历史，进行工业规模的热卷取的模拟。其它的处理步骤保持与路线 1 相似。在冷轧后，冷轧产品在 550℃ 热处理 20 分钟、淬火、然后时效到 T6 状态 190℃ 4 小时。结果在表 1 中给出。

表 1. 根据如上描述路线 1 和路线 2 处理的在两种不同热轧机出口温度设置下 6013 和 6056-合金组成的使用小型 Euronorm 的强度 ( $R_p$ 、 $R_m$ )、缺口韧性 ( $TS/R_p$ )、晶间腐蚀 (IGC) 深度和类型的总结。

合金 编号	路 线	热轧出口温 度 (°C)	$R_p$ (MPa)	$R_m$ (MPa)	$TS/R_p$	IGC 深度 ( $\mu m$ )	IGC 类型
1 6013	2	490	354	390	1.75	101	P(i)
2	1	490	344	381	1.72	118	I
3	2	450	345	385	1.73	97	I
4	1	450	337	377	1.63	108	I
5 6056	2	490	347	386	1.85	112	I
6	1	490	349	388	1.79	177	I+
7	2	450	328	372	1.75	103	P(i)
8	1	450	331	375	1.70	143	I

从表 1 中可以看出，轧制产品通过维持好的拉伸屈服强度和极限拉伸强度水平表现出更高热轧温度下更好的缺口韧性。此外，提高了晶间腐蚀，以至进行关于抗疲劳裂纹扩展性的进一步测试 (表 2)。

表 2. 表 1 中样品 1、2 和 5、6 (较高热轧温度) 在两种不同  $\Delta K$ -水平的抗疲劳裂纹扩展性 (“FCGR”) 的总结。

合金	路线	热轧出口温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )	FCGR	
			$\Delta K=30\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$	$\Delta K=40\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$
6013	2	490	1.83E-03	5.26 E-03
	1	490	1.84E-03	8.88 E-03
6056	2	490	1.62E-03	3.32 E-03
	1	490	1.66E-03	4.89 E-03

尽管本发明产品的抗疲劳裂纹扩展性在较低  $\Delta K$  值与根据标准工艺路线生产产品的抗疲劳裂纹扩展性几乎相同, 但提高了在较高  $\Delta K$  值的抗疲劳裂纹扩展性。

根据本发明另一个优选的实施方式, 在全尺寸生产试验中已生产出低铜高损伤容限 AA6000-系列合金组成。组成在表 3 中给出。

表 3. 高损伤容限 AA6000-系列片材产品以重量%的组成, 余量的铝和不可避免的杂质。

Si	Fe	Cu	Mg	Mn	Zn
1.14	0.18	0.32	0.70	0.71	0.08

处理合金到具有 4.5mm 热轧规格的片材产品。然后应用下面三个处理变化:

路线 1. 标准处理路线。(在热轧后没有卷取步骤)

路线 2. 具有在热轧后的卷取、以及在相同方向上的热轧和冷轧的发明处理路线。

路线 3. 具有在热轧后的卷取、以及在不同方向上的热轧和冷轧(横轧)的发明处理路线。

将三种上述的处理变化应用于下面的一般的处理路线:

a. DC 铸造具有表 3 合金组成的铸锭。

b. 均质化铸锭。

c. 在  $510^{\circ}\text{C}$  预热均质化的铸锭 6 小时, 且然后热轧预热的铸锭, 使得出口温度约为  $450^{\circ}\text{C}$ , 规格 4.5mm。

- d1. 无卷取 (= 路线 1)。  
 d2. 卷取、冷却和切割成板材 (= 路线 2)。  
 d3. 卷取、冷却和切割成板材 (= 路线 3)。  
 e1. 冷轧到 2mm 最终规格 (路线 1)。  
 e2. 在与热轧相同的方向上冷轧到 2mm 最终规格 (路线 2)。  
 e3. 在与热轧不同的方向上冷轧 (横轧) 到 2mm 最终规格 (路线 3)。  
 f. 550℃ 热处理 2 小时。  
 g. 拉伸冷轧产品 1.5-2.5%。  
 h. 时效到 T6 状态 190℃ 4 小时。

表 4. 使用依据表 3 的合金和上述三种处理路线 1、2 和 3 的最终产品的使用小型 Euronorm 的强度 ( $R_p$ 、 $R_m$ )、缺口韧性 ( $TS/R_p$ )、晶间腐蚀 (IGC) 的总结。

路线	$R_p$	$R_m$	$R_p$	$R_m$	TS/ $R_p$	IGC 深度 ( $\mu\text{m}$ )
	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)		
	L 方向		LT 方向		T-L 方向	
1	334	345	322	344	1.51	62
2	329	344	321	341	1.60	48
3	333	344	326	347	1.58	49

尽管能维持强度水平，但根据处理路线 2 和 3 生产的轧制产品显示出更好的缺口韧性和更好的晶间腐蚀性能。因此，也进行抗疲劳裂纹扩展性的测试并在表 5 和 6 中给出。

表 5. 根据上述处理路线 1、2 和 3 生产的产品在 5 种不同  $\Delta K$ -值的以 mm/循环表示的抗疲劳裂纹扩展性。

$\Delta K$ (MPa $\sqrt{\text{m}}$ )	路线 1	路线 2	路线 3
10	1.52E-04	1.71E-04	1.78E-04
20	1.43E-03	8.58E-04	1.26E-03
30	6.14E-03	3.38E-03	5.17E-03
40	1.70E-02	9.54E-03	-
50	3.73E-02	1.85E-02	-

表 6. 相对于标准 (路线 1) 的表 5 的值。

$\Delta K$ (MPa $\sqrt{m}$ )	线路 1	线路 2	线路 3
10	100%	113%	117%
20	100%	60%	88%
30	100%	55%	84%
40	100%	56%	-
50	100%	50%	-

上述样品显示出, 通过使用本发明方法能提高片材和板材产品的损伤容限性能, 特别是能提高较高 $\Delta K$ 值的抗疲劳裂纹扩展性。

#### 实施例 2

图 1 显示了铝 AA7050 合金从 440°C 热轧出口温度冷却到低于 150°C 温度时的典型连续冷却曲线, 由此根据这个发明的方法的一个实施方式, 金属片材具有 4.5mm 的规格, 且在离开热轧机时立即进行卷取。卷材的宽度是 1.4m。对于卷材的最热点 (中心, 如图 1 中 HotSpt 所示) 和最冷点 (卷材边缘, 如图 1 中 ColdSpt 所示), 表 7 中也给出作为时间函数的该卷材温度。表 7 也提供了具有 2.8m 宽卷材的情况的温度。

如图 1 冷却曲线所示,  $\alpha$  约为  $-0.084\text{hrs}^{-1}$ 。

使用常规冷却技术, 即在离开热轧机后放置板材在正常静止空气中冷却而没有任何卷取等操作, 使具有约 4.0-4.5mm 规格的片材从热轧机出口温度冷却到低于 150°C, 在此情况下, 典型的  $\alpha$  为  $-0.5 - -2\text{hrs}^{-1}$  范围, 结果是这种板材在小于 3 小时的时间内从热轧机出口温度冷却到 150°C 或更低温度。

受控的冷却循环遵循上述和权利要求中规定的等式, 卷取产品形式从 440 到 150°C 的平均冷却速率是 12-20°C/小时范围。

表 7. 当具有 4.5mm 卷取规格的 AA7050 合金根据发明冷却时，作为时间函数的卷材温度。

时间 (小时)	卷宽 1.4 米		卷宽 2.8 米	
	最冷点 (°C)	最热点 (°C)	最冷点 (°C)	最热点 (°C)
0	431	440	431	440
2	344	372	349	385
6	249	266	262	287
10	187	199	204	222
12	165	175	182	197
14	146	150	163	176
16	130	137	148	159
18	117	123	134	144

现在已全部描述了发明，但对本领域技术人员而言，没有偏离这里描述的发明范围和主旨的许多变化和改变是显而易见的。



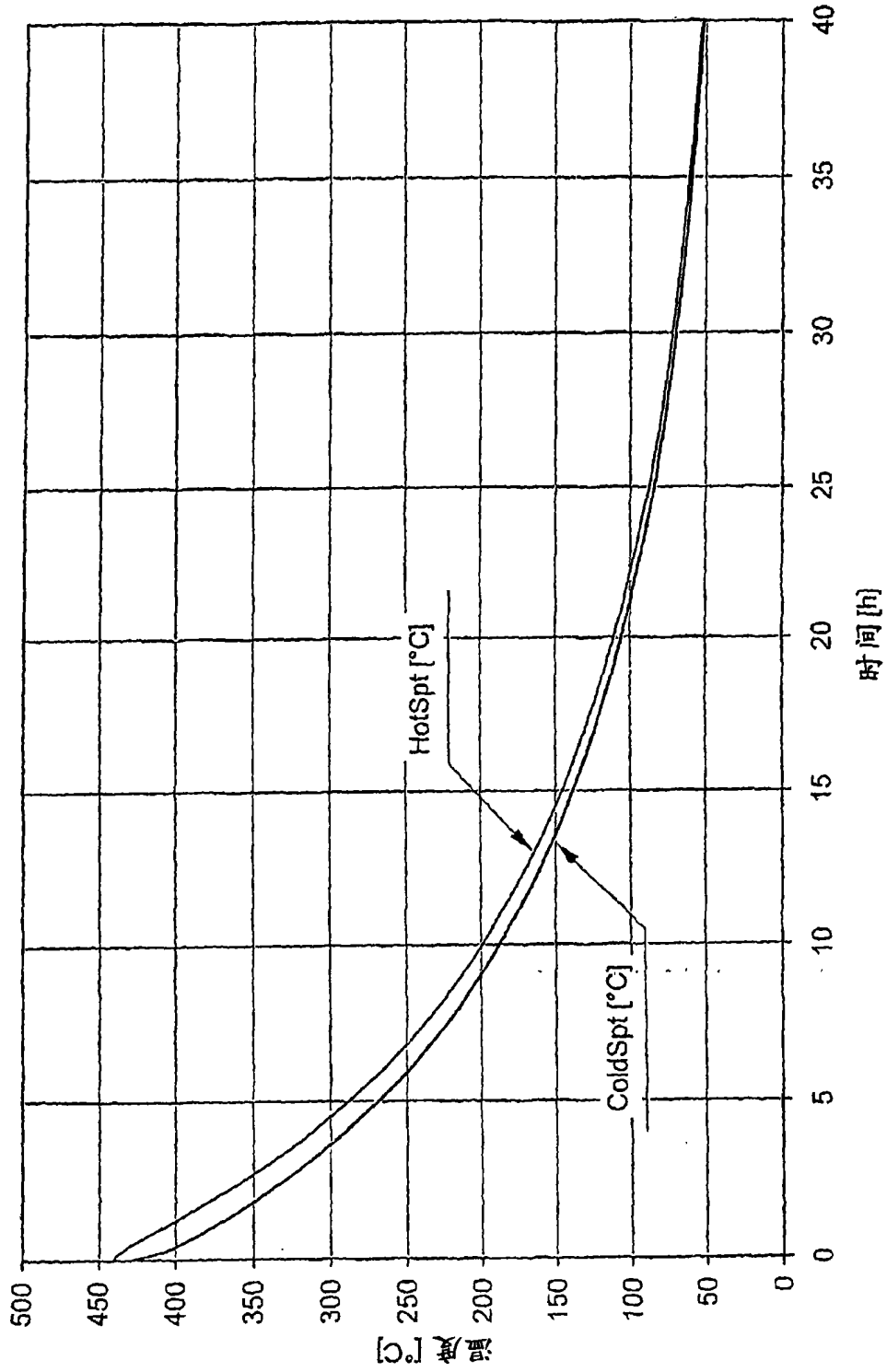


图 1