



(12) 发明专利



(10) 授权公告号 CN 110741103 B

(45) 授权公告日 2022.03.25

(21) 申请号 201880037704.2

(22) 申请日 2018.06.05

(65) 同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 110741103 A

(43) 申请公布日 2020.01.31

(30) 优先权数据
1755031 2017.06.06 FR

(85) PCT国际申请进入国家阶段日
2019.12.06

(86) PCT国际申请的申请数据
PCT/FR2018/051298 2018.06.05

(87) PCT国际申请的公布数据
W02018/224767 FR 2018.12.13

(73) 专利权人 伊苏瓦尔肯联铝业
地址 法国伊苏瓦尔

(72) 发明人 R·惠切尔 M·雷维拉-博达尔
P·扎瑞 B·贝斯 F·马斯

(74) 专利代理机构 北京北翔知识产权代理有限公司 11285
代理人 王媛 杨金娟

(51) Int.Cl.
G22C 21/00 (2006.01)
G22C 21/12 (2006.01)
G22C 21/16 (2006.01)
G22C 21/18 (2006.01)

(56) 对比文件
CN 102021378 A, 2011.04.20
CN 105543595 A, 2016.05.04
审查员 周海峰

权利要求书3页 说明书13页 附图4页

(54) 发明名称

具有改善的疲劳特性的含锂铝合金

(57) 摘要

一种具有改善的机械强度和韧性的含锂铝合金。本发明涉及一种2XXX合金锻制产品,其包含0.05至1.9重量%的Li和0.005至0.045重量%的Cr和/或V。本发明还涉及一种铸造的2XXX合金未锻制产品,其包含0.05至1.9重量%的Li和0.005至0.045重量%的Cr和/或V。最后,本发明涉及一种飞机结构元件,优选其中蒙皮和加强件源自相同起始材料的下表面或上表面元件、翼梁或肋骨,其包括锻制产品。

1. 基于铝的轧制、挤压和/或锻造的2XXX合金产品,其包含以重量%计的下述组分:

Li:0.05-1.9;

Cu:1.0-6.0;

Cr和/或V:0.035-0.044;

Mg:0.2-0.6,排除0.6;

Zr:0.07-0.15;

Mn:0.0-0.6;

Zn: <0.8;

Ag:0-0.5;

Fe+Si <0.2;

至少一种选自Hf、Ti、Sc或其他稀土元素的能够控制晶粒尺寸的元素:

Sc:0.02-0.1;

其他稀土元素:0.02-0.1;

Hf:0.02-0.5;

Ti:0.01-0.15;

其他元素各自 ≤ 0.05 且总计 ≤ 0.15 ,余量为铝;

其中所述产品基本上不含具有V和/或Cr的分散体。

2. 根据权利要求1所述的产品,其具有金属间相的平均密度d,以每 mm^2 的相数表示,使得:

$$d < -0.0023e^2 + 0.0329e + 160.91$$

其中e=产品厚度,以mm计。

3. 根据权利要求1或2所述的产品,其包含3.2至4.0重量%的Cu。

4. 根据权利要求1所述的产品,其包含0.5至1.5重量%的Li。

5. 根据权利要求4所述的产品,其包含0.7至1.2重量%的Li。

6. 根据权利要求5所述的产品,其包含0.80至0.95重量%的Li。

7. 根据权利要求1所述的产品,其包含小于0.7重量%的Zn。

8. 根据权利要求1所述的产品,其包含0.07至0.11重量%的Zr。

9. 根据权利要求8所述的产品,其包含0.08至0.10重量%的Zr。

10. 根据权利要求1所述的产品,其包含0.035至0.043重量%的Cr和/或V。

11. 根据前述权利要求1所述的产品,其中基于铝的合金包含以重量%计的下述组分:

Cu:3.2-4.0;

Li:0.80-0.95;

Cr和/或V:0.035-0.044;

Zn:0.45-0.70;

Mg:0.2-0.6,排除0.6;

Zr:0.07-0.15;

Mn:0.1-0.6;

Ag:<0.15;

Fe+Si ≤ 0.20 ;

至少一种选自下述的元素

Ti:0.01-0.15;

Sc:0.02-0.1;

Hf:0.02-0.5;

其他元素各自 ≤ 0.05 且总计 ≤ 0.15 ,余量为铝。

12.根据权利要求1所述的产品,其中基于铝的合金是AA2050合金。

13.根据权利要求1所述的产品,其厚度为12至175mm。

14.根据权利要求13所述的产品,其厚度为30至140mm。

15.根据权利要求14所述的产品,其厚度为40至110mm。

16.根据权利要求15所述的产品,其厚度为40至75mm。

17.根据权利要求1所述的产品,其在已轧制、固溶热处理、淬火、消除应力、并且时效处理的状态下,对于12至175mm的厚度,在240,000次循环时具有以MPa表示的疲劳质量指数FQI,使得:

$$FQI > -0.0886e+177$$

其中e=产品厚度,以mm计。

18.根据权利要求17所述的产品,其中通过拉伸而消除应力。

19.根据权利要求1所述的产品,其在已轧制、固溶热处理、淬火、消除应力、并且时效处理的状态下,与除了Cr和V含量之外具有相同组成的合金产品相比,具有至少一种以下改进的性能的折衷:

-Rp0.2 (L) 和K1C (L-T) ,

-Rp0.2 (TL) 和K1C (T-L) ,

-Rp0.2 (TC) 和K1C (TC-L) 。

20.根据权利要求19所述的产品,其中通过拉伸而消除应力。

21.根据权利要求19所述的产品,其与除了Cr和V含量之外具有相同组成的合金产品相比,具有至少两种以下改进的性能的折衷:

-Rp0.2 (L) 和K1C (L-T) ,

-Rp0.2 (TL) 和K1C (T-L) ,

-Rp0.2 (TC) 和K1C (TC-L) 。

22.基于铝的2XXX合金铸造未锻制产品,其包含0.05至1.9重量%的Li和0.035至0.044重量%的Cr和/或V,其特征在于,与除了V和Cr含量之外具有相同组成的合金铸造未锻制产品相比,其具有更呈树枝状的晶粒。

23.根据权利要求22所述的铸造未锻制产品,其在所述产品的四分之一厚度处,具有大于 $1.0\mu\text{m}^{-1}$ 的参数 s^* ,而参数 p^* 小于 $100\mu\text{m}$,

其中参数 p^* 由以下方程式定义

$$A = A_{\min} + \frac{A_{\max} - A_{\min}}{(1 + \exp(\alpha(p^* - i)))}$$

并且,其中参数 s^* 由以下方程式定义

$$s^* = \frac{\alpha \times (A_{\max} - A_{\min})}{4}$$

其中

A表示转变后物体的表面分数，

$A_{\min}$ 表示阈值转换后金属间粒子的初始表面分数，

$A_{\max}$ 表示对应于为了预防在填充结束时收敛缓慢的问题而停止运算的常规填充的表面分数，

i是计算步骤数，

以及 α 是S形曲线的斜率的调整系数。

24. 根据权利要求22或23所述的铸造未锻制产品，其通过斜率-截距法确定的铸件的晶粒尺寸为：

-在二分之一厚度处为250至350 μm ，

-在四分之一厚度处为175至275 μm 。

25. 飞机结构元件，其包括根据权利要求1至21中任一项所述的产品。

26. 根据权利要求25所述的飞机结构元件，其为其中蒙皮和加强件源自相同起始产品的下表面或上表面元件、翼梁或肋骨。

具有改善的疲劳特性的含锂铝合金

技术领域

[0001] 本发明涉及基于铝的含锂2XXX合金产品,更具体而言,涉及所述产品、其制造方法和特别是用于航空和航天构造的用途。

背景技术

[0002] 开发铝合金产品,以制备特别是用于航空工业和航天工业的结构元件。

[0003] 铝锂合金特别有希望用于制造此类产品。航空工业对抗疲劳性的要求很高,这对较厚产品特别难达到。实际上,考虑到铸锭的可能厚度,通过热变形实现的厚度减小相当小,因此,在热变形期间,产生疲劳裂纹的铸造相关部位的尺寸仅略微减小。

[0004] Al-Li合金提供的性能折衷通常高于常规合金,特别是在疲劳、耐损伤性和机械强度之间的折衷方面。这特别使得可减小Al-Li合金锻制产品的厚度,从而进一步使它们提供的重量减小最大化。然而,这使得当前的应力增加,从而导致疲劳裂纹产生的风险更高。因此,令人感兴趣的是改善Al-Li合金产品的抗疲劳性。

[0005] 在申请W0 2012/110717中,为了改善特别是疲劳方面的性能,提出了特别包含至少0.1%的Mg和/或0.1%的Li的铝合金以在铸造期间进行超声处理。然而,这类处理需要对铸造炉进行实质性的修改,并且对于制造厚板材所需的量而言仍难以进行。

[0006] 申请US 2009/0142222记载了可包含以下元素的合金:3.4-4.2重量%的Cu,0.9-1.4重量%的Li,0.3-0.7重量%的Ag,0.1-0.6重量%的Mg,0.2-0.8重量%Zn,0.1-0.6重量%的Mn和0.01-0.6重量%的至少一种控制晶粒结构的元素,余量为铝、其他元素和杂质。

[0007] 申请W0 2015/086921记载了包含以下元素(以重量%计)的合金:Cu:2.0-6.0;Li:0.5-2.0;Mg:0-1.0;Ag:0-0.7;Zn:0-1.0;以及至少一种选自Zr、Mn、Cr、Sc、Hf和Ti的元素,如果选择所述元素,则其用量如下:Zr为0.05至0.20重量%,Mn为0.05至0.8重量%,Cr和Sc为0.05至0.3重量%,Hf为0.05至0.5重量%,Ti为0.01至0.15重量%,余量为铝、其他元素和杂质。

[0008] 总体上,Al-Cu-Li合金由铝业协会(The Aluminum Association)出版的《International alloy designations and chemical composition limits for wrought aluminum and alloy》已知。已知的实例为AA2050、AA2055、AA2098、AA2099合金。然而,在所有已知合金中,均未添加0.005至0.045重量%的Cr和/或V。

[0009] 需要这样的Al-Li合金产品,其与已知产品相比具有改善的性能,特别是在疲劳性能方面,同时仍具有有利的韧性和静态机械强度性能。此外,还需要一种用于获得这些产品的简单且经济的方法。

发明内容

[0010] 本发明的目的是一种基于铝的轧制、挤压和/或锻造的2XXX合金产品,包含0.05至1.9重量%的Li和0.005至0.045重量%的Cr和/或V。

[0011] 根据一个实施方案,本发明的所述锻制产品具有金属间相的平均密度d,以每 mm^2

的相数表示,使得

[0012] $d < -0.0023e^2 + 0.0329e + 160.91$

[0013] 其中 e =产品厚度,以mm计。

[0014] 有利地,所述锻制产品基本上不含具有V和/或Cr的分散体。

[0015] 本发明的另一个目的是一种基于铝的2XXX合金铸造未锻制产品,其包含0.05至1.9重量%的Li和0.005至0.045重量%的Cr和/或V。与除了V和Cr含量之外具有相同组成的合金铸造未锻制产品相比,所述铸造未锻制产品具有更呈树枝状的晶粒。

[0016] 最后,本发明的目的是一种飞机结构元件,优选是其中蒙皮(peau)和加强件(raidisseur)由相同起始产品制备的下表面或上表面元件、以及翼梁(longeron)或肋(nervure),其包括上述的轧制、挤压和/或锻造产品。

附图说明

[0017] 图1示出了取自实施例1的合金铸锭的二分之一厚度处的样品获得的显微照片(图1a:合金C,图1b:合金A,图1c:合金B)

[0018] 图2示出了取自实施例1的合金铸锭的四分之一厚度处的样品获得的显微照片(图2a:合金C,图2b:合金A,图2c:合金B)

[0019] 图3是用于疲劳的带孔测试件的示意图。提及的尺寸是以示例说明的方式,但可按照说明书中所述的更改。

[0020] 图4示出了实施例3的合金板材在240,000次循环时的疲劳质量指数FQI(以MPa表示)与厚度(以mm计)的关系图,该图还示出了由现有技术的AA2050合金产品获得的结果的趋势曲线(多项式回归)。

[0021] 图5表示合金G和K根据实施例4的时效动力学获得的 $K_{IC}(T-L)$ (以 $MPa \sqrt{m}$ 表示)和 $R_{p0.2}(LT)$ (以MPa表示)之间的折衷。

[0022] 图6表示本发明的板材的金属间相平均密度(相数/ mm^2)与厚度 e (以mm表示)的关系图。该图还示出了由现有技术的AA2050合金产品获得的结果的趋势曲线(多项式回归)。

具体实施方式

[0023] 除非另有说明,否则关于合金化学组成的所有说明均以基于合金总重量计的重量百分比表示。表述1.4Cu意指以重量%表示的铜含量乘以1.4。合金命名符合本领域技术人员已知的铝业协会的规则。当浓度以ppm(百万分比)表示时,该说明也指质量浓度。

[0024] 除非另有说明,否则适用欧洲标准EN 515(1993)中规定的冶金状态的定义。

[0025] 除非另有说明,否则适用标准EN 12258的定义。型材的厚度根据标准EN 2066:2001定义:将横截面分为尺寸为A和B的基本矩形;A始终是基本矩形的最大尺寸,而B可被视为基本矩形的厚度。

[0026] 拉伸时的静态机械特性,即极限拉伸强度 R_m 、在0.2%伸长率下的常规屈服强度 $R_{p0.2}$ 和断裂伸长率A%,根据标准NF EN ISO 6892-1(2016)通过拉伸试验测定,取样和测试方向由标准EN 485(2016)定义。

[0027] 应力强度因子(K_{IC})根据标准ASTM E 399(2012)确定。

[0028] 带孔的测试件的疲劳特性根据标准EN 6072(2010)在环境空气中针对变化的应力

水平,在50Hz频率、应力比 $R=0.1$ 下,在平坦测试件($K_t=2.3$)上在方向L-T上测量。

[0029] 使用沃克(Walker)方程式确定最大应力值,其表示在240,000次循环时50%未断裂。为此,计算韦勒曲线(courbe de **Wöhler**)上每个点的疲劳质量指数(FQI),其代表施加的应力大小 S 与循环次数 N 之间的关系,公式为:

$$[0030] \quad S = S_{lim} + (FQI - S_{lim}) (N/N_0)^{1/p}$$

[0031] 其中 S 是所施加的应力大小, S_{lim} 是疲劳极限, N 是直到断裂的循环数, N_0 等于240,000, p 是指数。报道对应于中值的FQI,即240,000次循环时50%断裂的值。特别地,FQI的含义记载在文章《Démarches de calcul en fatigue dans le domaine aéronautique (structures métalliques)》(Duprat,D.(1999) Congrès《Dimensionnement en fatigue des structures:démarche and outils》,巴黎,1999年6月2-3日;Société **Française** de Métallurgie et de Matériaux.Journées de printemps N 18,巴黎,法国(1999年6月2日),第2.1-2.8页。

[0032] 在本发明的框架中,铸件的微结构特别地由参数 p^* (尺寸 $[\mu m]$)和 s^* (尺寸 $[\mu m^{-1}]$)表征。这些参数更具体地表征了显微偏析的精细度和均匀性。参数 p^* 表征了固化结构中沉淀物之间的平均距离,因此表征了没有沉淀物的区域的平均尺寸。参数 s^* 表征了这些距离分布的均匀性。这两个参数的确切定义及其测试方法明确记载在Ph.Jarry、M.Boehm和S.Antoine的文章《Quantification of Spatial Distribution of as-cast Microstructural Features》,发表于Proceedings of the Light Metals 2001 Conference,Ed.J.L.Anjier,TMS,第903-909页。参数 p^* 确定是VIRCAST欧洲项目框架中的一项实验室间测试的主题,参见Ph.Jarry和A.Johansen的文章“Characterisation by the p^* method of eutectic aggregates spatial distribution in 5xxx and 3xxx aluminum alloys cast in wedge molds and comparison with SDAS measurements”,发表于Solidification of Alloys,ed.M.G.Chu,D.A.Granger and Q.Han,TMS 2004。参数 p^* 和 s^* 基于对未锻制形式的抛光剖面的光学显微镜分析,放大倍数通常为50,或者在所研究微观结构的代表性选样和所需的分辨率之间提供良好折衷的任何其他放大倍数。获取图像通常由连接到图像分析计算机的CCD(电荷耦合器件)型彩色相机进行。分析过程在上述Ph.Jarry、M.Boehm和S.Antoine的文章中详细描述,包括以下步骤:

[0033] a. 获取图像

[0034] b. 暗相的阈值转换和具有灰度级的图像的二进制分析,

[0035] c. 抑制尺寸过小的相(放大倍数50,将小于5像素的组视为电子噪声),

[0036] d. 使用关闭算法(algorithme de fermeture)对图像进行数字分析。

[0037] 图像的数字分析包括以递增步骤的迭代闭合图像。闭合图像 C_i 的步骤 i 由下述定义:将相同物体的图像连续扩展 i 次(扩展包括将图像的每个像素替换为其相邻像素的最大值),随后将图像 d 的相同物体的图像连续腐蚀 i 次(腐蚀包括将图像的每个像素替换为其相邻像素的最小值)(请注意,腐蚀和扩展的操作不可交换)。绘制出表面比 A 随闭合步骤 i 的数量的变化,表面比 A 代表物体的表面分数。得到S形曲线,然后通过S形函数调整所述S形曲线,以由此推断出特征参数 p^* 和 s^* ,已知 p^* 是拐点的横坐标,以长度单位表示,而 s^* 是在S形曲线在拐点处的斜率。

[0038] 因此,参数 p^* 由以下方程式定义:

$$[0039] \quad A = A_{\min} + \frac{A_{\max} + A_{\min}}{(1 + \exp(\alpha(p^* - i)))}$$

[0040] 其中

[0041] A 表示转变后物体的表面分数,

[0042] $A_{\min}$ 表示阈值转换后金属间粒子的初始表面分数,

[0043] $A_{\max}$ 表示对应于为了预防在填充结束时收敛缓慢的问题而停止运算(实际上为90%)的常规填充的表面分数,

[0044] i 是计算步骤数,

[0045] 以及 α 是S形曲线的斜率的调整系数。

[0046] 参数 p^* 代表矩阵中存在的粒子之间的平均距离。

[0047] 另一个参数是 s^* ,其由以下方程式定义:

$$[0048] \quad s^* = \frac{\alpha \times (A_{\max} - A_{\min})}{4}$$

[0049] 已表明, $1/s^*$ 与粒子之间的第一相邻粒子的距离分布的标准偏差成正比。因此,参数 s^* 是矩阵中相位分布的规律性的量度。

[0050] 因此,通过参数 s^* 和 p^* 对铸件结构的描述的确同时考虑了显微偏析的精细度和均匀性二者。申请人已观察到, s^* 对于描述粒子分布的规律性更重要,而 p^* 对于描述其空间分布的精细度更重要。

[0051] 在本发明的框架中,铸件的微观结构还根据0至2的得分半定量地表征:得分0=主要为球状的晶粒,得分1=弱树枝状的晶粒,得分2=强树枝状的晶粒。该半定量评估通过将铸锭在阳极氧化(稀 HBF_4 溶液,开路电压为30V,蚀刻时间为60至180s)后,在四分之一或二分之一厚度处取样,由样品的显微照片进行。实施例1(表3,图1和2)详细示出了如上所述的得分0、1或2与显微照片之间的对应关系。图1a和2a代表得分0,图1c和2c代表得分1,图1b和2b代表得分2。

[0052] 在本发明的框架中,通过扫描电子显微镜表征了锻制板材在二分之一厚度($t/2$)和四分之一厚度($t/4$)处的微观结构,以测定金属间相在微米级的分散和尺寸。金属间相,也称为“组成粒子”,是在固化过程中形成的不溶相,例如 $\text{Al}_6(\text{FeMn})$ 、 Cu_2FeAl_7 或 FeAl_3 相。它们的尺寸大于 $1\mu\text{m}$,通常为2至 $50\mu\text{m}$ 。

[0053] 除非另有说明,否则适用标准EN 12258-1(1998)的定义。特别地,根据本发明,板材是具有矩形横截面的轧制产品,其均匀厚度至少为6mm并且不超过宽度的1/10。

[0054] 此处,机械构造的“结构元件”用于指这样的机械部件,其静态和/或动态机械性能对结构性能特别重要,并且通常规定结构计算或进行结构计算。它们通常是其故障可能危及所述构造、其使用者或其他人安全的元件。对于飞机,这些结构元件特别包括构成机身的元件(例如机身蒙皮(英文为fuselage skin))、机身加强件或纵梁(stringer)、舱壁(bulkhead)、圆周框架(circumferential frame)、机翼(例如机翼蒙皮(wing skin))、加强件(stringer or stiffener)、肋(rib)和翼梁(spar)和特别是由水平或垂直稳定器(horizontal or vertical stabilizer)的尾翼,以及地板横梁(floor beam)、座椅轨道(seat track)和门。

[0055] 出人意料地,本发明人观察到,可获得基于铝的含锂2xxx合金板材——即根据铝合金的铝业协会定义的Al-Cu合金,其主要添加剂元素为铜,并且其添加剂元素的含量大于1重量%——通过选择铬和/或钒相对于所述合金的特定量和临界量、更特别是通过具体地添加0.005至0.045重量%的Cr和/或V,其具有改善的疲劳性能,同时仍具有有利的韧性和静态机械强度性能。优选地,本发明的合金包含0.010至0.044重量%、更优选0.015至0.044重量%、且更优选0.025至0.044重量%的Cr和/或V。在一个甚至更优选的实施方案中,所述合金包含0.035至0.043重量%的Cr和/或V。

[0056] 钒和/或铬通常以与锆、铈、铅、锰或属于稀土族的元素的相同方式加入铝合金中,作为细化晶粒或控制晶粒结构的元素。同样,细化晶粒的元素通常以0.05至0.5重量%的量添加,以在均质化步骤和再加热步骤中形成分散体。特别地,分散体具有在后续的方法步骤中防止晶粒边界和位错迁移的作用。这特别防止了在诸如固溶热处理的步骤期间的重结晶。分散体是在高温热操作过程中形成的细沉淀物。例如 $ZrAl_3$ 、 $Al_{12}(FeMn)_3Si$ 和 $Al_{12}Mg_2Cr$ 。它们的尺寸小于 $1\mu m$,通常为0.01至 $0.5\mu m$ 。

[0057] 相反,但在没有任何科学理论假设的情况下,本发明人已观察到,将根据本发明的特定量和临界量的V和/或Cr添加到含有0.05至1.9重量%的Li的2XXX合金中,不会引起在对这类合金进行均质化和再加热步骤的温度下(通常为450至550°C)形成分散体,而是形成非常特殊的微观结构,使得锻制产品基本不含具有Cr和/或V的分散体。此处,术语“基本不含具有Cr和/或V的分散体”意指具有Cr和/或V的分散体的密度小于 0.1 分散体每 μm^2 ,优选小于 0.05 分散体每 μm^2 。

[0058] 在本发明的2XXX合金中所含的Li的临界量以及V和/或Cr的临界量影响铸造未锻制产品的微观结构,以及最终的锻制产品的微观结构,本发明人已揭示了,与已知产品相比,本发明的产品具有改善的性能,特别是在疲劳性能方面。更特别地,特别是对于厚度为12至175mm、优选30至140mm的产品,本发明人已揭示了,与除了V和Cr的临界含量之外具有相似组成的已知产品相比,本发明的产品具有改善的疲劳以及韧性和静态机械强度。

[0059] 本发明的产品的锂含量为0.05至1.9重量%。有利地,锂含量为0.5至1.5重量%,更优选0.7至1.2重量%,更优选0.80至0.95重量%。

[0060] 在一个有利的实施方案中,本发明的产品的合金是包含1.0至6.0重量%的Cu、优选3.2至4.0重量%的Cu的2XXX合金。

[0061] 本发明的2XXX合金产品的合金组成(以重量%计)为:

[0062] Li:0.05-1.9%;

[0063] Cu:1.0和6.0%;

[0064] Cr和/或V:0.005-0.045;

[0065] Mg:0.1-1.0;

[0066] Zr:0-0.15;

[0067] Mn:0-0.6;

[0068] Zn<0.8;

[0069] Ag:0-0.5;

[0070] Fe+Si $\leq$ 0.2;

[0071] 以及至少一种选自Hf、Ti和Sc或其他稀土元素的能够控制晶粒尺寸的元素,如果

选择的话,则该元素的量为:对于Sc和其他稀土元素为0.02至0.15重量%,优选0.02至0.1重量%;对于Hf为0.02至0.5重量%;以及对于Ti为0.01至0.15重量%;

[0072] 其他元素各自 ≤ 0.05 且总计 ≤ 0.15 ;

[0073] 余量为铝。

[0074] 在一个优选的实施方案中,本发明的产品的合金还包含镁。因此,本发明的产品的镁含量有利地为0.15至0.7重量%,优选为0.2至0.6重量%。有利地,镁含量为至少0.30重量%,优选至少0.35重量%,并且优选至少0.38重量%。在另一个实施方案中,镁含量为0.30至0.40重量%。

[0075] 在一个优选的实施方案中,本发明的产品的合金包含小于0.8重量%的Zn,优选小于0.7重量%的Zn。

[0076] 有利地,锌含量为0.45至0.65重量%,这可有助于在韧性和机械强度之间达到极好的折衷。在该具体实施方案中,本发明的合金有利地包含小于0.15重量%的Ag,优选小于0.1重量%,甚至更优选小于0.05重量%。

[0077] 在另一个实施方案中,本发明的合金包含小于0.05重量%的Zn。在该第二实施方案中,本发明的合金有利地包含大于0.2重量%的银,优选0.3至0.5重量%的Ag,甚至更优选0.3至0.4重量%的Ag。

[0078] 在一个具体实施方案中,本发明的产品的合金还包含0.07至0.15重量%的Zr,优选0.07至0.11重量%的Zr,并且更优选0.08至0.10重量%的Zr。

[0079] 有利地,本发明的产品的锰含量为0.1至0.6重量%,优选0.2至0.4重量%,这可改善韧性而不损害机械强度。

[0080] 有利地,铁含量和硅含量的总和为至多0.20重量%。优选地,铁含量和硅含量各自为至多0.08重量%。在本发明的一个有利的实施方案中,铁含量和硅含量分别为至多0.06重量%和0.04重量%。

[0081] 在一个优选的实施方式中,合金还包含至少一种选自Hf、Ti和Sc或其他稀土元素的可控制晶粒尺寸的元素,如果选择的话,则该元素的量为:对于Sc和其他稀土元素为0.02至0.15重量%,优选0.02至0.1重量%;对于Hf为0.02至0.5重量%;以及对于Ti为0.01至0.15重量%。优选地,选择0.02至0.10重量%的Ti,有利地为0.02至0.04重量%。

[0082] 根据本发明的一个实施方案,基于铝的2XXX合金还包含上述临界含量的Cr和/或V和0.05至1.9重量%的Li、有利地1.0至6.0重量%的Cu,以及任选地,以重量%计的以下元素:

[0083] Mg:0.15-0.7;

[0084] Zr:0.07-0.15;

[0085] Mn:0.1-0.6;

[0086] Zn<0.8;

[0087] Ag:0-0.5;

[0088] Fe+Si ≤ 0.2 ;

[0089] 以及至少一种选自Hf、Ti和Sc或其他稀土元素的能够控制晶粒尺寸的元素,如果选择的话,则该元素的量为:对于Sc和其他稀土元素为0.02至0.15重量%,优选0.02至0.1重量%;对于Hf为0.02至0.5重量%;以及对于Ti为0.01至0.15重量%;

[0090] 其他元素各自 ≤ 0.05 且总计 ≤ 0.15 ;

[0091] 余量为铝。

[0092] 根据本发明的一个最优的实施方案,该产品是这样的基于铝的合金,除了上述临界含量的Cr和/或V外,其还包含以重量%计的以下元素:Cu:3.2-4.0;Li:0.80-0.95;Zn:0.45-0.70;Mg:0.15-0.7;Zr:0.07-0.15;Mn:0.1-0.6;Ag: <0.15 ;Fe+Si ≤ 0.20 ;至少一种选自下述的元素:Ti:0.01-0.15;Sc:0.02-0.1;Hf:0.02-0.5;其他元素各自 ≤ 0.05 且总计 ≤ 0.15 ,余量为铝。根据另一个实施方案,本发明的产品由包含上述临界含量的Cr和/或V的AA2050合金制成。

[0093] 制造本发明的产品的方法包括以下步骤:制备液态金属熔池;铸造;均质化;轧制、锻造和/或挤压;固溶热处理;淬火;消除应力,以及任选的时效处理。在第一步中,制备包含0.05至1.9重量%的Li和0.005至0.045重量%的Cr和/或V的基于铝的2XXX合金液态金属熔池。然后,将液态金属熔池铸造为未锻制的形式,通常是轧制锭、锻造坯料或挤压坯料。

[0094] 由铸造步骤开始,本发明的产品的微观结构不同于现有技术的产品的微观结构。特别地,与除了V和Cr的特定和临界含量之外具有相同组成的合金铸造产品相比,本发明的合金铸造未锻制产品具有更呈树枝状的晶粒。

[0095] 本发明人对铸件的微观结构进行了半定量评估,并根据晶粒的树枝化程度对研究的样品给出了0至2的得分:得分0=主要为球形的晶粒,得分1=弱树枝状的晶粒,得分2=强树枝状的晶粒。该半定量评估通过使用阳极氧化(稀HBF₄溶液,开路电压为30V,蚀刻时间为60至180s)后的样品的显微照片进行。因此,本发明的合金铸造未锻制产品具有更呈树枝状的晶粒,对应于根据上述评估的得分1(本发明的含Cr的合金)至2(本发明的含V的合金),相比之下,除了V和Cr的特定和临界含量之外具有相同组成的合金铸造未锻制产品的得分为0。有利地,本发明的铸造未锻制产品,在所述产品的四分之一厚度处,参数 s^* 大于 $1.0\mu\text{m}^{-1}$,并且参数 p^* 小于 $100\mu\text{m}$,

[0096] 其中参数 p^* 由以下方程式定义

$$[0097] \quad A = A_{\min} + \frac{A_{\max} - A_{\min}}{(1 + \exp(\alpha(p^* - i)))}$$

[0098] 并且,其中参数 s^* 由以下方程式定义

$$[0099] \quad s^* = \frac{\alpha \times (A_{\max} - A_{\min})}{4}$$

[0100] 其中

[0101] A表示转变后物体的表面分数,

[0102] $A_{\min}$ 表示阈值转换后金属间粒子的初始表面分数,

[0103] $A_{\max}$ 表示对应于为了预防在填充结束时收敛缓慢的问题而停止运算的常规填充的表面分数,

[0104] i是计算步骤数,

[0105] 以及 α 是S形曲线的斜率的调整系数。

[0106] 根据一个优选的实施方案,所述铸造未锻制产品的通过截距-斜率法(méthod de intercepte)评估的铸件晶粒尺寸为:

[0107] -在二分之一厚度处为250至350 μm ,

[0108] -在四分之一厚度处为175至275 μm 。

[0109] 然后,有利地将铸造未锻制产品在450 $^{\circ}\text{C}$ 至550 $^{\circ}\text{C}$ 、优选480 $^{\circ}\text{C}$ 至530 $^{\circ}\text{C}$ 的温度下均质化5至60小时。

[0110] 均质化后,通常将铸造产品冷却至室温,然后再加热以进行热变形。为此,再加热有利地达到400至550 $^{\circ}\text{C}$ 且优选约500 $^{\circ}\text{C}$ 的温度,以允许变形未锻制的产品。

[0111] 可通过轧制、锻造和/或挤压来进行热变形。优选地,热变形通过轧制和/或锻造至足以获得厚度优选为至少12mm、更优选至少30mm且甚至更优选至少40mm的轧制和/或锻造产品。所述轧制和/或锻造的产品还具有至多175mm的优选厚度,更优选至多140mm,甚至更优选至多110mm。

[0112] 然后,将如此获得的锻制产品通过优选490至550 $^{\circ}\text{C}$ 的热处理进行固溶热处理15min至8h,然后通常在室温下用水淬火。然后,优选通过拉伸和/或压缩,使产品经受可控的应力消除,其中永久变形率为1至7%,优选为至少2%。轧制产品优选经受永久变形率至少等于3.5%的可控拉伸。优选的冶金状态是状态T84和T86,优选T84。诸如轧制、矫平、矫直、成形的已知步骤可任选地在固溶热处理和淬火之后以及在可控拉伸之前或之后进行。

[0113] 任选地进行时效处理,包括在130至170 $^{\circ}\text{C}$ 的温度下加热5至100h,优选10至50h。

[0114] 本发明的轧制、挤压和/或锻造的产品有利地具有金属间相的平均密度d,以每 mm^2 的相数表示,使得:

[0115] $d < -0.0023e^2 + 0.0329e + 160.91$

[0116] 且甚至更优选

[0117] $d < -0.0023e^2 + 0.0329e + 140.26$

[0118] 其中e=产品厚度,以mm计。

[0119] 根据一个有利的实施方案,呈已经轧制、固溶热处理、淬火、应力消除(优选通过拉伸)和时效处理状态的本发明的产品在240,000次循环时具有疲劳质量指数FQI(以MPa表示),使得:

[0120] $FQI > -0.0886e + 177$

[0121] 其中e=产品的厚度,以mm计;

[0122] 甚至更优选地,产品在240,000次循环时具有这样的疲劳质量指数FQI(MPa),使得:

[0123] $FQI > -0.0886e + 180$ 。

[0124] 根据该有利的实施方案,轧制和/或锻造的产品的厚度为30至140mm,更优选为40至110mm,甚至更优选为40至75mm。

[0125] 根据一个实施方案,呈已经轧制、固溶热处理、淬火、应力消除(优选通过拉伸)和时效处理状态的本发明的产品,与除了Cr和/或V的含量之外具有相同组成的合金产品相比,具有至少一种、优选至少两种、甚至更优选三种以下改进的性能的折衷:

[0126] -Rp0.2(L)和K1C(L-T),

[0127] -Rp0.2(TL)和K1C(T-L),

[0128] -Rp0.2(TC)和K1C(TC-L)。

[0129] 本发明的合金特别地用于制造轧制和/或锻造的产品,更特别是轧制的产品。

[0130] 本发明的产品可有利地用于结构元件,特别是飞机结构元件。

[0131] 使用包括至少一种本发明的产品的结构元件是有利的,特别是对于航空构造。本发明的产品特别有利于进行大批量产品的加工,例如特别是其中蒙皮和加强件源自相同起始产品的下表面或上表面元件、翼梁或肋骨,以及其中本特性可为有利的任何其他用途。

[0132] 使用以下说明性和非限制性实施例更详细地阐述了本发明的这些方面以及其他方面。

[0133] 实施例

[0134] 实施例1

[0135] 铸造厚度为约400mm的铸锭,其组成在表1中给出。

[0136] 表1:铸锭形式的铸造Al-Cu-Li合金的以重量%计的组成。

合金	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Zr	Li	Ag	V	Cr
A	0.02	0.03	3.60	0.38	0.34	-	0.03	0.08	0.92	0.36	0.04	-
B	0.02	0.04	3.60	0.35	0.34	-	0.03	0.08	0.93	0.37	-	0.04
[0137] C (2050)	0.03	0.04	3.60	0.38	0.33	-	0.03	0.09	0.90	0.35	-	-
D (2050)	0.03	0.04	3.50	0.35	0.33	-	0.04	0.08	0.92	0.35	-	-

[0138] 在某些铸锭的二分之一厚度 ($t/2$) 和四分之一厚度 ($t/4$) 处取样,以测量铸造晶粒尺寸以及表征显微偏析的精细度和均匀性的参数 p^* 和 s^* 。参数 s^* 对于描述粒子分布的规律性更重要,而参数 p^* 对于描述粒子空间分布的精细度更重要。结果示于表2中,并与常规的AA2050合金的平均值进行比较。

[0139] 表2:在Al-Cu-Li合金铸锭的二分之一厚度 ($t/2$) 和四分之一厚度 ($t/4$) 处评估的晶粒尺寸和参数 s^* 和 p^* 。

合金	$P^* (\mu m)$		$s^* (\mu m^{-1})$		晶粒尺寸 (μm)	
	$t/2$	$t/4$	$t/2$	$t/4$	$t/2$	$t/4$
[0140] A	58	53	1.3	1.5	305	212
B	81	76	1.1	1.2	281	215
AA2050	120	115	0.68	0.82	200	150

[0141] 还根据由0到2的得分在所取样品上对这些样品的微观结构进行半定量评估:得分0=主要为球状的晶粒,得分1=弱树枝状的晶粒,得分2=强树枝状的晶粒。使用阳极氧化(稀HBF₄溶液,开路电压为30V,蚀刻时间为60至180)后的样品的显微照片进行半定量评估。

[0142] 表3总结了不同样品的得分。图3和图4示出了在合金A(图3b和4b)、B(图3b和图4b)和C(图3c和4c)铸锭的二分之一厚度(图3)和四分之一厚度(图4)处取样的样品获得的显微照片。

[0143] 表3:在Al-Cu-Li合金铸锭的二分之一厚度 ($t/2$) 和四分之一厚度 ($t/4$) 处评估的

晶粒的微观结构(得分0=主要为球状的晶粒,得分1=弱树枝状的晶粒,分数2=强树枝状的晶粒)。

合金	微观结构 (得分)	
	t/2	t/4
A	2	2
B	1	1
C (2050)	0	0

[0145] 与铸锭C相比,铸锭A和B具有更大且更呈树枝状的铸造晶粒。

[0146] 实施例2

[0147] 将实施例1的某些铸锭在505℃下均质化约12小时,然后剥皮。将铸锭热轧以获得厚度为60mm的板材。将它们在527℃下进行固溶热处理,然后用冷水淬火。然后,将板材以3.7%的永久伸长率拉伸。

[0148] 将该板材在155℃下时效处理约20小时。

[0149] 在四分之一厚度(t/4)处取样,以测量在方向L和TL上的拉伸时的静态机械特性以及在方向L-T和T-L上的韧性,在二分之一厚度(t/2)处取样,以测量在方向TC上的拉伸时的静态机械特性以及在方向TC-L上的韧性。用于测量韧性的测试件是具有几何结构CT并且具有以下尺寸的测试件:

[0150] -方向L和TL/L-T和T-L,测试件CT25:厚度B=25mm,宽度W=50mm;

[0151] -方向TC/TC-L,测试件CT20:厚度B=20mm,宽度W=40mm。

[0152] 表4和表5中列出了获得的结果。

[0153] 表4:不同板材获得的静态机械性能。

合金	Rp02 (MPa)	Rm (MPa)	A (%)	Rp02 (MPa)	Rm (MPa)	A (%)	Rp02 (MPa)	Rm (MPa)	A (%)
	方向 L			方向 TL			方向 TC		
A	513	537	11.8	490	531	10.1	461	528	6.3
B	511	539	11.1	491	533	10.1	465	532	5.7
C (2050)	490	516	10.7	473	513	10.1	451	513	5.5
D (2050)	492	518	11	484	525	9.4	448	514	7.5

[0155] 表5:不同板材获得的K1C韧性的性能。

	合金	K1C L-T (Mpa $\sqrt{m}$)	K1C T-L (Mpa $\sqrt{m}$)	K1C S-L (Mpa $\sqrt{m}$)
[0156]	A	44.9	35	33.6
	B	42.9	32.5	31.7
	C (2050)	46	36	28
	D (2050)	40	31	28

[0157] 与现有技术的2050合金板材C和D相比,板材A和B总体上具有改进的机械强度性能Rp0.2/K1C韧性的折衷。

[0158] 在于二分之一厚度处取样的带孔测试件上表征疲劳性能。图1再现了所使用的测试件,其Kt值为2.3。在环境空气中在50Hz的频率下对测试件进行测试,其中R值=0.1。计算疲劳质量指数FQI并在表6中示出。

[0159] 表6:疲劳测试的结果(带孔的测试件)

	合金	FQI (MPa), 在 240,000 次循环时 50%断裂	
		L-T	T-L
[0160]	A	182	180
	B	184	186
	D (2050)	172	157

[0161] 与板材D相比,合金A和B板材具有改善的疲劳性能。

[0162] 实施例3

[0163] 在该实施例中,铸造了数个厚度为约400mm的铸锭,其组成在表7中给出。

[0164] 表7:铸锭形式的铸造Al-Cu-Li的以重量%计的组成。

[0165]	合金	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Zr	Li	Ag	V	Cr
	E	0.03	0.04	3.57	0.34	0.44	0.52	0.03	0.10	0.87	0.026	0.041	-
	F	0.03	0.05	3.58	0.34	0.43	0.60	0.03	0.11	0.86	0.002	0.040	-
	G	0.02	0.04	3.61	0.34	0.43	0.61	0.03	0.11	0.85	0.010	0.042	-
	H	0.03	0.04	3.45	0.33	0.34	0.56	0.03	0.10	0.86	0.079	0.038	-
	I	0.02	0.05	3.55	0.34	0.33	0.60	0.03	0.10	0.93	0.110	0.039	-
	J	0.02	0.04	3.55	0.34	0.33	0.60	0.03	0.11	0.87	0.090	0.039	-

[0166] 将铸锭在505℃下均质化12小时,然后剥皮。将它们热轧直至最终厚度为20和50mm(由合金E和J制成的板材),或102和130mm(由合金G制成的板材)或150mm(由合金F和I制成的板材),然后在527℃下热处理并用冷水淬火。然后,将板材以6%的永久伸长率拉伸,并在150℃下进行时效处理约20h。

[0167] 在于二分之一厚度处取样的带孔测试件上表征疲劳性能。图3再现了所使用的测试件,其Kt值为2.3。在环境空气中在50Hz的频率下对测试件进行测试,其中R值=0.1。计算

疲劳质量指标FQI。结果示于图4中,并与现有技术的AA2050合金产品获得的结果的趋势曲线(多项式回归)进行比较,所述AA2050合金不含V和Cr(V和Cr<0.005重量%)。

[0168] 实施例4

[0169] 在该实施例中,除了最后的时效处理步骤外,将实施例2的合金G按照如上所述的进行转变(厚度102mm)。对该实施例进行了时效动力学,并将结果与在相同条件下转变的合金K(组成在下表8中详述)所获得的结果进行了比较。

[0170] 表8:铸锭形式的铸造Al-Cu-Li的以重量%计的组成。

合金	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Zr	Li	Ag	V	Cr
K	0.02	0.04	3.62	0.36	0.43	0.56	0.031	0.10	0.90	0.01	-	-

[0172] 研究的时效处理条件如下:在150℃下进行20、25或30h(对合金G)以及20、30、40和50h(对合金K)。

[0173] 评估了最终产品的机械特性和韧性,并在图5中示出。

[0174] 为了测量拉伸时的静态机械特性,在四分之一厚度(T/4)处取样,以在方向L上测量这些特性。

[0175] 为了测量韧性,在四分之一厚度(T/4)处取样,以测量在方向T-L上的这些特性。用于测量韧性的测试件是具有几何结构CT40的测试件:厚度B=40mm,宽度W=80mm。

[0176] 实施例5

[0177] 通过扫描电子显微镜研究了实施例1和3的板材在二分之一厚度(t/2)和四分之一厚度(t/4)处的微观结构,以测定微米级的金属间相的密度。

[0178] 表9详细列出了金属间相的密度(每mm²的相数)。

[0179] 表9:金属间相的密度(每mm²的数量)

合金	金属间相(每 mm ² 的数量)		
	t/4	t/2	在该厚度下的平均密度
A	130.8	127.6	129.2
B	124.3	120.7	122.5
C	161.0	154.6	157.8
E	144.6	145.1	144.8
F	148.5	159.3	153.9
G	159.9	144.9	152.4

[0181] 图6示出了本发明的板材的金属间相平均密度(相数/mm²)随厚度e(以mm表示)的变化,该图还示出了现有技术的AA2050合金产品获得的结果的趋势曲线(多项式回归),所述AA2050合金不含V和Cr(V和Cr<0.005重量%)。

[0182] 实施例6

[0183] 铸造铸锭,其组成在表10中给出。

[0184] 表10:铸锭形式的铸造Al-Cu-Li的以重量%计的组成。

合金	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Zr	Li	Ag	V	Cr
----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	---	----

L	0.03	0.05	3.48	0.38	0.35	0.62	0.031	0.08	0.89	0.10	-	-
M	0.03	0.04	3.53	0.38	0.37	0.61	0.032	0.08	0.91	0.12	0.040	-
N	0.03	0.04	3.52	0.36	0.35	0.58	0.031	0.09	0.88	0.10	0.040	-

[0186] 将铸锭在505℃下均质化12h,然后在525℃下均质化12h,然后剥皮。将铸锭热轧以获得厚度为130mm的板材。将它们在517℃下进行固溶热处理,然后用冷水淬火。然后,将板材以3.7%的永久伸长率拉伸。

[0187] 将该板材在155℃下时效处理约20h。

[0188] 在四分之一厚度 ($t/4$) 处取样,以测量在方向L和TL上的拉伸时的静态机械特性以及在方向L-T和T-L上的韧性,在二分之一厚度 ($t/2$) 处取样,以测量在方向TC上的拉伸时的静态机械特性以及在方向TC-L上的韧性。用于测量韧性的测试件是具有几何结构CT并且具有以下尺寸的测试件:

[0189] -方向L和TL/L-T和T-L,测试件CT25:厚度B=25mm,宽度W=50mm;

[0190] -方向TC/TC-L,测试件CT20:厚度B=20mm,宽度W=40mm。

[0191] 表11和表12中列出了获得的结果。

[0192] 表11:不同板材获得的静态机械性能

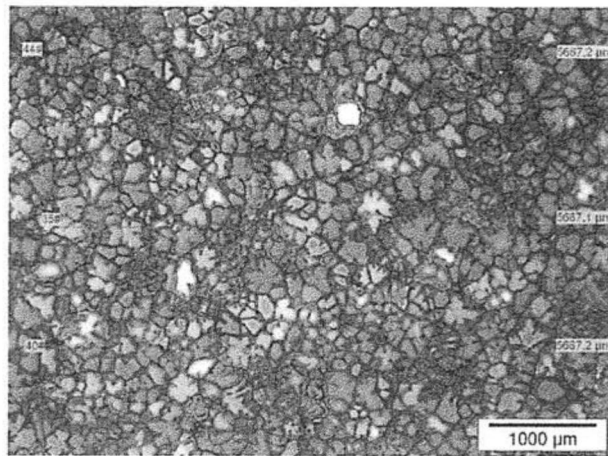
合金	Rp02 (MPa)	Rm (MPa)	Rp02 (MPa)	Rm (MPa)	Rp02 (MPa)	Rm (MPa)
	方向 L		方向 TL		方向 TC	
L	478	503	467	512	447	504
M	482	509	471	516	448	502
N	478	503	466	511	448	503

[0194] 表12:不同板材获得的K1C韧性性能

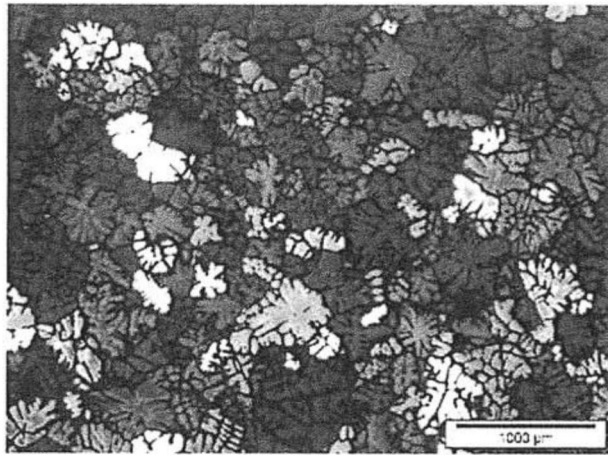
合金	K1C L-T (MPa $\sqrt{m}$)	K1C T-L (MPa $\sqrt{m}$)	K1C S-L (MPa $\sqrt{m}$)
L	31.7	26.1	24.7
M	34.1	27.2	26.2
N	34.6	27.9	27.7

[0196] 与板材L相比,板材M和N总体上具有改进的机械强度性能Rp0.2/K1C韧性的折衷。

a)



b)



c)

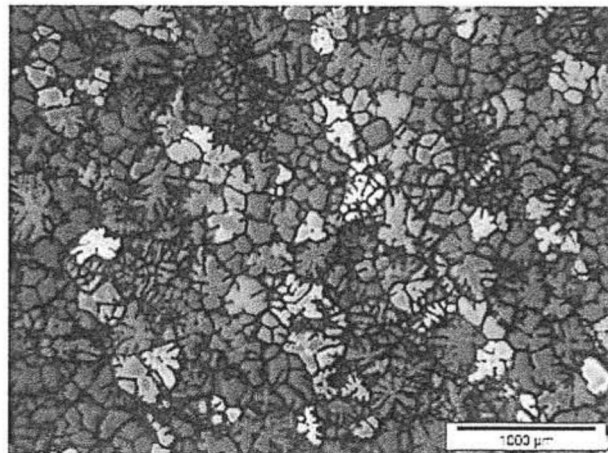


图1

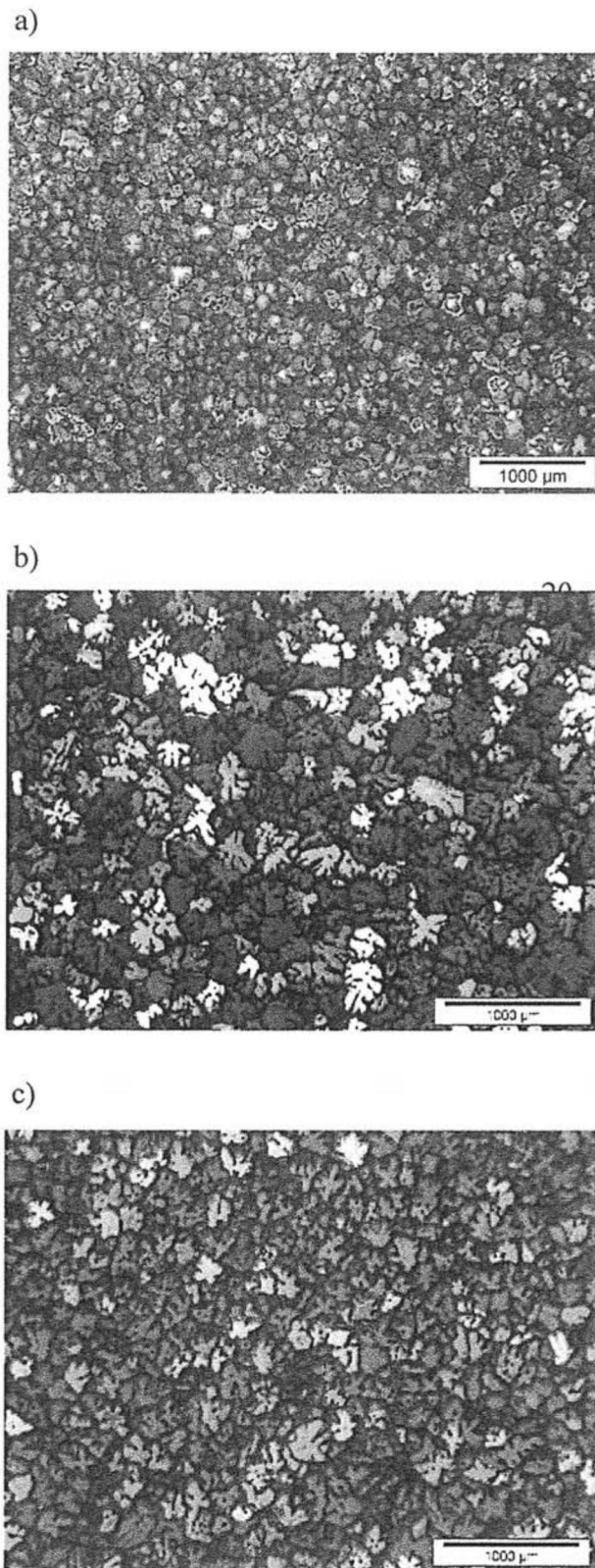


图2

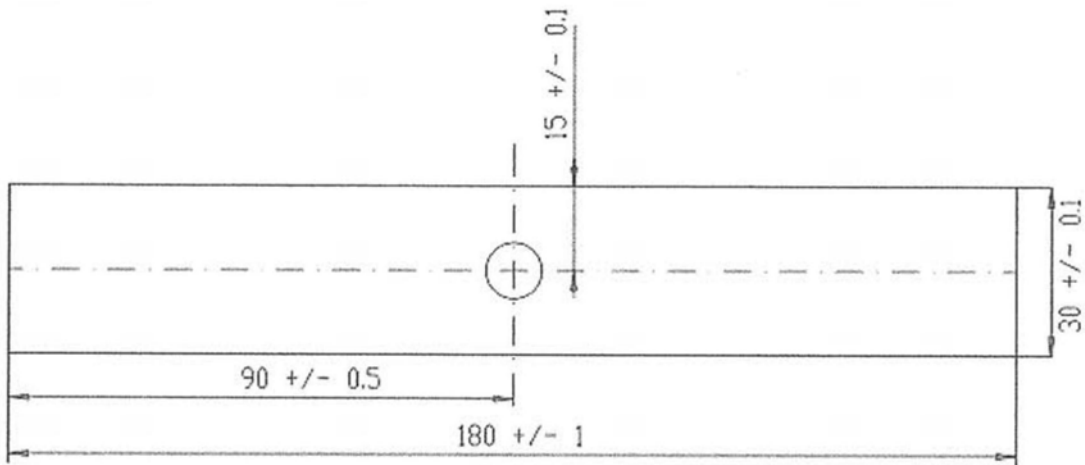


图3

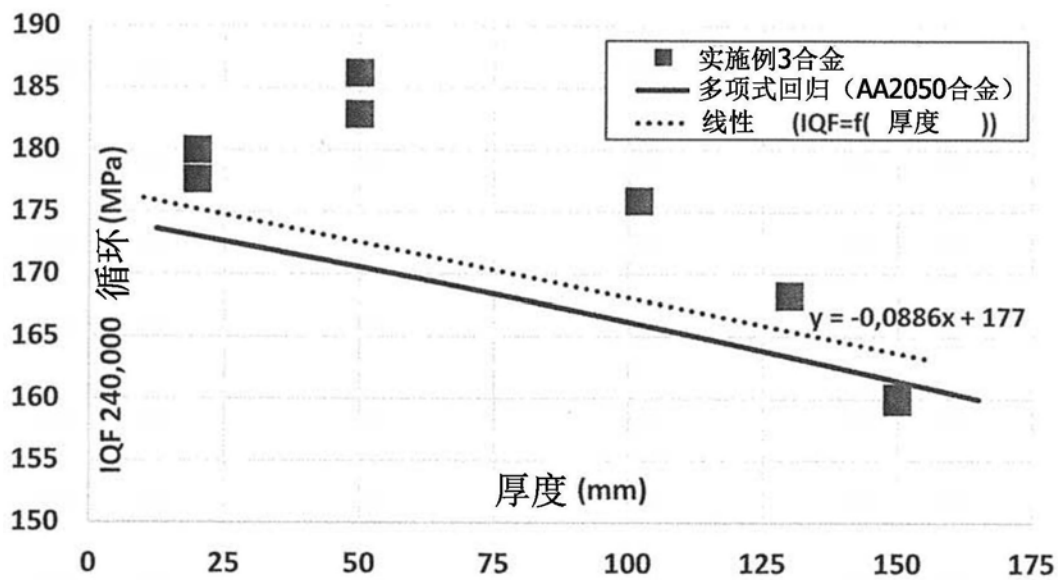


图4

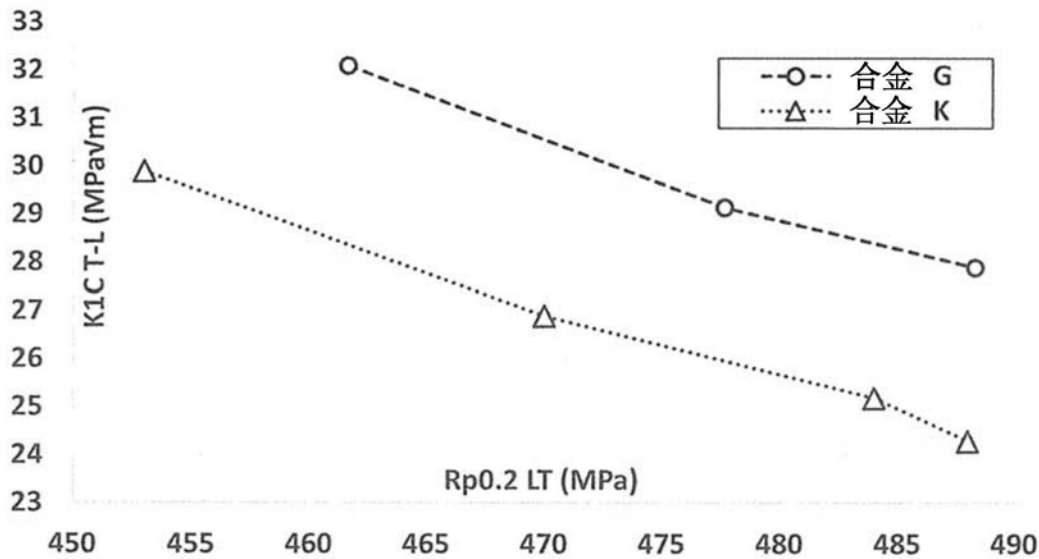


图5

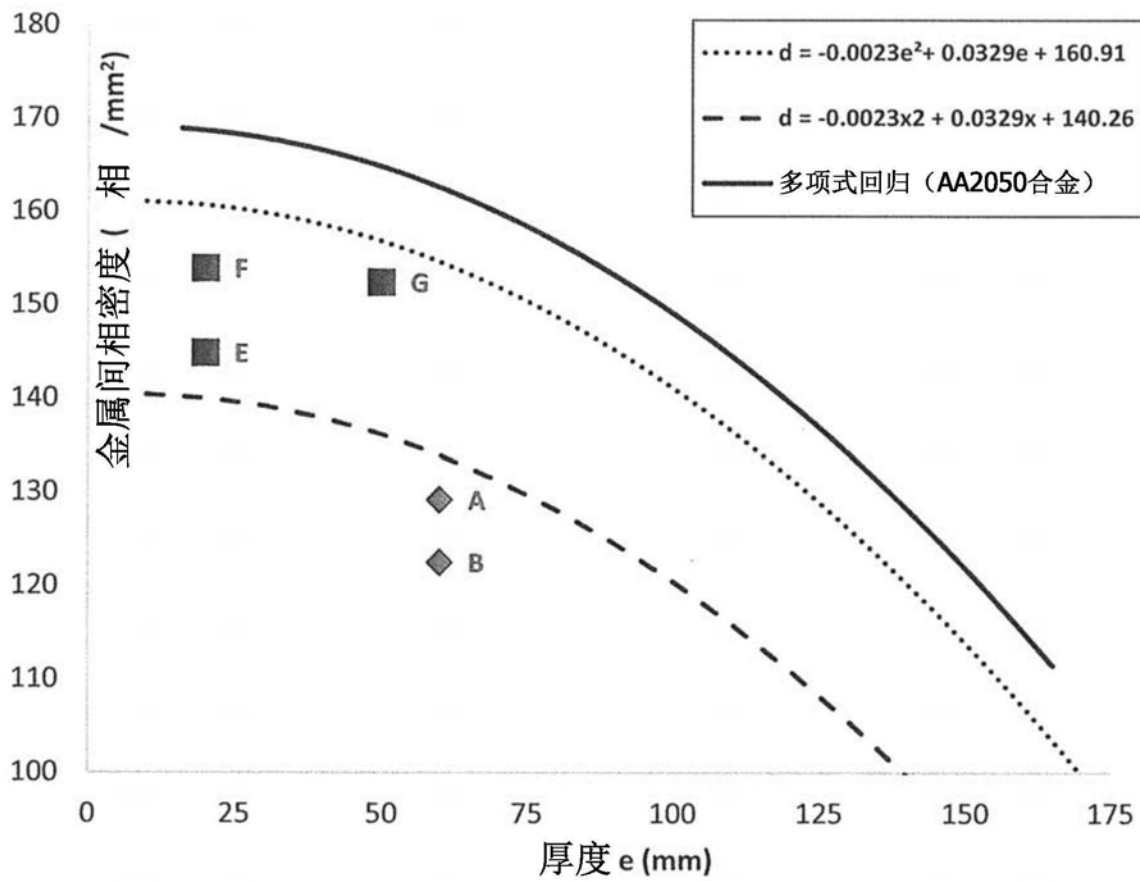


图6