

钛合金表面激光熔覆 Ni 基合金 涂层中析出相热力学模拟计算

Thermodynamic Calculation on Precipitated
Phase in Laser Clad Ni Base Alloy
Coating on TC4 Alloy

雷贻文^{1,2}, 孙荣禄¹, 唐 英¹

(1 天津工业大学 机械工程学院, 天津 300387; 2 天津市
现代机电装备技术重点实验室, 天津 300387)
LEI Yi-wen^{1,2}, SUN Rong-lu¹, TANG Ying¹

(1 School of Mechanical Engineering, Tianjin Polytechnic University,
Tianjin 300387, China; 2 Tianjin Key Laboratory of Advanced
Mechatronics Equipment Technology, Tianjin 300387, China)

摘要: 采用横流 CO₂ 激光器在 TC4 合金表面熔覆 Ni 基合金涂层, 对激光熔覆层的微观组织、析出相、各合金元素在 γ -Ni 和 $M_{23}C_6$ 相中含量变化进行了研究。结果表明, 熔覆层可分为三个区: 熔覆区、结合区和基体热影响区。熔覆区由 γ -Ni, TiB₂, TiC, $M_{23}C_6$ 和 Ni₃B 相组成, 其中, TiB₂, TiC 和 $M_{23}C_6$ 细小颗粒均匀分布于 γ -Ni 初晶上, 共晶组织由 γ -Ni 和 Ni₃B 组成。为揭示 TC4 合金表面激光熔覆 Ni 基合金涂层在 3500~500K 温度范围的相组成及组织变化规律, 利用 Thermo-Calc 软件及相应 Ni 基合金数据库对 TC4 合金表面激光熔覆 Ni 基合金涂层凝固过程中各析出相进行了热力学计算分析, 研究了熔覆层中 γ -Ni, TiB₂, TiC, $M_{23}C_6$ 和 Ni₃B 各相相对含量和 B, C, Cr, Fe, Ni, Ti 元素在 γ -Ni 和 $M_{23}C_6$ 相中的含量随温度变化关系, 为 TC4 合金表面激光熔覆 Ni 基合金涂层成分设计和工艺优化提供理论依据。

关键词: 激光熔覆; 微观组织; 析出相; 热力学计算

doi: 10.3969/j.issn.1001-4381.2013.10.006

中图分类号: TN249 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2013)10-0036-05

Abstract: Laser clad Ni base alloy coatings are fabricated on TC4 alloy using CW CO₂ laser. The microstructures, precipitated phases and the partitioning characteristics of the main elements in γ -Ni and $M_{23}C_6$ phases of the coatings were examined. Results show that the coating can be divided into three regions: the cladding zone, the bonding zone and the heat-affected zone of the substrate. The cladding zone consists of γ -Ni, TiB₂, TiC, $M_{23}C_6$ and Ni₃B phases. The fine particles of TiB₂, TiC and $M_{23}C_6$ are distributed in the primary γ -Ni and the eutectics consist of γ -Ni and Ni₃B. The precipitated phases in Ni base alloy coatings were calculated using Thermo-Calc software with related database. To illustrate the evolutionary rule of the precipitated phases and microstructure of Ni matrix coatings on TC4 substrate in the temperature range from 3500K to 500K, the effect of temperature on the amount of the precipitated phases and the partitioning characteristics of the main elements (B, C, Cr, Fe, Ni and Ti) in γ -Ni and $M_{23}C_6$ phases were studied. It could provide the theoretical basis to optimize of the processing parameters and design the constituent of laser clad Ni matrix coatings on TC4 substrate.

Key words: laser cladding; microstructure; precipitated phase; thermodynamic calculation

钛合金具有高比强度、优良的高温性能和耐腐蚀性能, 在航空、航天、石油、化工、医药等领域广泛使用, 但其硬度低、耐磨性能差的缺点阻碍了钛合金在摩擦构件上的应用^[1]。激光熔覆表面强化技术是提高钛合金耐磨性能的有效途径^[2,3]。激光熔覆表面强化技术

具有如下优点: 熔覆层与基体之间为冶金结合, 结合强度高; 熔覆层组织细小, 具有明显的细晶强化作用; 激光能量密度高, 加热速率快, 对基体的热损伤小。鉴于激光熔覆表面强化技术的独特优点, 近年来其研究和应用领域不断扩大。在钛合金表面激光熔覆 Ni 基合

金涂层时,由于激光辐照过程产生的高温作用,熔覆层中 Ni, Cr, B, C, Ti 等元素间具有较强的化合能力,极易形成多种金属间化合物或非金属化合物,熔覆层的组织变化十分复杂。由于反应合成产物的类型、形态、大小、数量和分布对熔覆层性能有着重要的影响,必须从热力学的角度对熔覆层的微观组织、各相的析出行为和机理进行研究,从而揭示钛合金表面激光熔覆 Ni 基合金涂层的组织变化规律。

Thermo-Calc 是一款功能强大的热力学计算软件,可计算合金体系凝固过程、相图、不同条件下相与相之间的转变及各相热力学性能等,广泛应用于各类合金成分设计、热处理工艺制定、析出相形成机理分析^[4-7]。郝珊等^[4]采用 Thermo-Calc 软件对 T91 耐热钢中 $M_{23}C_6$ 和 MX 相进行了热力学计算,表明 $M_{23}C_6$ 和 MX 相开始析出温度分别为 860℃ 和 1200℃。MX 相中首先析出富 Nb 碳氮化物,随后析出富 V 碳氮化物。随着钢中 Nb, V 和 N 含量的提高, MX 相的数量和开始析出温度均有所提高。Da Li 等^[5]采用 Thermo-Calc 软件研究了高 Cr 铸铁中各相的转变、碳化物析出温度和相图,结果表明,成分(质量分数/% ,下同)为 2.0Cr, 15Cr, 0.20Mo, 1.0Ni 铸铁的共晶转变温度为 1245℃ (实验值为 1234℃),主要析出碳化物为 M_7C_3 ;高 Cr 铸铁共晶转变温度随 C 含量的降低而升高,单相奥氏体相区随 Cr 含量的增加而缩小,计算结果和实验结果具有很好的一致性。

本工作采用横流 CO_2 激光器在 TC4 合金表面进行了激光熔覆 Ni 基合金涂层实验,结合 Thermo-Calc 热力学软件^[8,9]对各析出相进行了热力学计算,分析了熔覆层中各析出相的构成、稳定性、各相相对含量、不同温度下各元素在 γ -Ni 和 $M_{23}C_6$ 相中的分布特征等,为 TC4 合金表面激光熔覆 Ni 基合金涂层成分设计和生产工艺的合理制定提供了重要的理论指导。

1 实验方法

基体材料采用退火态 TC4 合金,激光熔覆试样尺寸为 30mm×20mm×10mm 的长方体。待熔覆表面经磨削加工,粗糙度为 $R_a=0.2\mu m$,预置熔覆材料前用砂纸打磨除去表面氧化层,并用无水酒精和丙酮清洗。熔覆材料成分为:16.0Cr, 3.3B, 0.9C, $\leq 8Fe$,其余为 Ni。用黏结剂将熔覆材料调成膏状,预置在 TC4 合金试样表面,预置层厚度为 1mm,低温烘干后待用。

激光熔覆实验采用 ML-108 型 9kW 横流 CO_2 激

光器。激光熔覆工艺参数:激光光斑直径 $D=6mm$,激光功率 $P=5kW$,光束扫描速率 $V=8mm/s$,多道熔覆的搭接率为 50%。为防止激光熔覆过程中熔池发生氧化,采用 Ar 气对熔池进行保护,Ar 气的流量为 20L/min。

利用 QUANTA200 型扫描电镜 (SEM)、Rigaku Rotaflex D/max-r B 型 X 射线衍射仪 (XRD) 和 Philips CM12 型透射电镜分析激光熔覆层的微观组织结构。制备扫描电镜试样时,采用线切割机沿垂直于熔覆的方向切开,试样经研磨抛光后用氢氟酸、硝酸和水混合液 ($HF:HNO_3:H_2O=1:3:5$, 体积比) 进行化学腐蚀。制备透射电镜试样时,采用线切割机沿熔覆的方向切割成 0.5mm 厚的薄片,在砂纸上手工磨至厚度约为 30 μm ,最后采用离子减薄至穿孔。

2 计算方法

根据合金系中各相热力学特征函数,建立热力学模型,计算出合金系中析出相,在不同温度下合金系中相及其组成根据系统的 Gibbs 能最小原理来确定^[10]。当体系温度低于 500K 时,各析出相的相对含量趋于稳定,合金元素之间的扩散和各相之间的相互转化基本停止,因此本工作采用 Thermo-Calc 软件及相应 Ni 基合金数据库对钛合金表面激光熔覆 Ni 基合金涂层在 500K 以上温度范围内各相相对含量及各元素在 γ -Ni 和 $M_{23}C_6$ 相中的含量随温度变化关系进行了模拟计算^[11]。计算时,设合金系为 1mol,参照状态为 298.15K 和 10^5Pa ,温度以热力学温度输入。激光熔覆过程中,TC4 基体材料表层熔化并进入熔池中。研究结果表明^[12],在优化熔覆工艺条件下,进入熔覆层中的基体材料约为 10%,因此熔覆层成分为:16.0Cr, 3.3B, 0.9C, 10Ti, $\leq 8Fe$,其余为 Ni。

3 实验结果与讨论

3.1 激光熔覆层中各相析出量与温度的关系

在激光熔覆过程中,激光束辐照预置层表面,激光能量转化为热能并向试样内部传导,试样由表及里产生很大的温度分布梯度,预置层和基体表层熔化形成熔池。熔池中 Ni, Cr, Ti, C, B 原子相互间具有较强的化合能力,在随后冷却凝固过程中极易形成多种金属间化合物或非金属化合物。

图 1 为熔覆层中各析出相相对含量与温度的关系,图 1(b)为图 1(a)左下角局部放大图。由图 1(a)可知,熔池温度降至 3100K 时,熔池中开始析出 TiC

相,随着温度继续降低,TiC 相的相对含量迅速增加,当温度降低至 2500K 时,TiC 相的相对含量基本保持不变;熔池温度为 2420K 时,熔池中开始析出少量 TiB₂ 相,随着温度继续降低,TiB₂ 相的相对含量缓慢增加,当温度降至 1460K 时,TiB₂ 相的相对含量快速增加;熔池温度在 1470~1140K 范围内,熔池中析出 γ -Ni 相,随着温度降低, γ -Ni 相的相对含量迅速增加

并达到峰值,温度继续降低, γ -Ni 相的相对含量反而减少;熔池温度低于 1200K 时,熔池中析出少量 $M_{23}C_6$ 相和 Ni₃B 相, $M_{23}C_6$ 相相对含量迅速达到 10% 后基本保持不变,Ni₃B 相相对含量则随温度下降呈上升趋势,见图 1(b)。由图 1(a)和 Ni-B 二元合金相图可知,熔池中液态金属在 1150K 时发生共晶转变: $L \rightarrow \gamma\text{-Ni} + \text{Ni}_3\text{B}$,直至凝固结束,液相消失。

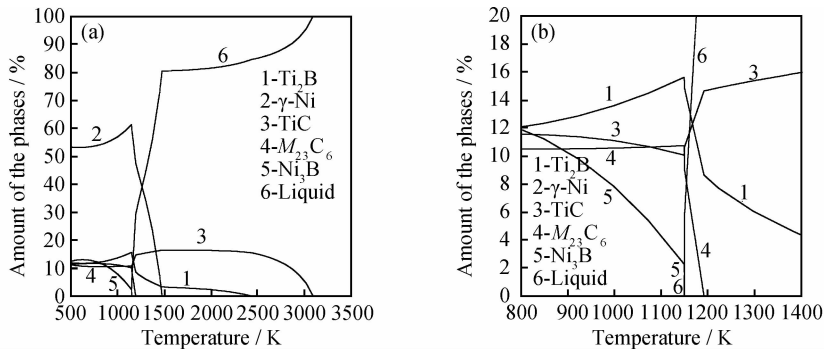


图 1 激光熔覆层中各相析出量与温度关系曲线(a)及局部放大图(b) (摩尔分数/%)

Fig. 1 Relationship between temperature and the amount of precipitated phases in laser clad coating (a) and its partial magnification diagram (b) (mole fraction/%)

熔池凝固结束后,在 1150~500K 温度范围内,由于固态扩散和固态相变的作用,熔覆层中不同固相之间发生相互转变,这一过程对熔覆层组织有着很重要的影响,如图 1(b)所示。当温度低于 1150K 时,继续冷却, γ -Ni 和 TiB₂ 相的含量不断减少,Ni₃B 和 TiC 相的含量不断增加,而 $M_{23}C_6$ 含量基本保持不变,说明在固态冷却过程中,由于固态扩散和固态相变的作用,TiB₂ 相发生分解,B 原子与 γ -Ni 中 Ni 原子化合形成 Ni₃B,Ti 原子和 C 原子化合形成 TiC 相。当温度低于 500K 时,TC4 合金表面激光熔覆 Ni 基合金涂层中以 γ -Ni 相为主,同时含有少量的 TiC, TiB₂, Ni₃B 和

$M_{23}C_6$ 相。

3.2 激光熔覆层中 γ -Ni 和 $M_{23}C_6$ 相成分的变化

为了更好地理解熔覆层在 1150~500K 温度范围内的固态相变过程,采用 Thermo-Calc 热力学计算软件分析了不同温度下 B,C,Cr,Fe,Ni 和 Ti 元素在 γ -Ni 和 $M_{23}C_6$ 相中含量的变化(见图 2)。图 2(a)给出了激光熔覆层中 $M_{23}C_6$ 相中各元素含量随温度变化曲线。由图 2(a)可知, $M_{23}C_6$ 相是一种合金碳化物,以 Cr 和 C 元素为主,同时含有少量 Ni 和 Fe 元素。在 1150~500K 温度范围内,随温度降低, $M_{23}C_6$ 相 Cr 含量迅速升高, $M_{23}C_6$ 相有向 Cr_{23}C_6 相转变的趋势,

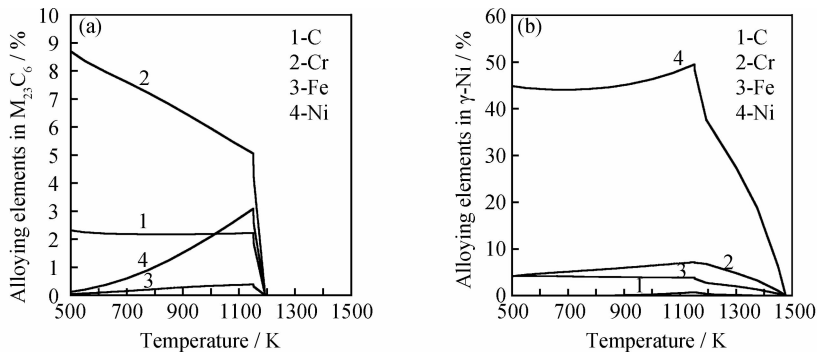


图 2 γ -Ni 和 $M_{23}C_6$ 相中 C,Cr,Fe 和 Ni 元素含量与温度的关系 (摩尔分数/%)

(a)合金元素在 $M_{23}C_6$ 相中的分布;(b)合金元素在 γ -Ni 相中的分布

Fig. 2 Variations of the content of C, Cr, Fe and Ni elements in γ -Ni and $M_{23}C_6$ phases with temperature (mole fraction/%)

(a)the content of the alloying elements in $M_{23}C_6$;(b)the content of the alloying elements in γ -Ni

说明 Ni 和 Fe 元素对 $M_{23}C_6$ 相的稳定性有显著地影响, Ni 和 Fe 元素的含量越高, $M_{23}C_6$ 相的稳定性越低。图 2(b) 给出了激光熔覆层中 γ -Ni 相中各元素含量随温度变化曲线。由图 2(b) 可知, γ -Ni 相为 Fe, Cr 和少量 C 元素溶于 Ni 所得到的一种固溶体相, γ -Ni 相的成分随温度变化不明显。

结合熔覆层中各相相对含量和各合金元素在 $M_{23}C_6$ 和 γ -Ni 相中含量随温度的变化曲线可知(如图 1, 2 所示), 在 1150~500K 温度范围内, 随温度的降低, γ -Ni 相相对含量缓慢下降(该相缓慢分解), γ -Ni 固溶体中 Fe 原子的浓度稍有增加, 而 Cr 元素、C 原子和 Ni 元素的浓度则有所降低, 说明在这个温度范围, γ -Ni 固溶体向周围释放出 Cr 原子、C 原子和 Ni 原子。 $M_{23}C_6$ 相的相对含量基本保持不变, $M_{23}C_6$ 相中 Cr 浓度快速升高, Fe 和 Ni 的浓度则有所降低, 说明在这个温度范围, $M_{23}C_6$ 相向周围释放 Fe 原子和 Ni 原子, 并从周围吸收 Cr 原子。 TiB_2 相的相对含量下降, TiB_2 相分解成 Ti 原子和 B 原子; Ni_3B 相和 TiC 相的相对含量增加, 说明在这个温度范围, Ni 原子和 B 原子化合形成 Ni_3B 相, Ti 原子和 C 原子化合形成 TiC 相。由此分析可知, 在 1150~500K 范围内, 钛合金表面激光熔覆 Ni 基合金涂层固态相变及合金元素在各相中的扩散过程为: γ -Ni 固溶体分解释放的 Cr 原子固溶于 $M_{23}C_6$ 相中, γ -Ni 固溶体分解和 $M_{23}C_6$ 相中释放的 Ni 原子与 TiB_2 相分解释放的 B 原子化合成了 Ni_3B 相, γ -Ni 固溶体分解释放的 C 原子与 TiB_2 相分解释放的 Ti 原子化合成了 TiC 相。

3.3 激光熔覆层微观组织

为了验证 Thermo-Calc 热力学软件计算结果的正确性, 在 TC4 合金表面激光熔覆了 Ni 基合金涂层。图 3 示出了激光熔覆试样横截面宏观形貌。由图 3 可见, 激光熔覆层可分为三个区: 熔覆区 (Cladding Zone)、结合区 (Bonding Zone) 和基体热影响区 (Heat-

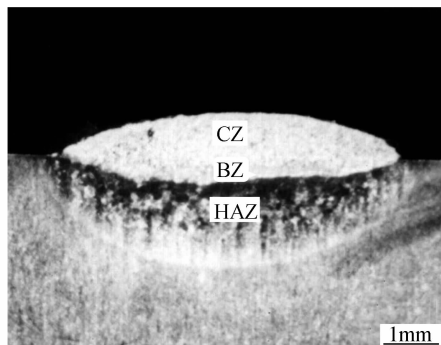


图 3 激光熔覆试样横截面形貌

Fig. 3 Cross-section morphology of the laser clad sample

affected Zone of Substrate)。TC4 合金表面激光熔覆 Ni 基合金涂层内部无气孔和裂纹等缺陷存在, 且熔覆层与基体 TC4 合金之间形成了良好的冶金结合。

图 4 为 TC4 合金表面激光熔覆 Ni 基合金涂层显微组织形貌。如图 4 所示, 激光熔覆层显微组织由细小树枝晶、共晶、黑色颗粒、白色颗粒和白色短杆状相

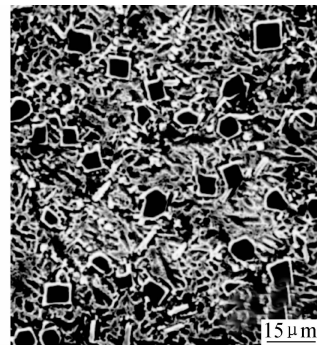


图 4 激光熔覆层组织 SEM 照片

Fig. 4 SEM micrograph of laser clad coating

组成。激光熔覆层中均匀分布的黑色颗粒相尺寸为 5~10 μm , 呈四边形或六边形形状; 白色颗粒相尺寸为 1~2 μm , 排列成带状。图 5 为多道搭接熔覆层 X 射线衍射图谱。由 X 射线衍射结果可知, 激光熔覆层中包含: γ -Ni, TiC , TiB_2 , Ni_3B 和 $M_{23}C_6$ 相。由各相衍射峰的相对强度与该相相对含量的定性关系可知, γ -Ni 固溶体对应衍射峰的相对强度最大, 熔覆层中 γ -Ni 固溶体的含量最高, TiC , TiB_2 , Ni_3B 和 $M_{23}C_6$ 相对应衍射峰的相对强度相当, 且强度均较低, 说明这些相在熔覆的相对含量相近, 且含量较低, 与热力学计算结果相吻合。在激光熔覆过程中, 钛合金表层发生熔化并进入 Ni 基合金熔池中, 由于 Ti 是强碳化物和硼化物形成元素, 因此, 在高温作用下 Ti 元素极易与熔池中的 C 和 B 元素化合形成 TiC 和 TiB_2 相^[13]。由能谱分析结果可知, 熔覆层中树枝晶的主要成分为 Ni, 同时含有

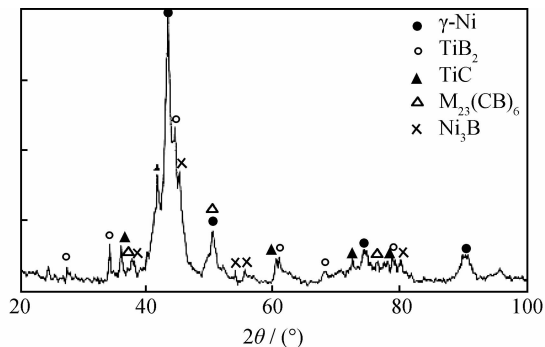


图 5 激光熔覆层 X 射线衍射图谱

Fig. 5 X-ray diffraction spectrum of the laser clad layer

Cr 和 Fe, 说明树枝晶为 γ -Ni 固溶体相。由 Ni-B 二元合金相图可知, 熔覆层中共晶组织为 γ -Ni+Ni₃B。短杆相的主要成分为 Cr, 同时含有少量的 Ti, Fe 和 Ni, 说明短杆相为 $M_{23}C_6$ 合金碳化物。黑色颗粒相和白色颗粒相的主要成分均为 Ti, 说明它们分别为 TiC 和 TiB₂ 相。

图 6 为熔覆层中层片状共晶组织的 TEM 明场像及组成相的选区电子衍射照片。共晶组织层片厚度为 0.2~0.3 μ m。由选区电子衍射可知, 明亮相具有面心立方晶体结构, 为 γ -Ni 固溶体相(见图 6(b)), 灰暗相具有正交晶体结构, 为 Ni₃B 相(见图 6(c)), 由此可知, 熔覆层中共晶组织为 γ -Ni+Ni₃B。由上述分析可知, TC4 合金表面激光熔覆 Ni 基合金涂层中析出相种类、各相相对含量及共晶组织组成与 Thermo-Calc 热力学软件计算结果基本一致, 为 TC4 合金表面激光熔覆 Ni 基合金涂层成分设计和工艺优化提供理论依据。

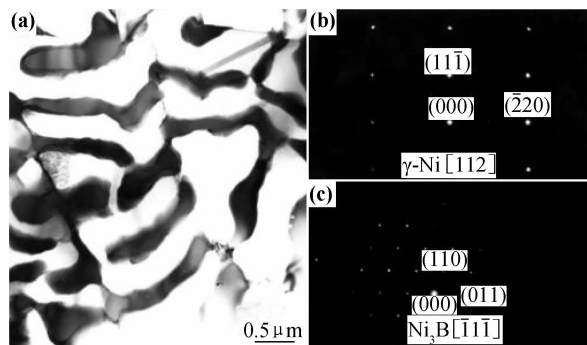


图 6 熔覆层共晶组织的 TEM 照片及组成相的选区电子衍射照片

(a) 共晶组织明场相; (b) γ -Ni 固溶体相选区电子衍射;

(c) Ni₃B 相选区电子衍射

Fig. 6 TEM micrographs showing γ -Ni and Ni₃B eutectic and SADP for the constituent phases

(a) bright-field image; (b) SADP of γ -Ni; (c) SADP of Ni₃B

4 结论

(1) TC4 合金表面熔覆 Ni 基合金涂层可分为三个区域: 熔覆区、结合区和热影响区, 其中熔覆区由 γ -Ni, TiB₂, TiC, $M_{23}C_6$ 和 Ni₃B 相组成。

(2) γ -Ni 相为 Fe, Cr 和少量 C 元素溶于 Ni 得到的一种固溶体相, 而 $M_{23}C_6$ 相以 Cr 为主, 同时含有少量 Ni 和 Fe 元素的合金碳化物。

(3) 激光熔覆层在 1150~500K 范围内冷却过程中, γ -Ni 固溶体相和 TiB₂ 相发生分解, 其相对含量不断降低, Ni₃B 相和 TiC 相不断形成, 其相对含量不断增加, $M_{23}C_6$ 相含量则基本保持不变。

参考文献

- [1] 牛伟, 孙荣禄. 钛合金激光熔覆的研究现状与发展趋势[J]. 材料导报, 2006, 20 (7): 58-60.
NIU Wei, SUN Rong-lu. Research progress and development on laser cladding on titanium alloys surface [J]. Materials Review, 2006, 20 (7): 58-60.
- [2] 王慧萍, 李军, 张光钧, 等. TC4 钛合金表面激光熔覆 TiC 复合涂层组织和耐磨性能[J]. 金属热处理, 2010, 35 (8): 38-41.
WANG Hui-ping, LI Jun, ZHANG Guang-jun, et al. Microstructure and wear resistance of laser clad TiC coating on TC4 titanium alloy surface [J]. Heat Treatment of Metals, 2010, 35 (8): 38-41.
- [3] 牛伟, 孙荣禄, 雷贻文. Ti6Al4V 合金表面激光熔覆钛基复合涂层的显微组织研究[J]. 金属热处理, 2008, 33 (7): 50-52.
NIU Wei, SUN Rong-lu, LEI Yi-wen. Microstructure of laser clad Ti-based composite coating on Ti6Al4V alloy [J]. Heat Treatment of Metals, 2008, 33 (7): 50-52.
- [4] 郝珊, 李国忠, 王福明, 等. T91 耐热钢析出物的热力学计算和平衡相分析[J]. 特殊钢, 2008, 29 (3): 16-18.
HAO Shan, LI Guo-zhong, WANG Fu-ming, et al. Thermodynamic calculation and analysis on precipitated phases in heat-resistant steel T91 [J]. Special Steel, 2008, 29 (3): 16-18.
- [5] LI D, LIU L G, ZHANG Y K, et al. Phase diagram calculation of high chromium cast irons and influence of its chemical composition [J]. Materials and Design, 2009, 30 (2): 340-345.
- [6] 路妍, 王军华, 苏杰, 等. 30Cr3Si2MnNiNb 钢中未溶相的热力学计算及分析[J]. 材料工程, 2011, (9): 1-5.
LU Yan, WANG Jun-hua, SU Jie, et al. Thermodynamic calculation and experimental analysis on undissolved phases of 30Cr3Si2MnNiNb steel [J]. Journal of Materials Engineering, 2011, (9): 1-5.
- [7] 焦少阳, 朱冠妮, 董建新, 等. Hastelloy C-276 中碳化物析出及晶界贫 Mo 规律研究[J]. 材料工程, 2011, (1): 47-52.
JIAO Shao-yang, ZHU Guan-ni, DONG Jian-xin, et al. Carbide evolution and Mo depletion Law in Hastelloy C-276 [J]. Journal of Materials Engineering, 2011, (1): 47-52.
- [8] ANDERSSON J O, HELANDER T, HOGUND L, et al. Thermo-Calc & DICTRA, computational tools for materials sciences [J]. Calphad, 2002, 26 (2): 273-312.
- [9] SCHAFFERNAK B C, CERJAK H H. Design of improved heat resistant materials by use of computational thermodynamics [J]. Calphad, 2001, 25 (2): 241-251.
- [10] 崩春光, 彭志方. T/P91 钢在 450-1200℃ 区间各相元素的分配特征及相稳定性[J]. 金属学报, 2008, 44 (8): 897-900.
KUAI Chun-guang, PENG Zhi-fang. Elemental partitioning characteristics and stability of equilibrium phases during 450-1200℃ in T/P91 steel [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2008, 44 (8): 897-900.
- [11] 于鸿焱, 董建新, 谢锡善. 18Cr10NiNb 耐热钢析出相的热力学计算和平衡相分析[J]. 材料研究学报, 2010, 24 (5): 449-454.

- [6] 蹇海根,姜峰,李金龙,等. 大规格 B93 铝合金棒材的淬透性研究[J]. 航空材料学报,2011,31(2):18-23.
JIAN H G,JIANG F,LI J L,et al. Research on quench sensitivity of B93 aluminum alloy for large sized bars[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2011,31(2):18-23.
- [7] DENG Y L,WAN L,ZHANG Y,et al. Influence of Mg content on quench sensitivity of Al-Zn-Mg-Cu aluminum alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2011, 509(13): 4636-4642.
- [8] LIM S T,YUN S J,NAM S W. Improved quench sensitivity in modified aluminum alloy 7175 for thick forging applications [J]. Materials Science and Engineering, 2004,371(1/2):82-90.
- [9] SUZUKI H,KANNO M,SAITOH H. Different effects between Zr and Cr additions on recrystallization of hot-rolled Al-Zn-Mg-Cu alloys [J]. Journal of Japan Institute of Light Metals,1986,36(1):22-28.
- [10] POGANITSCH R,JEQLITSCH F,RATZI R. Cold working, recovery, and recrystallization of the alloy AlZnMgCu [J]. Zeitschrift für Metallkunde,1984,75(4):249-262.
- [11] ADACHI H, OSAMURA K, TANAHASHI T. Effect of Zr addition on microstructure of hot extruded P/M Al-Zn-Mg-Cu alloys[J]. Journal of Japan Institute of Light Metals,2005, 55(4):164-168.
- [12] ITO K,NAKASHIMA N. Effect of fine Zr-compound on the formation of structure of solution annealed Al-Zn-Mg-Cu alloys [J]. Journal of Japan Institute of Light Metals,1985, 35(3): 147-153.
- [13] HOLL H A. Investigations into the possibility of reducing quench sensitivity in high strength Al-Zn-Mg-Cu alloys [J]. Journal of the Institute of Metals, 1969,97:200-205.
- [14] DUMONT D,DESCHAMPS A. Characterization of precipitation microstructures in aluminum alloys 7040 and 7050 and their relationship to mechanical behavior[J]. Materials Science and Technology,2004,20(5):567-576.
- [15] 陈送义,陈康华,彭国胜,等. 热变形温度和淬火速率对 7085 铝合金组织和性能的影响[J]. 中国有色金属学报,2012,22(4): 1033-1038.
CHEN S Y,CHEN K H,PENG G S, et al. Effect of hot deformation temperature and quench rate on microstructure and

- property of 7085 aluminum alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012,22(4):1033-1038.
- [16] 王东,马宗义. 轧制工艺对 7050 铝合金显微组织和力学性能的影响[J]. 金属学报,2008,44(1):49-54.
WANG D,MA Z Y. Effects of rolling process on microstructure and mechanical property of 7050 aluminum alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2008, 44(1):49-54.
- [17] 韩念梅,张新明,刘胜胆,等. 固溶处理对 7050 铝合金强度和断裂韧性的影响[J]. 中南大学学报:自然科学,2012,43(3):855-863.
HAN N M,ZHANG X M, LIU S D,et al. Influence of solution heat treatment on strength and fracture toughness of aluminum alloy 7050[J]. Journal of Central South University:Science and Technology, 2012,43(3):855-863.
- [18] 周年润,陈康华,方华婵. 复合添加 Zr,Cr 和 La 对再结晶温度的提高作用[J]. 2008,13(4):208-213.
ZHOU N R,CHEN K H,FANG H C. Effect of combined addition of Zr,Cr and La on improving recrystallization temperature of aluminum[J]. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy, 2008,13(4):208-213.
- [19] HUMPHREYS F J,HATHERLY M. Recrystallization and related annealing phenomena [M]. Oxford: Pergamon Press, 2000.
- [20] BUHA J,LUMLEY R N,CROSKY A G. Secondary aging in an aluminum alloy 7050[J]. Materials Science and Engineering A, 2008,492(1/2):1-10.
- [21] 谢优华,杨守杰,戴圣龙,等. 锆元素在铝合金中的应用[J]. 航空材料学报,2002,22(4):56-61.
XIE Y H, YANG S J,DAI S L, et al. Application of element Zr in aluminum alloys[J]. Journal of Aeronautical Materials,2002, 22(4):56-61.

基金项目:国家 973 重点基础研究发展计划资助项目(2012CB619500)

收稿日期:2013-05-01;修订日期:2013-07-20

作者简介:张新明(1946—),男,教授,博士生导师,研究方向:有色金属材料加工工程研究,联系地址:湖南省长沙市中南大学材料科学与工程学院(410083),E-mail: xmzhang_cn@yahoo. cn

(上接第 40 页)

- YU Hong-yao, DONG Jian-xin, XIE Xi-shan. Thermodynamic calculation and analysis on precipitated phases in 18Cr10NiNb heat-resistant steel [J]. Chinese Journal of Materials Research, 2010, 24(5): 449-454.
- [12] LEI Y W, SUN R L, LEI J B, et al. A new theoretical model for high power laser clad TiC/NiCrBSiC composite coatings on Ti6Al4V alloys [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2010, 48(9): 899-905.
- [13] SUN R L, YANG D Z, GUO L X, et al. Microstructure and wear resistance of NiCrBSi laser clad layer on titanium alloy sub-

strate [J]. Surface and Coatings Technology, 2000, 132(2-3): 251-255.

基金项目:天津市应用基础及前沿技术研究计划(11JCZDJC21400);国家自然科学基金资助项目(51371125)

收稿日期:2012-04-23;修订日期:2013-05-20

作者简介:雷贻文(1976—),男,副教授,博士,主要从事激光材料加工方面的研究,联系地址:天津市西青区宾水西道 399 号天津工业大学机械工程学院(300387),E-mail:leiyiwen@163. com