

高熔点金属电弧喷涂制模涂层缺陷产生机理及控制*

Generation Mechanism and Control of Coating Defect of High Melting Point Metal Arc Spray Tooling

西安交通大学快速制造国家工程研究中心 仲成 何仲赞 魏润强 池金春 刘彬

[摘要] 在利用高熔点金属电弧喷涂技术制作快速模具的过程中,经常产生裂纹,分层剥离和胀起等缺陷,导致涂层缺陷的重要原因是涂层内残余应力。缺陷常发生在涂层最薄弱的位置。改变喷涂工艺,使涂层厚度尽量均匀,增加工艺补充,减少结构的应力集中,可以有效地减少或消除缺陷。

关键词: 高熔点金属涂层 缺陷 残余应力 应力集中

[ABSTRACT] In the forming process of high melting point metal arc spray tooling, defects usually appear, such as cracking, warping and swelling. Residual stress in high melting point metal coating is an important reason for coating defects. The position that easily produces defects is the weak part. Optimizing spraying process, adding binder surface or reducing stress concentration could effectively reduce and eliminate coating defects.

Keywords: High melting point metal coating Defect Residual stress Stress concentration

电弧喷涂快速制模技术是近 10 年来发展较快的一种新型制模技术。近年来,国内外相继开展了一些用电弧喷涂方法制造钢基模具的相关研究工作。用电弧喷涂方法制造钢基模具,首先要在母模基体上喷涂低熔点合金形成打底层,再在打底层上继续喷涂高熔点金属,去除掉低熔点合金打底层,得顶峰到高熔点金属模具。

用电弧喷涂方法制造钢基模具的过程中,经常出现一些缺陷,严重的时候会影响到模具的使用性能,而失效分析的目的就是从外部和内部因素 2 方面分析产生缺陷的原因,以便采取有效的预防和补救措施。常见的缺陷有分层剥离、裂纹、胀起和胀裂^[1](见图 1)。

这些缺陷的产生是由喷涂过程中残余应力

的存在引起的,而涂层通过分层剥离、裂纹和胀裂等方式来释放残余应力^[2]。目前对涂层的分层剥离和胀裂的研究比较多,分层剥离和胀裂跟涂层与基体的结合强度有直接的关系。影响喷涂层和基体结合强度的因素有很多,如压缩空气的压力、被喷涂工件表面预处理程度、喷枪喷嘴相对工件的距离和喷枪电极电弧上的电压等^[3]。本课题着重考虑裂纹产生的原因及其相貌特征,分析影响裂纹产生的因素,利用 ANSYS 有限元分析软件模拟分析缺陷产生的部位以及减少缺陷的方法,最后提出减少和消除涂层缺陷的参考方法。

1 高熔点金属电弧喷涂涂层缺陷产生机理

1.1 残余应力产生的原因

现有理论模型大都将残余内应力分为 4 种:骤冷应力、冷却应力、相变应力以及喷射冲击应力^[4-5]。骤冷应力是在喷涂粒子沉积到基体表面或者上一层已沉积的涂层上时,快速由高温降到与基体大致相同的温度,形成骤冷残余应力;冷却应力是在喷涂结束后,整个涂层温度降到室温的过程,由于涂层与基体热膨胀系数不匹

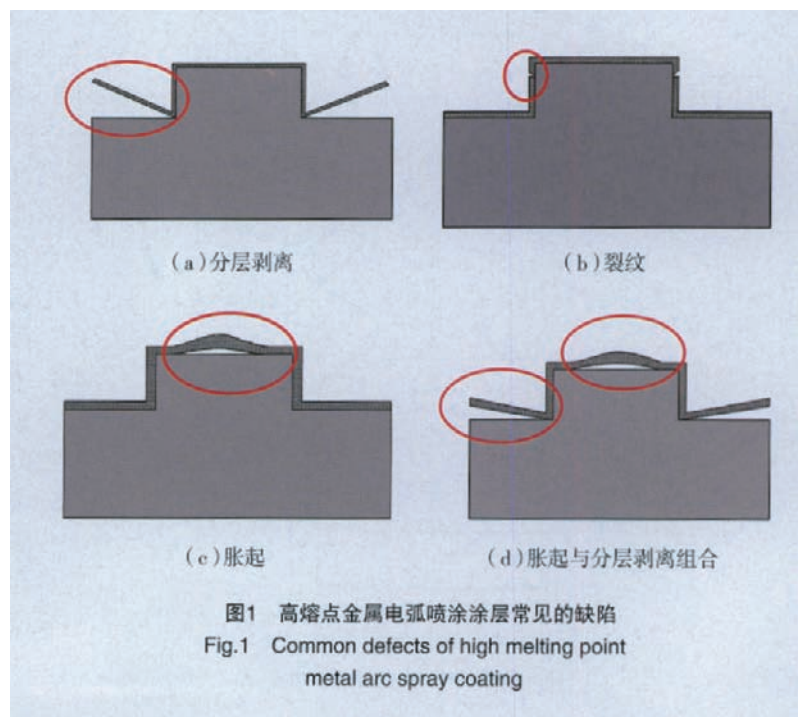


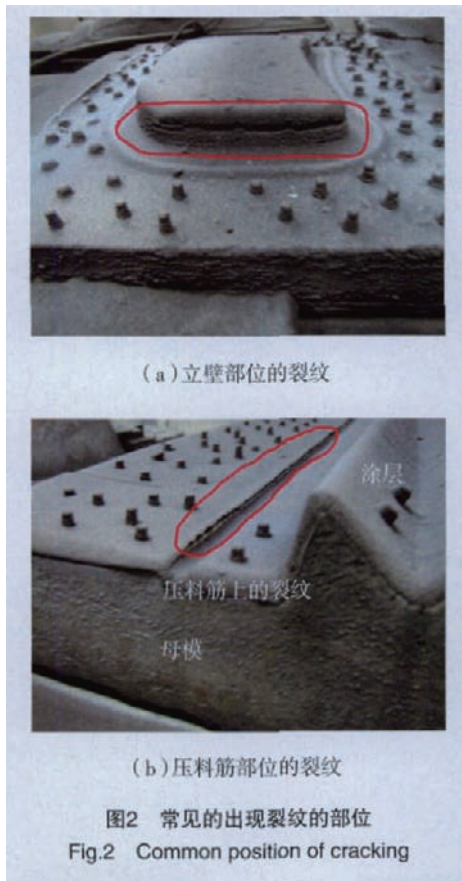
图1 高熔点金属电弧喷涂涂层常见的缺陷
Fig.1 Common defects of high melting point metal arc spray coating

* “十一五”国家科技支撑计划重点课题 (2006BAF04B14)。

配产生的应力;相变应力是雾化的粒子在凝固的过程中发生相变,则产生相变应力。如果在喷涂过程中,粒子在撞击涂层之前就已经凝固,发生了相变,粒子在飞行过程中体积变化不受阻碍,不会产生相变应力。本文着重模拟分析骤冷应力和冷却应力。

1.2 常见缺陷的形态和特征

常见的出现裂纹的地方有 90° 或者接近 90° 的立壁中部,压料筋与平面的结合部分(见图2)。



立壁上的裂纹大都呈直线,且与侧壁和平面的交线平行,最初几层是在立壁上产生粒子与粒子没有结合的几何不连续状态,再喷涂几层后就发展成为裂纹,并急剧扩展,导致立壁上的裂纹产生;压料筋部位的裂纹一般是沿着压料筋的走向,由最初的几何不连续发展成为裂纹。

常见的出现分层剥离的部位为立壁下面的压料面,常见的出现胀起的位置在立壁中间的型面,通常分层剥离和鼓包胀起会同时发生。

1.3 喷涂立壁和压料筋时喷枪移动轨迹

喷涂装备为西安交通大学先进制造研究所研制的ART-3500型金属电弧喷涂机器人。

该机器人在联动运动过程中摆动轴最大的摆动角度为 45° ,即摆动轴摆动使喷嘴中心线与立壁的最

夹角为 45° ,而且喷枪的摆动有一定的响应时间,导致立壁的顶部和底部沉积的粒子较多,而立壁中部沉积的粒子很少。对于小特征的喷涂,比如压料筋,现有的喷涂策略是忽略小特征,这就导致了在喷涂压料筋时,筋的谷底部分沉积了较多的粒子,而在筋与压料面结合的部分沉积的粒子较少。这是由喷涂的轨迹和设备的局限性导致的单层厚度不均匀,几何不连续。

1.4 缺陷产生的原因分析

产生缺陷的根本原因在于喷涂过程中残余应力的产生,而涂层通过分层剥离、裂纹和胀裂等方式来释放残余应力。在喷涂立壁或者压料筋时,因为单层的厚度不均匀和积累的几何不连续,则在立壁的中部和压料筋与压料面的结合部位,产生应力集中,则导致在这些部位产生裂纹,释放残余应力。

在喷涂过程中,涂层内应力如果大于涂层的抗拉强度时,就导致零件开裂;涂层剪切应力如果大于涂层与基体的结合强度,就会导致分层剥离或者胀起。

1.4.1 不锈钢骤冷应力近似计算

已知材料膨胀系数 $\alpha=15 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$,弹性模量 $E=200\text{GPa}$,泊松比 $\nu=0.27$;骤冷加热温度 $T_1=400^\circ\text{C}$,冷却后温度 $T_2=100^\circ\text{C}$ 。当零件快速冷却时,由热胀到冷缩状态的应力 δ 为:

$$\delta = \frac{\alpha E}{1 - \nu} (T_1 - T_2) = 1233\text{MPa}。$$

已知 3Cr13 不锈钢的抗拉强度 $\delta_B=500\sim 600\text{MPa}$,屈服强度 $\delta_s=48\text{MPa}$ 。则骤冷时的冷却应力 δ 大于抗拉强度 δ_B ,则会导致在薄弱的地方产生裂纹或者翘曲来释放应力。

1.4.2 不锈钢冷却应力近似计算

喷涂完成之后,涂层和基体温度 $T_1=100^\circ\text{C}$,冷却到室温后温度 $T_2=25^\circ\text{C}$ 。则这个过程中产生的应力 δ 为

$$\delta = \frac{\alpha E}{1 - \nu} (T_1 - T_2) = 308\text{MPa}。$$

则喷涂结束后冷却应力 δ 小于屈服强度 δ_s ,则理论计算这个过程不会产生变形和缺陷,但是材料内部还残留有残余应力,需要经过时效或者其他处理来释放应力。

2 ANSYS 模拟缺陷产生部位以及优化参数和轨迹的结果

本课题对立壁位置的涂层进行分析,每个位置都有 3 种不同的涂层结构,对比每种结构最大的应力的

建立的涂层模型为喷涂 10 层之后的涂层模型。首先进行热分析,利用瞬态热分析求得涂层温度随时间的变化规律,找到温度梯度最大的时刻,再进行结构分析,将刚才求得的该时刻的热分析数据加载到模型上,添加适当的约束,进行求解,最后查看 Mises 等效应力分布(Von Mises stress)。

2.1 基本假设条件

假设涂层与基体的结合强度比较大,而且不考虑相变应力和喷射冲击应力,只考虑骤冷应力和冷却应力。在喷涂过程中,基体温度基本保持一定,假设喷涂过程中母模基体不发生变形,只在冷却的过程中发生变形。假设冷却时涂层与基体良好的结合。

2.2 模型的建立

将要成型的零件分为立壁部分和压料筋部分单独进行分析。由以前的试验测得使用该设备,喷涂一层沉

积的涂层的厚度为 0.2mm,若涂层厚度均匀,喷涂 10 层的厚度应为 2mm。热分析时采用 PLANE 55 单元网格划分,结构分析时将热分析单元转化为相应的 PLANE 42 单元进行网格划分。因为热分析和结构分析对单元精度的要求不一样,所以在热分析之后进行结构分析还要重新划分网格。

图 3 为喷涂立壁时的 3 种不同涂层结构,图 3 (a) 为厚度均匀的涂层的模型,图 3 (b) 为按现在的喷涂轨迹直接喷涂出来的涂层的近似模型的右侧立壁部分,在立壁部分有一块粒子沉积得比较少的部分,图 3 (c) 为厚度均匀时涂层右侧立壁部分,图 3 (d) 为人为在立壁上多沉积粒子后涂层右侧立壁部分。为了方便,在下文中,分布将这 3 种结构称为结构 A、结构 B 和结构 C。

2.3 材料属性基本参数

该模型中 3Cr13 不锈钢和菱镁水泥的基本参数如表 1 所示。

2.4 分析过程

分析骤冷应力时,基体温度为 100°,分析涂层从 400° 降到 100° 的过程;分析冷却应力时,涂层和基体一起从 100° 降到室温(假设为 25°)。首先进行热分析,利用瞬态热分析求得涂层温度随时间的变化规律,找到温度梯度最大的时刻,再进行结构分析,将刚才求得的该时刻的热分析数据加载到模型上,添加适当的约束,进行求解。

2.5 模拟结果及分析

2.5.1 立壁骤冷过程分析

图 4 给出了 3 种涂层结构的温度梯度和内应力分布图。由图可知,最大温度梯度依次为 541 016、184 618 和 171 205,最大内应力依次为 2 000MPa、

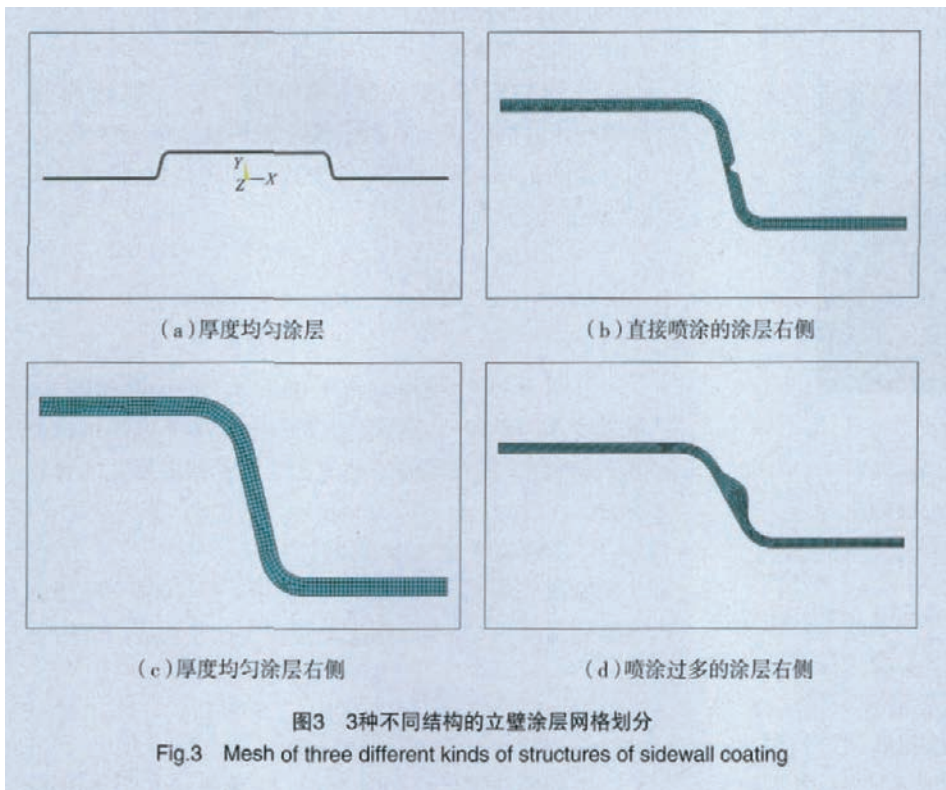


图3 3种不同结构的立壁涂层网格划分
Fig.3 Mesh of three different kinds of structures of sidewall coating

表1 3Cr13不锈钢和菱镁水泥的基本参数

材料	密度/(kg·m ⁻³)	弹性模量/Pa	泊松比	膨胀系数/10 ⁻⁶ °C ⁻¹	比热/J·(kg·K) ⁻¹	导热系数/W·(m·K) ⁻¹			
						0°C	100°C	200°C	400°C
3Cr13 不锈钢	7 740	2×10 ¹¹	0.27	15	460	26.5	27	27	27.6
菱镁水泥	2100	1.4×10 ¹⁰	0.16	7	850	8.7	8.9	8.93	9

1 180MPa 和 1 250MPa,在骤冷时,立壁处涂层厚度均匀比不均匀产生的内应力大幅度降低,结构 A 的最大的内应力出现在沉积粒子少的位置,在该处极易产生裂纹,结构 B 和结构 C 的最大应力都出现在拐角处,那是应力集中的位置,可以从母模结构上来优化减少应力集中。结构 C 的内应力最大值大于了结构 B,这是因为形成涂层结构 C 的过程,是在立壁位置多喷涂若干次,使沉积的粒子增多,然而粒子增多导致积累的热应力增加,所以表现出来的内应力反而增大。结构 B 模拟的最大应力为 1 250MPa,与计算值 1 233MPa 相近,说明模拟结果有一定的准确性和可信度。在压料面和型面位置,3 种结构的内应力大小比较接近,近似为 870MPa。如果涂层与基体结合强度大于剪切应力,则因为此值大于材料的抗拉强度,则很可能导致在平面上的一些应力集中的位置产生拉裂缺陷,如果结合强度小于剪切应力,则会导致产生分层剥离或者胀起缺陷。

图 5 给出了 3 种涂层结构的 3 条路径和沿路径的

内应力变化曲线图。由图中可以看出,3 个图的拐角处的应力大小数值近似相等,而在结构 B 中最大的应力就出现在拐角的地方,所以结构 B 相对合理,而且如果采取措施减少拐角处的应力集中,最大的内应力还会减小。

2.5.2 立壁冷却过程分析

对涂层厚度均匀的立壁冷却过程进行有限元分析。图 6 为该过程的温度梯度分布和内应力分布,以及在路径上的应力分布。从图中可以看出,相对骤冷过程,冷却过程温度梯度值很小,最大的应力值为 402MPa,大于计算值 308MPa,小于不锈钢的屈服强度 480MPa,说明在冷却过程中不会产生塑性变形,但是涂层内还会残留有残余应力,可以通过其他方式来释放应力。最大的应力也是出现在拐角的位置,可以通过修改结构减小应力集中,从而减小内应力。

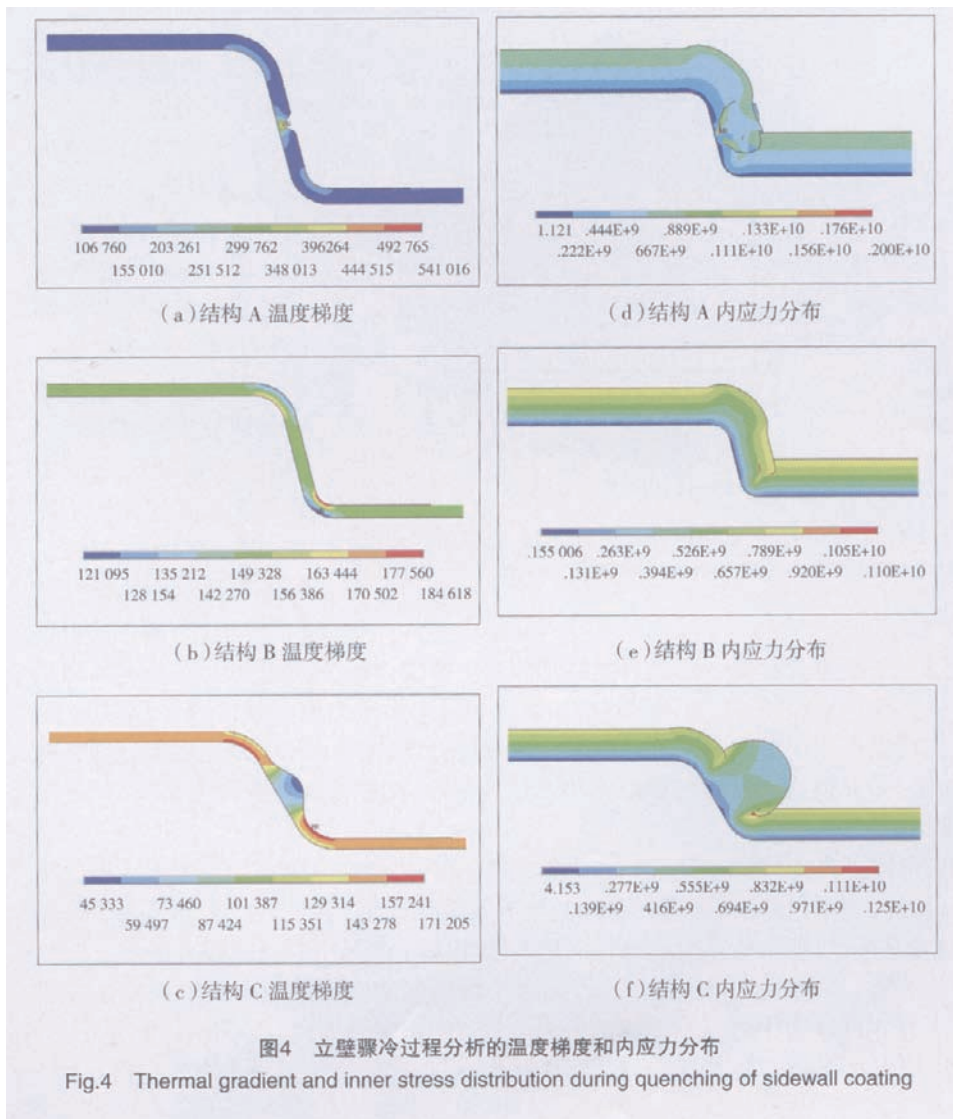
3 减少和消除高熔点金属电弧喷涂涂层缺陷的方法

由第二部分的分析和数据可以看出,涂层厚度的均匀性对涂层的应力分布有很重要的影响,喷涂过程中应该尽量使涂层厚度均匀。当涂层厚度均匀后,对大的应力和平均应力也都还很大,大于涂层材料的抗拉强度和屈服强度,这就导致了应力始终要在涂层最薄弱的地方反释放。以下是作者提出的减少和消除高熔点金属电弧喷涂涂层缺陷的方法。

(1) 优化喷涂工艺,使厚度尽量均匀。为了使厚度均匀,则应该优化喷枪的移动轨迹;在喷涂粒子沉积少的位置,进行预喷涂或者多次喷涂;在粒子沉积较多的位置,则应该采用间歇喷涂的方式,或者在喷涂到该位置时,控制喷枪减少喷涂金属粒子;采用交叉喷涂的方式等。

(2) 合理修改母模结构,减少容易产生应力集中的结构。

(3) 人为的制造或者添加喷涂工艺补充部分,使该部分



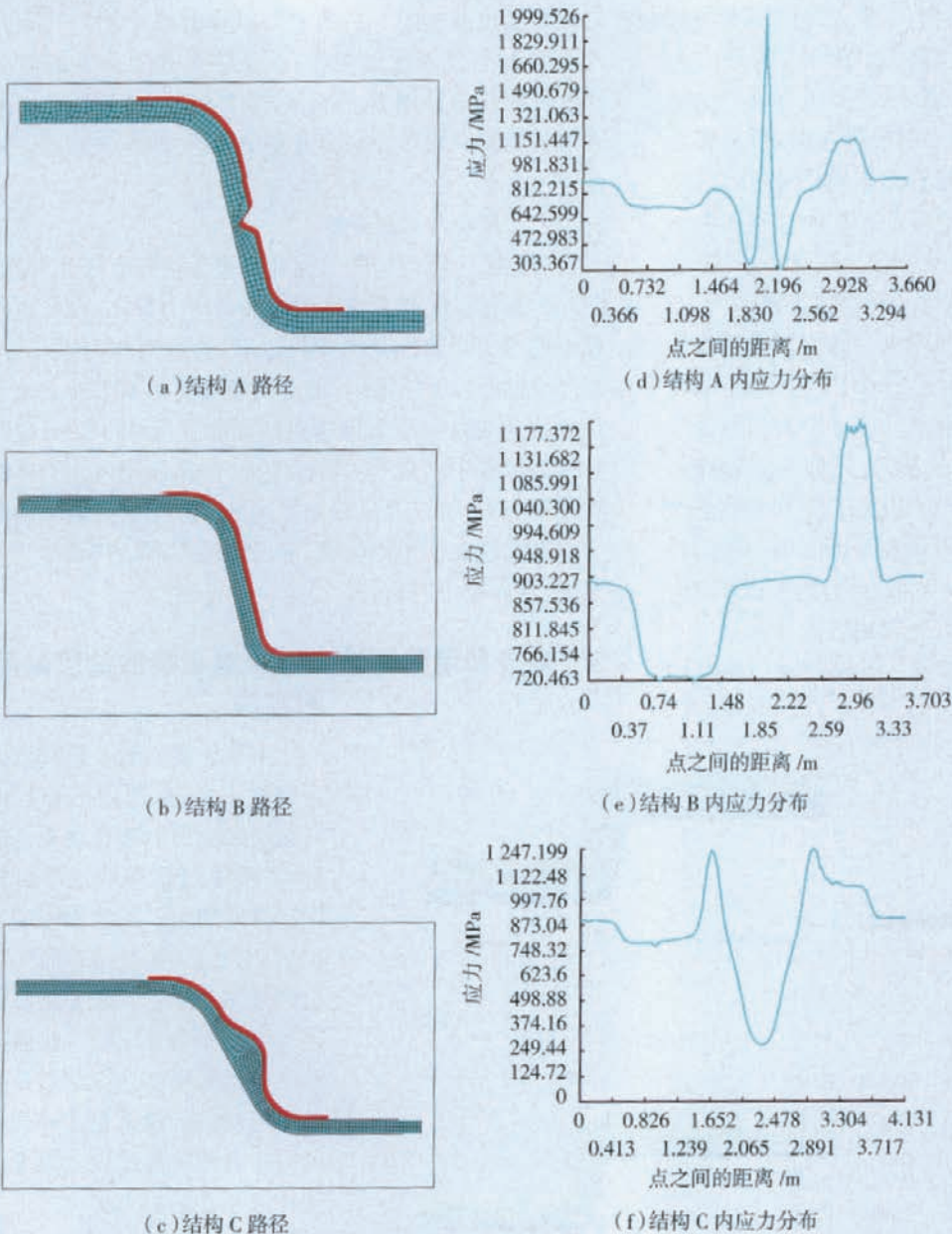


图5 立壁骤冷过程分析的沿路径内应力分布图
Fig.5 Inner stress distribution on path during quenching of sidewall coating

求。

4 结论

本课题针对利用高熔点金属电弧喷涂技术制造高熔点金属模具,分析了涂层缺陷产生的机理,提出了减少和消除高熔点金属电弧喷涂涂层缺陷的方法。

(1)分析了涂层缺陷产生机理,导致缺陷产生的根本原因是在喷涂过程中产生了残余应力,而涂层通过分层剥离、裂纹和胀裂等方式来释放残余应力。在喷涂过程中产生的残余应力类型有骤冷应力、冷却应力、相变应力以及喷射冲击应力。

(2)通过骤冷过程以及冷却过程的内应力近似计算,以及利用ANSYS有限元分析软件模拟缺陷涂层骤冷和冷却过程,以及优化涂层结构后的结果,得到在喷涂立壁或者压料筋时,因为单层的厚度不均匀和积累的几何不连续,在立壁的中部和压料筋与压料面的结合部位,产生应力集中,则导致

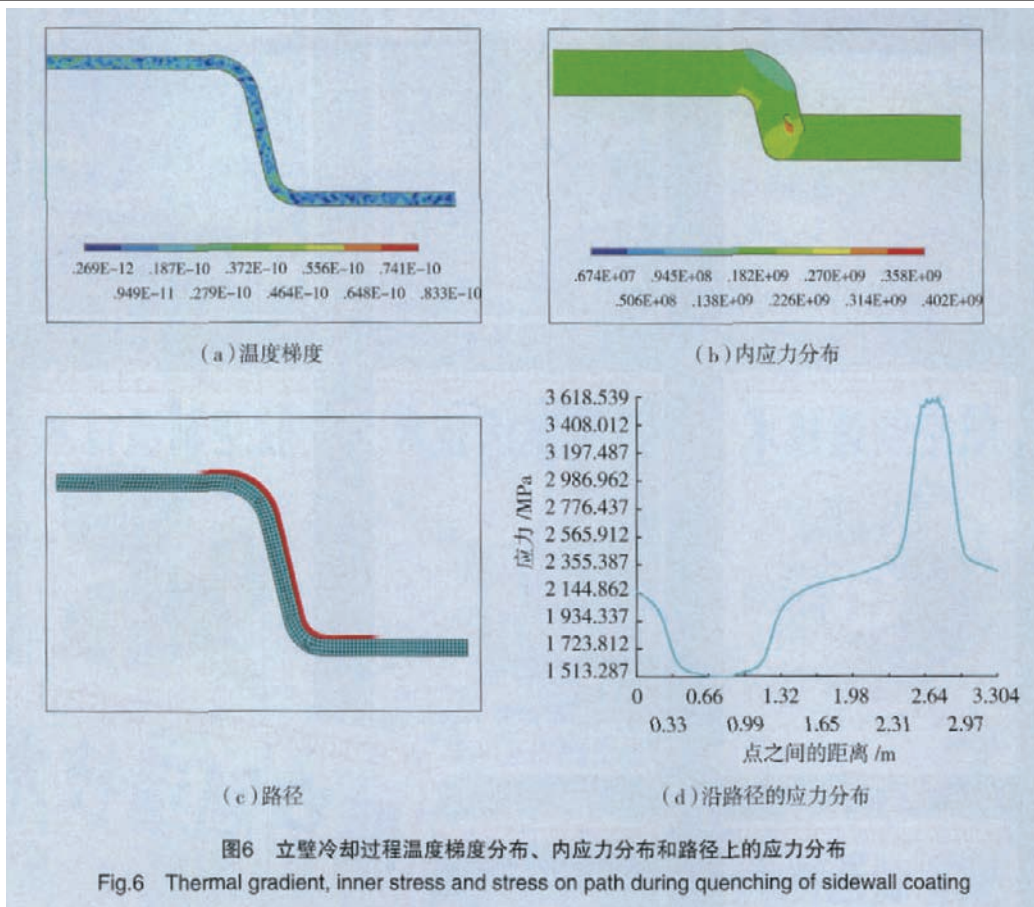
喷涂涂层最薄弱,则可以诱导涂层在工艺补充部分释放应力,减少在工作面上积累的应力。

(4)对于要求不是特别高的情况,可以在涂层出现裂纹后,在裂纹部分来回间歇性的喷涂,如果裂纹比较小,可以将裂纹补好(填充裂纹),数控加工之后也可以达到要求。如果型壳在立壁外面的压料面上产生分层剥离而翘曲,翘曲的最大位移在3mm以内,则可以适当地在型壳的中部没有发生翘曲的位置单独喷涂,喷涂的层数为厚度刚好达到翘曲的最大位移为宜。例如最大位移为3mm,则可以在中部喷涂15层,使中部厚度比翘曲位置大3mm,通过数控加工也能达到模具型壳的要

致在这些部位产生裂纹,释放残余应力。在压料面和型面部位,如果剪切应力大于涂层与基体的结合强度,则在压料面出现分层剥离,在型面出现鼓包胀起。如果剪切应力小于结合强度,则在薄弱位置产生裂纹,释放应力。

(3)在喷涂过程中,涂层内应力如果大于涂层的抗拉强度时,就导致零件开裂;涂层内应力如果大于涂层与基体的结合强度,就会导致分层剥离或者胀起。

(4)提出了减少和消除高熔点金属电弧喷涂涂层缺陷的参考方法:优化喷涂工艺,使厚度尽量均匀;合理修改母模结构,减少容易产生应力集中的结构;添加



喷涂工艺补充部分,诱导涂层在工艺补充部分释放应力。

参考文献

[1] 罗瑞强,章桥新.热喷涂涂层中应力研究与分析[D].武汉:武汉理工大学机械电子工程,2008.

[2] 伍超群,周克崧,刘敏,等.铜基体上超音速火焰喷涂镍基涂层残余应力分析.金属热处理,2006,35(19):35-38.

[3] 韩雪峰,朱张校,王昆林,等.提高电弧喷涂层与基体结合强度的新工艺.SURFACE TECHNOLOGY,2001,30(5):24-25.

[4] 文赫岩,肖念新.喷涂的残余应力分析.煤矿机械,2005,6:47-48.

[5] 王忠诚.热处理常见缺陷分析与对策.北京:化学工业出版社,2007,9:6-8.

(责编 岩石)

(上接第93页)

根据以往加工GH4169材料涡轮盘的加工经验,同时考虑到粉末材料的难加工性,开始时采用了1.5~2 m/min的拉削速度,但发现拉刀磨损严重,每拉削7个槽就需要卸下拉刀进行重新刃磨,经多次拉削试验,最后将拉削速度调整为粗拉1m/min;精拉1~1.5m/min,取得了良好的拉削效果。

4.6 拉削中出现的问题及改进方案

通过拉削过程中刀具的磨损情况和投影检查结果发现影响拉削质量和拉刀耐用度的主要因素有:

(1) 拉削速度。在数控高速侧拉床上拉削,使用常规拉削GH4169材料的拉削速度2m/min,明显发现拉刀磨损严重,榫槽表面粗糙度不好,经多次试拉将拉削速度调整为粗拉1m/min,精拉1.5m/min,取得了良好的拉削效果。

(2) 投影检查小试件发现,榫槽轮廓转接不圆滑,槽型局部有突起,经研究确定了拉刀的修磨方案,对粗拉槽底拉刀进行了结构和拉削方式的改进,将原侧面拉削改为顶齿拉削,同时将精拉齿型刀的齿距加大,避免了刀具的快速磨损,保证了榫槽轮廓形状完全符合放大图要求。

(3) 在试拉削过程中,通过检测发现轮盘辐板尺寸由于受到拉削力影响,辐板处向拉削方向产生了0.15mm左右的倾斜变形。通过对拉具结构方案进行改进,增加辅助支撑,有效地降低了拉削过程中的变形。

(4) 粗拉齿底槽拉刀齿升量偏大,造成拉刀刀齿崩刃,经重新进行拉削试验,改进了拉削方式,降低齿升量,保证了拉削质量。

(5) 拉刀材料ASP2060含碳量高,拉削中发现材料脆性大,易产生崩齿现象,刀具材料改为T15粉末高速钢后,拉刀寿命和耐用度提高。

5 结束语

先进的制造技术是航空发动机技术发展的基础,航空事业的发展依赖于材料、设计和加工技术的共同进步,粉末盘的研制与应用使我们的制造技术水平迈向了新的台阶。但就目前来说,我国在粉末盘制造技术领域与国外相比,存在较大的差距,特别是在机械加工方面,我们要快速开展切削技术研究工作,在消化吸收国际先进制造技术的基础上,结合新材料、新结构、新工艺不断应用的实际需要,开展工艺制造技术的创新和探索,开展针对性的技术合作,大力提升制造技术水平。

(责编 侧卫)